



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA

Lícia Regina Ramalho de Figueirêdo

**ESTUDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO
RIO POTENGI, NATAL/RN.**

Natal - RN
2007

Lícia Regina Ramalho de Figueirêdo

**ESTUDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO
RIO POTENGI, NATAL/RN.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientadora: Dr^a. Ada Cristina Scudelari

Co-Orientador: Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman

Natal - RN

2007

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Figueirêdo, Lícia Regina Ramalho.

Estudo da circulação hidrodinâmica do Estuário do Rio Potengi, Natal/RN/ Lícia Regina Ramalho de Figueirêdo – Natal, RN, 2007.
115 f.

Orientadora: Dra. Ada Cristina Scudelari

Co-Orientador: Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

1. Estuário – Modelagem Hidrodinâmica – Dissertação. 2. Variação batimétrica - Dissertação. 3. Estuário do Rio Potengi – Dissertação. I.Scudelari, Ada Cristina. II. Rosman, Paulo César Colonna. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 556.546(043.3)

LÍCIA REGINA RAMALHO DE FIGUEIRÊDO

**ESTUDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO
RIO POTENGI, NATAL/RN.**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da
Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
como requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Sanitária.

BANCA EXAMINADORA

Dr^a. Ada Cristina Scudelari – Orientadora – UFRN

PH. D. Paulo Cesar Colonna Rosman – Co-Orientador – COPPE/UFRJ

Dr. Antônio Marozzi Righetto – Examinador Interno - UFRN

Dr. Ronaldo Fernandes Diniz – Examinador Externo – CEFET/RN

Natal, 08 de Março de 2007.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me dá a vida, com todas as dificuldades e todas as superações.

Aos meus pais, Raimundo Nonato de Figueirêdo e Maria Valdi Ramalho de Figueirêdo (*in memorium*), pelo incentivo, sabedoria e dedicação depreendidas em todos os anos de minha vida.

Ao meu filho, Pedro Henrique, por todo o carinho, pela existência e pelo amor.

Ao meu irmão, Lailson Emanuel, por toda alegria e irmandade.

À Prof^a. Dr^a. Ada Cristina Scudelari, pela competente orientação, pela paciência, pela dedicação e confiança depositada.

Ao Prof. Phd. Paulo César Colonna Rosman, pela orientação, críticas e sugestões, além dos ensinamentos e palavras de força.

Aos demais professores, funcionários e colegas do PPgES, por todas as experiências, diversões, colaboração e suporte técnico recebidos.

À Sayonara Andrade de Medeiros, Cibele Gouveia Costa, Thaise Emmanuele de Andrade Sales, Joelson Kayto Barbosa Feitosa e Daniel Melo Martins de Góis, pela amizade e companheirismo.

À Angelina Guedes e Valéria Nunes de Oliveira, pelo suporte técnico recebido.

À Dr^a. Helenice Vital e Dr. José Wilson, pelas informações técnicas concedidas.

Aos meus familiares, pelo laço de fraternidade.

A CAPES, pela bolsa fornecida.

A todos que me ajudaram de forma que esta dissertação seja um meio de incentivo à pesquisa na área ambiental da modelagem computacional preditiva no

estado do Rio Grande do Norte, e que possa ser expandido para o nordeste, e posteriormente o Brasil.

Dedico este trabalho ao meu filho **Pedro Henrique**,
pela razão do meu viver.

Aos meus pais **Nonato** e **Valdi**,
e ao meu irmão **Lailson**.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	13
RESUMO.....	13
ABSTRACT	14
CAPÍTULO I	15
INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO II	20
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
2.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO	20
2.2. ASPECTOS FÍSICOS	21
2.2.1. Recursos Hídricos	21
2.2.2. Aspectos Climatológicos	24
2.2.3. Cobertura Vegetal	25
2.2.4. Geologia.....	26
2.2.5. Geomorfologia.....	28
2.2.6. Solos	30
2.2.7. Morfologia Estuarina	31
2.2.8. Histórico das Obras Portuárias.....	31
2.3. ASPECTOS SÓCIOS - ECONÔMICOS	33
MODELO HIDRODINÂMICO COMPUTACIONAL	39
3.1. O SisBAHIA	39
3.1.1. Módulo Hidrodinâmico.....	39
3.1.2. Atributos Considerados no SisBAHIA	40
3.2. RESUMO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MÓDULO 2DH DO MODELO HIDRODINÂMICO	41
3.2.1. Tensões de Atrito devido ao Vento	43
3.2.2. Tensões de Atrito no Fundo no Módulo 2DH	43
3.2.3 Tensões Turbulentas.....	44
3.3. ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	46
IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	48
4.1. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	48
4.2. DADOS NECESSÁRIOS À IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	49
4.2.1. Definição do Domínio	49
4.2.2. Discretização Espacial – Malha de Elementos Finitos	50
4.2.3. Parâmetros Ambientais	51
4.2.3.1. Batimetria	51
4.2.3.2. Tipo de Fundo e Rugosidade Equivalente	53
4.2.3.3. Marés.....	54
4.2.3.4. Vazões dos Rios Afluentes	57
4.2.3.5. Ventos	57
4.2.3.6. Massa Específica da Água e do Ar	59

4.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	59
4.4. CONDIÇÕES INICIAIS	60
ESTUDO DA VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR	61
5.1. ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR	62
5.2. COMPARAÇÃO DE VALORES SELECIONADOS	74
CAPÍTULO VI.....	77
ESTUDO DO PADRÃO DE CORRENTES.....	77
6.1. MEIA MARÉ ENCHENTE.....	80
6.1.1. <i>Meia Maré Enchente - Batimetria 1981.....</i>	81
<i>São representados os resultados hidrodinâmicos da meia maré enchente para a batimetria 1981.</i>	81
6.1.2. <i>Meia Maré Enchente - Batimetria 2004.....</i>	82
<i>São representados os resultados hidrodinâmicos da meia maré enchente para a batimetria 2004.</i>	82
6.2. PREAMAR	83
6.2.1. <i>Preamar – Batimetria 1981</i>	83
<i>São representados os resultados hidrodinâmicos da preamar para a batimetria 2004.</i>	83
6.2.2. <i>Preamar – Batimetria 2004</i>	84
<i>São representados os resultados hidrodinâmicos da preamar para a batimetria 2004.</i>	84
6.3. MEIA MARÉ VAZANTE	85
6.3.1. <i>Meia Maré Vazante – Batimetria 1981</i>	85
<i>São representados os resultados hidrodinâmicos da meia maré vazante para a batimetria 1981.</i>	85
6.3.2. <i>Meia Maré Vazante – Batimetria 2004</i>	87
<i>São representados os resultados hidrodinâmicos da meia maré vazante para a batimetria 2004.</i>	87
6.4. BAIXA- MAR	88
6.4.1 <i>Baixa-mar – Batimetria 1981.....</i>	88
<i>São representados os resultados hidrodinâmicos da baixa-mar para a batimetria 1981.</i>	88
6.4.2 <i>Baixa-mar – Batimetria 2004.....</i>	89
<i>São representados os resultados hidrodinâmicos da baixa-mar para a batimetria 2004.</i>	89
6.5. GRÁFICOS COMPARATIVOS.....	91
6.5.1 <i>Meia Maré Enchente</i>	91
6.5.2 <i>Preamar</i>	96
6.5.3 <i>Meia Maré Vazante</i>	100
6.5.4 <i>Baixa-Mar.....</i>	103
6.5.5 <i>Prisma de Maré.....</i>	103
CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Estuário do Rio Potengi (Google, 2006).....	20
Figura 2-2: Bacia Hidrográfica Potengi (SERHID, 2006).....	21
Figura 4-1: Carta Náutica nº. 802 - Porto de Natal.....	50
Figura 4-2: Malha de discretização do Estuário do Rio Potengi.....	51
Figura 4-3: Batimetria do domínio de modelagem do Estuário do Rio Potengi, como vista pelo modelo – Ano 1981.	52
Figura 4-4: Batimetria do domínio de modelagem do Estuário do Rio Potengi, como vista pelo modelo – Ano 2004.	53
Figura 4-5: Rugosidade de fundo utilizado pelo SisBAHIA	54
Figura 4-6: Curva de maré astronômica gerada a partir das constantes harmônicas, período de sizígia (SZG) e quadratura (QDT)	56
Figura 4-7: Período selecionado da curva de maré astronômica gerada a partir das constantes harmônicas. Os períodos de maré de sizígia (SZG) e de quadratura (QDT)	56
Figura 4-8: Intensidade dos ventos obtidos para a modelagem do Estuário do Rio Potengi.	58
Figura 4-9: Direção dos ventos obtidos para a modelagem do Estuário do Rio Potengi.	58
Figura 5-1: Localização das 10 estações nas quais foram registradas resultados em forma de series temporais de valores.....	62
Figura 5-2: Elevação do nível d'água nas estações de controle: 1-fronteira aberta, 2 Entrada no estuário, 5-Porto de Natal e 10-Montante do Rio Jundiaí, para o período de sizígia entre 58 h e 98 h de simulação, cenário 1.....	63
Figura 5-3: Resultados de elevação (m) para o instante de preamar: a) na estação 1 (219.600 s – primeira) e b) na estação	65
10(223.200 s – segunda), cenário 1.....	65
Figura 5-4: Resultados de elevação (m) para o instante de baixa-mar: a) na estação 1 (241.200s – primeira) e b)na estação 10(248.400 s – segunda), cenário 1.	66
Figura 5-5: Fatia LO traçada no domínio de modelagem do Estuário do Rio Potengi para análise de elevação.....	67
Figura 5-6: Elevação ao longo da linha LO traçada, partindo da fronteira aberta indo até a montante do Rio Jundiaí (O) , em instantes de preamar nas estações 1 e 10, cenário 1.....	68
Figura 5-7: Elevação ao longo da linha LO traçada, partindo da fronteira aberta indo até a montante do Rio Jundiaí (O) , em instantes de baixa-mar nas estações 1 e 10, cenário 1.....	68
Figura 5-8: Instantes de preamar e baixa-mar nas estações 1 (219.200 s e 241.200 s)	69
e estação 10 (223.200 s e 249.400 s), cenário 1.	69
Figura 5-9: Elevação no período de 13 horas compreendido entre os instantes 61 h e	69
74 h, nas estações 1 (fronteira aberta) e 10 (parte oeste do estuário),.....	69
cenário 1.	69
Figura 5-10: Resultados horários de elevação ao longo da linha LO no período de 14	70
horas (219.200 s até 266.400 s), cenário 1.....	70

Figura 5-11: Elevação do nível d'água nas estações de controle 1 (fronteira aberta), 2 71	71
(entrada no estuário), 5 (Porto de Natal) e 10 (montante do estuário) para o 71	71
período de sizígia entre 58 h e 98 h de simulação, cenário 2. 71	71
Figura 5-12 Elevação do nível d'água nas estações de controle 1 (fronteira aberta), 2 71	71
(entrada no estuário), 5 (Porto de Natal) e 10 (montante do estuário) para o 71	71
período de sizígia entre 58 h e 98 h de simulação, cenário 3 71	71
Figura 5-13: Resultados da simulação para a estação 1 (fronteira aberta), nos cenários 72	72
1-sem vento, 2- vento usual e 3- frente fria. 72	72
Figura 5-14: Resultados da simulação para a estação 2 (entrada do estuário), nos cenários 1-sem vento, 2- vento usual e 3- frente fria. 73	73
Figura 5-15: Resultados da simulação para a estação 5 (Porto de Natal), nos 73	73
cenários 1-sem vento, 2- vento usual e 3- frente fria. 73	73
Figura 5-16: Resultados da simulação para a estação 10 (Norte do estuário), nos .. 74	74
cenários 1-sem vento, 2- vento usual e 3- frente fria. 74	74
Figura 5-17: Variação da maré em dois pontos no estuário do Rio Potengi. Acima com batimetria de 1981 e abaixo com batimetria 2004, cenário 3. 75	75
Figura 5 -18: Séries temporais comparando magnitude de componentes de velocidade de correntes na estação 3_ (entrada do estuário) e 6_ (Riacho do Baldo). Nota-se forte aumento nas correntes em decorrente da desobstrução propiciada pelo aumento da batimetria. 76	76
Figura 6-1: Ciclo de Maré na sizígia e os instantes de tempo analisados no estudo ... dos padrões de correntes de maré. 79	79
Figura 6-3: Padrão de circulação referente a meia maré enchente na estação 1, 81	81
instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2. 81	81
Figura 6-4: Padrão de circulação referente a meia maré enchente na estação 1, instante 205.200 s, na superfície(A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2. 81	81
Figura 6-5: Padrão de circulação referente a meia maré enchente na estação 1, 82	82
instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2. 82	82
Figura 6-6: Padrão de circulação referente a meia maré enchente na estação 1, instante 205.200 s, 82	82
na superfície(A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2. 82	82
Figura 6-7: Padrão de circulação referente a preamar na estação 1, 83	83
instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2. 83	83
Figura 6-8: Padrão de circulação referente a preamar na estação 1, instante 205.200 s, na superfície (A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2. 84	84
Figura 6-9: Padrão de circulação referente a preamar na estação 1, instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2. 84	84
Figura 6-10: Padrão de circulação referente a preamar na estação 1, instante 205.200s, na 85	85
superfície(A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2. 85	85
Figura 6-11: Padrão de circulação referente a meia maré vazante na estação 1, instante 205.200 s, 86	86
valores promediados na vertical, cenário 2. 86	86

Figura 6-12: Padrão de circulação referente a meia maré vazante na estação 1, instante 205.200s	86
na superfície (A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.	86
Figura 6-13: Padrão de circulação referente a meia maré vazante na estação 1,	87
instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2.	87
Figura 6-14: Padrão de circulação referente a meia maré vazante na estação 1, instante	87
205.200s, na superfície (A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.....	87
Figura 6-15: Padrão de circulação referente a baixa-mar na estação 1, instante 205.200 s, valores	88
promediados na vertical, cenário 2.....	88
Figura 6-16: Padrão de circulação referente a baixa-mar na estação 1, instante 205.200s, na.....	89
superfície (A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.	89
Figura 6-17: Padrão de circulação referente a baixa-mar na estação 1, instante 205.200 s, valores	90
promediados na vertical, cenário 2.....	90
Figura 6-18: Padrão de circulação referente a baixa-mar na estação 1, instante 205.200s, na.....	90
superfície (A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.	90
Figura 6-19: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de meia maré enchente para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 1981.....	92
Figura 6-20: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de meia maré enchente para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.....	95
Figura 6-21: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de preamar para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 1981.	97
Figura 6-22: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de preamar para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.	99
Figura 6-23: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de meia maré vazante para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 1981.....	101
Figura 6-24: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de meia maré vazante para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.....	102
Figura 6-25: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de baixa-mar para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 1981.	104
Figura 6-26: Valores de velocidades ao longo da fatia LO no instante de baixa-mar para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Valores recomendados para a rugosidade equivalente de fundo, ε , para uso no módulo 2DH do modelo FIST3D. (Adaptado de Abbot e Basco, 1989).....	44
Tabela 4-2 – Constantes Harmônicas Ajustadas utilizadas.....	55
Tabela 4-3 - Vazões Médias.....	57
Tabela 5-1 – Número e localização das estações no domínio modelado.....	61

RESUMO

FIGUEIRÊDO, Lícia Regina Ramalho de: **Estudo da Circulação Hidrodinâmica do Estuário do Rio Potengi, Natal/RN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2007.

Nesta dissertação apresenta-se um estudo sobre a circulação hidrodinâmica 3D do estuário do Rio Potengi, Natal/RN, através de modelagem computacional. A utilização de modelo hidrodinâmico 3D permite conhecer a elevação do nível d'água e o padrão de correntes em diversas profundidades de interesse ao longo da coluna d'água. Os cenários de simulação propostos permitem analisar as variações causadas pela atuação de ventos no comportamento hidrodinâmico. Para isto, a circulação hidrodinâmica do estuário do Rio Potengi - Natal/RN foi analisada em toda a distância do domínio modelado, para as batimetrias de 1981 e 2004. Na análise comparativa desses dados batimétricos, podem se identificar as principais diferenças na circulação hidrodinâmica no estuário entre os períodos, devido às alterações naturais e alterações antropogênicas. Verificou-se que não há influência significativa dos ventos na circulação hidrodinâmica do estuário do Rio Potengi. Verificou-se também que para a magnitude da velocidade é inversamente proporcional a variação das batimetrias, i.e. locais onde a batimetria cresceu ao longo dos anos, devido a obras de dragagens, as velocidades foram menores. Já para a análise 3D, a magnitude da velocidade é inversamente proporcional ao longo da coluna d'água, quanto mais próximo à superfície maior é a magnitude da velocidade, i.e., a velocidade na superfície de coluna d'água é maior que a velocidade apresentada na 1ª camada acima do fundo. Os resultados obtidos do modelo hidrodinâmico poderão ser utilizados como base para futuros estudos de transporte de contaminantes. A ferramenta utilizada para o estudo foi o SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), sistema de modelos nacional elaborado na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica do COPPE/UFRJ.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Hidrodinâmica, Variação Batimétrica. Estuário do Rio Potengi.

ABSTRACT

FIGUEIRÊDO, Lícia Regina Ramalho de: **Study of the Circulation Hydrodynamics of the Estuary of Rio Potengi, Natal/RN**. Dissertation. (Master in Sanitary Engineering). Rio Grande do Norte Federal University. Natal/RN, 2007.

In this dissertation a study is presented on the circulation hydrodynamics 3D of the estuary of Rio Potengi, Natal/RN, through computational modeling. The use of hydrodynamic model 3D allows to know the rise of the water level and the chain standard in diverse depths of interest throughout the water column. The considered scenes of simulation allow to analyze the variations caused for the performance of winds in the hydrodynamic behavior. For this, the circulation hydrodynamics of the estuary of Rio Potengi, Natal/RN was analyzed in all in the distance of the shaped domain, for the bathymetries of 1981 and 2004. In the comparative analysis of these batimétricos data, they can identify to the main differences in the circulation hydrodynamics in the estuary between the periods, had to the natural alterations and alterations for the man. It verified that it does not have significant influence of the winds in the hydrodynamic circulation of the estuary of Rio Potengi. i.e was also verified that for the magnitude of the speed the variation of the bathymetries is inversely proportional, local where the bathymetry grew throughout the years, due the workmanships of drags, the speeds had been lesser. Already for the analysis 3D, the magnitude of the speed is inversely proportional throughout the column of water, the more next to the surface biggest is the magnitude of the speed, i.e., the speed in the surface of water column is greater that the speed presented in 1^a layer above of the deep one. The gotten results of the hydrodynamic model could be used as base for future studies of transport of contaminants. The tool used for the study was the SisBAHIA (System Base of Ambient Hydrodynamics), national system of models elaborated in the Area of Coastal and Oceanographical Engineering of the Program of Oceanic Engineering of the COPPE/UFRJ.

KEY WORDS: Modeling Hydrodynamics, Batimétrica Variation. Estuary of Rio Potengi

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Estuário é uma bacia costeira semi-fechada onde a água do rio se mistura com água do mar. A importância dos estuários é resultado da grande produtividade biológica na coluna de água e nos sedimentos.

A característica principal das regiões costeiras e, particularmente dos estuários, é de concentrarem e desenvolverem sobre um espaço reduzido, entre o continente e o oceano, um grande número de atividades humanas que aí encontram condições muito favoráveis ao seu estabelecimento.

Essas atividades relacionadas com alimentação, transporte, urbanização, recreação e turismo, caracterizam estas regiões estuarinas como patrimônio cultural e econômico.

Por outro lado, os estuários são zonas naturais denotadas pela mistura e transferência de energia e material entre o meio fluvial e o marinho e, com isso, palco de fenômenos dinâmicos muito intensos, que lhe conferem uma alta complexidade ambiental.

As zonas costeiras estão sujeitas à influência de vários agentes dinâmicos como marés, ventos, vazões fluviais, etc. Estes agentes são responsáveis pela geração de correntes, justificando, portanto a dinâmica destes ambientes. As correntes determinam a movimentação dos sedimentos e das substâncias dissolvidas.

Dessa maneira, perturbações mesmo localizadas podem provocar a ruptura do equilíbrio natural, de maneira até desastrosa, sobre o ambiente e as atividades antrópicas que se encontram implantadas.

Exemplo de importância dos estuários como fator determinante urbano e econômico é o fato desses ambientes sediarem 7 (sete) das 10 (dez) maiores metrópoles do mundo, como Nova York, Tóquio Londres, Shangai, Buenos Aires, Osaka e Los Angeles. No Brasil, é encontrado um panorama semelhante, com os

estuários servindo como base para o desenvolvimento de alguns dos maiores centros populacionais.

O Estuário do Rio Potengi, no estado do Rio Grande do Norte e berço da sua capital, a cidade de Natal, enquadrando-se, perfeitamente, na histórica problemática que caracterizam esses ambientes.

As suas riquezas naturais associadas às facilidades oferecidas a navegação constituíram-se, no início, em fatores determinantes para o estabelecimento de sítios populacionais, com a atividade pesqueira e a produção de sal, ambas em caráter artesanal, destacando-se entre as atividades econômicas desenvolvidas, sem que fossem registradas maiores situações de conflito com a vocação ambiental da área.

Com o passar do tempo, no entanto, fatores como o crescimento populacional, a escassez de oportunidades de emprego e renda e a ausência de um planejamento urbano e ambiental adequado, foram decisivos para a implantação, na área do Estuário, de inúmeras atividades, de ordem bastante diversificada e de forma completamente desordenada, ocasionando, como consequência, uma série de conflitos e contribuindo, inevitavelmente, para a degradação ambiental da mesma.

O avanço da área urbanizada sobre as áreas a serem preservadas, traz como consequências a remoção da vegetação nativa e o assentamento de favelas, comprometendo, a produtividade nesses ambientes, e, como consequência, a própria sobrevivência das populações ribeirinhas, que têm no estuário a sua principal fonte de alimentação e renda.

O Estuário do Potengi figura como ponto final de lançamento de esgotos domésticos e industriais, sem tratamento prévio, pondo em risco a flora e fauna estuarina. Vale ressaltar o alto teor dessa poluição, que representa, em nível de esgotos domésticos, uma carga orgânica da ordem de 20.717 m^3 (de um volume total de $46.037 \text{ m}^3/\text{dia}$), e nos lançamentos industriais, com teores de alguns metais pesados (chumbo, níquel e zinco) acima do máximo permitido.

A ocupação humana nas margens de estuários gera águas residuais que causam problemas de degradação ambiental. Em zonas portuárias, as operações de dragagem e de deposição de dragados constituem, também, problema, em particular quando os sedimentos estão contaminados.

Além de problemas ambientais advindos do aumento da população concentrada nas proximidades do estuário, devido à necessidade de água como fonte de vida, atividades comerciais e industriais, há problemas ambientais gerados pela atividade portuária, que alteram a morfologia da região. Alguns desses problemas são: assoreamento estuarino, maior penetração da lâmina salina, elevação do nível d'água, inundação das margens, problemas com drenagem da cidade, aumento da velocidade das correntes, erosão das margens, inutilização das obras artificiais, autodragagem, problemas para a navegação, destruição da flora e fauna, repercussões negativas para a pesca, aumento da turbidez, queda da produtividade, ressuspensão dos poluentes e geração de áreas críticas de erosão e deposição.

A análise qualitativa do impacto mostra que o crescimento desordenado do sítio urbano de Natal, localizado às margens do Estuário Potengi, tem tornado esta região palco de um estado de acentuada devastação. Atualmente observam-se neste estuário as seguintes condições: lançamento de despejos urbanos e industriais "in natura", produção pesqueira declinante, grandes extensões de mangues devastados devido à atividade da carcinicultura. Tal quadro vem mostrar um desperdício de recursos naturais que poderão ser utilizados de maneira racional.

O Rio Grande do Norte vive um momento de realização de grandes investimentos e incremento da sua economia, hoje fortemente apoiada nas atividades do turismo e nas atividades relacionadas ao Pólo Gás-Sal e à fruticultura, por isso a necessidade do estudo da circulação hidrodinâmica, que é de primordial importância para futuros estudos de ampliação do Porto de Natal, como estudo de dragagem.

A gestão dos recursos hídricos requer o desenvolvimento de instrumentos tecnológicos e de sistemas de informação que sejam capazes de conhecer o sistema hídrico, além de criar condições técnicas que possam apoiar as decisões relacionadas a diversos setores. Programas de monitoramento e controle de poluição nos sistemas hídricos são instrumentos capazes de reduzir a degradação da qualidade da água. Este controle deve ser amplo, com especial atenção aos efluentes domésticos e industriais e às cargas difusas, urbanas e rurais.

As atividades antrópicas desenvolvidas no entorno do estuário são quadros problemáticos do ponto de vista da gestão ambiental justificando a aplicação de ações de caráter corretivo.

E, ainda regiões de baixa densidade ocupacional e ecossistemas de grande significado ambiental, objeto de acelerado processo de ocupação demandando ações preventivas.

Desta forma, torna-se necessária e imprescindível a recuperação do Estuário do Rio Potengi, ecossistema de grande importância ecológica e econômica para a capital e para o Estado, através de um programa abrangente e conseqüente que contemple a realização de ações como um programa de gerenciamento ambiental do estuário, realizado através da modelagem computacional, onde se podem prever inúmeras situações onde os resultados dos cenários sirvam de subsídio para relatórios de monitoramento da problemática e erradicação dos mesmos. A modelagem preditiva também auxilia na prevenção de futuros problemas que possam ocorrer.

É possível, ainda, desenvolver níveis de monitoramento específicos, considerando que a modelagem computacional responde mais rapidamente às variações de concentrações dos efluentes do que as medições analíticas feitas em laboratório.

Os modelos computacionais são temas de várias pesquisas desenvolvidas no âmbito nacional e internacional. O modelo aplicado no presente estudo é o SisBAHIA por ser nacional, ter uma linguagem de fácil entendimento, e se aplicar a águas rasas, além de ter inúmeros estudos realizados com o mesmo, e ter uma alta confiabilidade nos resultados obtidos.

O objetivo deste trabalho é estudar a circulação hidrodinâmica do estuário do Rio Potengi, através do módulo hidrodinâmico do Sisbahia, levando em consideração as alterações batimétricas entre 1981 e 2004. Objetiva-se também verificar os padrões de circulação hidrodinâmica referentes à situação de calmaria, de ação de ventos usuais e ventos de frente fria, para os períodos de quadratura e sizígia.

O trabalho foi dividido em 7 capítulos. No primeiro capítulo há uma breve introdução e explicita os objetivos do estudo. O capítulo 2 contém toda a caracterização da área de estudo. O capítulo 3 contém uma descrição do processo de modelagem, sua importância e uma breve revisão bibliográfica dos princípios da modelagem estuarina, além de uma descrição detalhada do modelo computacional utilizado – SisBAHIA. As equações governantes dos modelos utilizados para a

determinação da circulação hidrodinâmica no estuário em estudo também estão contidas nesse capítulo. O capítulo 4 descreve o processo de implementação sistema de modelos SisBAHIA, sistema de modelos elaborado na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, desde a definição do domínio a ser estudado, dos parâmetros ambientais, bem como as condições de contorno e iniciais utilizadas no módulo hidrodinâmico. O capítulo 5 estão as análises dos resultados obtidos a partir das simulações, subdividido em parte 1 – Elevação do Nível de Água, parte 2 – Padrões de correntes para o ano de 1981, parte 3 – Padrões de correntes para o ano de 2004. O capítulo 6 reúne as conclusões obtidas da modelagem do Estuário do Rio Potengi e algumas recomendações para estudos futuros. E o capítulo 7 contém as referências bibliográficas da dissertação.

CAPÍTULO II

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente capítulo contém a caracterização da área de estudo, sendo apresentados nele a localização e os aspectos relativos ao meio físico e a sócio-economia da região do estuário. Também é apresentado um resumo sucinto das principais intervenções antrópicas ocorridas no mesmo.

2.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO

O Rio Potengi, por vezes denominado Potengi, é o principal rio do estado do Rio Grande do Norte. Sua nascente está localizada no município de Cerro Corá e sua foz no município de Natal, onde desemboca no Oceano Atlântico. O nome Potengi, na tradução do tupi-guarani para o português, significa Rio Grande. Seu nome deu origem à denominação da Capitania do Rio Grande, e posteriormente a Província e ao Estado do Rio Grande do Norte.

O Potengi é o maior e mais importante sistema estuarino do Estado. Está situado inteiramente no Rio Grande do Norte. Localiza-se na região metropolitana da cidade de Natal, situado aproximadamente, entre as coordenadas 232500 UTM e 260000 UTM de latitude sul e 9352000 UTM e 9367500 UTM de longitude oeste (Figura 2-1).

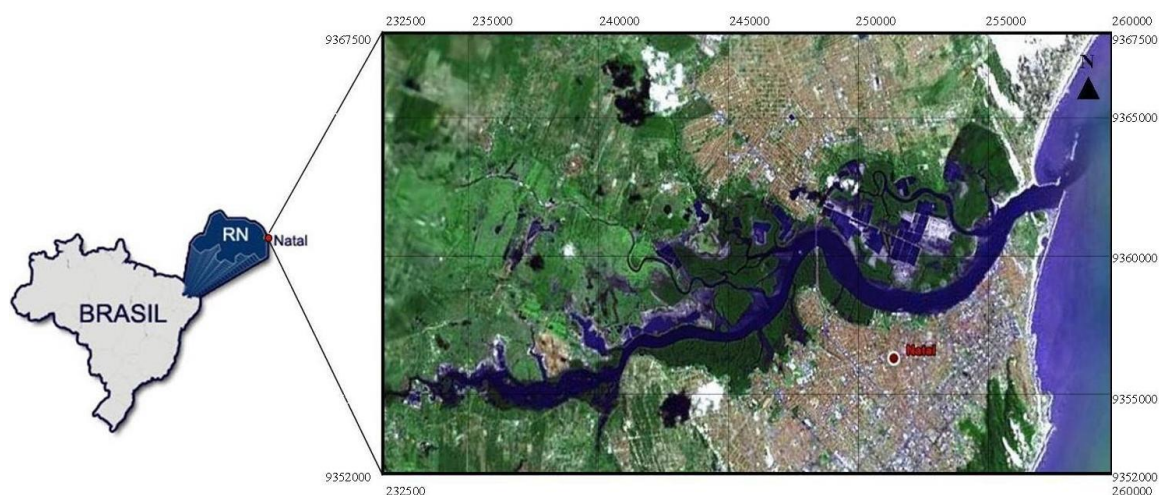


Figura 2-1: Estuário do Rio Potengi (Google, 2006).

pequenas descargas mesmo durante o período de chuvas, propiciam uma insignificante contribuição hidrológico-fluvial no estuário (CUNHA, 1982).

Rio Doce

É um pequeno rio com extensão de 14 km, formado pela descarga da Lagoa de Extremoz (RN), de caráter perene, com declividade quase nula e que corre sobre sedimentos quaternários de dunas e aluviões até desaguar no estuário. A bacia do Rio Doce ocupa uma superfície de 387,8 km² (CUNHA, 1982) e apresenta na foz uma descarga hídrica em torno de 4,7m³/s (ARAÚJO, 2005).

Rio Jundiáí

Segundo SOUZA (2004), o rio Jundiáí é o principal contribuinte da margem direita do Potengi. Nasce na Serra Chata, município de Sítio Novo (RN), a uma altitude de 280 metros e tem a extensão total do seu curso de aproximadamente 85 km. Passa por distintas zonas físicas do estado do Rio Grande do Norte e recebe água de vários riachos, sendo seus principais contribuintes os riachos da Prata/Guarapes, das Quintas e do Baldo.

Com o nome de Rio Grande do Norte, percorre cerca de 23 km, em direção leste. Perto da cidade de Presidente Juscelino (RN), a uma altitude em torno dos 145 metros, toma a direção NE até o município de Bom Jesus (RN). Novamente em direção E, continua até a localidade de Uberaba, a 65 metros de altitude. Rapidamente, toma rumo NE, até chegar ao estuário na cidade de Macaíba (RN), correndo ao longo de uns 19 km sobre terrenos de declividade insignificante, ocupados por manguezais, para alcançar sua desembocadura no Oceano Atlântico. Neste setor, a 7 km da desembocadura, recebe o aporte do rio Potengi, formando um amplo estuário.

Suas descargas mostram um caráter intermitente em decorrência da irregularidade e reduzida pluviosidade da região do seu curso superior (CUNHA, 1982).

Rio Potengi

O Rio Potengi, o contribuinte hídrico mais importante do estuário ao qual dá o nome, percorre setores fisicamente diferenciados do estado do Rio Grande do Norte,

iniciando em região semi-árida e finalizando em zona litorânea. A extensão total do seu curso é de aproximadamente 176 km, com uma inclinação geral ao redor dos 2,80 m/km.

A formação do curso do Potengi nasce num arco formado pelas serras da Apertada Hora e do Doutor, situadas a uma altitude de 500 metros aproximadamente. Corre em direção N-NE até as proximidades da cidade de São Tomé (RN), tomando depois o rumo NE, até alcançar o estuário.

A uns 15 km da cidade de São Tomé, recebe as águas do resto dos afluentes formadores, isto é, dos riachos de Ingá, Porteiras, reforçado pelo Ribeirão Portas d'Água, Cascavel e pelos riachos Araras, Cerro Corá, Catete e outros.

A denominação “rio Potengi” é mantida até a sua foz. Segundo CUNHA (1982), na realidade, nos últimos 10 km de seu curso perde o rio Potengi o caráter de um curso d'água definido como rio, apresentando as características de um braço de mar sujeito a todas as variações do nível do mar, com a corrente d'água em dois sentidos opostos, conforme o movimento das marés.

Como ponto final do curso, onde se iniciam as características marítimas, pode-se identificar a confluência do rio Jundiaí, que é tomado como afluente da margem direita do rio Potengi, mas na realidade deve ser tomado como um rio independente, com a bacia hidrográfica própria, que tem a sua barra em conjunto com o rio Potengi, na enseada formada pelo mar (TECNOAMBIENTE, 2001).

De modo geral, pode-se constatar que a região da bacia hidrográfica do Rio Potengi, pertencente ao último trecho do seu curso (independente de se considerar o rio Jundiaí ou não), influencia o regime do rio propriamente dito, principalmente pelos lençóis subterrâneos. Pertence ela a uma zona de pluviosidade elevada, sem problemas decorrentes de secas periódicas, uma vez que a pluviosidade aumenta gradativamente com a aproximação do litoral.

Segundo CUNHA (1982), a grande variação de descargas no curso superior do Rio Potengi é reflexo quase instantâneo das ocorrências de chuvas, que se apresentam reduzidas e irregulares, normalmente limitadas a poucos meses. Esta variação gera descargas médias anuais de aproximadamente 5 m³/s, nos períodos chuvosos de anos de precipitação normal, e em torno de 1 m³/s nos períodos de estiagem.

Estuário Potengi

Pode-se caracterizar o estuário do rio Potengi como um estuário positivo, pois as vazões afluentes dos rios e das chuvas são superiores à vazão de água evaporada.

Quanto à altura de maré, ele é um estuário situado em região de mesomaré. É um estuário hipersíncrono, pois a altura da maré no seu interior possui amplitude superior à observada na boca. Isto ocorre por efeito de reflexão da maré. No entanto, a forma deste estuário não é afunilada como usualmente se observa em estuários hipersíncronos.

2.2.2. Aspectos Climatológicos

Segundo a classificação climática de Köppen, na metade leste da bacia do estuário do Rio Potengi há uma predominância do tipo As', caracterizado por um clima tropical chuvoso com verão seco e estação chuvosa se adiantando para o outono; na porção centro-oeste, predomina o tipo BSs'h' - clima muito quente e semi-árido, com estação chuvosa que se adianta para o outono; e, no extremo oeste, perfazendo cerca de 10% da área total da bacia, o tipo BSw'h' - clima muito quente e semi-árido, com estação chuvosa que se atrasa para o outono (CUNHA, 2004).

O regime térmico na região é relativamente uniforme e as temperaturas são elevadas ao longo de todo o ano. Essas características são devido a grande quantidade de radiação solar incidente sob a superfície terrestre, associada às altas taxas de nebulosidade. Além disso, a proximidade do mar induz a redução na amplitude térmica.

Segundo, dados da Estação Climatológica da EMPARN, para o ano de 2005, a temperatura média anual é de 26,8°C, com uma temperatura máxima anual de 31,3°C e temperatura mínima anual de 21,1°C. A insolação média anual é de 2793 horas e a umidade relativa do ar gira em torno de 73% a 82% por ano. Quanto à precipitação média anual em Natal, a mesma é da ordem de 1554 mm. A estação chuvosa estende-se de fevereiro a agosto, quando os totais mensais, em média, excedem 1300 mm, e de outubro a dezembro tem-se os meses mais secos, com o total de precipitação média, abaixo de 110 mm. Os ventos apresentam uma média anual de 5,5 m/s com direção dominante SE.

2.2.3. Cobertura Vegetal

A área do estuário do Rio Potengi mostra nas suas porções marginais, uma cobertura vegetal associada às feições morfológicas existentes, ou seja, praias, dunas, tabuleiros e manguezais que ocupam toda a parte inferior do Estuário do Rio Potengi.

A cobertura vegetal das praias e das dunas são formações rasteiras, mais ou menos densas, instaladas sobre o substrato holocênico de areias quartzosas distróficas marinhas (Neossolos quartzarenicos), constituindo uma formação aberta ou moitas esparsas (CUNHA, 1982).

Conforme RIZZINI (1997), ao longo das praias, são freqüentes as espécies: *Ipomoea pescaprae* (salsa de praia), *Sporobolus virginicus* (capim barba de bode) e *Iresine portucaloides* (pirixiu). Como espécie arbórea destaca-se a *Cocos nucifera* (coqueiro).

As dunas mais recentes de caráter móvel, não apresentam cobertura vegetal. As de períodos anteriores apresentam-se parcialmente ou totalmente cobertas por vegetação, que ora é herbácea, escassa e rasteira, confundindo-se com as formações de praia que são arbóreas. Espécies do gênero *Anacardium* (cajeeiro) e *Ficus* (gameleira) aparecem entre as predominantes nas encostas das dunas. Encontram-se também gramíneas dos gêneros *Elionuros*, *Andropogon*, *Briza* e *Imperata*, ciperáceas, papilionáceas e algumas compostas, todas elas rasteiras, bem como espécies de *Remirea marítima* e *Spartina sp*, consideradas como fixadoras de dunas.

Os tabuleiros, dispostos nas superfícies aplainadas dos sedimentos terciários, são constituídos de dois estratos: um arbustivo arbóreo e outro herbáceo. O estrato herbáceo é composto quase totalmente de gramíneas dispostas em moitas, destacando-se os gêneros *Aristida* e *Andropogon*. O arbustivo arbóreo apresenta pequenas árvores e arbustos distribuídos esparsamente, destacando-se as espécies *Curatella americana* (lixeira), *Byrsonima cydoniaefolia* (murici do tabuleiro), *Duratea fieldingiana* (batiputa), *Hancornia speciosa* (mangabeira), *Anacardium occidentale* (cajeeiro), *Hirtella ciliata* (canoé) e *Miconia sp* (SOUZA, 2004).

No interior do estuário, as margens são totalmente colonizadas por manguezais, que são vegetais característicos de áreas lamacentas sujeitas a influência das marés. Dentre as poucas espécies que formam a flora dos

manguezais, destacam-se a *Rhizophora mangle* (mangue vermelho), *Laguncularia racemosa* (mangue branco) e *Avicennia schaueriana* (mangue canoé). Sendo a primeira espécie portadora de uma característica peculiar que são suas raízes adventícias e que podem atingir até 12m de altura. Esta espécie é típica de locais com altos índices de salinidade e na área do estuário do Rio Potengi esta predomina ocupando quase totalmente o estuário (SOUZA, 2004).

Estes manguezais preenchem as reentrâncias morfológicas do estuário, limitando-se ao continente com os paredões rochosos da Formação Barreiras e são mais expressivos no setor intermediário estuarino, ou seja, a montante da Ponte de Igapó.

O manguezal já apresenta em determinados pontos uma forte indicação da ação antrópica, como exploração de salinas, hoje desativadas. Encontra-se ao longo do manguezal, uma flora de porte pouco exuberante, em detrimento da retirada desordenada da madeira para a construção civil e outras atividades, além da invasão dessa área pela população de baixa renda que ali se aloja, sem nenhum sistema de saneamento básico, trazendo conseqüências ao ecossistema, além de sério comprometimento da saúde dessa população.

Exemplo típico disto (mangues intrusos) é a presença de um manguezal próximo ao Forte dos Reis Magos, na foz do estuário Potengi. Estes mangues se desenvolveram a partir da construção do guia corrente da Limpa, durante as obras de ampliação portuária em 1929, sobre uma praia estuarina do mesmo nome.

2.2.4.Geologia

A geologia da costa leste do Rio Grande do Norte compreende as rochas do Pré-Cambriano, sedimentos mesozóicos, sedimentos cenozóicos e feições estruturais importantes dadas por falhamentos de gravidade (Graben). Sua litologia de superfície compreende depósitos praias, terraços costeiros, aluviões lacustres, fluviais e estuarinos, além de cobertura de espriamento e seqüências sedimentares da Formação Barreiras.

A Formação Barreiras está distribuída numa extensa faixa litorânea, estendendo-se desde o Estado do Espírito Santo até o Pará. É encontrado numa seqüência notável e contínua de sedimentos, pouco ou não consolidados, litologicamente variando entre argilas e conglomerados, apresentando normalmente

uma estratigrafia irregular e muito distinta (CUNHA, 1982).

Em alguns setores encontram-se afloramentos dos sedimentos mesozóicos e do embasamento cristalino. Os sistemas de falhamentos na região desenvolveram pequenos grabens, constituindo elementos de grande expressão na evolução morfológica dos vales fluviais e estuarinos da referida zona costeira (MABESOONE, 1972).

Quanto à coluna estratigráfica de Natal, esta pode ser sintetizada, da base para o topo, da seguinte forma (MABESOONE, 1972):

- *Embasamento Cristalino Pré-Cambriano*: Constituído por granitos, granodioritos, migmatitos, gnaisses e xistos.
- *Sedimentos Mesozóicos*: Corresponde a seqüência infra-barreiras, posicionada sobre as rochas pré-cambrianas. Constituída por sedimentos do Cretáceo com um horizonte inferior arenítico e outro superior com calcário.
- *Seqüências Sedimentares do Barreiras*: Constituem uma seqüência de camadas de depósitos elásticos, com granulometria variando entre areias e argilas. Os referidos depósitos afloram em vários locais com estratificação cruzada ou gradual. Esta seqüência sedimentar de idade Cenozóica está sobreposta, discordantemente, a rochas pré-cambrianas do Embasamento Cristalino ou aos sedimentos mesozóicos.
- *Sedimentos Sub-Recentes e Recentes*: Correspondem as fases de acumulação após deposição Barreiras, com diversas origens e litologias, constituindo os seguintes depósitos: dunares, praias, terraços marinhos, depósitos estuarinos e depósitos aluvionares. Depósitos Dunares: São sedimentos areno-quartzosos, de granulometria fina a média que ocorrem na faixa costeira, desenvolvendo solos de areias quartzosas distróficas marinhas. São depósitos eólicos naturalmente selecionados pela própria natureza do agente de transporte. Depósitos Praiais: São constituídos por areias finas, médias e grossas. São encontradas nas chamadas "zonas de estirâncio", onde no litoral leste do Rio Grande do Norte é notável a quase total ausência de materiais elásticos mais finos, como a argila e o silte. Contudo, em conjunção com o material areno-quartzoso, nota-se a ocorrência de argila caulínica e silte, que pode ser verificada na

presença de alguns pontais rochosos ou falésias. Depósitos de Terraços Marinhos: Correspondem aos sedimentos de areia, em determinados locais com pequena composição de argila e silte. São acumulados num plano inclinado, protegidos da ação efetiva das ondas pela crista de praia, estão sujeitos a serem banhados ou inundados por águas de afloramento do aquífero freático. Nestes terraços encontram-se associações de solos de areia quartzosa distrófica marinha e areia quartzosa distrófica. Depósitos Estuarinos: Correspondem aos sedimentos dos estuários, sujeitos às inundações das marés e de descarga dos cursos fluviais. Nestes sedimentos desenvolvem-se solos indiscriminados de manguezais. Estes depósitos correspondem a bancos de areia com coloração esbranquiçada, sedimentos de areia grossa, média, fina, silte e argila com muita matéria orgânica e de cor cinza-escura a preta. Como exemplos destes depósitos têm-se os estuários dos rios Potengi e Ceará - Mirim. Depósitos Aluvionares: São constituídos por sedimentos clásticos, com granulometria e litologia bastante variadas, observandose areias quartzosas distróficas, material mioclástico com ou sem matéria orgânica, turfa e argila orgânica, ocorrendo o desenvolvimento de grande variação de solos aluviais. Estes sedimentos são encontrados nos leitos e planícies ou como depósitos aluviais do estuário do Rio Potengi.

2.2.5. Geomorfologia

A área de estudo localiza-se na planície costeira oriental do RN. O estuário do Rio Potengi encontra-se inserido numa paisagem complexa, modelada por formações resultantes de processos e fatores endogenéticos, exogenéticos e mais atualmente fatores antropogênicos. A endogenia está fortemente ligada aos movimentos tectônicos, que através de processos de falhamentos e dobramentos ocasionaram, por exemplo, a gênese de uma rede de drenagem fluvial (Graben Natal), interferindo no capeamento litológico e fatores exógenos.

Para uma caracterização mais bem definida dos aspectos geológicos e geomorfológicos da região, adotou-se a divisão proposta por Cunha (1982), que dividiu em sedimentos terciários representados pela Formação Barreiras e os sedimentos quaternários e recentes, que constituem morfologicamente as feições

de dunas, recifes, aluviões, terraços e mangues.

Na faixa costeira de Natal, a seqüência da Formação Barreiras, morfologicamente, está representada por tabuleiros semiplanos que terminam abruptamente em barreiras às margens do estuário do Rio Potengi e em falésias nas praias. Estas feições são, em muitos locais, capeadas por dunas e aluviões.

As dunas, morfologicamente, mostram formas colinosas suavemente arredondadas, dispostas paralelas ou semiparalelamente segundo a orientação geral SE-NW, condicionadas aos ventos predominantes de sudeste.

Os aluviões e terraços são encontrados, margeando o estuário principalmente nas proximidades de sua embocadura.

A geomorfologia do estuário, obtida através de medições batimétricas efetuadas pela Marinha do Brasil, mostra uma ampla depressão com zonas preferenciais de maior profundidade e outras com um evoluído preenchimento sedimentar (CUNHA, 1982).

As zonas de maiores profundidades se encontram junto às margens côncavas do estuário, geralmente caracterizadas pela presença de elevações terciárias da Formação Barreiras, que, nestes locais, tomam a forma de terraços. Nas margens convexas, um avançado preenchimento sedimentar possibilita um crescimento lateral em direção ao centro do estuário (CUNHA, 1982).

Ao longo do estuário, o comportamento morfológico se modifica caracterizando zonas distintas. A profundidade, a largura e a forma dos canais mostram diferentes níveis de atuação dos mecanismos dinâmicos do ambiente. Modificações artificiais introduzidas no estuário, como construção de diques, espigões, aterros e enrocamentos têm gerado áreas com profundidades anômalas. O vale do estuário possui fundo chato com leitos ocupados por canais e planície de inundação de marés, onde ocorre à dinâmica das águas estuarinas.

Na área de estudo podem ser classificadas duas formas de planície flúvio-marinha: uma de influência estuarina, com um acúmulo de sedimentos e matéria orgânica, sendo formada por processos tectônicos abrangendo uma grande área, tendo uma expressiva extensão nos 19 km adentro do continente, formando assim, a planície estuarina do rio Potengi. Outra, encontrada em uma pequena faixa de terra no bairro de Santos Reis, sendo proveniente de deposições sedimentares diferenciadas com acúmulo de sedimentos argilosos com presença de faixas de manguezal e sedimentos arenosos quartzosos oriundos de deposição eólica

marinha com presença de vegetação rasteira de restinga (CUNHA, 1982).

2.2.6. Solos

Os diversos tipos de solos encontrados na área abrangida pelos estudos se caracterizam por apresentarem certa homogeneidade, principalmente no que se refere a sua gênese e datação geológica, provenientes do Cenozóico.

Os solos estão dispostos geograficamente na área de estudos da seguinte maneira: na margem esquerda: Neossolos quartzarênicos, Associação de Neossolos quartzarênicos e Gleissolos; na margem direita: Neossolos quartzarênicos, Associação de Neossolos quartzarênicos e Gleissolos.

Os Neossolos Quartzarênicos são solos profundos, altamente dissecados, com alta porosidade, alto índice de infiltração, bastante intemperizados de fertilidade natural baixa, com pH abaixo de 6.0, portanto, ácidos, ocorrendo em tabuleiros com relevo plano e suavemente ondulados e friáveis (SOUZA, 2004).

Os Gleissolos também conhecidos como sedimentos indiscriminados de manguezais, se constituem como depósitos aluvionares estuarinos. São formações sedimentares cenozóicas que ocorrem na superfície, sendo uma seqüência cretácea de arenitos na lapa e calcários na capa, repousando sobre o embasamento cristalino pré-cambriano regional (SALIM; COUTINHO, 1971). São profundos, constituídos por areia média e fina e por argila siltica orgânica, possui baixa porosidade devido ao agregado argiloso, alto teor de matéria orgânica orgânicos, com alta fertilidade natural e com tonalidades escuras, provenientes do acúmulo de matéria orgânica. Ocorrem em porções de topografia plana e baixa, geralmente em planícies de inundação dos rios e estuários, sendo um dos constituintes sedimentares da área de estudo, localizado mais precisamente, na planície de inundação do estuário.

Os Neossolos quartzarênicos ocorrem nas diversas porções da área de estudo, correspondendo à constituição das neodunas e paleodunas. São compostos por grãos de quartzo, são profundos, pobres em matéria orgânica e com horizonte A pouco desenvolvido, ocorrendo em áreas de topografias planas a suavemente onduladas, tais como campos de restinga.

2.2.7. Morfologia Estuarina

A morfologia atual do estuário é predominantemente de origem marinha, embora receba influência fluvial acentuada durante o período das cheias. As zonas de maiores profundidades encontram-se junto às margens côncavas do estuário, onde se localizam as elevações terciárias da Formação Barreiras, na forma de terraços. A sedimentação decorre do regime hidráulico e se processa pela remobilização do material erodido nas margens opostas e formação de bancos e coroas arenosas (CUNHA, 1982).

Ao longo do estuário o comportamento morfológico se modifica caracterizando zonas distintas decorrentes dos diferentes níveis de atuação dos mecanismos dinâmicos do ambiente. Nas zonas próximas à foz, com forte influência marinha, tem-se um vale amplo, definido por taludes abruptos junto às margens, onde quase toda a seção estuarina é ocupada por um canal principal muito largo e um canal secundário mais estreito e menos profundo do que o principal (CUNHA, 1982).

Na direção do interior do estuário os canais vão diminuindo suas larguras e profundidades, adquirindo forma mais estável decorrente da sedimentação, típico de um padrão nitidamente de maré. Isto pode ser observado na parte superior do estuário, onde a influência das marés é menor, assim os canais se apresentam mais estreitos, com pequenas profundidades e com formas bem estabilizadas (CUNHA, 1982).

As alterações antrópicas introduzidas no estuário, tais como a construção de guia corrente e quebra-mares, a derrocagem submersa do recife da boca da barra, com certeza causaram uma reorganização no interior do estuário, que se reflete através das variações batimétricas do canal, gerando profundidades anômalas, como algumas próximas à Praia da Redinha, com cotas de até 13 metros.

Normalmente, o assoreamento se verifica na direção interior do estuário, devendo ficar constante após o Porto de Natal. Devido à redução da capacidade de transporte das correntes de marés de enchente, os materiais de granulometria mais grossa sedimentam próximo à foz, enquanto que os de granulometria inferior são depositados gradativamente em direção ao interior do estuário (CUNHA, 1982).

2.2.8.Histórico das obras portuárias

Entre os anos 1902 e 2003, diversas intervenções do tipo obras fixas, dragagens e derrocagens foram realizadas ao longo do estuário do Rio Potengi, com a finalidade de regularizar a dinâmica dos processos de erosão e deposição de sedimentos, para a melhoria da navegabilidade no canal de acesso ao Porto de Natal e melhorias físicas no Porto de Natal.

Em ordem cronológica, foram realizadas as seguintes intervenções, segundo a CODERN.

- 1902 – Dragagem do canal de acesso ao estuário próximo à sua embocadura;
- 1927 – Início da construção do dique da Limpa;
- 1929 – Finalização da construção do dique da Limpa e construção dos espigões do nº 1 ao 9. Com a construção dos espigões nº 4 ao 9, a margem esquerda foi erodida e os espigões ficaram solapados. Isto justificou o prolongamento e reforço dos espigões da margem esquerda;
- 1947 – Construção do espigão defletor E-1^a. Esse espigão possui a tendência a formar um braço de mar em direção ao canal de acesso;
- 1949 – Construção dos espigões defletores;
- 1955 – Dragagem do canal de acesso da barra, com um volume de 49.840 m³;
- 1956 – Derrocagem de 25m da extremidade da Ponta do Picão para a cota de 8m, com um volume de 23.185 m³. Levantamentos mais recentes mostraram que a derrocagem não atingiu a cota de 8m ou então que não foram removidos os resíduos da detonação;
- 1956 – Derrocagem da pedra da Limpa com um volume de 1.500 m³, o que gerou melhorias nas condições de manobra, necessitando ainda de derrocagem;
- 1956 – Construção parcial do molhe defletor na extremidade da Ponta do Picão, com um volume de 4.633 m³. Esta, por sua vez, não foi concluída;
- 1956 – Novo prolongamento do espigão com um volume de 7.020 m³, passando a ser chamado de guia corrente da Redinha. Essa obra acabou provocando um processo erosivo entre o espigão e a ilha da Baixinha;
- 1960 – Alçamento e reforço do dique da Limpa;

- 1963 – Desvio do rio Doce para o interior da gamboa Manimbú. Este desvio não causou nenhum efeito significativo ao comportamento hidráulico, pois o riacho tem seu leito de areia com contribuição de sólidos insignificantes;
- 1966 – Dragagem do canal de acesso na projeção do banco das Velhas, com um volume de 362.017 m³. O despejo foi realizado nas duas margens, com retorno de material. Ocasionalmente, por sua vez, o decréscimo do banco das Velhas,
- 1967 – Dragagem no canal de acesso e bacia de evolução para a cota 8 m, com um volume de 553.688 m³;
- 1968 - Dragagem no canal de acesso, com um volume de 884.815 m³. O despejo foi realizado nas duas margens, com retorno de material;
- 1971 – Derrocagem de um trecho da pedra da Baixinha, com um volume de 5.900 m³, que ocasionou melhorias nas condições de acesso ao estuário;
- 1972 - Dragagem no canal de acesso na projeção do banco das Velhas, com um volume de 210.420 m³, o que ocasionou o decréscimo do banco das Velhas. O despejo foi realizado junto ao guia corrente da Redinha, do lado externo, com retorno de material;
- 1982 – Derrocagem experimental com explosivos na entrada da barra (canal de acesso);
- 1997 – Início das obras de derrocagem, dragagens e construção dos guias correntes, sendo realizado na 1ª etapa, a derrocagem da pedra da Bicuda;
- 1998 – Início da construção da guia corrente da Redinha;
- 1999 – Início das operações de dragagem do estuário;
- 2003 – Nova dragagem no canal de acesso, sendo realizada apenas 45% da operação pretendida.

2.3. ASPECTOS SÓCIO - ECONÔMICOS

O estuário do Rio Potengi está localizado na região metropolitana do Rio Grande do Norte, onde há a maior concentração populacional do estado.

Alguns dos usos praticados no estuário do Rio Potengi estão descritos a seguir, como turismo, carcinicultura, lazer e transporte.

Turismo

O estuário do Rio Potengi tem como principal característica de sua paisagem natural, a área estuarina no entorno da foz, região urbana de Natal. Onde o manguezal, o campo dunar adjacente, as praias e a cidade proporcionam um excepcional momento da beleza do litoral Potiguar, fazendo de Natal uma das mais belas capitais do País. A cidade possui áreas em processo de expansão, indo de encontro aos municípios adjacentes, originando um curioso processo de conurbação (IDEMA, 2004).

A foz do estuário é uma zona abrigada que, apresenta em seu interior um exuberante manguezal e a zona portuária de Natal. Na região mais interna, formada pelas vertentes do tabuleiro litorâneo, onde se localizam as cidades de Macaíba e São Gonçalo do Amarante, tem-se um extenso manguezal, fortemente impactado pela poluição proveniente da zona metropolitana de Natal, além da presença de viveiros de camarão, cuja ação impactante vem sendo observada em todo o litoral Potiguar.

A zona costeira oriental onde está localizado o estuário do Rio Potengi, apresenta potencial turístico elevado, com destaque para o Forte dos Reis Magos, o Porto de Natal, as praias da Redinha e do Forte, além de áreas de interesse cultural e de preservação ambiental, como o mangue, que ocupa grande parcela das margens do estuário.

O posicionamento da segunda ponte sobre o Rio Potengi, por exemplo, exigirá retificações na estrutura viária do entorno mais imediato às suas cabeceiras, com reflexos na estrutura viária da Zona Norte, no bairro da Redinha, como também e, principalmente, no entorno da cabeceira localizada no lado sul, no triângulo formado pela enseada do Rio Potengi com o Oceano Atlântico, no bairro de Santos Reis (CUNHA, 2004).

Deste lado (sul), encontra-se uma área bastante complexa, aonde o corredor turístico vindo da orla encontra-se com o corredor portuário vindo do rio. A presença da Fortaleza dos Reis Magos e o seu sítio histórico, circundado pela área militar e por importantes núcleos residenciais formados pelos bairros de Santos Reis, Rocas e Praia do Meio, tendem a sofrer transformações na sua configuração urbana (CUNHA, 2004).

Enquanto na beira mar a atividade turística tende a se instalar e aumentar a disputa pelas áreas residenciais de baixa renda ali existentes, na Ribeira e na

Cidade Alta, o turismo tende a desenvolver-se conjuntamente com as atividades portuárias e, em alguns trechos, com a residencial (CUNHA, 2004).

No entanto, a atividade turística nessa área constitui-se de atividades ligadas tanto à presença do rio, suas belezas naturais, passeios de barcos, bem como com o turismo cultural possível em função da riqueza do patrimônio arquitetônico ali existente. A margem direita do Rio Potengi, desde a enseada, apresenta pontos interessantes para o desenvolvimento da atividade turística, ligadas à presença do rio e ao patrimônio histórico dos bairros em questão.

Assim, para a Comunidade do Areado e Passo da Pátria, localizadas ao lado da Pedra do Rosário, é proposta a relocação de algumas residências para uma área livre da favela, liberando o entorno do ponto turístico, para tratamento paisagístico e viabilização de ancoragem de barcos de passeio. Ao mesmo tempo propõe a criação de uma calçada, entre as casas e o rio, fazendo a ligação da comunidade com o novo parque criado a partir das relocações (CUNHA, 2004).

Da Pedra do Rosário, em Cidade Alta, desenvolve-se um *deck* de madeira, margeando o Rio, acompanhado pela linha férrea, até outro importante ponto, o Cais da Tavares de Lira, já no bairro da Ribeira, hoje o ancoradouro de barcos de passageiros que faz a ligação entre a Ribeira e a Redinha, do outro lado do rio. O *deck* continua margeando o rio por trás dos casarões antigos da Rua Chile até encontrar um mirante construído ao lado do Porto, e parte integrante do Largo da Rua Chile (CUNHA, 2004).

Finalmente, com o prolongamento da Avenida Duque de Caxias, é proposto um novo tratamento para o conhecido Canto do Mangue, local de concentração dos pescadores, ao lado da Favela do Maruim, que com as obras de ampliação do porto, será removida. Para o Canto do Mangue é proposta a relocação de pequenos bares para o outro lado da via, liberando dessa forma a visual para o rio. O Canto do Mangue integrar-se-á ao espaço do futuro Museu da Aviação e ao Terminal de Balsas que faz a travessia para a Zona Norte, no bairro da Redinha (CUNHA, 2004).

Traz como idéia básica que esse trecho assuma, na estrutura da cidade, o elo entre o tecido urbano e o Rio Potengi, apresentando uma diversidade de atividades que possibilitam a sua exploração do ponto de vista turístico. Ao mesmo tempo, além do acervo histórico e arquitetônico que apresenta, constitui-se como importante ponto de passagem entre áreas da cidade, além de apresentar importantes núcleos residenciais estabelecidos no seu entorno (CUNHA, 2004).

A sua proximidade com a orla marítima faz com que se estabeleçam relações de vizinhança, tratadas a partir de uma abordagem de escala e interdependência constantes. Nesse sentido, sob a ótica da habitação, a compreensão dos bairros da Ribeira e Cidade Alta, apontam para a necessidade de se estimular o uso residencial como elemento fundamental para a revitalização e reabilitação desses dois bairros históricos da cidade (CUNHA, 2004).

O bairro de Rocas, também por sua vez, caracteriza-se por ser uma grande área residencial, um bairro interior, passagem entre o corredor turístico e o centro histórico urbano, comercial e cultural, que ora se forma entre Ribeira e Cidade Alta. Apresenta uma ocupação predominantemente horizontal, com residências unifamiliares, em processo de transformação e verticalização (CUNHA, 2004).

O trecho da Ribeira à Cidade Alta, áreas de operação urbana, sofrem um processo de ocupação distinto dos bairros localizados à beira-mar. Nesses, a atividade turística tende a alavancar as transformações no espaço urbano, naqueles, por localizarem-se às margens do Rio Potengi, a transformação e consolidação do porto de Natal tende a alterar a configuração espacial das áreas do entorno, com significativo impacto nas zonas de preservação histórica, mantidas pela legislação em vigor (CUNHA, 2004).

Da mesma forma, nesse trecho, as áreas residenciais, que se encontram localizadas na Zona de Preservação Histórica e próximas à Zona Especial Portuária, mesclam-se entre a atividade comercial e de serviços instaladas na área central de Natal, e às atividades portuárias, próximas às margens do Rio Potengi. O apelo turístico, cultural, e, sobretudo, as transformações decorrentes da ampliação do porto, fazem com que exista também nesse trecho, a exemplo do que ocorrem com a Praia do Meio, Rocas, Santos Reis e Mãe Luiza, uma linha de tensão entre essas atividades e a moradia, a ponto da Lei de Operação Urbana tentar estimular o uso residencial no bairro da Ribeira, com o intuito de torná-lo mais vivo e dinâmico.

Instalação portuária e de transporte

O estuário é atravessado por barcas de transporte de passageiros que fazem a ligação entre o bairro da Ribeira, na margem direita a praia da Redinha, localizada a margem esquerda.

Com relação à movimentação de barcos pesqueiros, tem-se uma estatística, segundo a CODERN (1996), de cerca de 80 barcos trafegando normalmente no estuário Potengi. Inclui-se também a frota da Marinha do Brasil.

O porto do Natal está situado na margem direita do rio Potengi, recebendo grandes navios que entram no estuário através do canal principal.

A operacionalização do Porto de Natal e sistema viário fluvial dependem das condições portuárias do estuário do rio Potengi. O porto comercial tem condições de operacionalização restritas, sem condições de atracar navios de maior calado, assim como, as zonas de armazenamento de carga e descarga, encontram-se inseridas na zona urbana, compreendendo parte dos bairros da Ribeira e Rocas, com poucas condições para expansão.

As operações portuárias de Natal caracterizam-se como de porto de carga geral. Devido talvez a falta de alternativas, o Porto de Natal tem se caracterizado nos últimos anos como especialista no embarque de frutas tropicais para a Europa e açúcar para o continente Africano (principalmente Nigéria) e importação de Trigo para o Grande Moinho Potiguar – GMP. Além do transporte de petróleo e sal. (TC/BR, 2001).

2.4. ASPECTOS DA QUALIDADE DA ÁGUA

Segundo CAERN (2005), a cidade de Natal possui 32% da sua área com rede coletora de esgoto, e desse total 40% recebem tratamento em estações da CAERN. O restante da coleta, correspondente a 31,2 mil metros cúbicos por dia é jogada *in natura* no estuário. O esgoto não coletado pela empresa é lançado pela população em fossas, sumidouros ou jogados no lixo e em galerias de águas pluviais, apresentando riscos de contaminação de lençol freático.

O Distrito Industrial, região metropolitana de Natal, chega a lançar em horário de pico, 350 metros cúbicos de dejetos por hora, no estuário. Estima-se que 30% desses dejetos sejam tratados pelas próprias empresas. A CAERN não faz nenhum tipo de tratamento de dejetos das empresas pertencentes ao Distrito Industrial. (ARAÚJO, 2005)

No centro industrial avançado (CIA), na cidade de Macaíba, estão instaladas 11 indústrias, das quais duas atuam no setor têxtil e uma na produção de tintas

(IDEMA, 2004). As águas residuárias coletadas em 06 indústrias são lançadas pelo emissário da CAERN, sem tratamento, no Rio Jundiaí.

Há um grande aporte de efluentes domésticos lançados sem tratamento nos rios que deságuam no estuário, comprometendo a qualidade ambiental do mesmo. O Relatório de Inspeção Técnica do IDEMA (2004) identificou 25 indústrias instaladas no Distrito Industrial de Natal (DIN) como responsáveis pelo lançamento de quantidades expressivas de poluentes no estuário do Rio Potengi e nos rios da bacia, justificada pela ETE do DIN que está inoperante. O referido relatório destaca também que 11 indústrias utilizam à rede coletora de esgotos da CAERN e que 03 efetuam pré-tratamento do efluente líquido industrial. Do número total de indústrias instaladas no DIN, 09 atuam no setor têxtil e 04 são curtumes. Os curtumes geram odores na região. As empresas Limpa Fossas, consideradas como “descarregadoras de lixo noturno” também despejam resíduos contaminantes no Rio Potengi.

CAPÍTULO III

MODELO HIDRODINÂMICO COMPUTACIONAL

O presente capítulo contém a descrição do modelo computacional SisBAHIA, com ênfase para o módulo hidrodinâmico. É apresentada uma descrição sucinta do modelo, as equações governantes e as condições iniciais e de contorno que regem o modelo do presente estudo. Maiores detalhes sobre o mesmo podem ser encontrados na documentação técnica e em Métodos Numéricos em Recursos Hídricos (Vol. 1 e Vol. 3) e SisBAHIA – Documentação de Referência Técnica. O documento de referência técnica do SisBAHIA pode ser baixado do site www.sisbahia.coppe.ufrj.br.

3.1. O SisBAHIA

O SisBAHIA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (Versão 5.0,2006) desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica, e na Área de Banco de Dados do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, ambos da COPPE/UFRJ, é composto pelos seguintes módulos: Módulo Hidrodinâmico, Módulo de Transporte Euleriano, Módulo de Qualidade de Água, Módulo de Transporte Lagrangeano (Determinístico e Probabilístico), Módulo de Geração de Ondas e Módulo de Análise e Previsão de Marés. Cabe ressaltar que este sistema vem sendo continuamente testado, ampliado e aperfeiçoado na COPPE/ UFRJ desde 1987. No presente trabalho é utilizado o módulo hidrodinâmico, o qual é descrito brevemente a seguir.

3.1.1. Módulo Hidrodinâmico

Este módulo possui um modelo hidrodinâmico de linhagem FIST (Filtered in Space and Time), otimizado para corpos de água naturais, nos quais eventuais gradientes de densidade sejam pouco relevantes, isto é, cujos forçantes sejam essencialmente barotrópicos (Rosman, 1987). A linhagem FIST representa um

sistema de modelagem de corpos d'água com superfície livre composta por uma série de modelos hidrodinâmicos, nos quais a modelagem da turbulência é baseada em técnicas semelhantes às aquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES - *Large Eddy Simulation*). A versão 3D do FIST resolve as equações completas de Navier-Stokes com aproximação de águas rasas, i.e., considerando a aproximação de pressão hidrostática.

O sistema de discretização espacial é otimizado para corpos de água naturais, permitindo um bom detalhamento de contornos recortados e de batimetrias complexas como é usual em tais corpos de água. A discretização espacial é feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos ou via elementos finitos triangulares quadráticos ou combinação de ambos que garante representações potencialmente de quarta ordem. A discretização vertical da coluna de água usa diferenças finitas com transformação sigma, fazendo com que a discretização completa do domínio resulte em uma pilha de malhas de elementos finitos, uma para cada nível Z da transformação sigma. O esquema de discretização temporal é via um método implícito de diferenças finitas, com erro de truncamento de segunda ordem.

O FIST3D utiliza uma eficiente técnica numérica em dois módulos, calculando, primeiramente, os valores da elevação da superfície livre e, em seguida, o campo de velocidades. Dependendo dos dados de entrada, os resultados podem ser 3D e 2DH, ou apenas 2DH. O esquema numérico resultante é comprovadamente robusto e eficiente. Em geral obtêm-se bons resultados com número de Courant médio da malha por volta de 5.

Com o FIST3D pode-se simular a circulação hidrodinâmica em corpos de água naturais sob diferentes cenários meteorológicos, oceanográficos, fluviais ou lacustres. Na versão utilizada o FIST3D é um modelo tridimensional barotrópico, capaz de simular com boa acurácia campos de correntes tridimensional (3D), bem como promediadas na vertical (2DH), em escoamentos pouco sensíveis à baroclinicidade.

3.1.2. Atributos Considerados no SisBAHIA

Uma série de atributos de modelagem vem sendo incorporada aos modelos à medida que estes são continuamente desenvolvidos. Isso inclui características necessárias à modelagem adequada de diversos corpos de água naturais,

características que aumentam a confiabilidade e aceitação dos modelos, e que permitam que tais modelos sejam aperfeiçoados e adaptados para estudos futuros, ou otimizados para estudos específicos. Dessa forma, as seguintes características vêm sendo consideradas:

1. O modelo hidrodinâmico admite especificação pontual do tipo de material de fundo, e usa interpolação biquadrática para valores de profundidade e rugosidade equivalente do fundo, permitindo ótima acurácia na representação física do leito. Além disso, permite que o atrito no fundo e o campo de vento sejam variáveis no tempo e no espaço. Tal realismo é muito relevante para simulações de escoamentos em regiões costeiras, baías, estuários, rios e lagos. Com a fidelidade conseguida no mapeamento da batimetria e contornos, bem como das tensões de atrito e forçantes, diminui-se as discrepâncias entre resultados medidos e modelados, minimizando o processo de calibração.
2. Na versão utilizada, o modelo calcula tanto campos de velocidades tridimensionais, 3D, como campos de velocidades promediadas na vertical, 2DH. Isso pode ser obtido de duas maneiras: através de um eficiente método analítico-numérico que funciona muito bem na maioria dos casos, ou diretamente através de uma formulação numérica 3D. A primeira maneira, utilizada no presente trabalho, é mais rápida e gera resultados acurados em casos de escoamento tipicamente barotrópicos, se o interesse estiver voltado para regiões nas quais as acelerações advectivas ao longo da coluna de água sejam pouco relevante, o que é bastante comum em simulações de corpos de água costeiros. Embora opcionalmente possa-se computar apenas o módulo 2DH do modelo hidrodinâmico, quando se calcula escoamentos 3D, por ambos os métodos mencionados acima, as soluções 2DH e 3D passam a ser interdependentes. Desta forma, em alguns casos a solução puramente 2DH pode diferir um pouco da solução 2DH+3D, pois neste caso o atrito no fundo também passa a ser função do perfil de velocidades computado no módulo 3D.

3.2. RESUMO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MÓDULO 2DH DO MODELO HIDRODINÂMICO

A mecânica do movimento para escoamento em regime turbulento é governada pelas equações de Navier-Stokes. Tais equações representam o princípio

da conservação da quantidade de movimento, e, em conjunto com a equação da continuidade, uma equação de estado e uma equação de transporte para cada constituinte da equação de estado, compõem o modelo matemático fundamental para qualquer corpo d'água.

No presente trabalho foi utilizado o módulo 3D com a opção de uma solução analítico-numérica para se obter os perfis de velocidade no campo de escoamento horizontal. Nessa opção, os perfis de velocidade são computados através de uma solução que é função das velocidades 2DH promediadas na vertical, elevação da superfície livre, rugosidade equivalente de fundo do módulo 2DH, e da velocidade do vento atuando na superfície livre da água.

Os gradientes de elevação da superfície e as tensões de atrito no fundo acoplam os dois módulos, sendo que um acoplamento adicional é garantido ao se forçar que as velocidades médias na vertical sejam iguais em ambos os módulos. O módulo 3D utiliza as elevações da superfície livre obtidas no módulo 2DH. Em seqüência, o módulo 2DH utiliza os perfis verticais de velocidade obtidos no módulo 3D, no cálculo das tensões de atrito no fundo.

Sendo assim, são resumidas abaixo as equações necessárias para determinar as três incógnitas de circulação hidrodinâmica em um escoamento 2DH integrado na vertical, (ζ , U , V). O desenvolvimento detalhado destas equações pode ser visto, em Rosman, (1989^b, Métodos Numéricos em Recursos Hídricos – Capítulo 3)), Rosman, (1997^b, Métodos Numéricos em Recursos Hídricos – Capítulo 3)) e Rosman ((2006^a, SisBAHIA - Documentação de Referência Técnica)). As equações 3.1 a 3.3, estão dispostas a seguir.

- Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\Phi \sin \theta V \quad (\text{Eq. 3.1})$$

- Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B) - 2\Phi \sin \theta U \quad (\text{Eq. 3.2})$$

- Equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde:

$$U = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} u dz \quad \text{e} \quad V = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} v dz$$

são as componentes da velocidade média na vertical nas direções x e y respectivamente. $H = h + \zeta$ é a altura da coluna d'água e $f = 2\Omega \sin \theta$ é o parâmetro de Coriolis, sendo Ω a velocidade angular de rotação da Terra e θ a latitude do local considerado. τ_x^s e τ_y^s são as componentes da tensão do vento sobre a superfície livre e τ_x^B e τ_y^B são as componentes da tensão de atrito no fundo.

3.2.1. Tensões de Atrito devido ao Vento

Como é usual em modelos de escoamento com superfície livre, no programa FIST3D, o atrito na superfície livre devido ao vento também é escrito em termos de uma formulação de velocidade quadrática, descrita na equação 3.4.

$$\tau_i^s = \rho_{ar} C_D W_{10}^2 \cos \phi_i \quad [i = 1, 2] \quad (\text{Eq. 3.4})$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar, C_D é o coeficiente de arraste do vento, W_{10} é o valor local da velocidade do vento a 10 metros acima da superfície livre, e ϕ_i é o ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção x_i . O coeficiente de arraste do vento, C_D , pode ser determinado por diversas fórmulas empíricas. A fórmula adotada no modelo FIST3D, disposta na equação 3.5, é a apresentada por Wu(1982):

$$C_D = (0.80 + 0.065 W_{10}) \times 10^{-3} ; [W_{10} \text{ em m/s}] \quad (\text{Eq. 3.5})$$

3.2.2. Tensões de Atrito no Fundo no Módulo 2DH

A tensão de atrito no fundo é calculada através da equação 3.6:

$$\tau_i^B = \rho_o \beta U_i \quad [i = 1, 2] \quad (\text{Eq. 3.6})$$

onde o parâmetro β depende da maneira em que o módulo 2DH seja empregado, conforme descrito abaixo:

Módulo 2DH desacoplado: Se apenas o módulo 2DH estiver sendo utilizado no programa FIST3D, i.e., se o módulo 2DH não for acoplado com o módulo 3D, a lei quadrática usual é empregada e usa-se a equação 3.7:

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Módulo 2DH acoplado ao 3D: Se o módulo 2DH for acoplado com o módulo 3D, o parâmetro β depende da velocidade de atrito característica u_* , que é função do perfil de velocidade 3D. Nesse caso, tem-se:

$$\beta = \frac{\sqrt{g}}{C_h} |u_*| \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Nos dois casos, C_h é o coeficiente de Chézy, definido como:

$$C_h = 18 \log_{10} \left(\frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Para o modelo FIST3D, recomenda-se os valores para a rugosidade equivalente de fundo ε dados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 - Valores recomendados para a rugosidade equivalente de fundo, ε , para uso no módulo 2DH do modelo FIST3D. (Adaptado de Abbot e Basco, 1989).

Terreno ou leito de terra	
Leito com transporte de sedimentos	$0.0070\text{m} < \varepsilon < 0.0500\text{m}$
Leito com vegetação	$0.0500\text{m} < \varepsilon < 0.1500\text{m}$
Leito com obstáculos	$0.1500\text{m} < \varepsilon < 0.4000\text{m}$
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0.0003\text{m} < \varepsilon < 0.0010\text{m}$
Fundo de pedra lisa	$0.0010\text{m} < \varepsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de asfalto	$0.0030\text{m} < \varepsilon < 0.0070\text{m}$
Fundo com pedregulho	$0.0070\text{m} < \varepsilon < 0.0150\text{m}$
Fundo com pedras médias	$0.0150\text{m} < \varepsilon < 0.0400\text{m}$
Fundo com pedras	$0.0400\text{m} < \varepsilon < 0.1000\text{m}$
Fundo com rochas	$0.1000\text{m} < \varepsilon < 0.2000\text{m}$
Fundo de Concreto:	
Fundo de concreto liso	$0.0001\text{m} < \varepsilon < 0.0005\text{m}$
Fundo de concreto inacabado	$0.0005\text{m} < \varepsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de concreto antigo	$0.0030\text{m} < \varepsilon < 0.0100\text{m}$

3.2.3 Tensões Turbulentas

As tensões turbulentas laterais médias na vertical, τ_{ij} , são fundamentais para a obtenção de modelos com boa capacidade de previsão. No programa FIST3D, elas são modeladas através da equação 3.10:

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = (K_{Hf} + K_v) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\Lambda_k^2}{24} \left(\left| \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \left| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right| \right) \quad (\text{Eq. 3.10})$$

K_{Hf} é o coeficiente horizontal de difusão turbulenta de quantidade de movimento; K_v é um coeficiente de dispersão horizontal de quantidade de movimento que aparece devido à promediação na dimensão vertical. Λ_k é um parâmetro relativo à largura do filtro utilizado na filtragem (promediação) da turbulência, para obtenção das equações do escoamento de grande escala (Rosman e Gobbi, 1990).

3.2.4. Condições de Contorno do Modelo Hidrodinâmico

Para o modelo hidrodinâmico, há dois tipos básicos de condições de contorno: as terrestres e as abertas. As condições de contorno terrestres definem as margens do corpo d'água e os possíveis afluentes ou efluentes e, ao longo das quais é necessário prescrever vazões ou velocidades normais ao contorno. As condições de contorno abertas caracterizam normalmente encontro de massas d'água, representando um limite do domínio do modelo mas não um limite real do corpo d'água. Ao longo das fronteiras abertas usualmente prescreve-se elevações de nível d'água.

Nos trechos de contornos terrestres característicos de margens, prescreve-se uma condição de contorno, que é o valor da componente da vazão ou da velocidade normal à linha de fronteira. É comum considerar-se a margem como impermeável e impor-se valor zero. O modelo também pode estimar a vazão normal de **efluxo** (fluxo efluente, ou para fora do domínio) e **afluxo** (fluxo afluente, ou para dentro do domínio) decorrente de alagamentos laterais. Neste caso, o modelo estima os valores em função do talude das áreas alagáveis, que pode ser imposto ou estimado a partir da topo-hidrografia dada. Nos trechos de contorno terrestre representando rios ou canais em afluxo, além da prescrição da vazão normal ao trecho de fronteira em questão, há também que se prescrever a componente tangencial, usualmente zero. A direção do fluxo entrando pela fronteira de terra pode ser calculada

automaticamente pelo modelo em função da geometria local fornecida, ou pode ser imposta.

Nos contornos abertos em situações de efluxo basta prescrever uma condição de contorno, que é a variação do nível da água. Entretanto, nas situações de afluxo há necessidade de outra condição além da anterior, sendo freqüente impor-se como nula a componente da velocidade tangencial ao contorno. Como no caso dos contornos terrestres, a direção do fluxo entrando pelo contorno aberto pode ser calculada automaticamente pelo modelo em função da geometria local fornecida, ou pode ser imposta.

3.3. ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

A estratégia de uso do módulo 3D, utilizada para obter o campo de escoamento no presente trabalho foi a que acoplada o módulo 2DH numérico ao módulo 3D analítico-numérico.

Nesse caso, o módulo 2DH do FIST3D calcula ζ, U, V . Em seguida, um módulo analítico-numérico 3D calcula os perfis de velocidade do campo de escoamento horizontal, ou seja, $u(x,y,z,t)$ e $v(x,y,z,t)$. Os dois módulos são acoplados já que as tensões de atrito no fundo para o cálculo do escoamento 2DH depende dos perfis de velocidade 3D, que por sua vez, dependem da solução do escoamento 2DH. Neste caso, as etapas são as seguintes:

Etapa 1.	Resolve o módulo hidrodinâmico 2DH, calculando (ζ, U, V) através da resolução simultânea das equações (Eq. 3.1), (Eq. 3.2) e (Eq. 3.3). Para isso, como apresentado anteriormente, o FIST3D usa um esquema numérico implícito de segunda ordem para a discretização temporal, e elementos finitos com elementos sub-paramétricos Lagrangeanos quadráticos para a discretização espacial. As tensões de atrito no fundo 2DH dependem dos perfis de velocidade 3D calculados nos dois instantes de tempo anteriores. (Deve-se estabelecer uma condição inicial para o primeiro incremento de tempo)
Etapa 2.	Calcula os perfis de velocidade do campo de velocidades na horizontal, $u(x,y,z,t)$ e $v(x,y,z,t)$, através de uma solução analítico-numérica que é função de (ζ, U, V) calculada na etapa 1, da rugosidade equivalente de

	fundo (ζ , e da velocidade do vento na superfície livre (W_{10}).
Etapa 3.	Atualiza os vetores solução de (ζ , U , V , u e v) e retorna à etapa 1 para calcular as soluções para o próximo instante de tempo, repetindo esse procedimento até que o tempo de simulação especificado seja completado.

Note que, o módulo 2DH e o módulo 3D analítico-numérico são acoplados e interdependentes.

Para obter a parte analítica da solução é necessário primeiro obter-se numericamente a posição da superfície livre e as componentes da velocidade média na vertical (ζ , U , V). O perfil de velocidade analítico é dado pela equação 3.11:

$$u_i(z) = \frac{1}{\kappa |u_*|_i} \left[M \frac{\tau_i^B}{\rho_o} \ln \left(\frac{h+z+\varepsilon}{\varepsilon} \right) - \frac{\tau_i^S}{\rho_o} \ln \left(\frac{\zeta-z+\varepsilon}{H+\varepsilon} \right) \right] \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Onde o parâmetro κ é a constante de Von Karman e M é um parâmetro usado para impor a condição de coincidência entre a média vertical do perfil de velocidade 3D e a velocidade 2DH promediada na vertical, é fácil de calcular que M tem que ser dado pela equação 3.12:

$$M = \frac{U_i H \kappa |u_*|_i \rho_o + \left(\tau_i^S \varepsilon \ln \left(\frac{H+\varepsilon}{\varepsilon} \right) - \tau_i^S H \right)}{\left(\tau_i^B (H+\varepsilon) \ln \left(\frac{H+\varepsilon}{\varepsilon} \right) - \tau_i^B H \right)} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Observa-se que, na ausência de ventos, o parâmetro M corresponde à razão entre o fluxo 2DH por unidade de comprimento horizontal e o mesmo fluxo calculada através da integração vertical do perfil de velocidades 3D.

Os parâmetros de entrada necessários para a utilização do resultado acima são: as velocidades promediadas na vertical calculadas no módulo 2DH, e posição da superfície livre e do fundo, a velocidade do vento, W_{10} , e a amplitude da rugosidade equivalente do fundo. Essa solução, satisfaz às mesmas condições de contorno no fundo e na superfície livre do módulo numérico 3D. Além disso, satisfaz a condição da velocidade média do perfil vertical de velocidades (3D) ser igual à obtida numericamente no módulo 2DH.

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Neste capítulo estão apresentados os cenários modelados e os dados ambientais da região necessários à aplicação do modelo hidrodinâmico como batimetria, maré e vento, além das condições iniciais e de contorno.

4.1. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Como o objetivo deste trabalho é avaliar as variações hidrodinâmicas no estuário do rio Potengi, devidas as alterações batimétricas verificadas entre 1981 e 2004, bem como avaliar a influência do vento na sua hidrodinâmica, foram considerados os três cenários de simulação descritos a seguir, caracterizando situações para o ano de 1981 e para o ano de 2004.

Cenário 1: Padrões de correntes gerados por maré usual em situação de calmaria (sem vento).

Neste cenário utiliza-se como forçante maré usual sem vento. A análise é feita abordando os períodos de quadratura e sizígia da maré astronômica.

Cenário 2: Padrões de correntes gerados por maré usual em situação de ventos usuais.

Neste cenário utiliza-se como forçante maré usual com vento de época de estiagem. A análise é feita abordando os períodos de quadratura e sizígia da maré astronômica.

Cenário 3: Padrões de correntes gerados por maré usual em situação de ventos de frente fria.

Neste cenário utiliza-se como forçante maré usual com vento de época de chuvas. A análise é feita abordando os períodos de quadratura e sizígia da maré astronômica.

A adoção do modelo 3D em todos os cenários de simulação apresentados permite a avaliação dos padrões de correntes ao longo da coluna d'água. Desta forma, é possível analisar o comportamento das correntes em diferentes níveis dentro de um mesmo cenário de simulação, assim como entre os três cenários propostos e os efeitos provocados pela ocorrência de ventos usuais e característicos de frente fria e também a ausência destes.

4.2. DADOS NECESSÁRIOS À IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Neste item são apresentados os dados utilizados para a definição dos contornos e para a discretização da malha de elementos finitos. Também são apresentados os seguintes parâmetros ambientais: batimetria, tipo de fundo e rugosidade equivalente, massa específica da água e do ar, marés, vazões dos rios afluentes e condições de ventos consideradas.

4.2.1. Definição do Domínio

O passo inicial para a determinação dos parâmetros ambientais é a definição de um domínio.

Os contornos do estuário do Rio Potengi foram definidos utilizando como base principal as cartas náuticas nº. 802 e 810 de 1981 e 2000 (Figura 4-1) (DHN, 2005), e uma imagem de satélite do Estuário do Rio Potengi (Google, 2005).

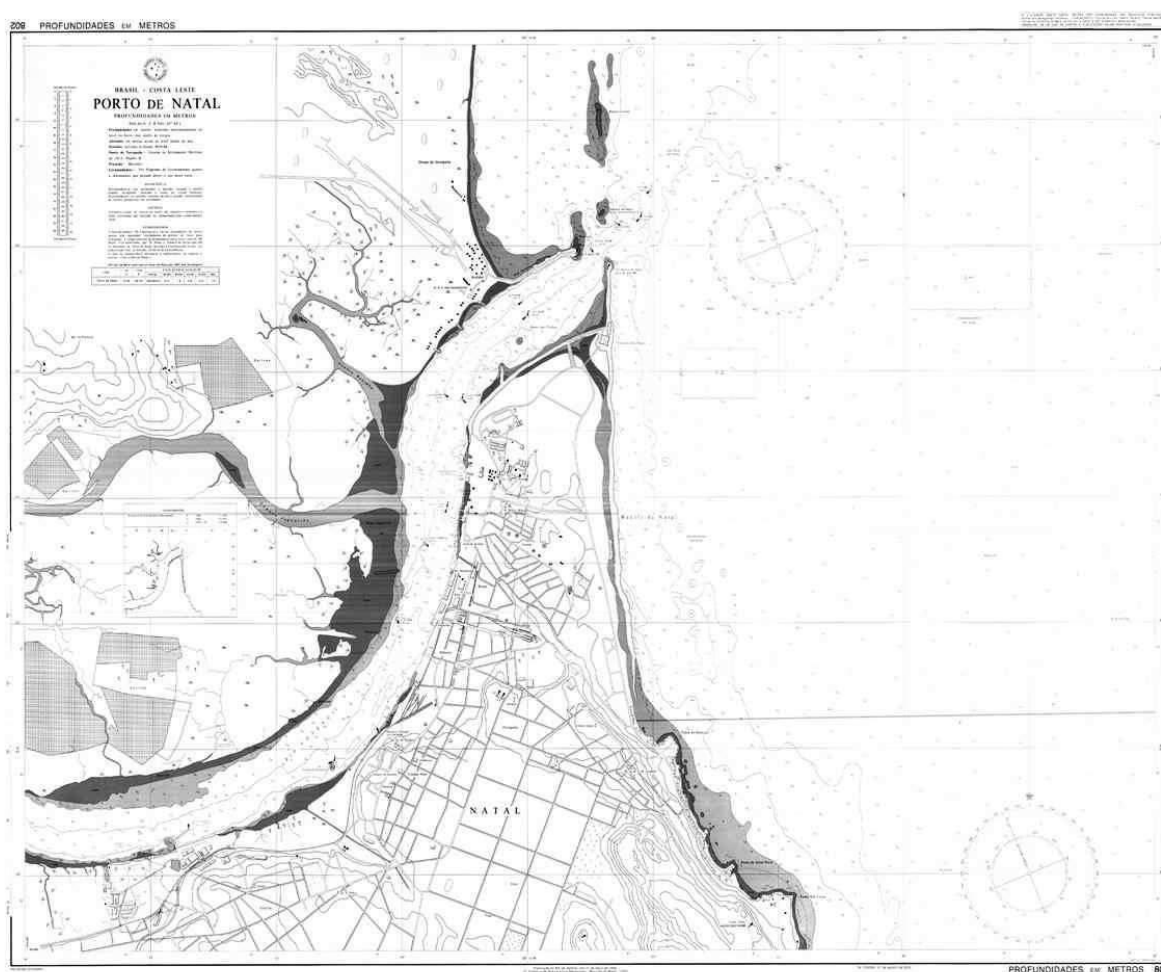


Figura 4-1: Carta Náutica nº. 802 - Porto de Natal. Fonte: DHN, 2005.

4.2.2. Discretização Espacial – Malha de Elementos Finitos

A confecção da malha de elementos finitos foi realizada de forma bastante cuidadosa no sentido de preservar adequadamente os contornos naturais, procurando evitar elementos com grandes distorções geométricas, de modo a garantir uma boa precisão e estabilidade numérica. A densidade dos elementos, assim como as suas dimensões, está de acordo com o grau de detalhamento desejado para os resultados, e com as escalas dos fenômenos de interesse.

O estuário do Rio Potengi foi discretizado através de uma malha que contém 1.147 elementos quadráticos e 5.528 nós (Figura 4-2), sendo que 1.883 fazem parte do contorno de terra, 45 são pertencentes ao contorno aberto e dois de contorno de terra/aberto. Os demais são nós internos. Esta malha foi utilizada para todos os cenários estudados neste trabalho.

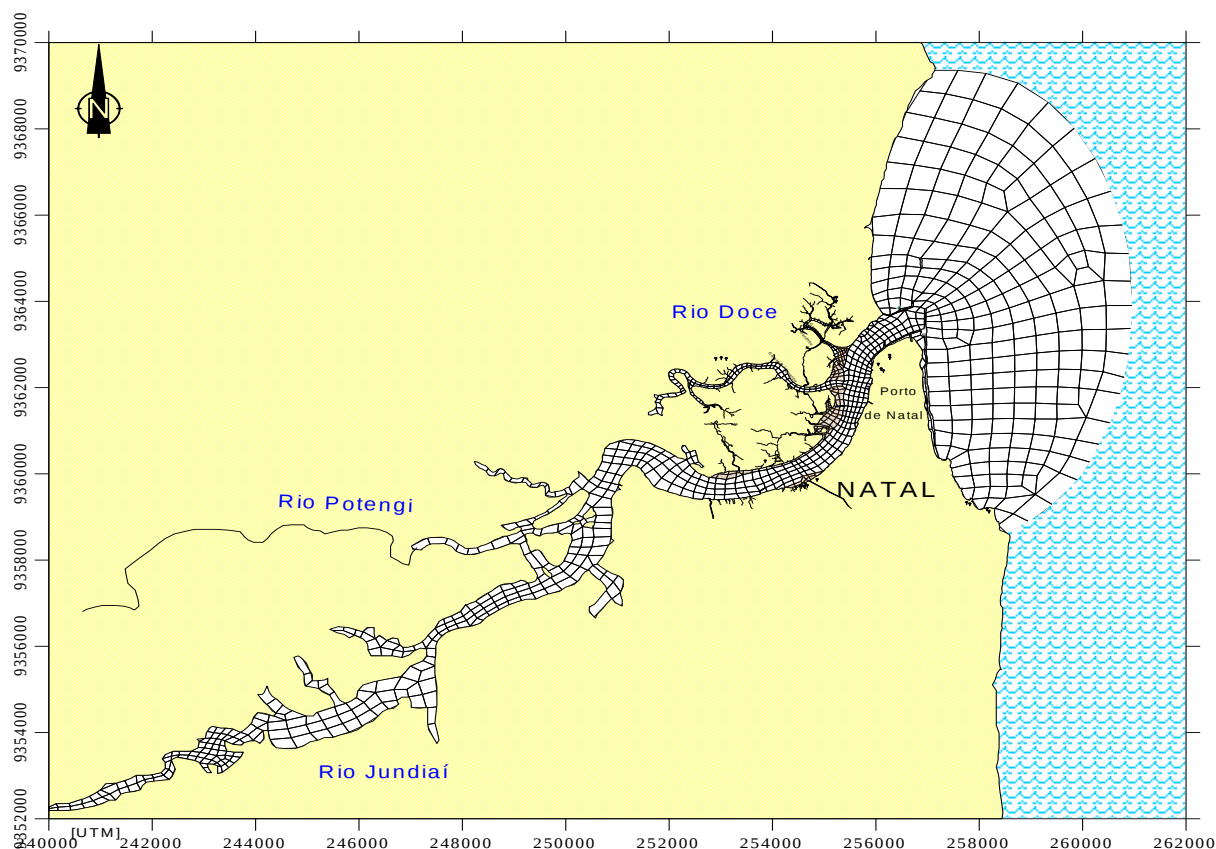


Figura 4-2: Malha de discretização do Estuário do Rio Potengi

4.2.3. Parâmetros Ambientais

Os parâmetros ambientais estão relacionados a características específicas da região em estudo.

Neste item são apresentados os diversos parâmetros que caracterizam o domínio de modelagem e suas condições ambientais.

4.2.3.1. Batimetria

As informações relativas à batimetria utilizadas neste estudo foram obtidas da carta náutica nº. 802 e 810 da DHN para o ano de 1981, e de levantamentos batimétricos realizados pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande, para os anos de 1981 e 2004, respectivamente.

Como a parte fluvial possui uma pequena quantidade de dados de batimetria, foi necessário utilizar profundidades arbitradas, de acordo com dados conhecidos através de campanhas anteriores.

Com base nesses dados, foi possível complementar a batimetria ao longo dos rios Potengi, Doce e principalmente no trecho oeste do Jundiáí. Gerando os mapas das figuras 4-3 e 4-4.

O arquivo contendo os pontos da batimetria e suas respectivas profundidades são importadas pelo modelo e este faz a interpolação dos valores de profundidade para cada ponto pertencente à malha de elementos finitos, a partir das coordenadas (x, y, z) fornecidas.

Os valores de profundidade nos nós da malha de elementos finitos foram calculados pelo modelo através de interpolações usando método de VMP (Vizinho mais próximo), a partir das coordenadas (x, y, z) fornecidas pela batimetria utilizada.

Para evitar que o nível de água durante o processamento do modelo alcance valores negativos, o que é denominado “secagem”, foi preciso impor valores mínimos de profundidade aos registros batimétricos, obtidos a partir da série temporal de elevação do nível do mar na entrada do estuário. O valor calculado considerou as principais componentes harmônicas da maré astronômica no Porto de Natal. A amplitude encontrada para o intervalo de tempo inicial foi de 110,92 cm. Sendo assim, adotou-se este valor como valor inicial mínimo de profundidade dentro do estuário.

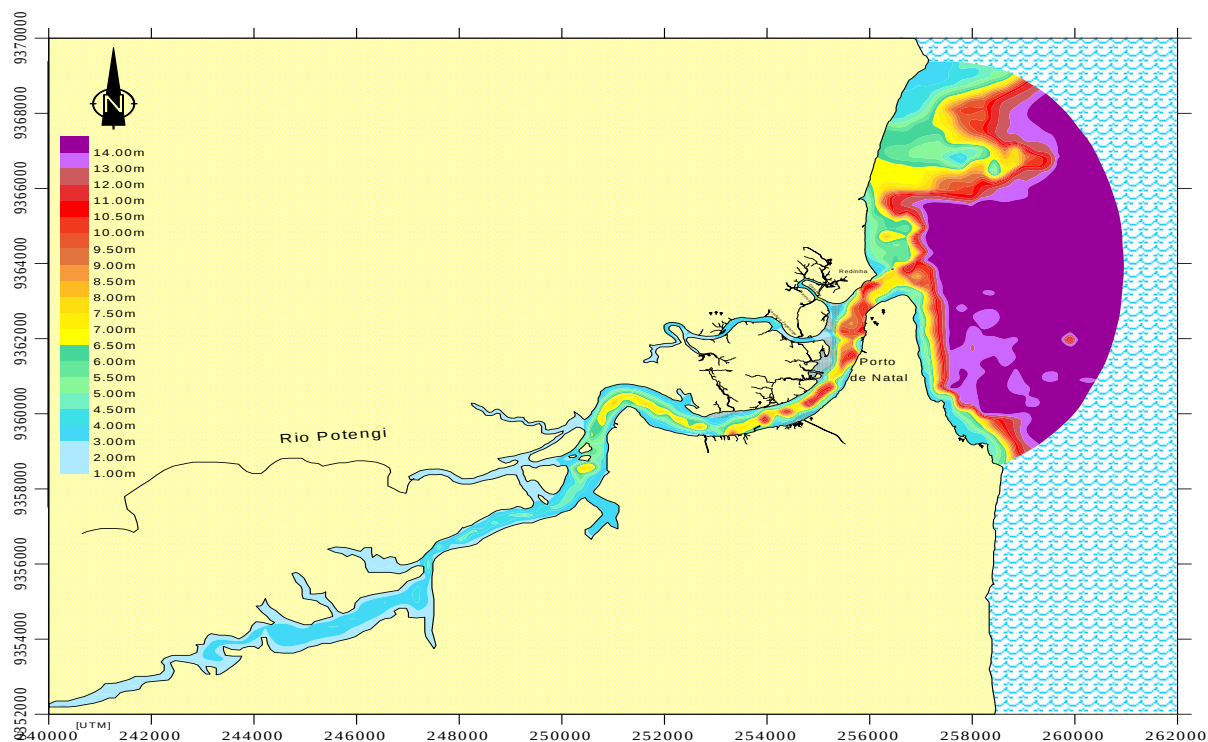


Figura 4-3: Batimetria do domínio de modelagem do Estuário do Rio Potengi, como vista pelo modelo – Ano 1981.

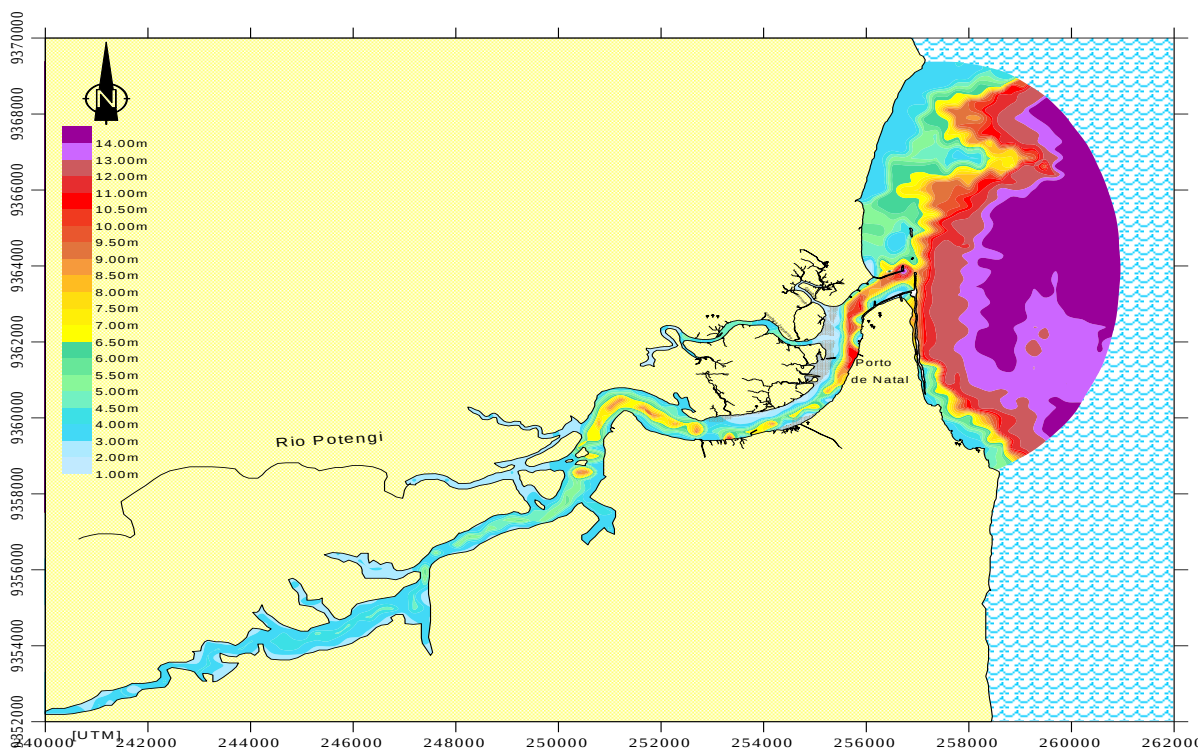


Figura 4-4: Batimetria do domínio de modelagem do Estuário do Rio Potengi, como vista pelo modelo – Ano 2004.

4.2.3.2. Tipo de Fundo e Rugosidade Equivalente

Para a determinação da rugosidade equivalente do fundo é necessário o conhecimento dos sedimentos presentes no leito do corpo de água. A amplitude da rugosidade equivalente do fundo (ε) é função direta do material componente do leito e cujos valores são obtidos a partir da tabela 3.1. A distribuição dos sedimentos adotada no presente trabalho segue a apresentada por Frazão (2003) e Cunha (2004).

Sendo assim, o domínio de modelagem do Estuário do Rio Potengi possui sedimentos de fundo que variam de cascalho, areia e lama e é apresentado na Figura 4-5, havendo o predomínio da fração arenosa sobre toda a área estudada ao longo do Rio Potengi até o mar.

Os valores adotados para a amplitude da rugosidade do fundo são:

- $\varepsilon = 0,01$ m: áreas onde predominam partículas coloidais (lama) (margens próximas a manguezais);
- $\varepsilon = 0,03$ m: áreas onde predominam as areias finas (área do canal central);
- $\varepsilon = 0,05$ m: áreas de cascalho (entre a entrada do estuário e o contorno aberto).

- $\varepsilon > 0,15$ m: áreas com obstáculos (proximidades dos bancos de areia).

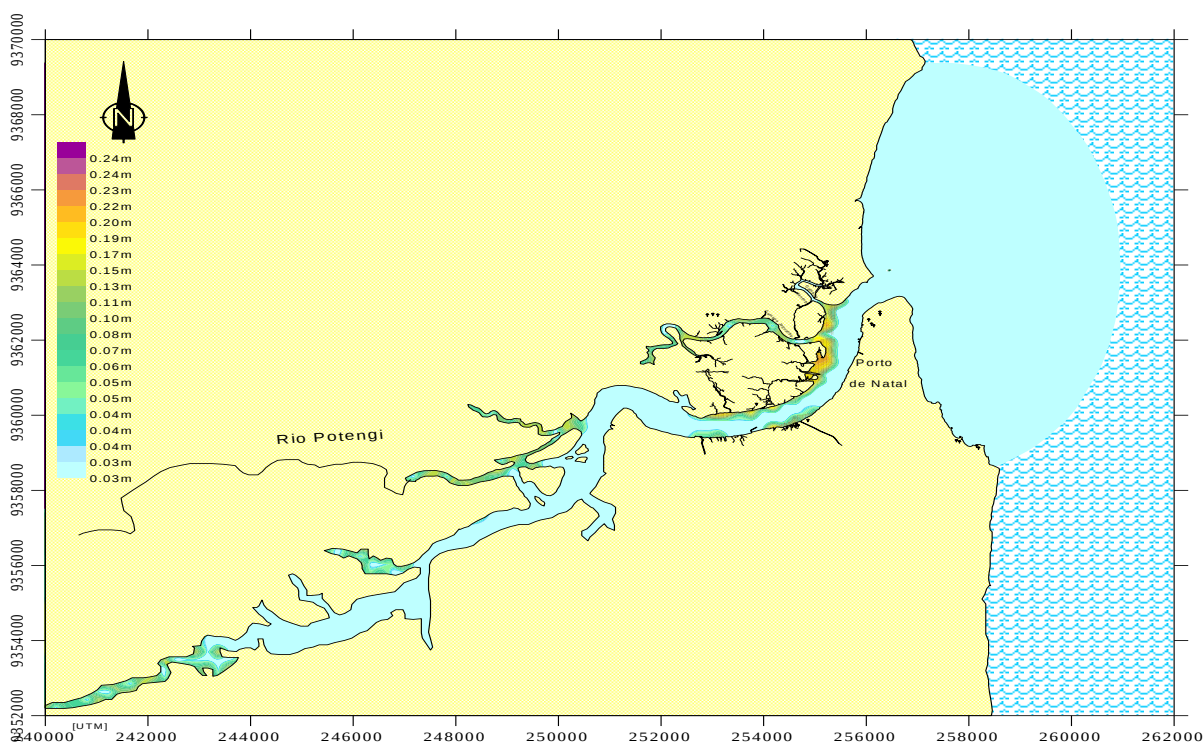


Figura 4-5: Rugosidade de fundo utilizado pelo SisBAHIA

4.2.3.3. Marés

A previsão das alturas de maré é, em geral, feita através de modelo harmônico, baseado no conhecimento de que a maré observada é a soma de N componentes ou *marés parciais*. Cada uma destas marés apresenta um período característico universal. No entanto, cada uma dessas *marés parciais* tem uma amplitude e uma fase única para um determinado local.

A série temporal de elevação do nível d'água devido à maré astronômica adotada neste estudo corresponde a registros obtidos no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) para o Porto de Natal, localizado na cidade do Natal.

Os registros compreendem 24 componentes harmônicas, que estão apresentadas na Tabela 4-2:

As constantes harmônicas das principais constituintes da maré, obtidas na estação maregráfica foram ajustadas para serem utilizadas em todo o domínio de modelagem. Dadas as constantes harmônicas, internamente o modelo hidrodinâmico computa a maré sintética com base na equação 4.1:

$$\zeta = C_0 + \sum_{i=1}^N A_i \sin\left(\frac{2\pi}{T_i} + f_i\right) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde ζ é o nível da maré, C_0 corresponde a cota de nível médio do mar em relação ao nível de referência do modelo, e A_i , T_i e f_i são, respectivamente, a amplitude, o período e a fase de cada uma das N constantes harmônicas utilizadas.

Tabela 4-2 – Constantes Harmônicas Ajustadas utilizadas.

Constante	Período(s)	Amplitude(m)	Fase (rad)
Mf	1180292.29	0.016	0.2443
Q1	96726.08	0.012	21.468
O1	92949.63	0.048	28.449
M1	89399.69	0.005	47.997
P1	86637.20	0.015	39.794
K1	86164.09	0.044	41.015
J1	83154.52	0.002	51.487
OO1	80301.87	0.004	0.1571
MNS2	42430.07	0.005	20.944
2N2	46459.35	0.024	18.850
MU2	46338.33	0.024	20.769
N2	45570.05	0.163	19.897
NU2	45453.62	0.029	20.246
M2	44714.16	0.796	21.642
L2	43889.83	0.024	20.944
T2	43259.22	0.015	23.387
S2	43200.00	0.275	24.784
K2	43082.05	0.078	23.911
MO3	30190.69	0.002	55.676
M3	29809.44	0.005	24.435
M4	22357.08	0.022	59.690
SN4	22176.69	0.003	0.7156
MN4	22569.03	0.008	60.039
MS4	21972.02	0.017	0.2793

Na Figura 4-6 mostra-se a curva de marés gerada como condição de contorno do modelo hidrodinâmico, a partir das constantes do Tabela 4-2. Como pode ser

observado, a cada ciclo de ~24 horas, ocorrem duas marés de altas ou preamares e duas marés baixas ou baixa-mares com amplitude da ordem de 1,10 m. Não foi considerada a maré meteorológica.

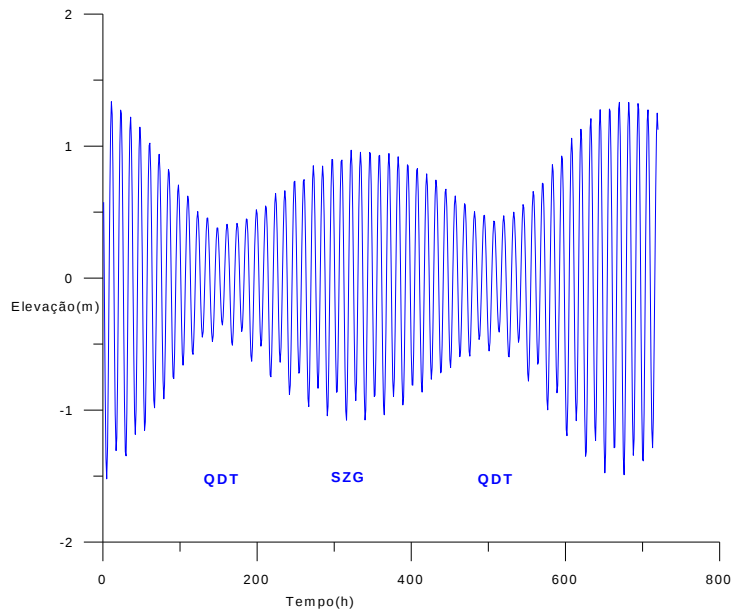


Figura 4-6: Curva de maré astronômica gerada a partir das constantes harmônicas, período de sizígia (SZG) e quadratura (QDT)

O período selecionado para a simulação foi de 14 dias, compreendendo períodos de maré de sizígia e quadratura (Figura 4-7).

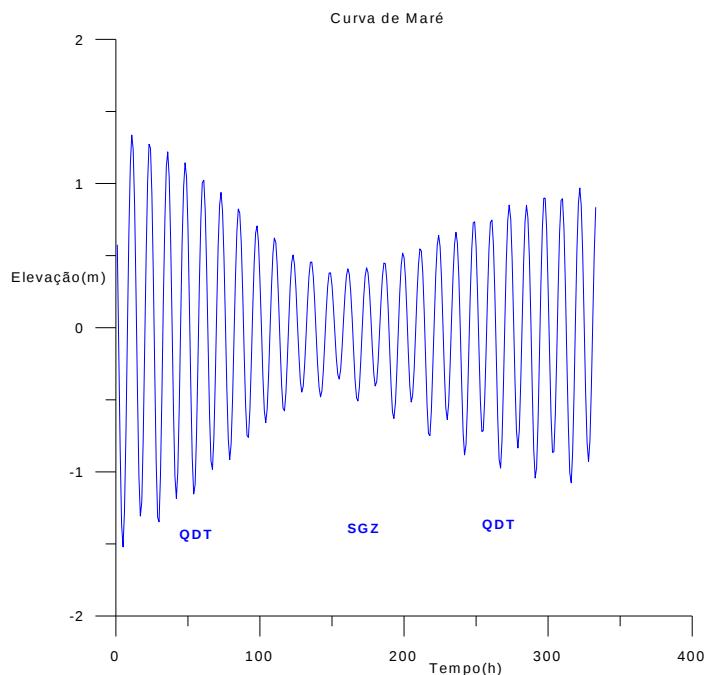


Figura 4-7: Período selecionado da curva de maré astronômica gerada a partir das constantes harmônicas. Os períodos de maré de sizígia (SZG) e de quadratura (QDT)

4.2.3.4. Vazões dos Rios Afluentes

Os rios afluentes ao Estuário do Rio Potengi são o Rio Doce, Rio Jundiaí e Rio Potengi, citados e caracterizados no capítulo 2.

O afluxo de água doce ao Estuário do Rio Potengi não é suficiente para modificar o padrão de circulação das águas do mesmo.

Caracteriza-se como época de chuvas, o mês que obteve a maior precipitação (mm), e de estiagem, o mês que obteve a menor precipitação (mm). As vazões fluviais utilizadas na modelagem foram baseadas em estudos de Araújo (2005) e estão apresentadas na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Vazões Médias

Rio Afluente	Vazões Médias
Doce	2 m ³ /s
Jundiaí	5 m ³ /s
Potengi	5 m ³ /s

4.3.2.5. Ventos

As velocidades médias dos ventos na faixa costeira nordestina, segundo Maia (1998), apresentam em geral valores sensivelmente superiores àqueles observados em pontos mais distantes da costa, mais propriamente nos centros urbanos, atribuindo esta característica ao fato do meio urbano exercer forte influência sobre seu deslocamento.

No litoral oriental do Rio Grande do Norte, sopram ventos predominantemente de sudeste durante grande parte do ano, seguido pelos ventos de sul, com intensidade média de 5,5 m/s.

Os dados de ventos utilizados na modelagem da circulação hidrodinâmica foram selecionados da série de registros horários de direção e intensidade de ventos do ano de 2001, da Estação Meteorológica do Laboratório de Dispositivos Elétricos da UFRN, operada pela EMPARN - Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte. Estes dados estão demonstrados nas figuras 4-8 e 4-9.

Para o cenário de simulação com vento usual, foi selecionado o mês de Setembro de 2001, de onde o período necessário à simulação foi extraído. Este mês foi selecionado por ter a menor precipitação no ano de 2001, caracterizando o mês de estiagem.

Da mesma forma foi feito para o cenário de simulação com ventos característicos de entrada de frente fria. Porém, o mês considerado foi de junho de 2001, de onde foi extraído o período necessário à simulação desta condição. Este mês foi selecionado por ter a maior precipitação no ano de 2001, caracterizando o mês de chuvas.

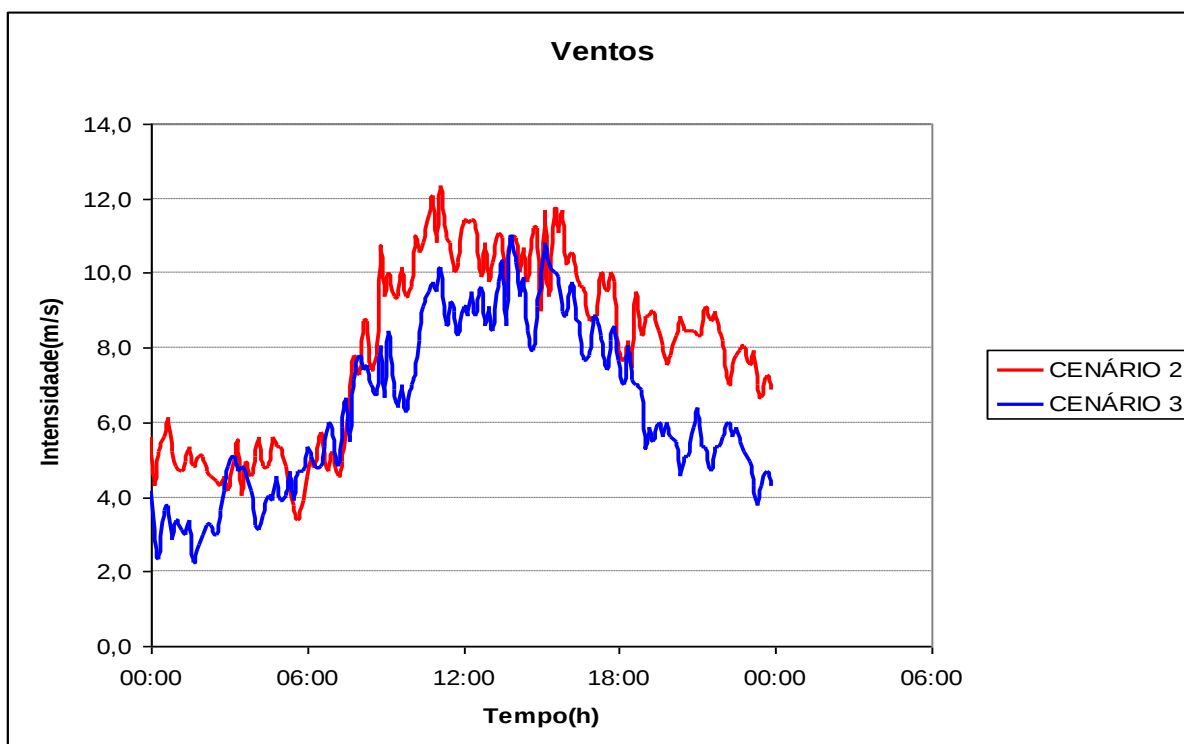


Figura 4-8: Intensidade dos ventos obtidos para a modelagem do Estuário do Rio Potengi.

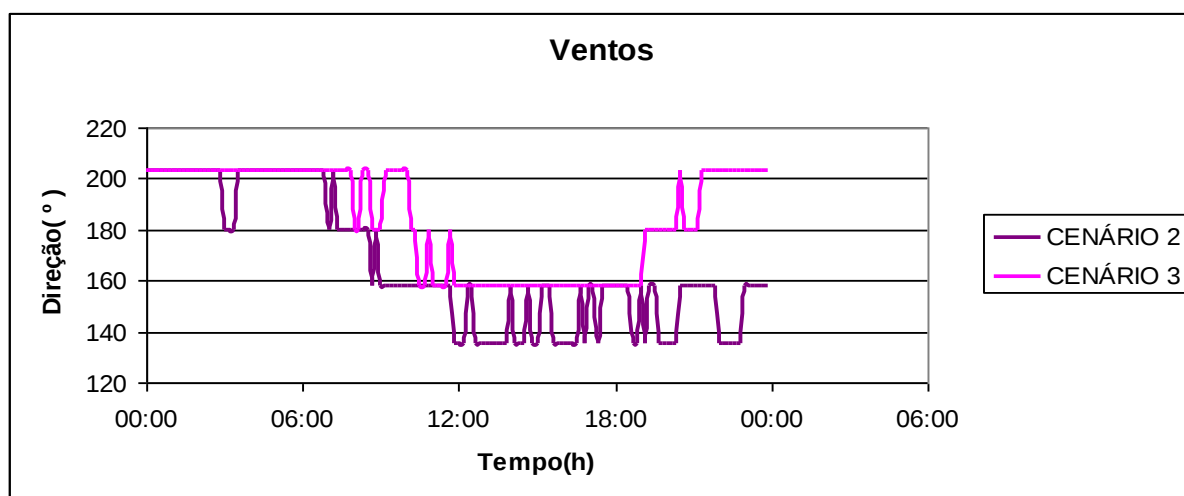


Figura 4-9: Direção dos ventos obtidos para a modelagem do Estuário do Rio Potengi.

4.2.3.6. Massa Específica da Água e do Ar

A massa específica é considerada constante em todo o domínio de modelagem. Foram adotados os seguintes valores para a massa específica de referência da água e do ar.

$$\rho_{\text{água}} = 1.025 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{ar}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

4.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para os estudos dos padrões de circulação hidrodinâmica é necessária a definição das condições de contorno horizontais e verticais.

As condições de contorno horizontais se diferenciam em dois tipos: contornos fechados e abertos.

Em corpos de água naturais, os contornos fechados, ou fronteiras de terra, são prescritos nos nós da malha que fazem fronteira com a terra, caracterizando as margens do corpo d'água e os possíveis afluentes.

Em fronteiras de terra, usualmente, há nós posicionados ao longo das margens, e de eventuais trechos onde ocorrem afluxos ou efluxos. Trechos com afluxos usuais aos domínios de modelagem são seções de rios ou canais, pontos de lançamentos de efluentes.

Para a modelagem hidrodinâmica do Estuário do Rio Potengi foi considerada a existência de rios afluentes, como já mencionado. Assim, como condição de contorno de terra impõe-se velocidade normal nula em nós ao longo das margens consideradas impermeáveis, e prescreveram-se as vazões médias dos rios afluentes. Nos pontos de vazão prescrita, listados no Quadro 4-3, especifica-se o valor normal como sendo o valor desejado e impõe-se como zero a componente tangencial.

Os contornos abertos, ou fronteiras abertas, caracterizam normalmente encontros de massas d'água, representando um limite do modelo mas não um limite real do corpo d'água, como a entrada do Estuário do Rio Potengi, caracterizando convenientemente o encontro das águas do estuário com o mar. Ao longo das fronteiras abertas usualmente impõem-se as elevações de nível d'água.

Direções de afluxo ao domínio através de fronteiras abertas podem ser impostas ou calculadas pelo modelo em função da geometria do contorno. Como em um ponto de afluxo os efeitos da direção do fluxo só afetam de fato as proximidades do ponto, e são irrelevantes para a circulação no interior do Estuário do Rio Potengi, optou-se por adotar as direções de afluxo. As elevações de superfície livre prescritas são obtidas a partir dos dados de maré apresentados anteriormente, conforme seção

4.4. CONDIÇÕES INICIAIS

Para a simulação da circulação hidrodinâmica através da utilização do SisBAHIA é necessário fornecer apenas as condições iniciais 2DH. Assim, para o instante inicial de simulação t_0 , os valores da elevação da superfície livre, ζ , e as componentes da velocidade 2DH, U e V , para todos os nós do domínio necessitam ser fornecidos.

Com o objetivo de se estabelecer condições iniciais para a simulação de 14 dias, foi feita uma simulação prévia de 12 horas com “partida fria”. Tal termo refere-se a uma condição inicial com nível plano e velocidades nulas. Neste estudo, adotou-se um nível plano equivalente à preamar de uma maré de sizígia média. Por se tratar de um corpo de água relativamente pequeno e com escoamento fortemente barotrópico, observa-se que o modelo entra em regime em menos de três ciclos de maré. Os resultados desta simulação prévia geraram as condições iniciais para uma “partida aquecida”, com ζ_0 , U_0 e V_0 variados.

A escolha do nível de preamar para partida a frio deve-se ao fato do estuário do Rio Potengi apresentar ondas de maré predominantemente estacionárias. Assim sendo, é natural que a intensidade das correntes seja muito baixa nos instantes próximos às preamares e baixa-mares. Conseqüentemente, exceto nos trechos fluviais, a escolha de nível de preamar com velocidades nulas, forma uma condição inicial bastante razoável.

Para facilitar a observação dos resultados foram distribuídas algumas estações ao longo da região em estudo, de forma a contemplar todas as possíveis variações no escoamento, englobando o trecho fluvial, estuarino e marítimo. As estações em azul estão relacionadas ao modelo hidrodinâmico.

CAPÍTULO V

ESTUDO DA VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

Os resultados da modelagem hidrodinâmica, referentes à elevação do nível do mar, velocidade e direção de corrente são apresentados ao longo de 10 estações posicionadas de forma a representar diferentes regiões do domínio modelado do estuário do Rio Potengi.

Neste capítulo serão apresentados os resultados da variação do nível do mar. Já os resultados de velocidade e direção de corrente serão dispostos no capítulo VI.

A Tabela 5-1 e a Figura 5-1, mostrados a seguir, identificam as estações e indicam as suas localizações no domínio da modelagem.

Tabela 5-1 – Número e localização das estações no domínio modelado.

ESTAÇÃO	LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO
1	Fronteira Aberta (de mar)
2	Foz do Potengi
3	Entrada do Estuário
4	Banco de Areia
5	Porto de Natal
6	Riacho do Baldo
7	Curva do Rio Jundiaí
8	Estreito do Rio Jundiaí
9	Próximo a Montante do Rio Jundiaí
10	Montante do Rio Jundiaí

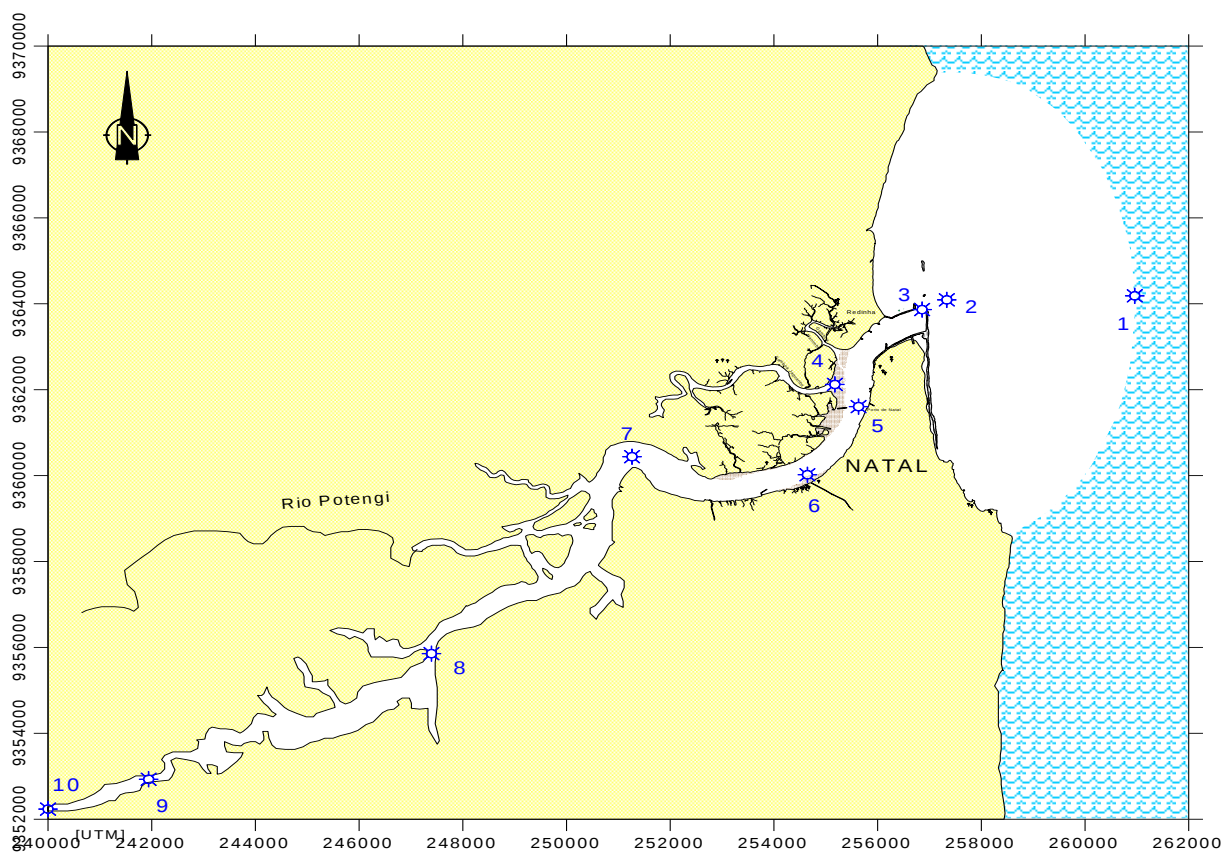


Figura 5-1: Localização das 10 estações nas quais foram registradas resultados em forma de series temporais de valores.

5.1. ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

Com o objetivo de se verificar como se propaga a onda de maré no interior do Estuário do Rio Potengi, inicialmente foram selecionadas as estações 1, 2, 5 e 10, observando os resultados obtidos para todo o período de simulação. A Figura 5-2 apresenta estes resultados (cenário 1 – sem vento) no período de 58 h e 98 h da simulação (maré de sizígia).

Foram feitas simulações para a batimetria de 1981 e 2004, e que os resultados dos cenários foram semelhantes, por isso apenas os resultados de 2004 serão apresentados.

– Ano 2004

A Figura 5-2 apresenta estes resultados (cenário 1 – sem vento) no período de 58 h e 98 h da simulação (maré de sizígia). Com isto, pode-se perceber claramente o aumento da amplitude à medida que a onda de maré se propaga no interior do estuário, assim como as diferenças de fase ao longo do percurso. As estações utilizadas como referência estão apresentadas na Figura 5-1.

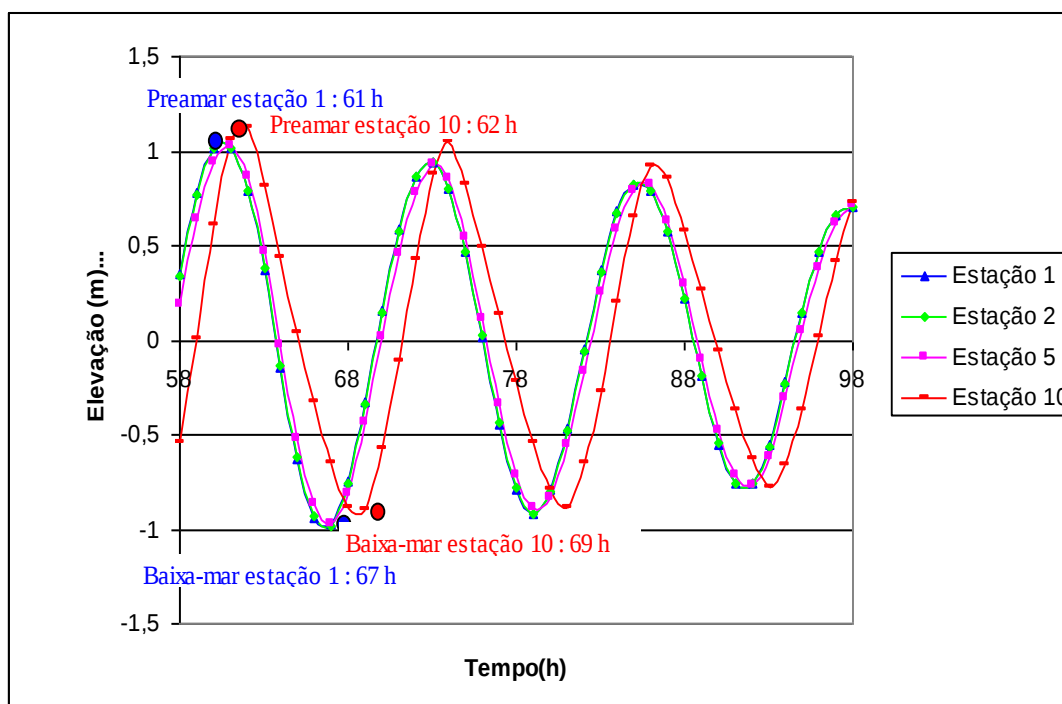


Figura 5-2: Elevação do nível d'água nas estações de controle: 1-fronteira aberta, 2-Entrada no estuário, 5-Porto de Natal e 10-Montante do Rio Jundiáí, para o período de sizígia entre 58 h e 98 h de simulação, cenário 1.

O período de tempo selecionado para a análise da elevação do nível d'água é o compreendido entre a preamar 61 h e a baixa-mar 69 h. Estes instantes de tempo estão destacados na Figura 5-2.

Para o cenário 1 – sem vento, a diferença de nível d'água dentro do domínio de modelagem da estuário do Rio Potengi para o mesmo instante de observação também pode ser percebido através da Figura 5-3, mostrada a seguir. Nela estão apresentadas as isolinhas de elevação nos instantes de ocorrência da preamar 219.600 s (61 h) referente à estação 1, e preamar 223.200 s (62 h) referente à estação 10.

Da mesma forma, a Figura 5-4 mostra as isolinhas de elevação para o instante de ocorrência da baixa-mar 241.200 s (67 h) referente à estação 1, e baixa-mar 248.400 s (69 h) referente a estação 7.

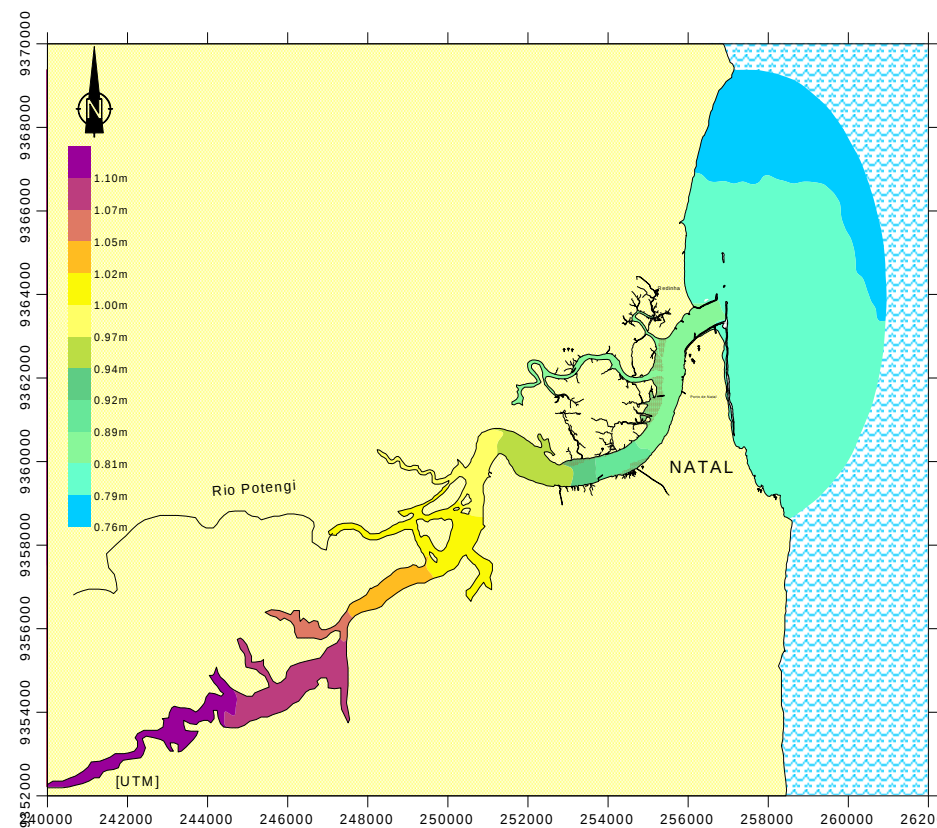
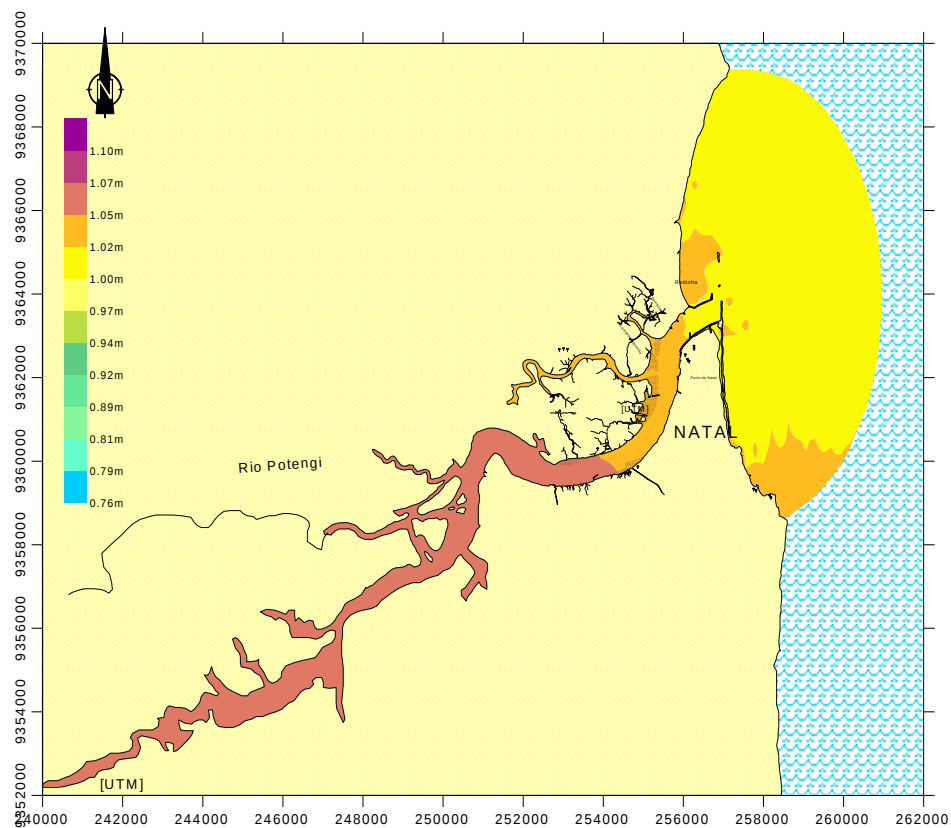


Figura 5-3: Resultados de elevação (m) para o instante de preamar: a) na estação 1 (219.600 s – primeira) e b) na estação 10(223.200 s – segunda), cenário 1.

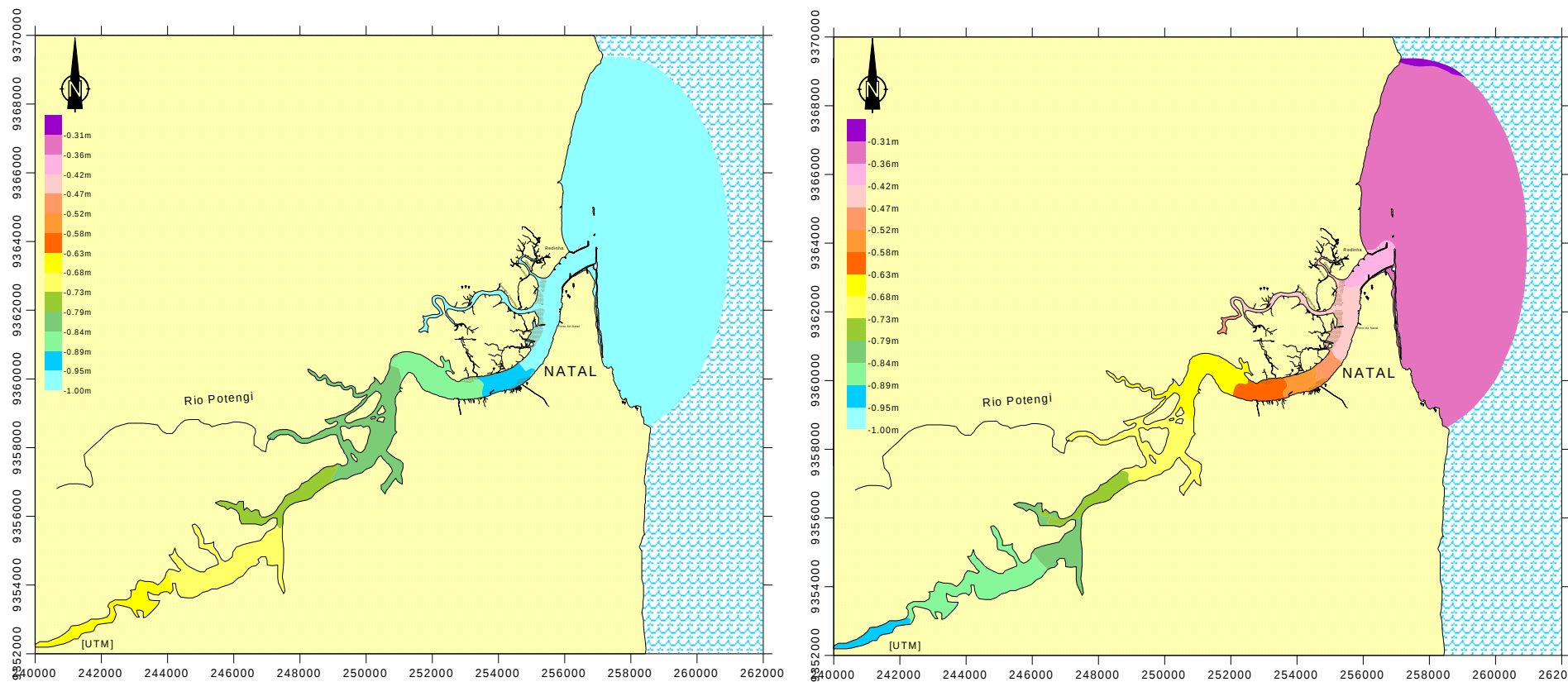


Figura 5-4: Resultados de elevação (m) para o instante de baixa-mar: a) na estação 1 (241.200s – primeira) e b) na estação 10 (248.400 s – segunda), cenário 1.

Quando a preamar ocorre na porção oeste do estuário do Rio Potengi nota-se um maior gradiente de elevação do nível d'água no domínio de modelagem do que o observado quando ocorre a preamar na porção leste do estuário do Rio Potengi, conforme apresentado na Figura 5-3. No primeiro instante da baixa-mar (241.200s), essa condição não é verificada, mas para o segundo instante (248.400s), a condição de maior gradiente de elevação do nível d'água conforme a Figura 5-4.

Isto decorre do aumento da amplitude da onda de maré quando esta entra no Estuário do Rio Potengi, tornando os níveis de preamares mais elevados e os de baixa-mares mais baixos à medida que se avança para o interior do sistema estuarino.

Para a visualização da variação da elevação ao longo do estuário do Rio Potengi, foi traçada uma linha, chamada fatia LO, que parte da fronteira aberta do domínio (ponto L) em direção ao interior do estuário (ponto O), no sentido leste - oeste-, como apresentado na Figura 5-5.

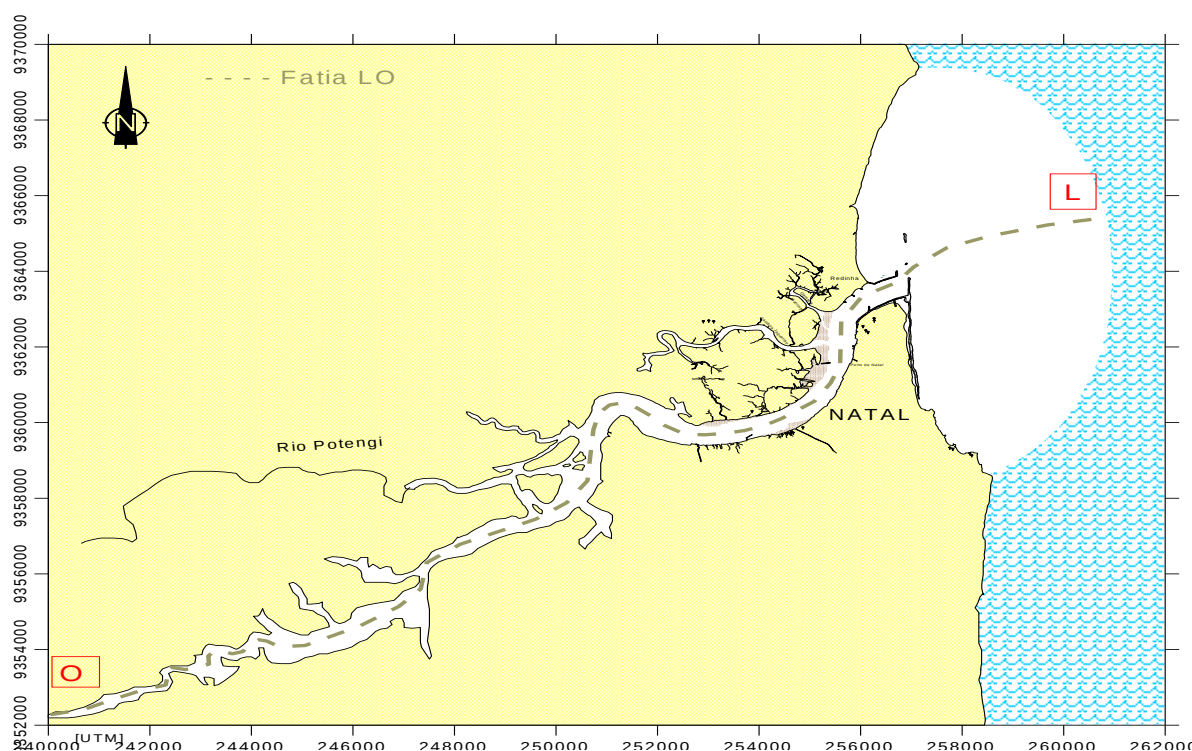


Figura 5-5: Fatia LO traçada no domínio de modelagem do Estuário do Rio Potengi para análise de elevação.

O gradiente de elevação da superfície livre ao longo do domínio pode ser verificado também através das Figura 5-6 e Figura 5-7, nas quais estão apresentados os resultados de elevação do nível d'água ao longo da fatia LO, para a

ocorrência da preamar e baixa-mar, respectivamente. Com estas figuras também é possível verificar como o gradiente de elevação da superfície livre é maior quando ocorre a preamar ou baixa-mar na porção oeste do Estuário do Rio Potengi.

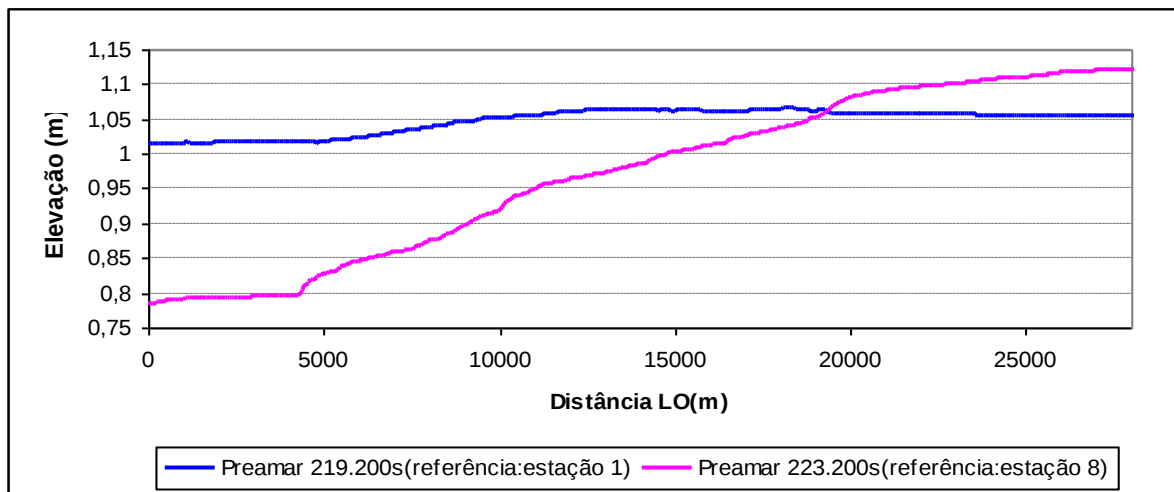


Figura 5-6: Elevação ao longo da linha LO traçada, partindo da fronteira aberta indo até a montante do Rio Jundiá (O) , em instantes de preamar nas estações 1 e 10, cenário 1.

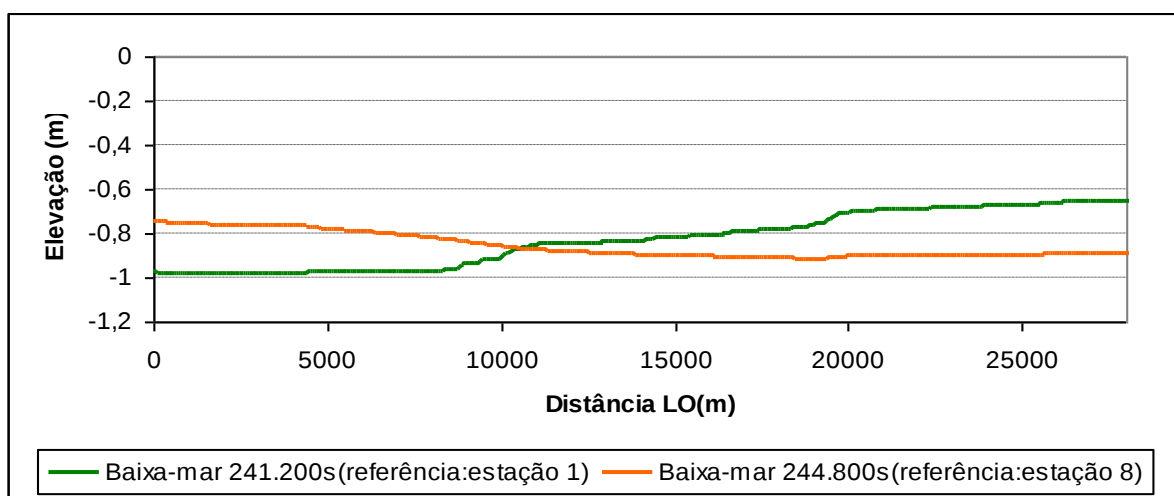


Figura 5-7: Elevação ao longo da linha LO traçada, partindo da fronteira aberta indo até a montante do Rio Jundiá (O) , em instantes de baixa-mar nas estações 1 e 10, cenário 1.

A Figura 5-8, apresentada a seguir, reúne as informações contidas nos gráficos da Figura 5-6 e Figura 5-7, e novamente é possível identificar o aumento da amplitude da maré quando esta avança dentro do domínio de modelagem do EP. A região próxima ao ponto O apresenta maior diferença entre os níveis de preamar e baixa-mar que a região próxima ao ponto L.

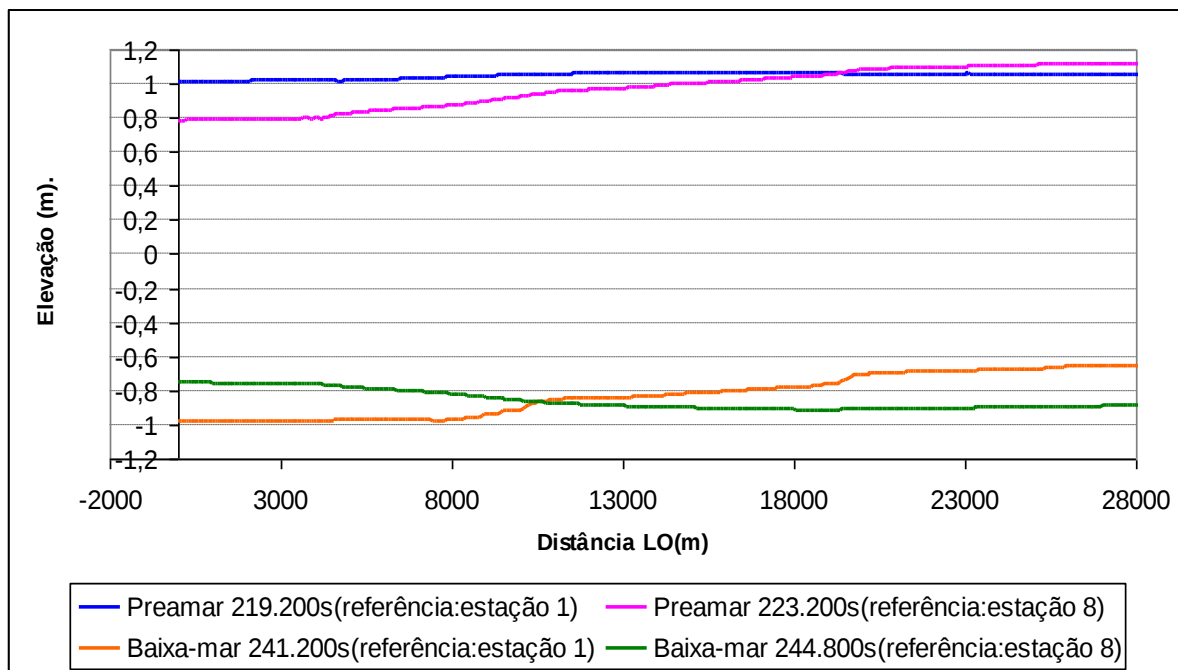


Figura 5-8: Instantes de preamar e baixa-mar nas estações 1 (219.200 s e 241.200 s) e estação 10 (223.200 s e 249.400 s), cenário 1.

Os resultados horários de elevação ao longo da linha LO foram analisados no período de 13 horas na maré de sizígia, compreendendo um ciclo completo de maré, entre os instantes 219.600 s (61 h) e 266.400 s (74 h). Desta forma, todos os instantes anteriormente apresentados estão incluídos nesta análise. A Figura 5-9 apresenta a variação de elevação do nível d'água neste período.

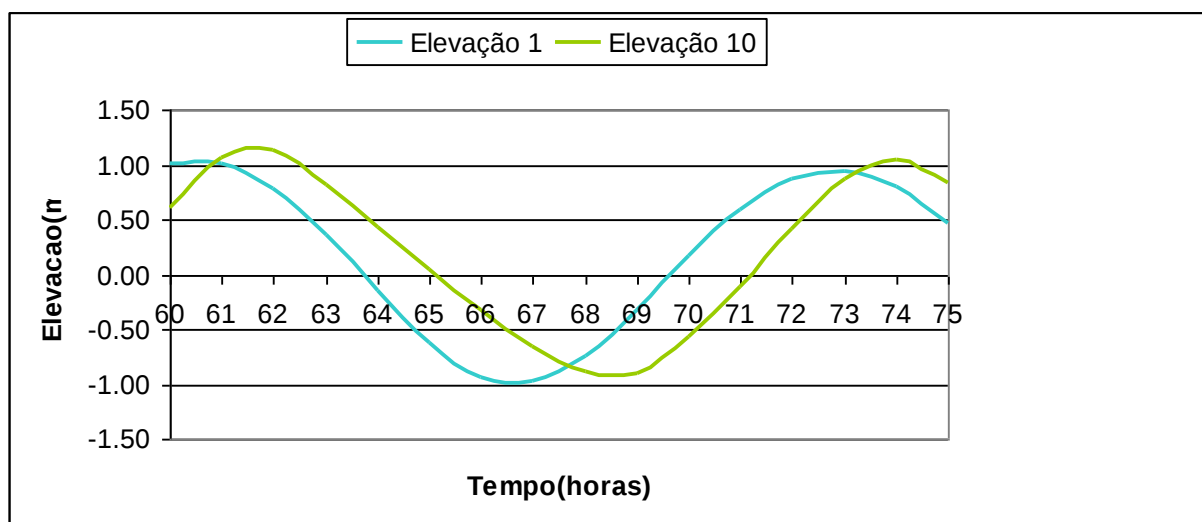


Figura 5-9: Elevação no período de 13 horas compreendido entre os instantes 61 h e 74 h, nas estações 1 (fronteira aberta) e 10 (parte oeste do estuário), cenário 1.

Os resultados horários de elevação ao longo da fatia LO estão apresentados na Figura 5-10, mostrada a seguir.

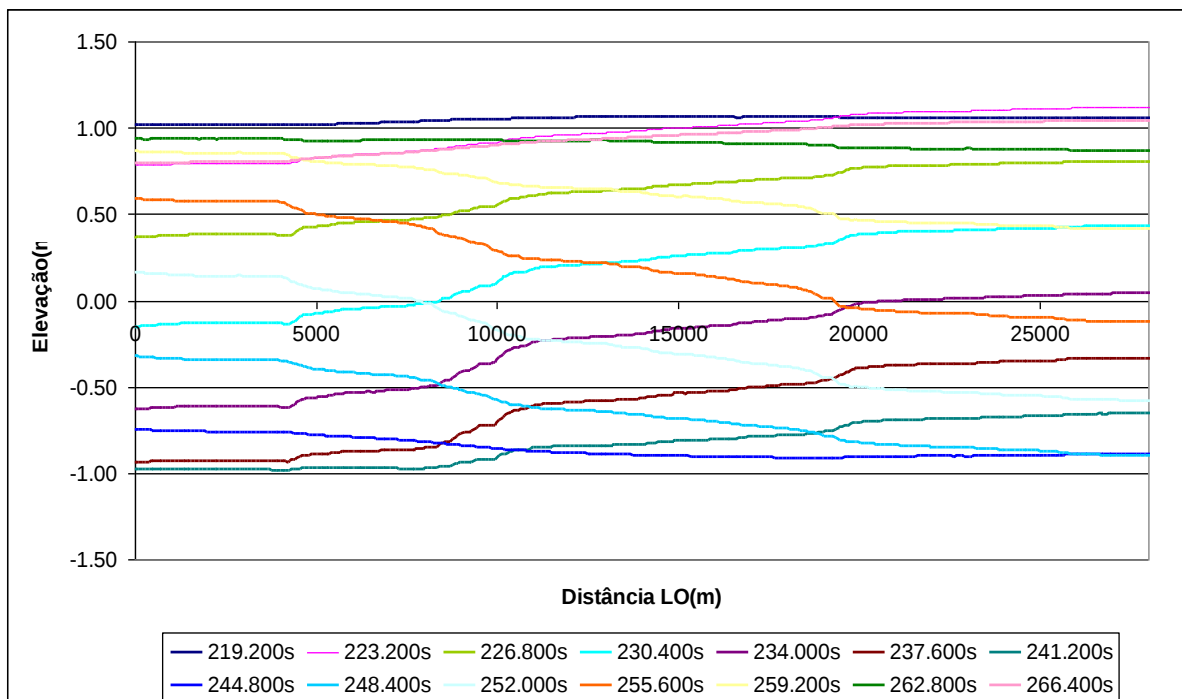


Figura 5-10: Resultados horários de elevação ao longo da linha LO no período de 14 horas (219.200 s até 266.400 s), cenário 1.

Partindo do ponto L, nota-se que nos quatro primeiros quilômetros pouco se percebe a influência do estuário do Rio Potengi na variação da elevação do nível d'água, pois estes permanecem praticamente constantes para um mesmo instante de observação. A partir desta região, começa a surgir um gradiente de elevação ao longo da linha LO. Esta informação pode ser utilizada para definição da entrada do Estuário do Rio Potengi, já que é na região localizada na foz do Rio Potengi ~ 4 km ao norte da fronteira aberta, que os efeitos do Estuário do Rio Potengi começam a ser percebidos pelo escoamento.

Para o cenário 2 – vento usual, o gráfico na Figura 5-11 mostra os resultados no mesmo período (entre 58 h e 98 h) da simulação (sizígia).

Para o cenário 3 – vento de frente fria, o gráfico na Figura 5-12 apresenta os resultados no mesmo período (entre 58 h e 98 h) da simulação (sizígia).

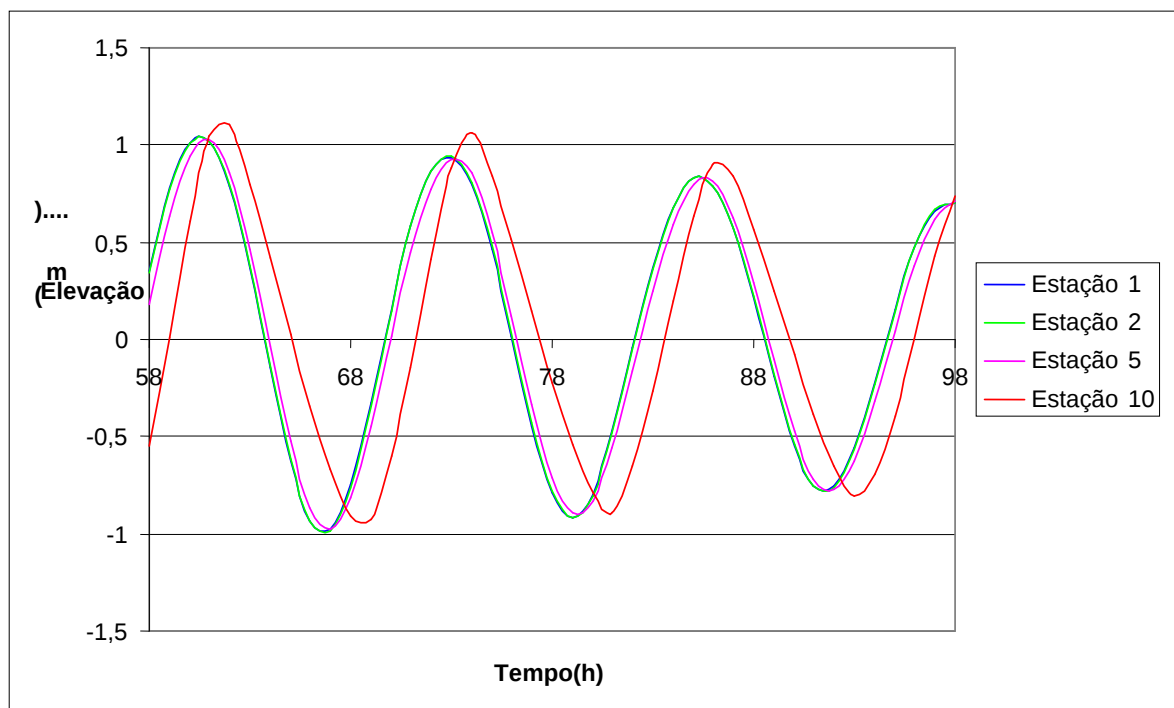


Figura 5-11: Elevação do nível d'água nas estações de controle 1 (fronteira aberta), 2 (entrada no estuário), 5 (Porto de Natal) e 10 (montante do estuário) para o período de sizígia entre 58 h e 98 h de simulação, cenário 2.

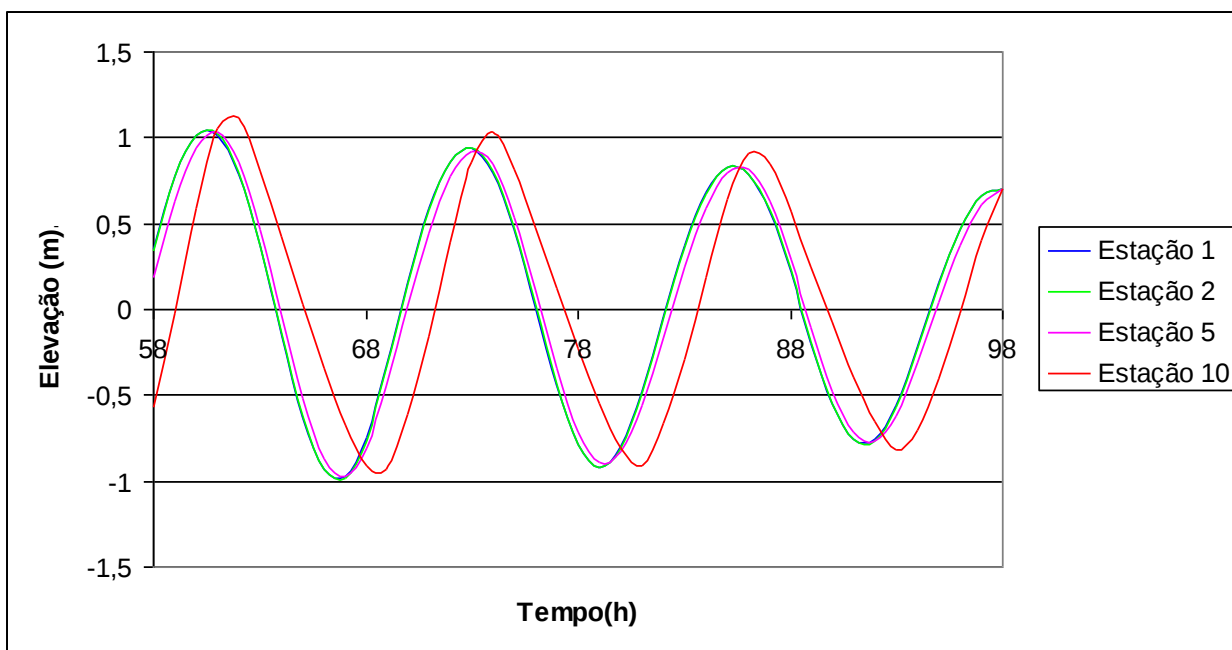


Figura 5-12 Elevação do nível d'água nas estações de controle 1 (fronteira aberta), 2 (entrada no estuário), 5 (Porto de Natal) e 10 (montante do estuário) para o período de sizígia entre 58 h e 98 h de simulação, cenário 3

Conforme pode ser observado na Figura 5-2, Figura 5-11 e Figura 5-12, a ocorrência de ventos, usuais ou característicos de frente fria, causa pequena

alteração na elevação do nível d'água confrontados com resultados do cenário 1 – sem vento.

Esta mudança no nível d'água provocada pela ocorrência de ventos no domínio de modelagem do EP está apresentada em gráficos para cada estação de controle. Assim, é possível observar o comportamento do nível d'água em uma determinada estação, para cada cenário de simulação.

A Figura 5-13 apresenta os resultados de elevação nos três cenários para a estação 1, considerando o mesmo período analisado no cenário 1. E assim também para as estações 2, 5 e 10, na Figura 5-14, Figura 5-15 e Figura 5-16, respectivamente.

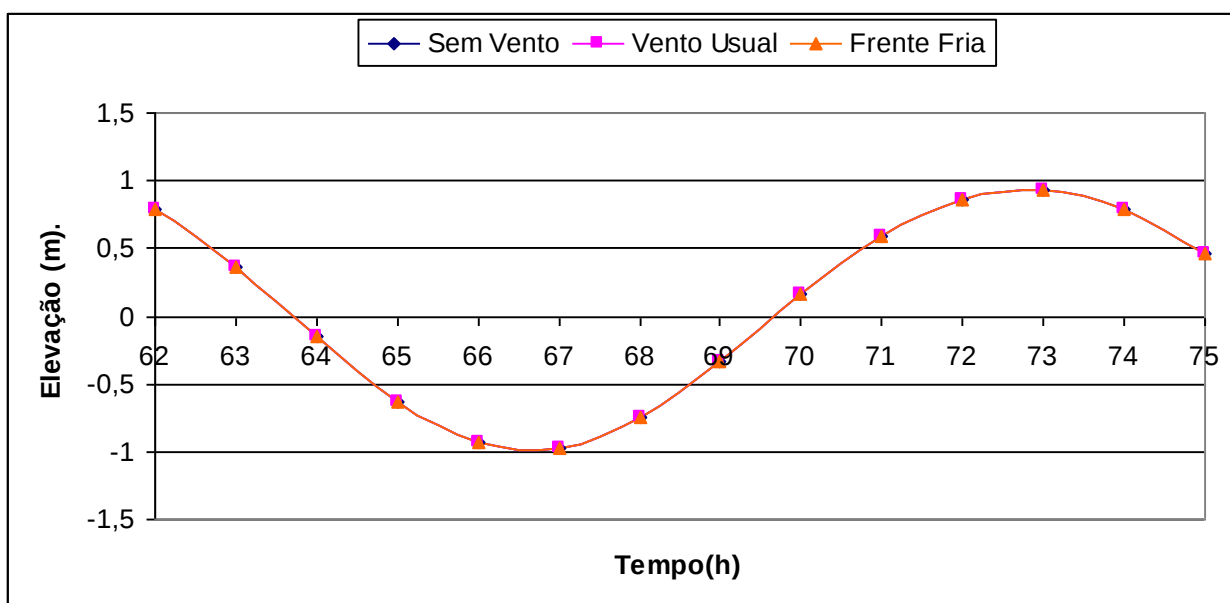


Figura 5-13: Resultados da simulação para a estação 1 (fronteira aberta), nos cenários 1-sem vento, 2- vento usual e 3- frente fria.

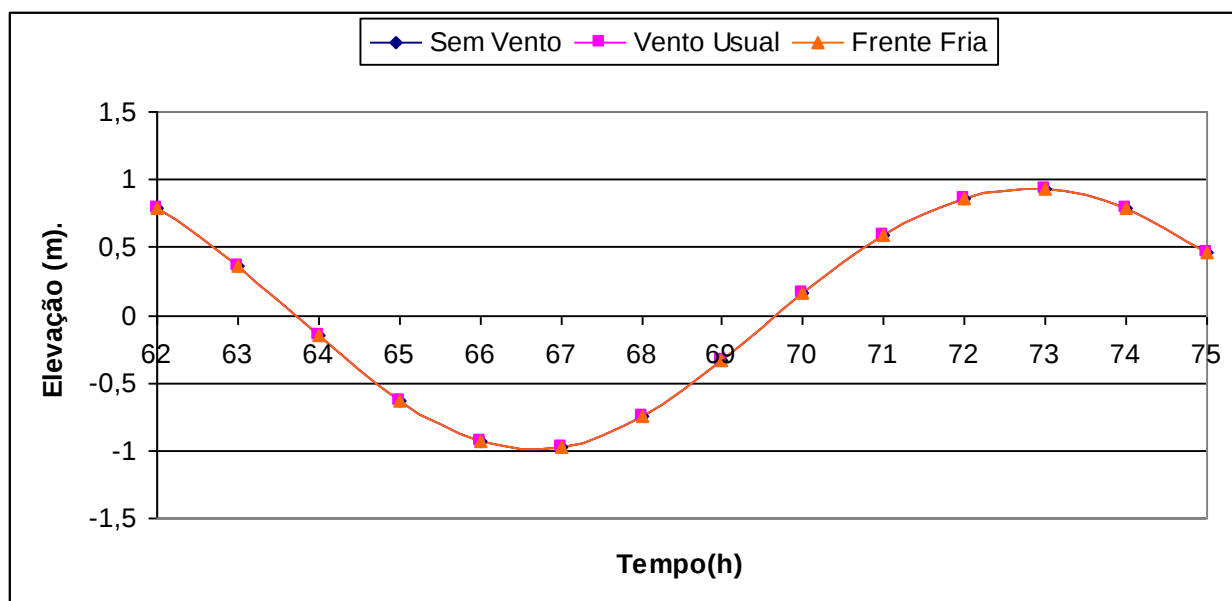


Figura 5-14: Resultados da simulação para a estação 2 (entrada do estuário), nos cenários 1-sem vento, 2- vento usual e 3- frente fria.

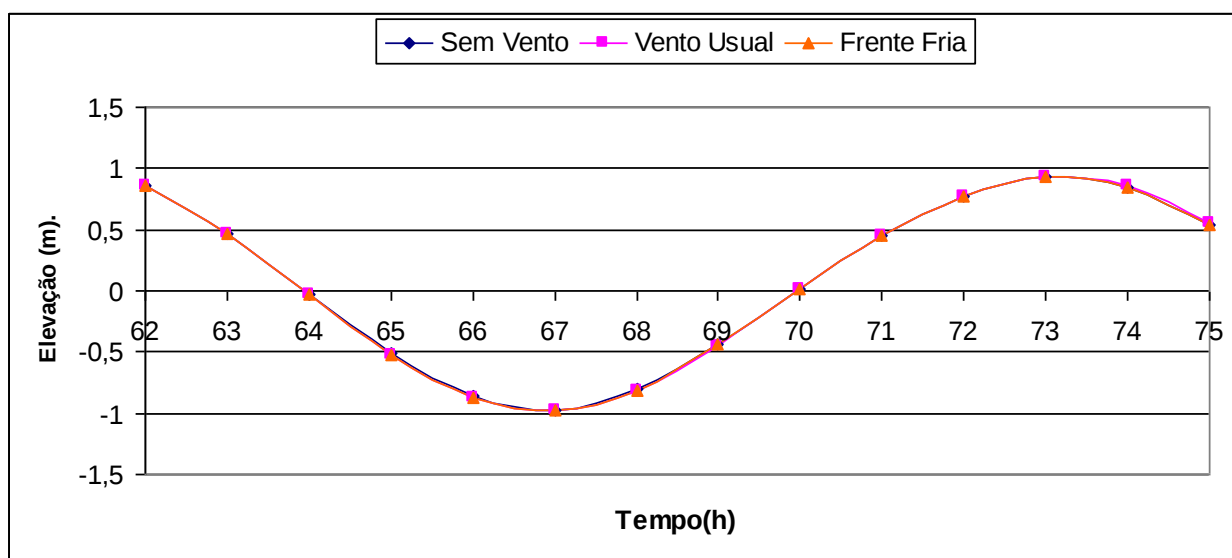


Figura 5-15: Resultados da simulação para a estação 5 (Porto de Natal), nos cenários 1-sem vento, 2- vento usual e 3- frente fria.

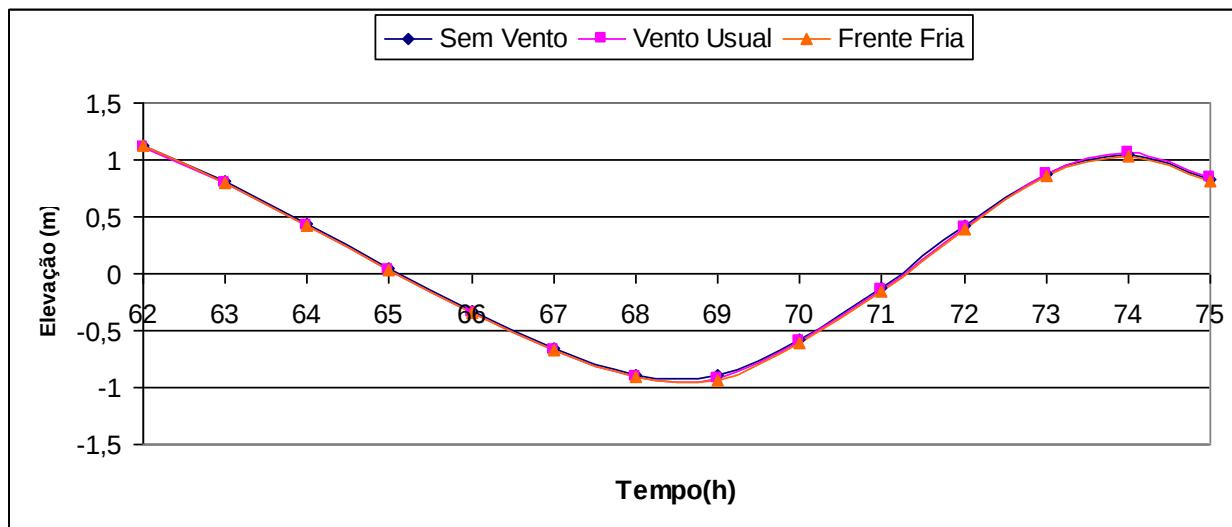


Figura 5-16: Resultados da simulação para a estação 10 (Norte do estuário), nos cenários 1-sem vento, 2- vento usual e 3- frente fria.

O gráfico apresentado na Figura 5-13 refere-se à estação 1, que está situada na fronteira aberta do domínio. Assim, os resultados de elevação registrados nesta estação são os dados prescritos de entrada e por isso não há diferença entre os cenários de simulação.

Nas demais estações de controle, pode-se observar que a ocorrência de ventos seja o mesmo usual ou de frente fria, não altera significativamente a elevação dos níveis d'água no período estudado, havendo pequena alteração nos instantes próximos a preamar e baixa-mar nas estações 5 e 10. Para a estação 10, há um deslocamento da curva, i.e. uma alteração do período em uma hora.

5.2 Comparação de valores selecionados

Os gráficos a seguir apresentam séries temporais de elevações de nível de água e a análise comparativa para a batimetria de 1981 e 2004, dos quais se destacam os seguintes pontos:

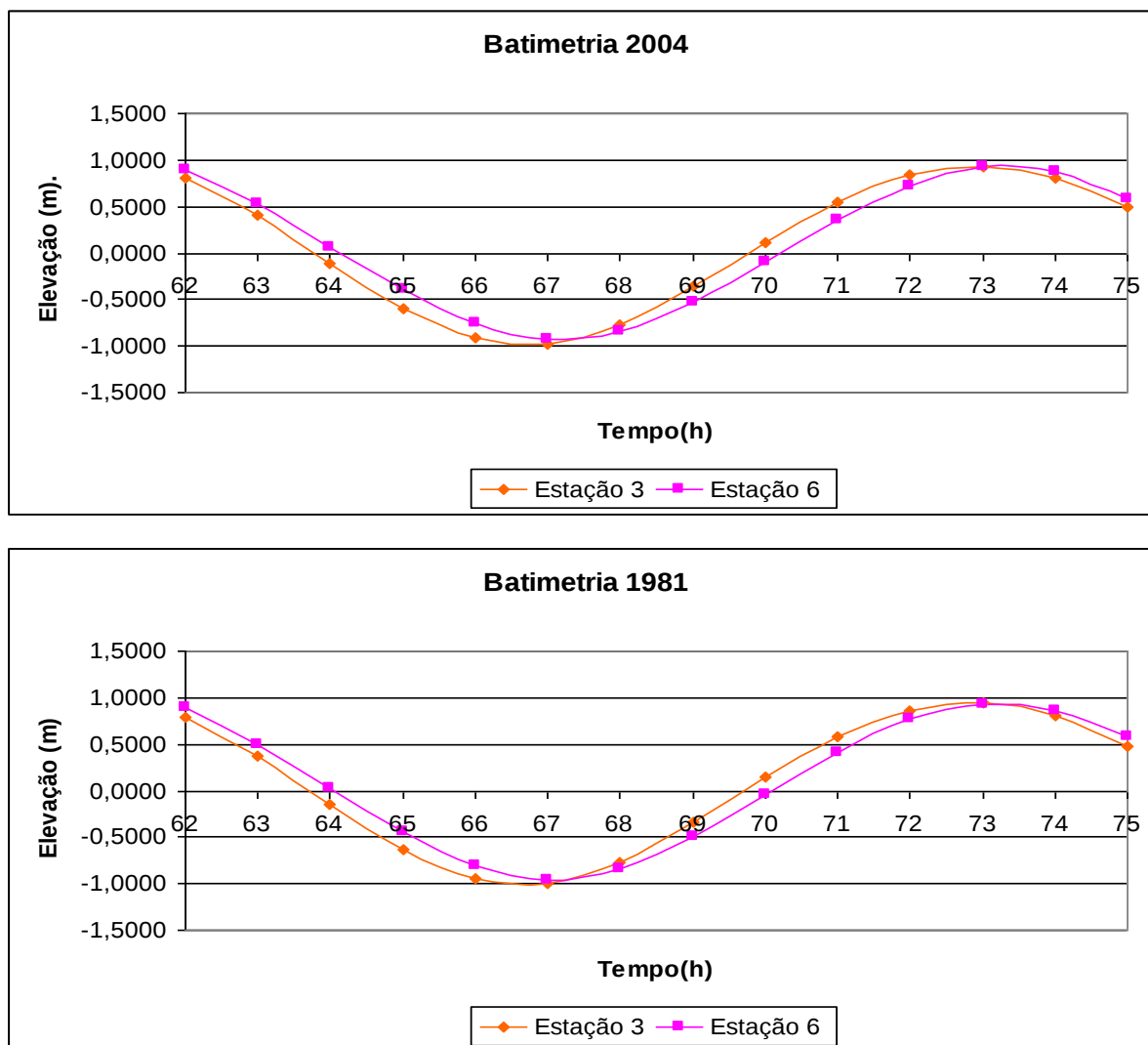


Figura 5-17: Variação da maré em dois pontos no estuário do Rio Potengi. Acima com batimetria de 1981 e abaixo com batimetria 2004, cenário 3.

- Na figura 5-17 pode-se verificar que o efeito da variação batimétrica na variação dos níveis de maré no estuário do Rio Potengi seria muito pequeno.
- Nota-se que os níveis na entrada do estuário passaram a apresentar uma amplitude um pouco maior, percebendo também o mesmo comportamento para a estação do Riacho do Baldo (estação 6). Isso ocorre porque com a batimetria maior permite que um volume de água consideravelmente maior possa fluir da entrada do estuário do Rio Potengi para o corpo principal do estuário.
- Os efeitos acima mencionados parecem contraditórios. Mas, de fato, a desobstrução obtida com a batimetria de 2004, propiciou um pequeno aumento no prisma de maré, i.e., no volume de água do mar que entra no estuário durante a enchente.

- A figura 5-18 mostra a magnitude das correntes antes e depois do aumento da batimetria (2004), acima para a estação 3 e abaixo para a estação 6. No caso da estação 3, as magnitudes chegam a ter um aumento de 1300% e na estação 6, além do forte acréscimo em magnitude ocorre à nítida mudança de fase.

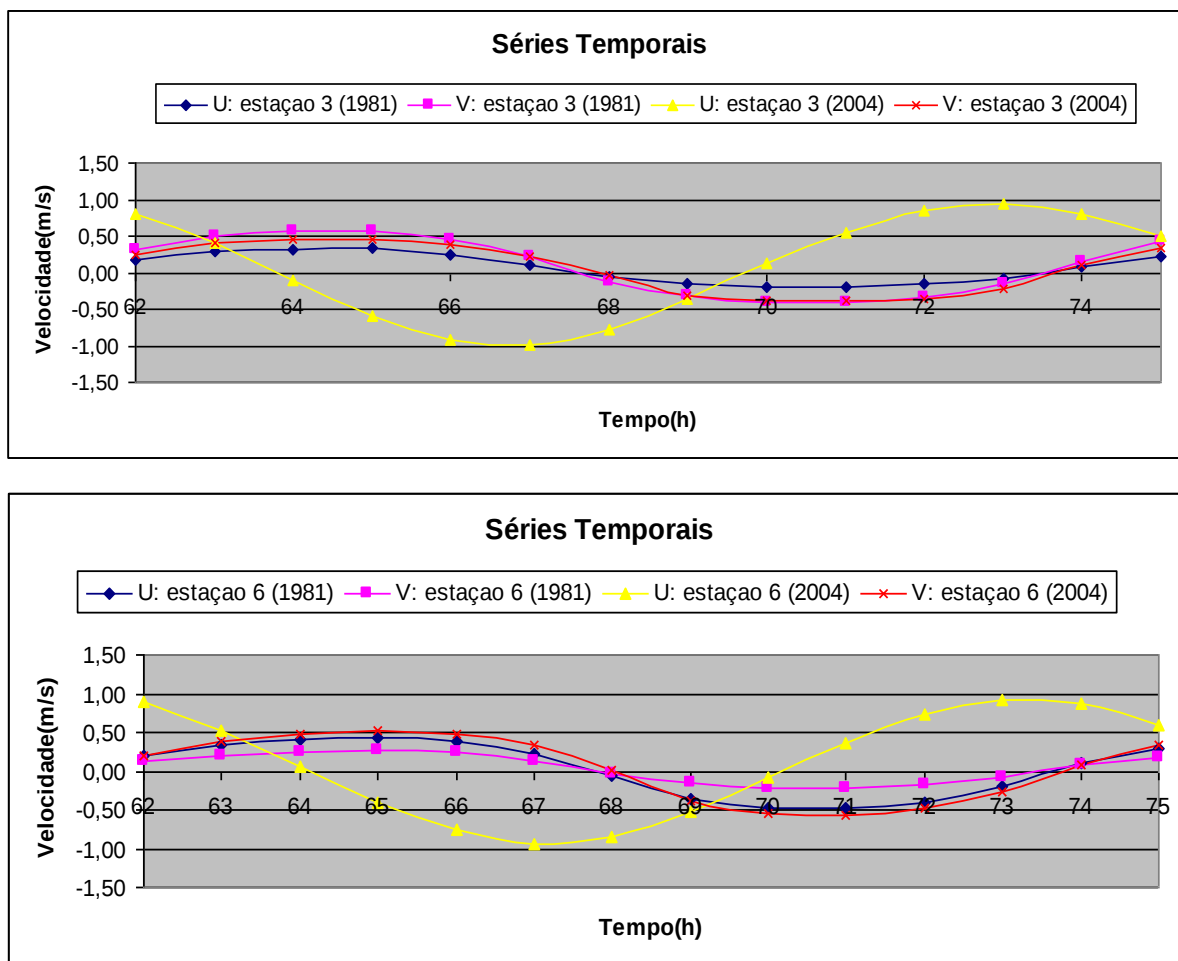


Figura 5 -18: Séries temporais comparando magnitude de componentes de velocidade de correntes na estação 3_ (entrada do estuário) e 6_ (Riacho do Baldo). Nota-se forte aumento nas correntes em decorrente da desobstrução propiciada pelo aumento da batimetria.

CAPÍTULO VI

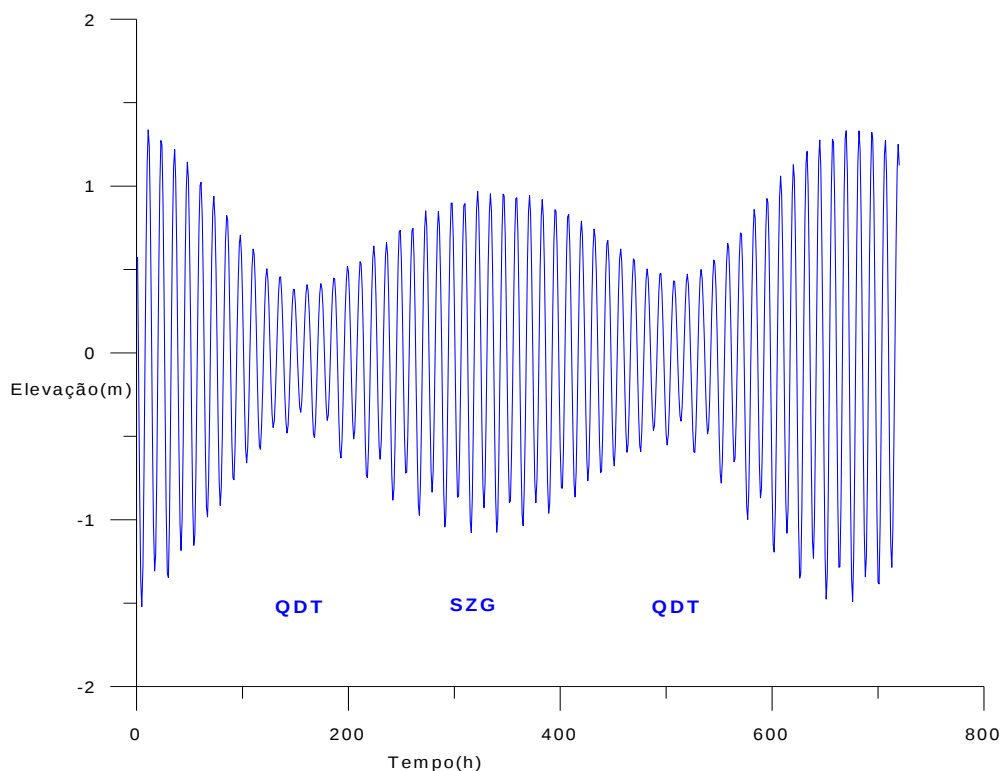
ESTUDO DO PADRÃO DE CORRENTES

O presente capítulo apresenta os resultados de padrão de correntes para a batimetria de 1981 e 2004.

A determinação dos padrões das correntes é realizada através dos resultados fornecidos pelo modelo 3D, pela análise dos campos de vetores representativos da velocidade. Os resultados de correntes foram analisados para todos os cenários de simulação já citados e nas seguintes situações:

- Valores promediados na vertical (2DH), correspondendo à circulação média;
- Superfície;
- 1 camada abaixo da superfície ou 5% da coluna de água local;
- 10 camada abaixo da superfície ou 50% da coluna de água local;
- 19 camadas abaixo da superfície correspondendo a uma camada acima do fundo, ou 95% da coluna de água local.

A onda de maré atuante na região do Estuário do Rio Potengi é semi-diurna. Associado a isto, a curva de maré oscila entre períodos de sizígia e quadratura, o que leva à escolha de situações que sejam representativas do escoamento no estuário. A Figura 4-6, reapresentada a seguir, ilustra a onda de maré para o período de um mês, no Estuário do Rio Potengi.



Reapresentação da Figura 4-6: Curva de maré astronômica gerada a partir das constantes harmônicas referentes à estação maregráfica operada pela DHN para um período de um mês. Os períodos de maré de sizígia e de quadratura estão indicados por SZG e QDT, respectivamente.

Para a análise dos padrões de correntes adotou-se as situações mais críticas, como maiores amplitudes (e conseqüentemente maiores velocidades), levando a escolha de uma situação típica de sizígia, para os três cenários de simulação. Assim, o período de resultados analisados para os padrões de correntes é coincidente com o estudado anteriormente para níveis d'água, conforme apresentado na Figura 6-1.

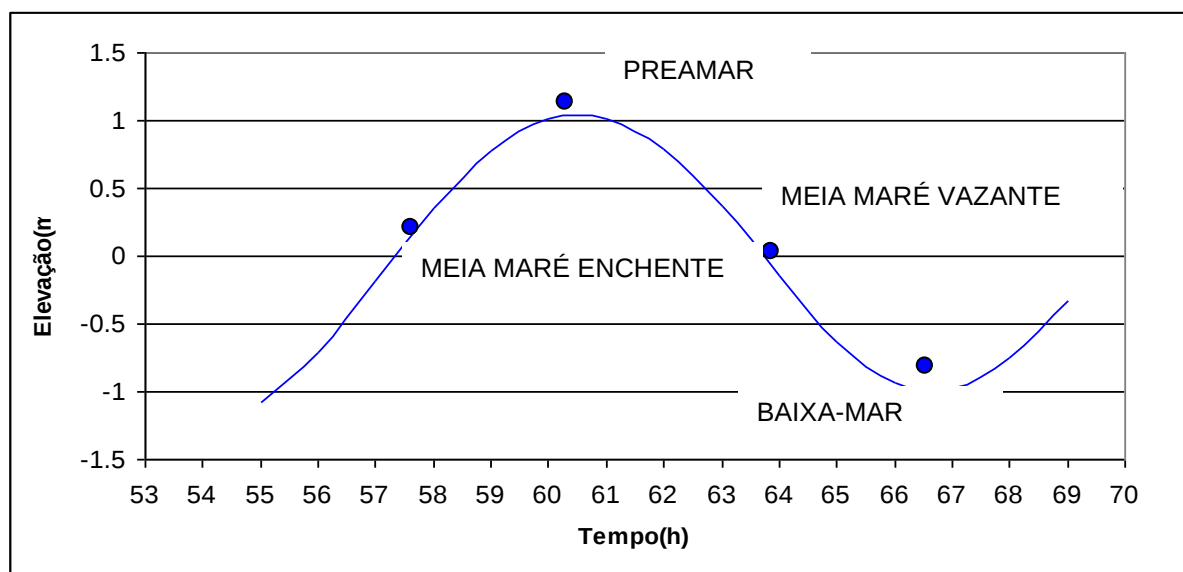


Figura 6-1: Ciclo de Maré na sizígia e os instantes de tempo analisados no estudo dos padrões de correntes de maré.

Assim, os instantes de tempo analisados neste estudo se aproximam dos instantes de preamar, meia-maré vazante, baixa-mar e meia-maré enchente e são eles:

- Meia Maré Enchente (MME): 205.200 s = 57 h.
- Preamar (PM): 219.600 s = 61 h
- Meia Maré Vazante (MMV): 230.400 s = 64 h
- Baixa-mar (BM): 241.200 s = 67 h

Como pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 6-1, mostrada a seguir, a onda de maré no Estuário do Rio Potengi é estacionária. Assim, o momento de inversão da corrente ocorre próximo aos instantes de preamar e a baixa-mar, instantes de estofa de maré.

Assim, os instantes selecionados para análise compreendem os momentos de inversão da corrente (PM e BM) com baixas velocidades, e também com as velocidades mais altas (MMV e MME) registradas no ciclo de maré em estudo.

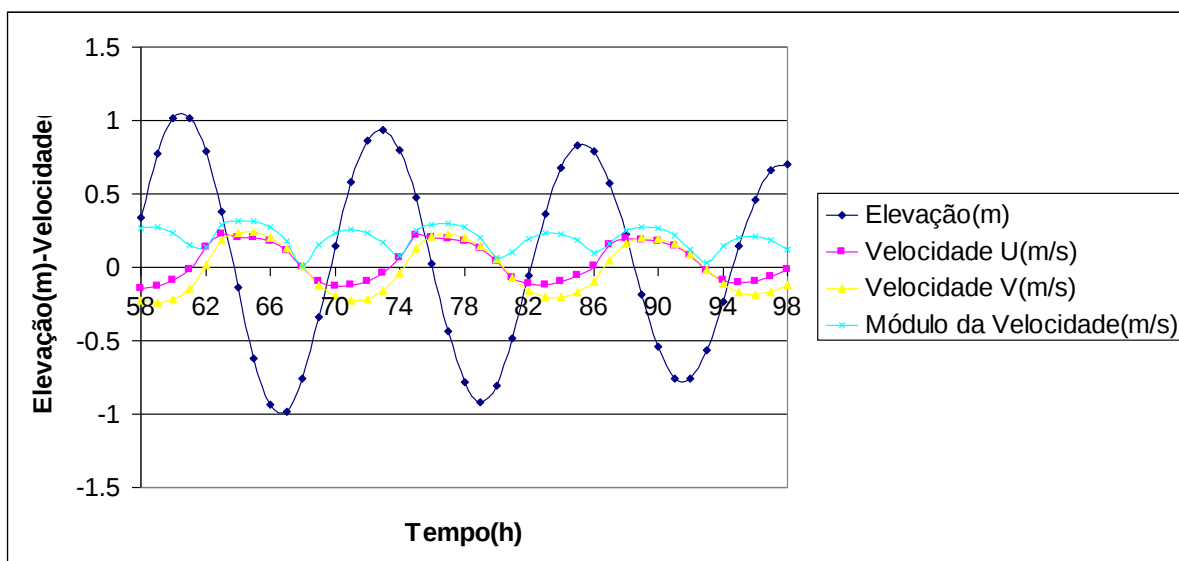


Figura 6-2: Resultados de elevação, velocidade na direção x (U), na direção y (V) e módulo da velocidade na estação 5, cenário 1 – sem vento.

Foram realizadas todas as simulações para os 3(três) cenários propostos, e para cada camada do 3D. Devido à semelhança de comportamento dos resultados de cada cenário foram apresentados apenas os resultados de padrão de correntes para o cenário 2 – ventos usuais, para as camadas do modelo 3D, para cada instante do ciclo de maré - meia-maré enchente, preamar, meia-maré vazante e baixamar.

Após a apresentação desses resultados, há uma análise comparativa entre os resultados da Fatia LO para cada cenário simulado. São apresentados a análise 3D, comparando os resultados de cada camada e a análise devido a variação batimétrica de 1981 e 2004.

6.1. MEIA MARÉ ENCHENTE

Nesse subitem são analisados os resultados hidrodinâmicos para o instante de tempo 205.200s(57h) de simulação, correspondente a ocorrência da meia maré enchente na estação 1 (fronteira aberta).

6.1.1. Meia Maré Enchente - Batimetria 1981

São representados os resultados hidrodinâmicos da meia maré enchente para a batimetria 1981.

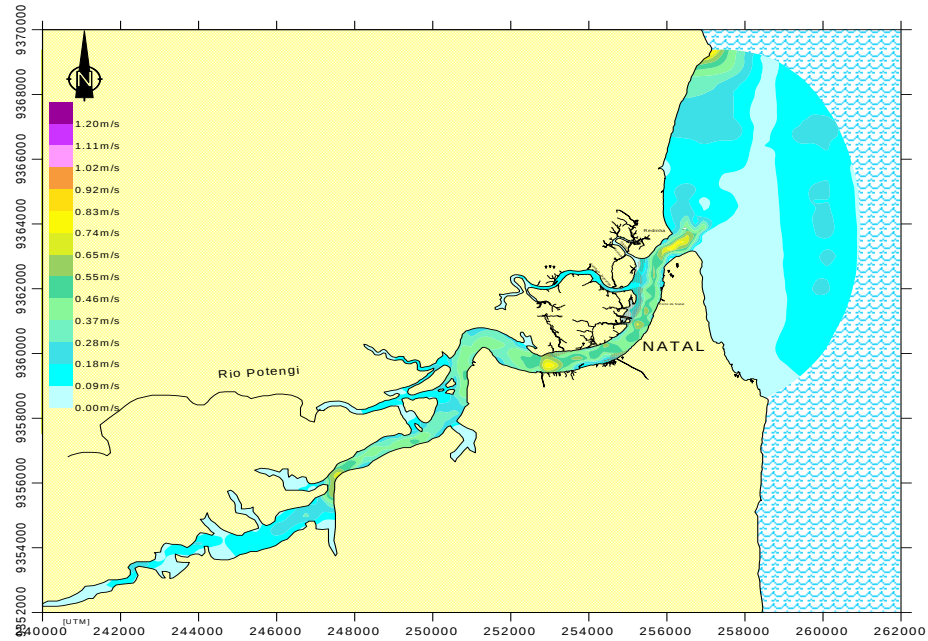


Figura 6-3: Padrão de circulação referente a meia maré enchente na estação 1, instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2.

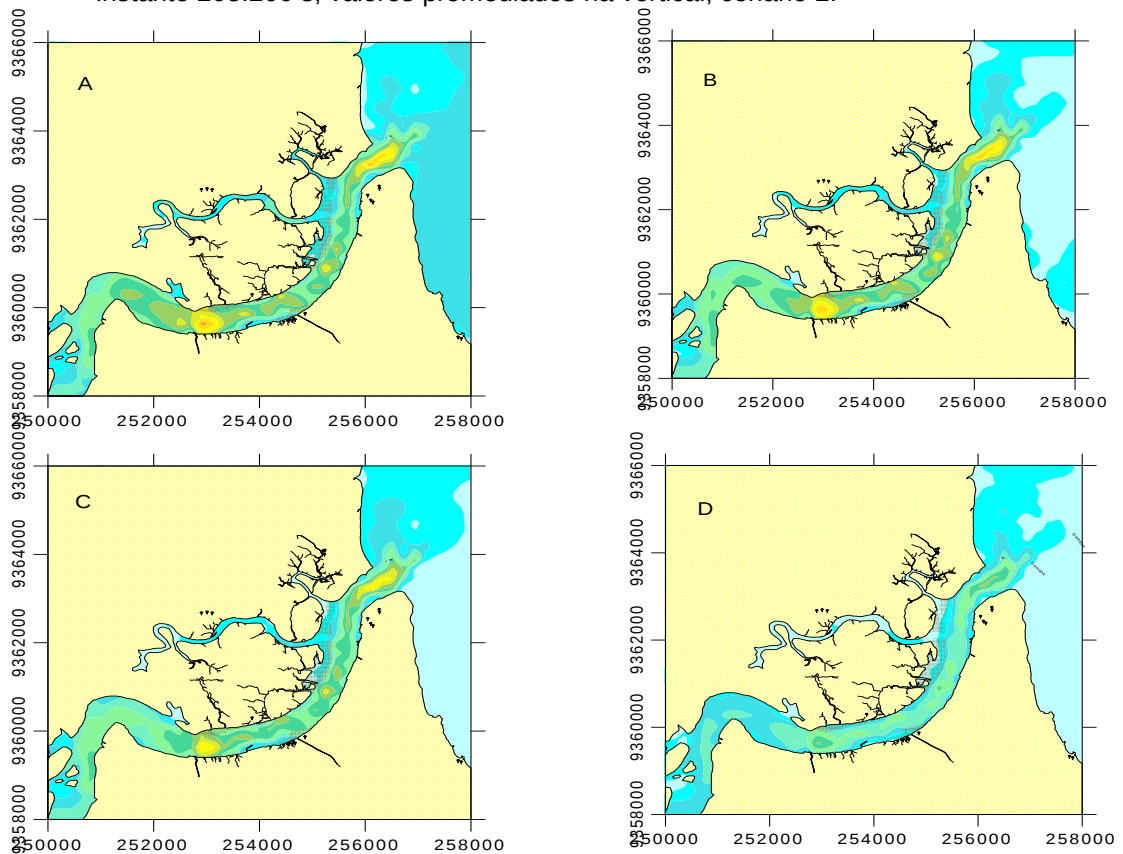


Figura 6-4: Padrão de circulação referente a meia maré enchente na estação 1, instante 205.200 s, na superfície(A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.

6.1.2. Meia Maré Enchente - Batimetria 2004

São representados os resultados hidrodinâmicos da meia maré enchente para a batimetria 2004.

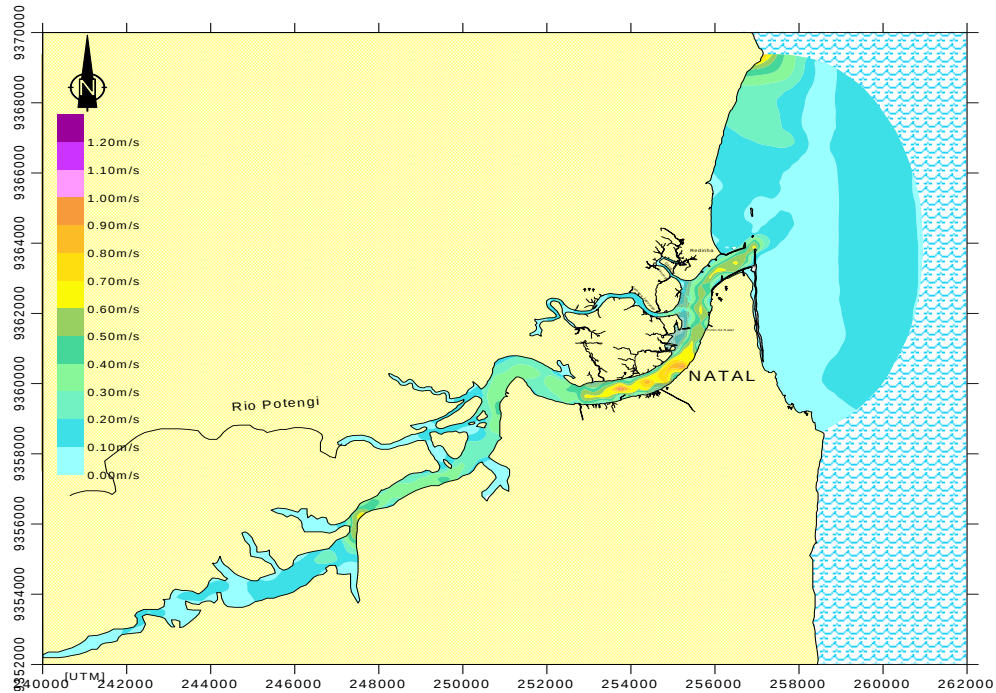


Figura 6-5: Padrão de circulação referente a meia maré enchente na estação 1, instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2.

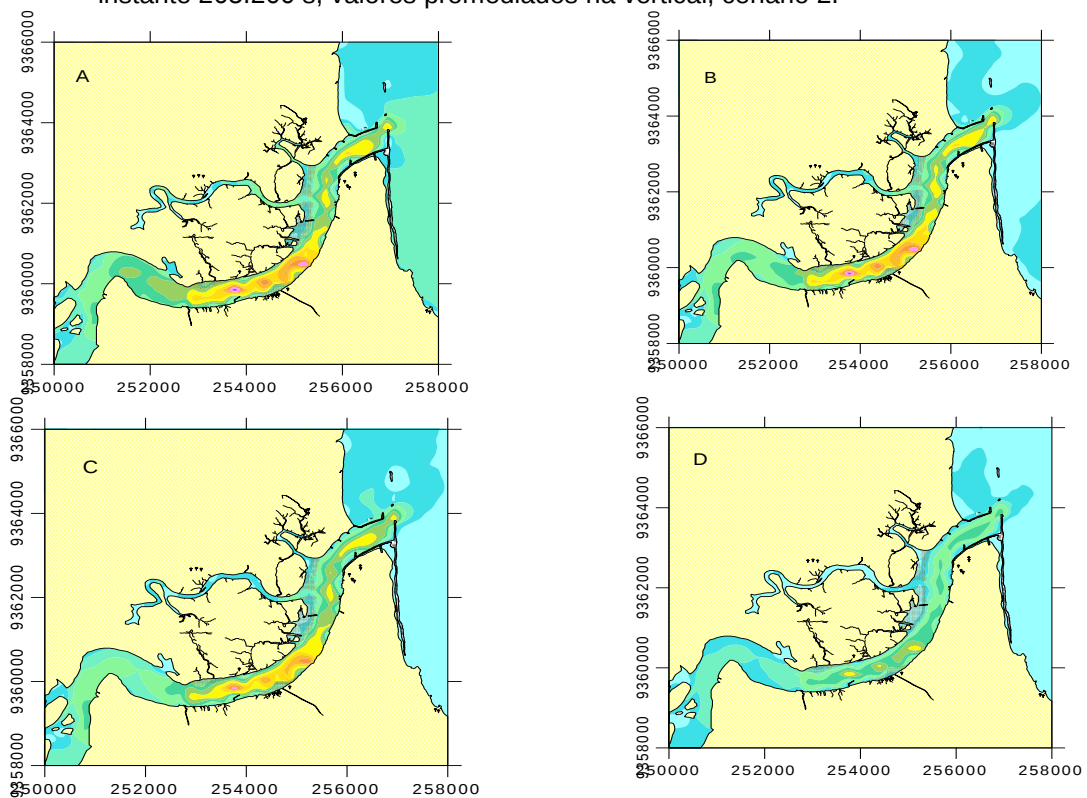


Figura 6-6: Padrão de circulação referente a meia maré enchente na estação 1, instante 205.200 s, na superfície(A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.

6.2. PREAMAR

Os resultados do cenário 2 – ventos usuais para a batimetria de 1981 estão representados na Figura 6-7 e Figura 6-8. Para a batimetria de 2004 estão representados na Figura 6-9 e Figura 6-10.

6.2.1. Preamar – Batimetria 1981

São representados os resultados hidrodinâmicos da preamar para a batimetria 2004.

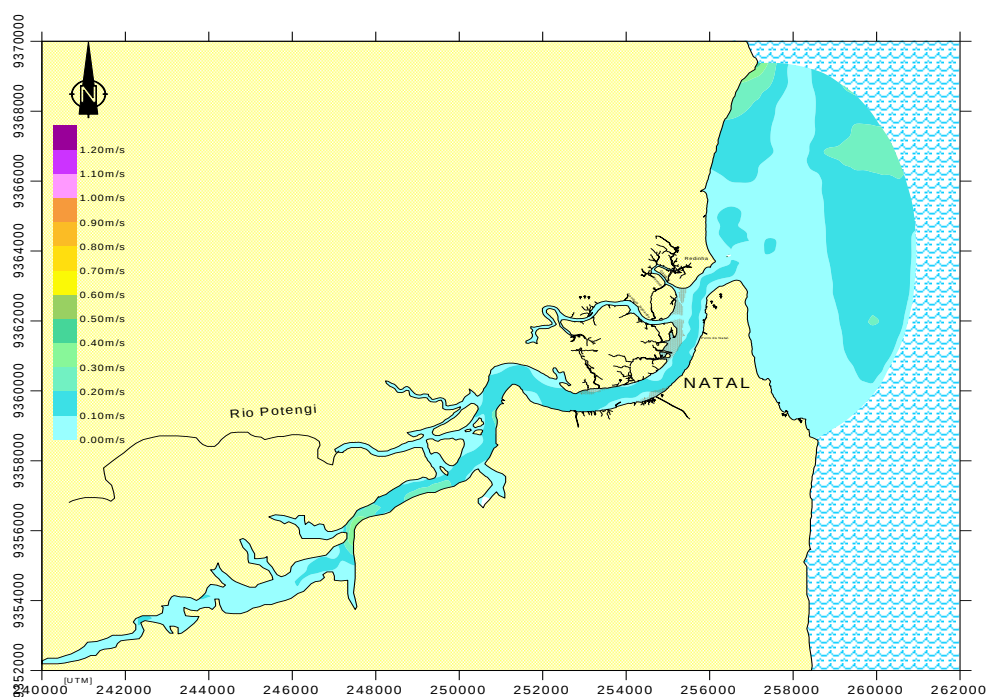
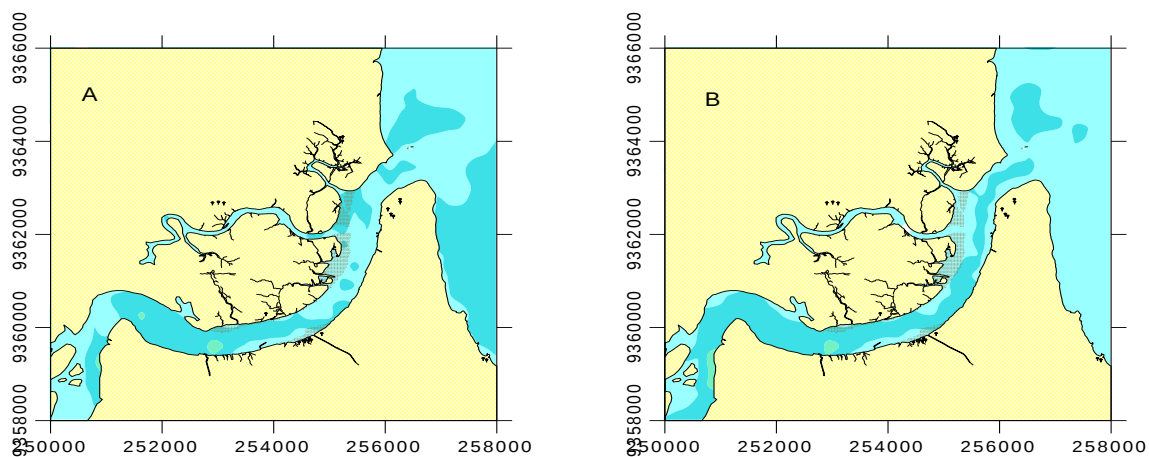


Figura 6-7: Padrão de circulação referente a preamar na estação 1, instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2.



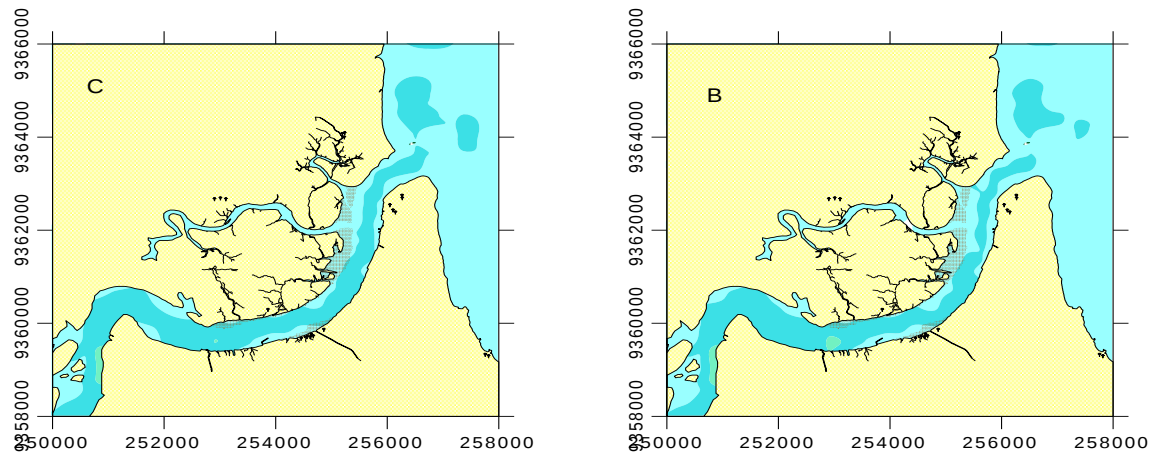


Figura 6-8: Padrão de circulação referente a preamar na estação 1, instante 205.200 s, na superfície (A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.

6.2.2. Preamar – Batimetria 2004

São representados os resultados hidrodinâmicos da preamar para a batimetria 2004.

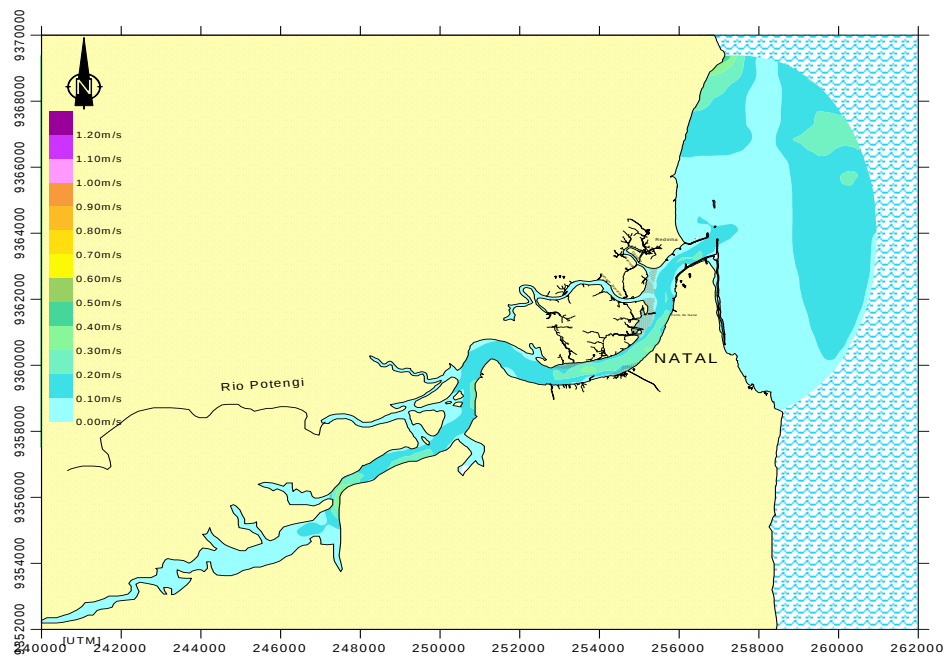


Figura 6-9: Padrão de circulação referente a preamar na estação 1, instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2.

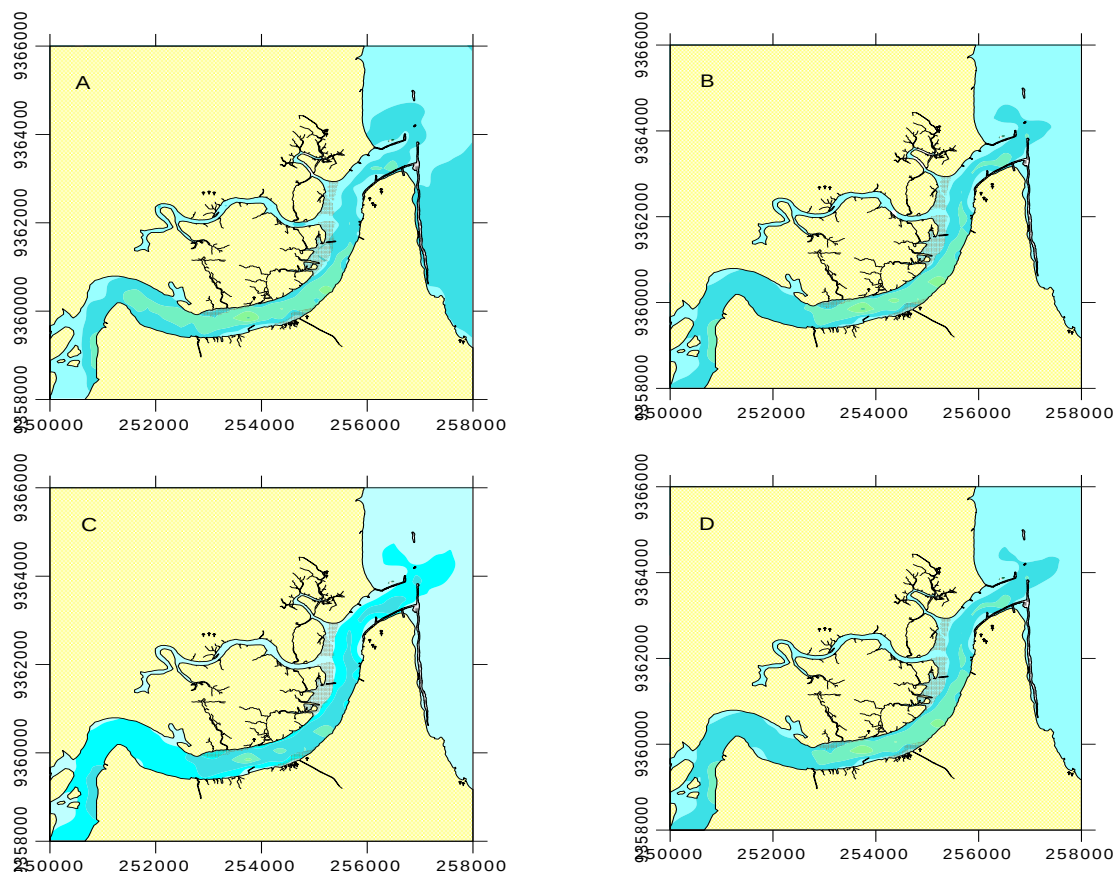


Figura 6-10: Padrão de circulação referente a preamar na estação 1, instante 205.200s, na superfície(A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.

6.3. MEIA MARÉ VAZANTE

Os resultados do cenário 2 – ventos usuais para a batimetria de 1981 estão representados na Figura 6-11 e Figura 6-12. Já para a batimetria de 2004 estão representados na Figura 6-13 e 6-14.

6.3.1. Meia Maré Vazante – Batimetria 1981

São representados os resultados hidrodinâmicos da meia maré vazante para a batimetria 1981.

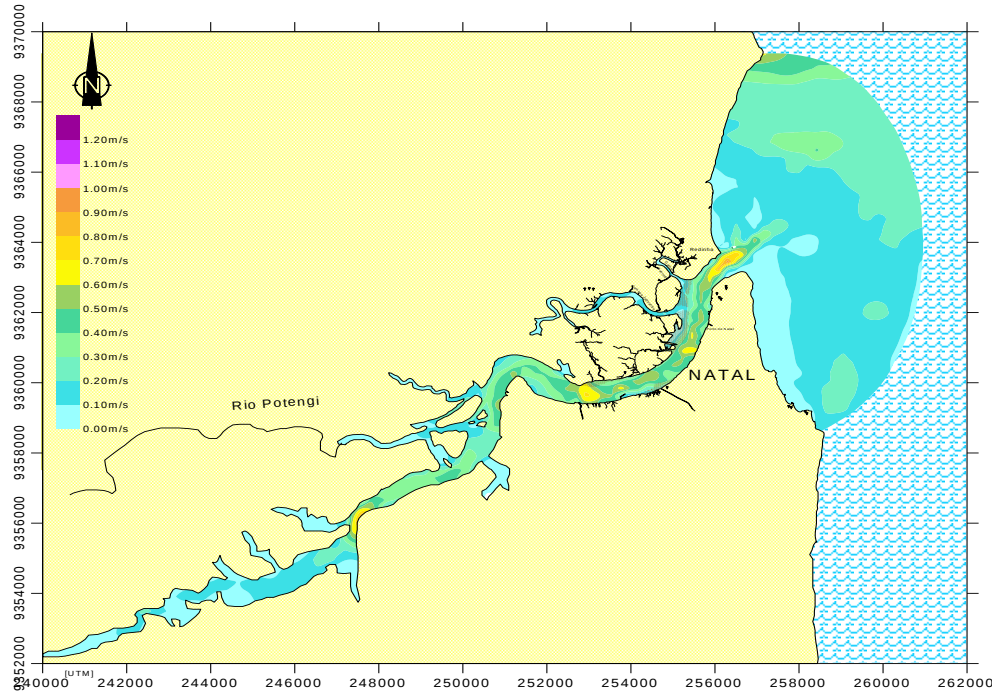


Figura 6-11: Padrão de circulação referente a meia maré vazante na estação 1, instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2.

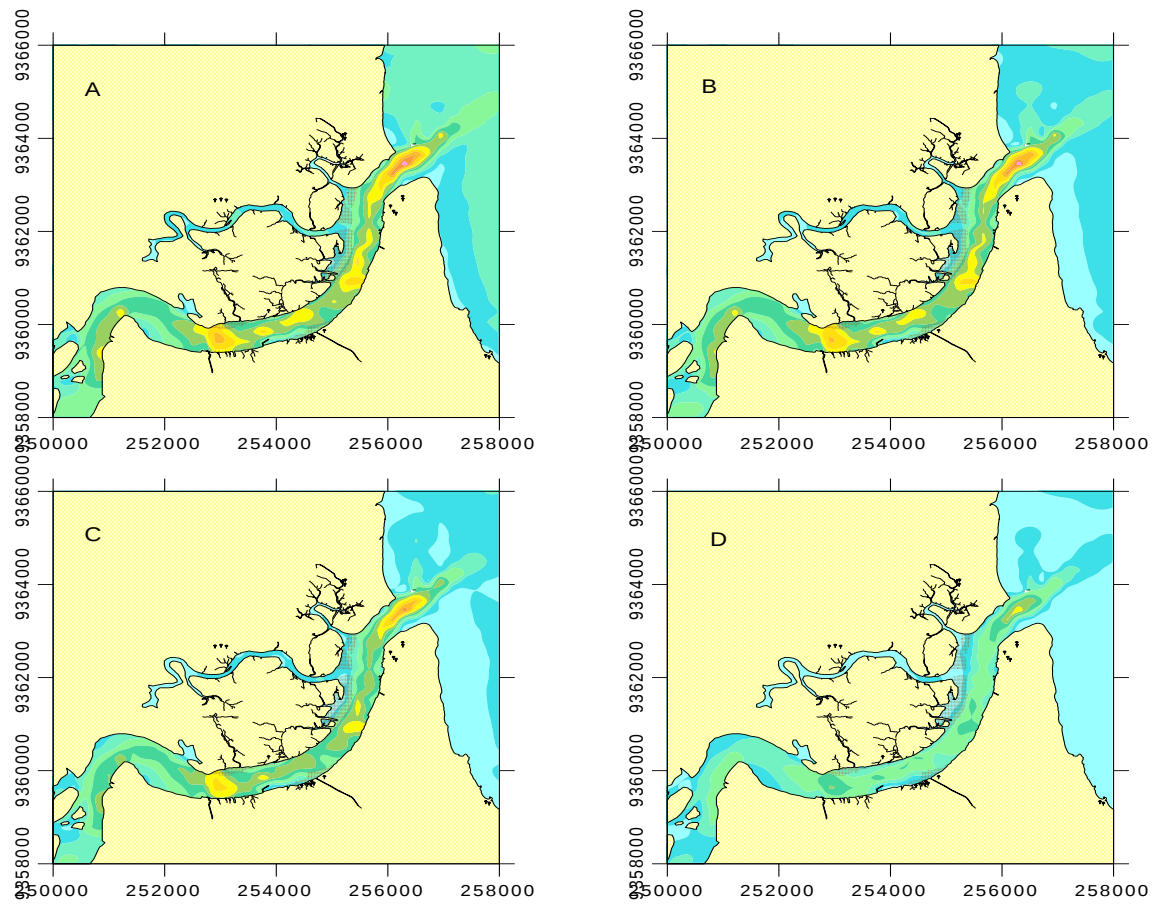


Figura 6-12: Padrão de circulação referente a meia maré vazante na estação 1, instante 205.200s na superfície (A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.

6.3.2. Meia Maré Vazante – Batimetria 2004

São representados os resultados hidrodinâmicos da meia maré vazante para a batimetria 2004.

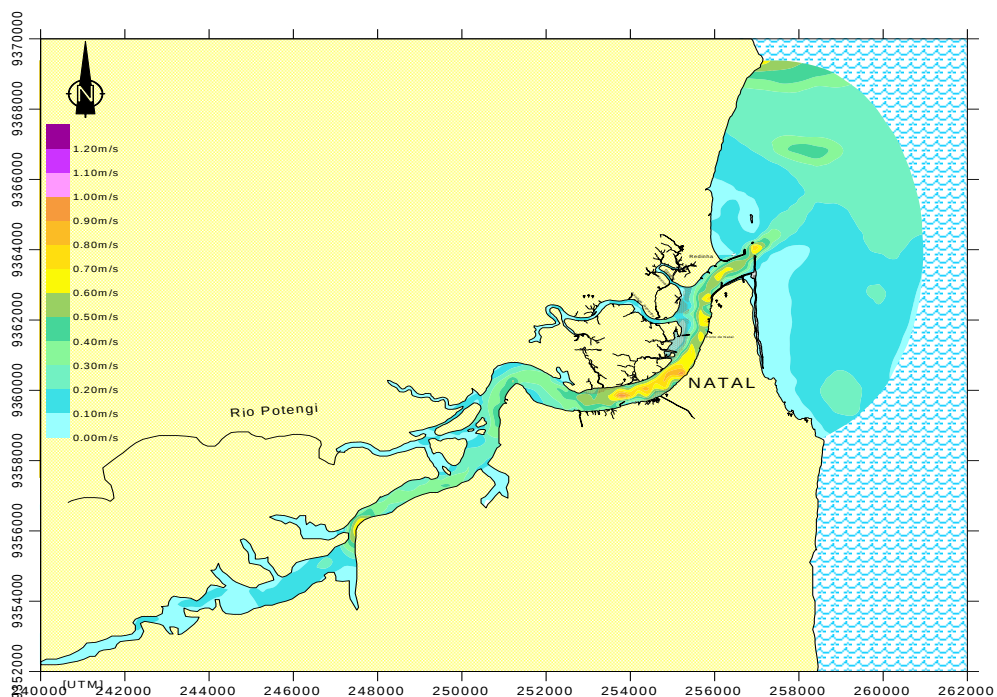


Figura 6-13: Padrão de circulação referente a meia maré vazante na estação 1, instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2.

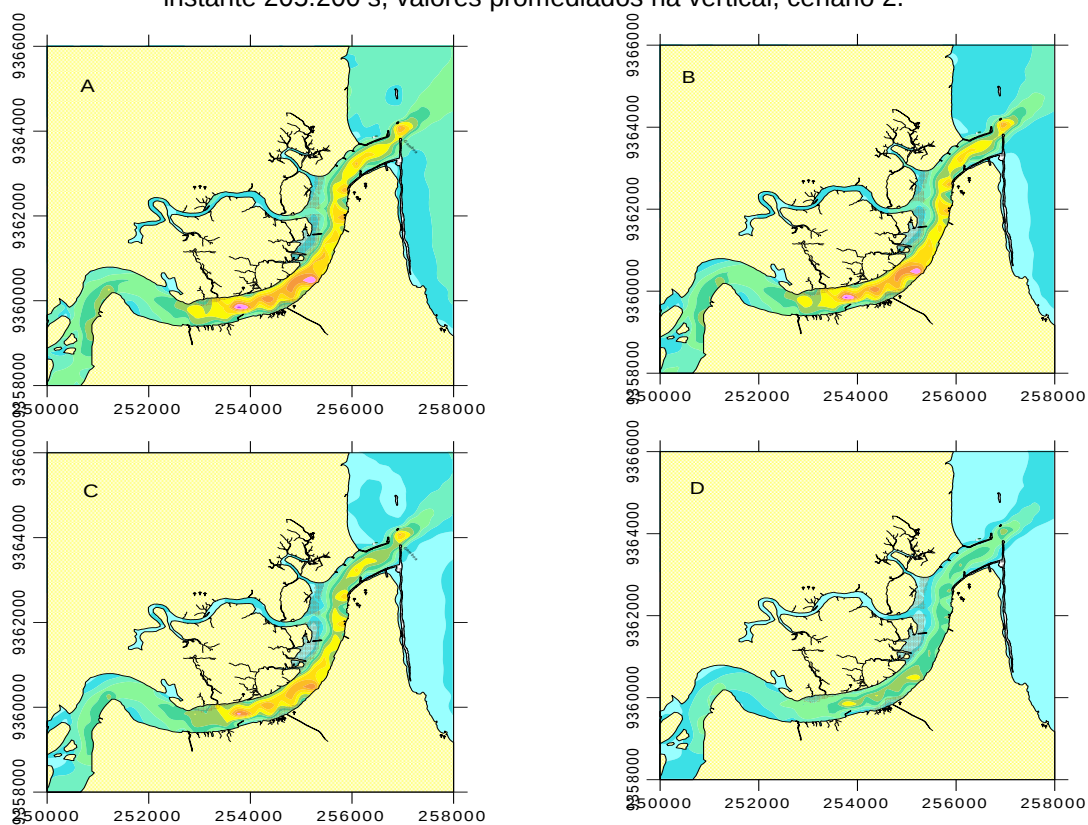


Figura 6-14: Padrão de circulação referente a meia maré vazante na estação 1, instante 205.200s, na superfície (A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.

6.4. BAIXA- MAR

Os resultados do cenário 2 – ventos usuais para a batimetria de 1981 estão representados na Figura 6-15 e Figura 6-16. Já para a batimetria de 2004 estão representados na Figura 6-17 e 6-18.

6.4.1 Baixa-mar – Batimetria 1981

São representados os resultados hidrodinâmicos da baixa-mar para a batimetria 1981.

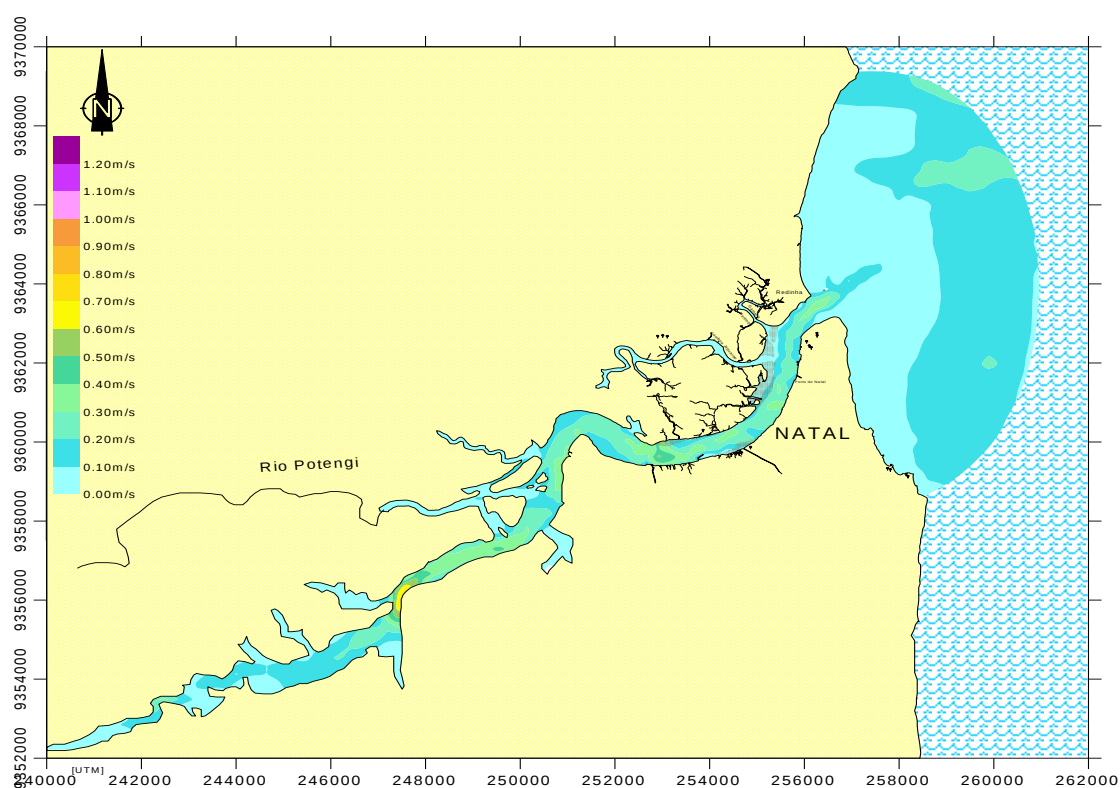


Figura 6-15: Padrão de circulação referente a baixa-mar na estação 1, instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2.

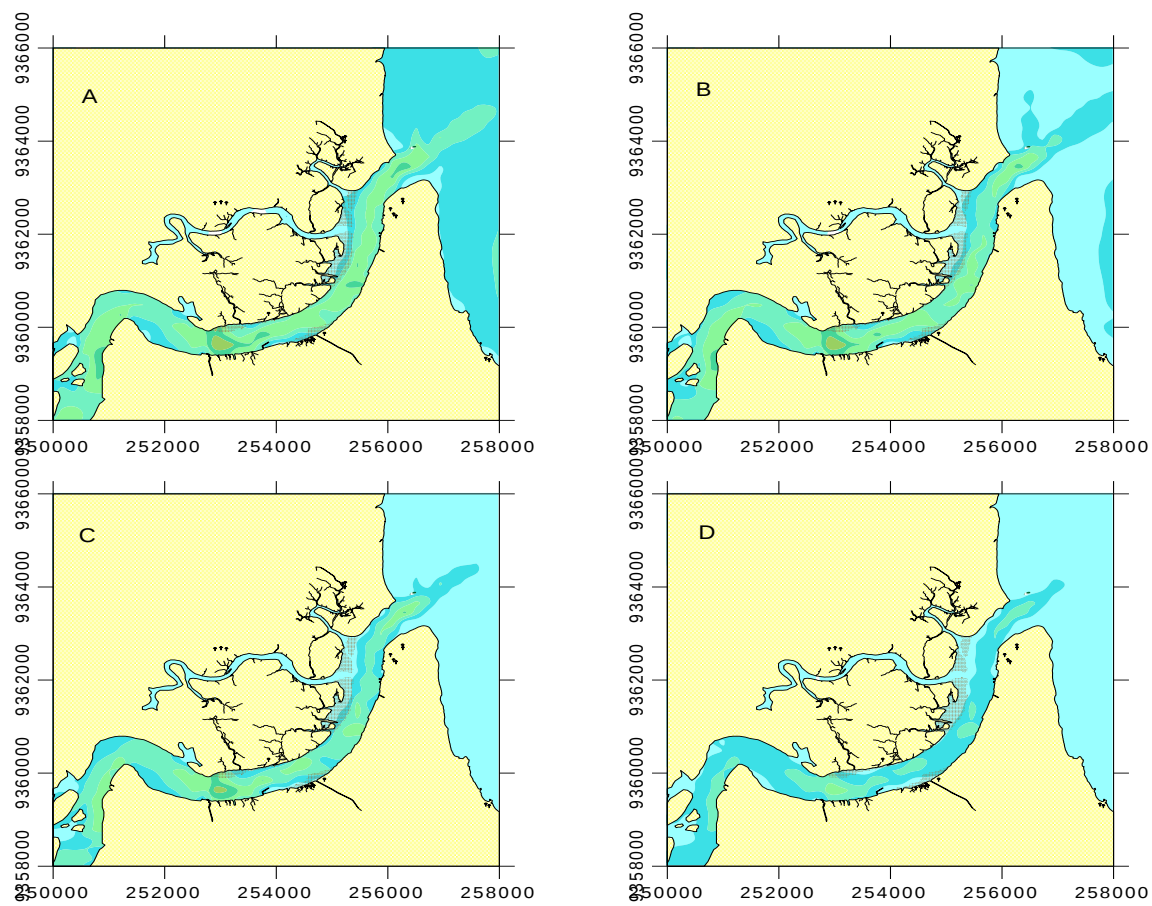


Figura 6-16: Padrão de circulação referente a baixa-mar na estação 1, instante 205.200s, na superfície (A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.

6.4.2 Baixa-mar – Batimetria 2004

São representados os resultados hidrodinâmicos da baixa-mar para a batimetria 2004.

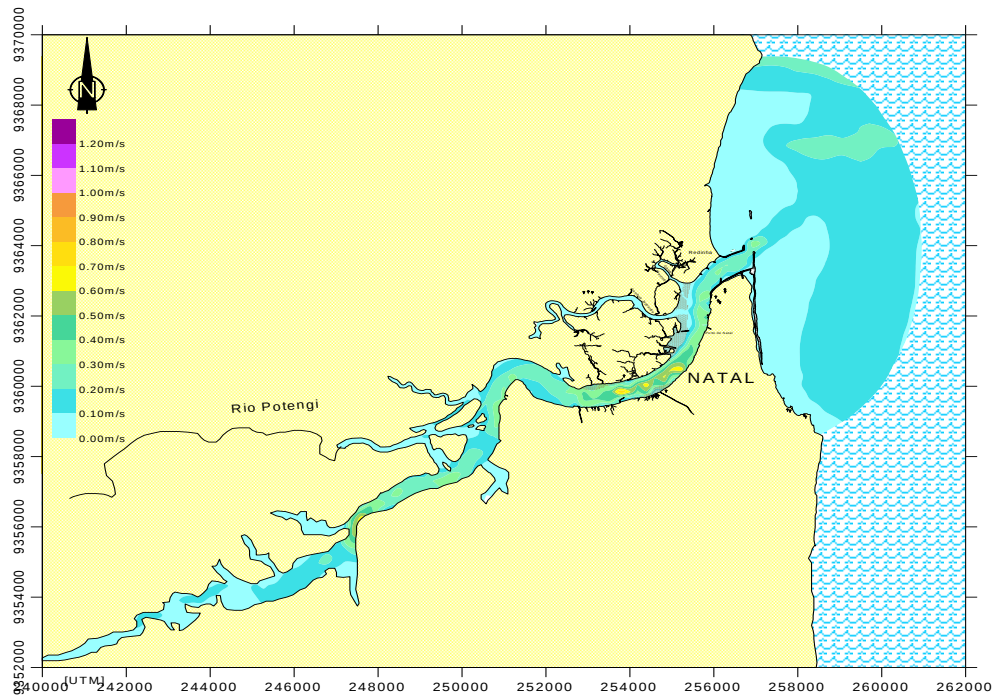


Figura 6-17: Padrão de circulação referente a baixa-mar na estação 1, instante 205.200 s, valores promediados na vertical, cenário 2.

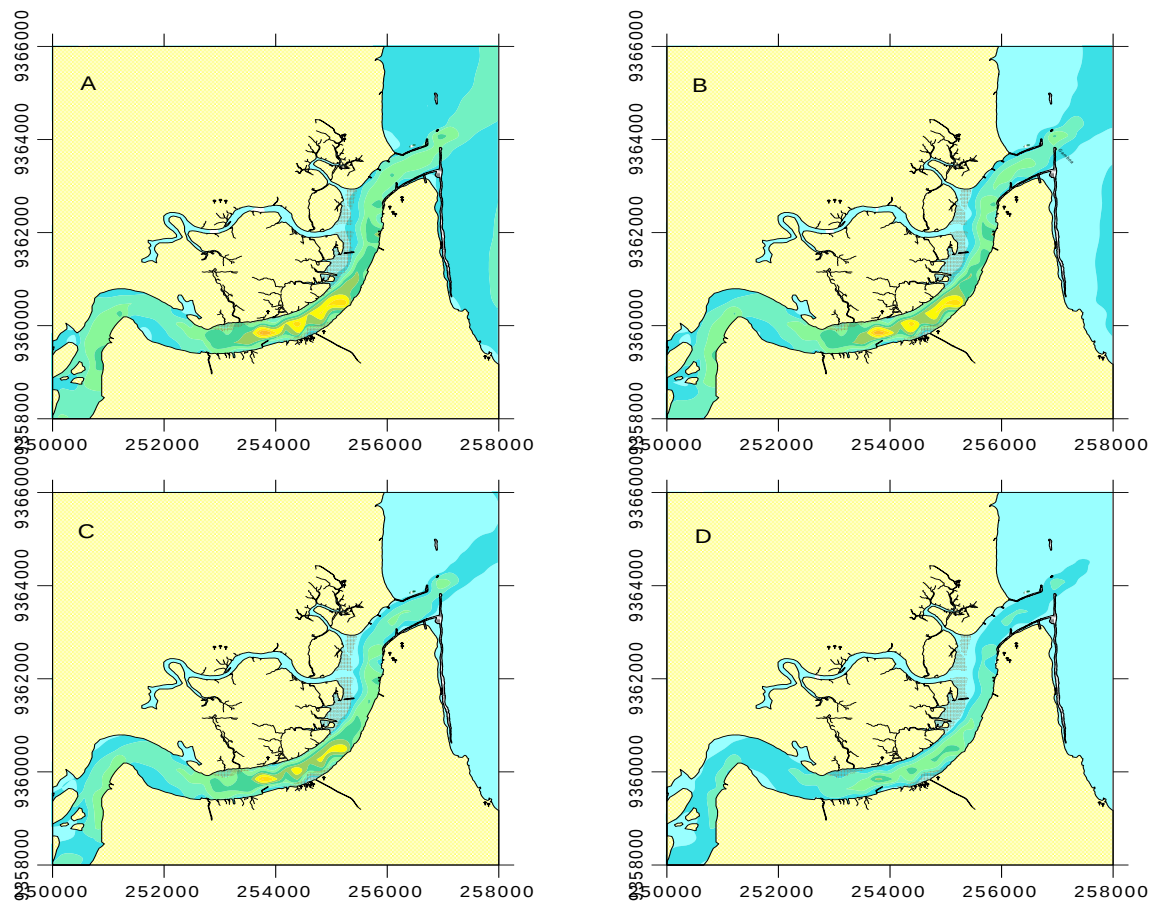


Figura 6-18: Padrão de circulação referente a baixa-mar na estação 1, instante 205.200s, na superfície (A), na 1 camada abaixo(B), na 10 camada abaixo(C) e na 19 camada abaixo(D), cenário 2.

6.5. GRÁFICOS COMPARATIVOS

Este item tem por objetivo observar as diferenças entre as velocidades ao longo da coluna d'água, assim como ao longo da própria fatia LO para a batimetria de 1981, nos três cenários simulados. Sendo o mesmo objetivo para a batimetria de 2004.

Para a visualização da variação do padrão de correntes no estuário do Rio Potengi, foi traçada uma linha, chamada fatia LO, que parte da fronteira aberta do domínio (ponto L) em direção ao interior do estuário (ponto O), no sentido leste – oeste, i.e., o 0 km corresponde a fronteira aberta e o 28 km, interior do estuário.

6.5.1 Meia Maré Enchente

Os valores do módulo da velocidade ao longo da fatia LO estão apresentados no gráfico da Figura 6-19.

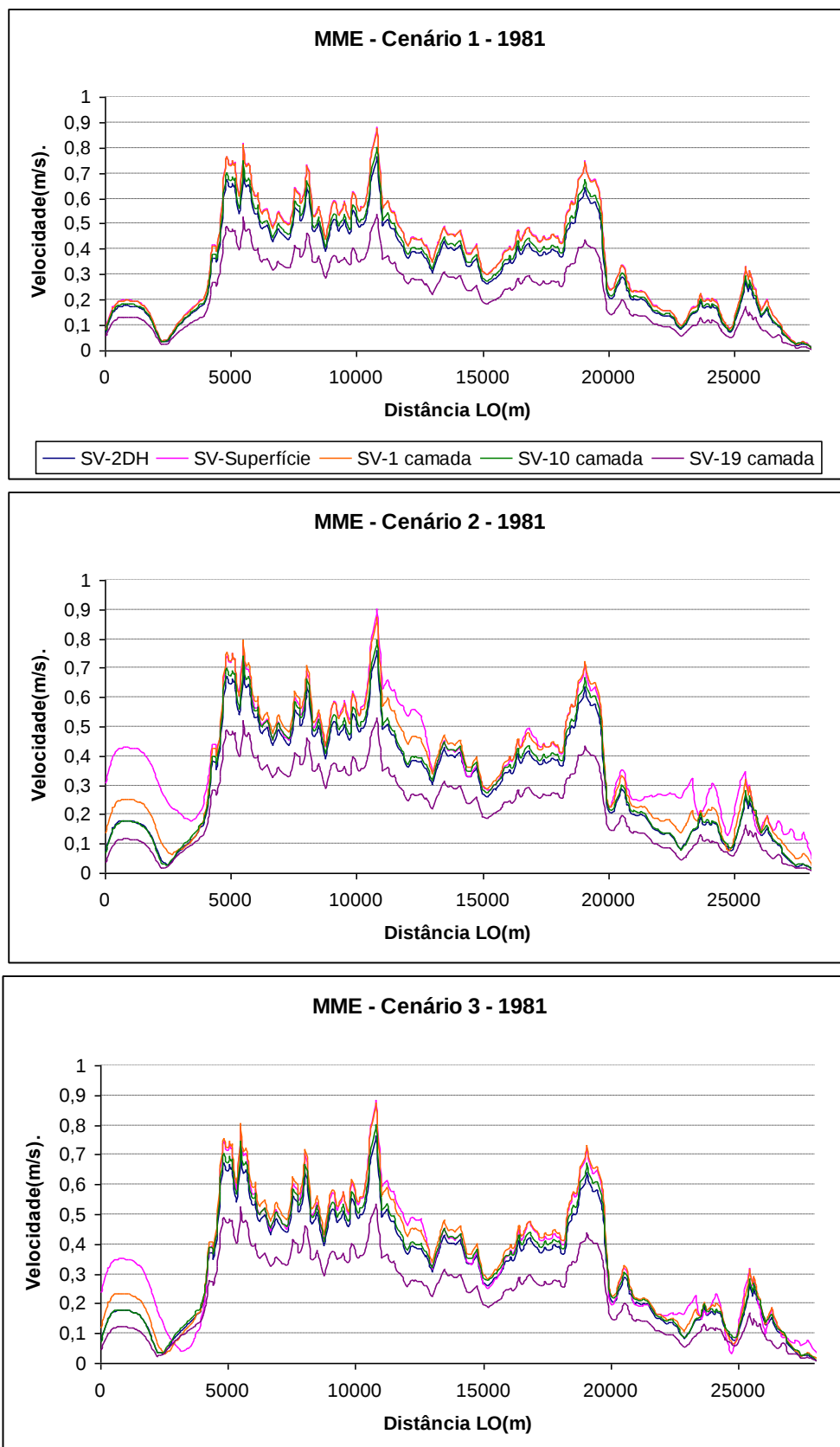


Figura 6-19: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de meia maré enchente para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 1981.

Ao longo da fatia LO, as maiores velocidades se encontram, como já mencionado na entrada do estuário, no Porto de Natal e no Riacho do Baldo.

O comportamento decrescente da velocidade que ocorre aproximadamente aos 4km da fatia LO, ocorre devido ao aumento da batimetria na entrada do estuário e o estreitamento do mesmo também provoca a subida brusca da velocidade, sendo uniformizada conforme a entrada do estuário e redução da profundidade ao longo da fatia LO.

Como as máximas velocidades ocorrem nos instantes de meia-maré vazante e enchente, as velocidades apresentadas neste instante são superiores as apresentadas no instante de baixa-mar e preamar, para o mesmo cenário 1. Esta situação também ocorrendo para os cenários 2 e 3.

No caso de circulação sem vento, verifica-se que os resultados 2DH são próximos dos resultados obtidos 10 camadas abaixo da superfície. São similares os resultados obtidos na superfície e 1 camada abaixo desta. O padrão de velocidade observado ao longo da coluna d'água é similar nos locais de ocorrência de máximos e mínimos.

A magnitude das velocidades ocorreu um crescimento comparado entre os cenários, i.e., a magnitude das velocidades dos cenários 3 é inferior que para o cenário 2 e este maior que para o cenário 1, podemos dizer que a situação com os ventos usuais tem uma maior influência que a situação sem ventos e de ventos de frente fria.

Quanto a análise 3D, houve um espalhamento entre as curvas do cenário 2 maior que para o cenário 1 e 3. O comportamento das curvas é semelhante para os três cenários, mas para o cenário 2 houveram pontos em que as magnitudes da curva na superfície livre foram bem inferiores ao do cenário 1 e onde o comportamento da curva na superfície livre indica que a situação de ventos usuais altera o padrão de circulação para pouco após o riacho do baldo($\approx 11\text{km}$). O mesmo ocorre para o cenário 3 – vento de frente fria.

Além do observado para o cenário 1, as velocidades na superfície e 1ª camada abaixo desta começam a diferir, devido à influência da atuação do vento, para o cenário 2, o que também acontece para o cenário 3. A 19ª camada abaixo apresenta menor magnitude da velocidade, por ser menos influenciada pela ação do vento.

A Figura 6-20 apresenta os valores de velocidades ao longo da fatia LO no instante de meia maré enchente para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.

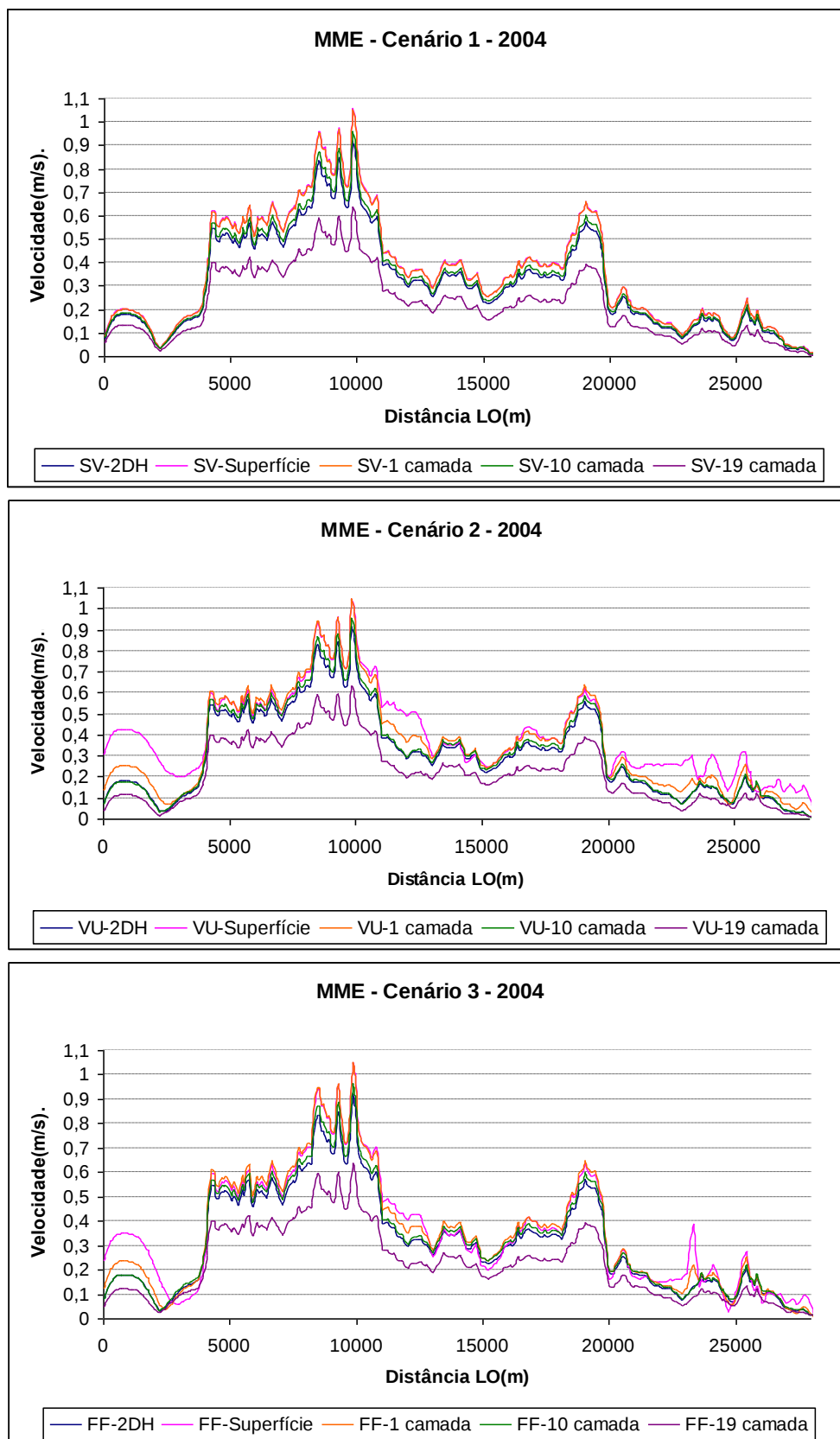


Figura 6-20: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de meia maré enchente para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.

A análise do comportamento das curvas de cada camada quanto à variação batimétrica pode-se perceber que para a batimetria de 2004, o comportamento é semelhante à batimetria de 1981. Quanto à magnitude das velocidades para a batimetria de 2004 verifica-se que são maiores que para a batimetria de 1981 onde a batimetria decresceu entre os anos, i.e., devido a processo de assoreamento do estuário, ocorrendo à deposição de sedimentos e poluição. O volume de água nesses pontos diminuiu, permitindo assim que a velocidade aumentasse. No riacho do baldo, a velocidade aumentou em 33%, para o cenário 3.

Já para pontos onde a profundidade aumentou, acontece o inverso, i.e., a velocidade diminuiu de uma forma insignificante. Na entrada do estuário, a velocidade diminuiu em 3%, para o cenário 3.

6.5.2 Preamar

Os valores do módulo da velocidade ao longo da fatia LO estão apresentados no gráfico da Figura 6-21, no qual se pode observar as diferenças entre as velocidades ao longo da coluna d'água, assim como ao longo da própria fatia LO.

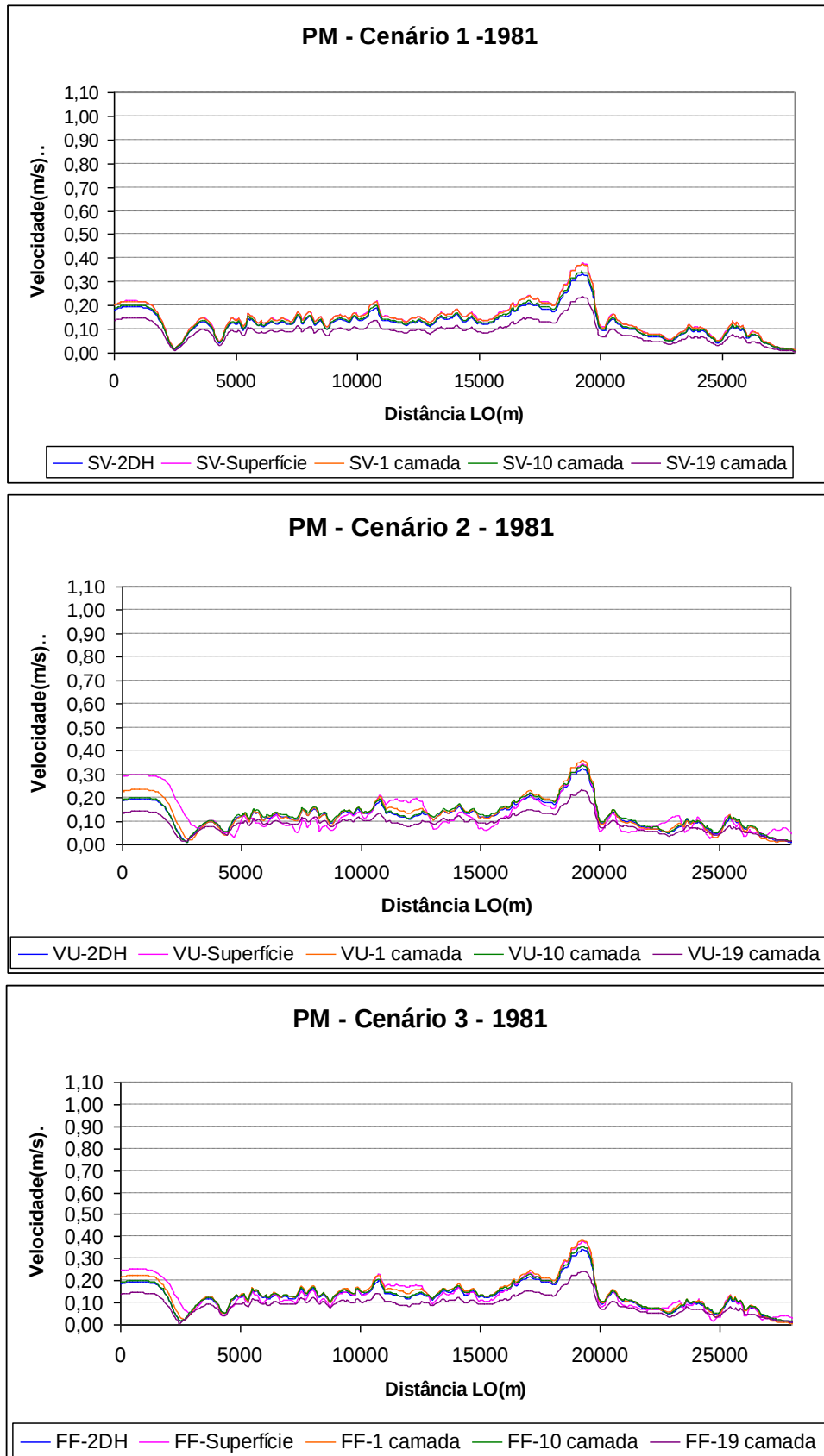


Figura 6-21: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de preamar para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 1981.

Ao longo da fatia LO, as maiores velocidades se encontram, como já mencionado, na entrada do estuário, Porto de Natal e Riacho do Baldo. Como as mínimas velocidades ocorrendo nos instantes de preamar.

No caso de circulação sem vento, verifica-se que os resultados 2DH são próximos dos resultados obtidos 10 camadas abaixo da superfície. São igualmente similares os resultados obtidos na superfície e 1 camada abaixo desta.

A magnitude das velocidades ocorreu um crescimento comparado entre os cenários, i.e., a magnitude das velocidades dos cenários 3 é inferior que para o cenário 2 e este maior que para o cenário 1, podemos dizer que a situação com os ventos usuais tem uma maior influência que a situação sem ventos e de ventos de frente fria. Este comportamento é similar ao ocorrido para a meia-maré enchente.

Quanto a análise 3D, houve um espalhamento entre as curvas do cenário 2 maior que para o cenário 1 e 3. O comportamento das curvas é semelhante para os três cenários, mas para o cenário 2 houveram pontos em que as magnitudes da curva na superfície livre foram bem inferiores ao do cenário 1 e onde o comportamento da curva na superfície livre indica que a situação de ventos usuais altera o padrão de circulação para região entre a entrada do estuário e pouco após o riacho do baldo($\approx 11\text{km}$). Este comportamento pode ser justificado pelo aumento do volume de água, por estar em preamar, e este estuário ser regido pelas forças de marés.

Além do observado para o cenário 1, as velocidades na superfície e 1 camada abaixo desta começam a diferir devido à influência da atuação do vento para o cenário 2, o que também acontece para o cenário 3.

A Figura 6-22 apresenta os valores de velocidades ao longo da fatia LO no instante de preamar para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.

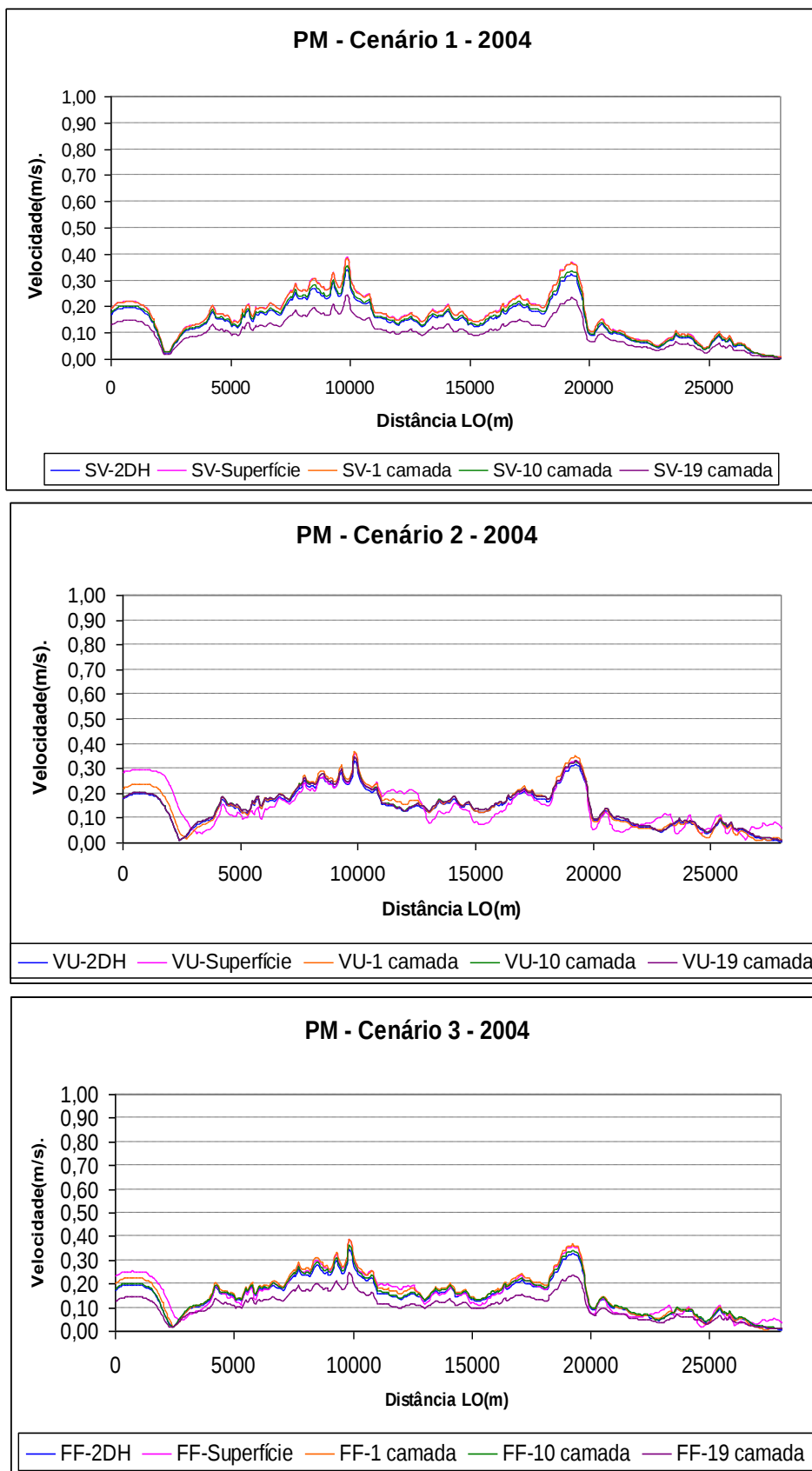


Figura 6-22: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de preamar para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.

A magnitude das velocidades ocorreu um crescimento comparado entre os cenários. Quanto a análise 3D, verifica-se que a magnitude das velocidades decrescem com a profundidade da camada. Semelhante a análise da batimetria de 1981. Não acontece este comportamento de decrescimento para a curva de superfície livre no cenário 2.

A análise do comportamento das curvas de cada camada quanto à variação batimétrica pode-se perceber que para a batimetria de 2004 é semelhante à batimetria de 1981. Quanto à magnitude das velocidades para a batimetria de 2004 verifica-se que são maiores que para a batimetria de 1981 onde a batimetria decresceu entre os anos, i.e., devido a processo de assoreamento do estuário devido à deposição de sedimentos e poluição. O volume de água nesses pontos diminuiu, permitindo assim que a velocidade aumentasse. No riacho do baldo, a velocidade aumentou em 85%, para o cenário 3. Já para pontos onde a profundidade aumentou, acontece o inverso, i.e, a velocidade diminuiu de uma forma insignificante. Na entrada do estuário, a velocidade diminuiu em 40%, para o cenário 3.

6.5.3 Meia Maré Vazante

Os valores do módulo da velocidade ao longo da fatia LO estão apresentados no gráfico da Figura 6-23, no qual se pode observar as diferenças entre as velocidades ao longo da coluna d'água, assim como ao longo da própria fatia LO.

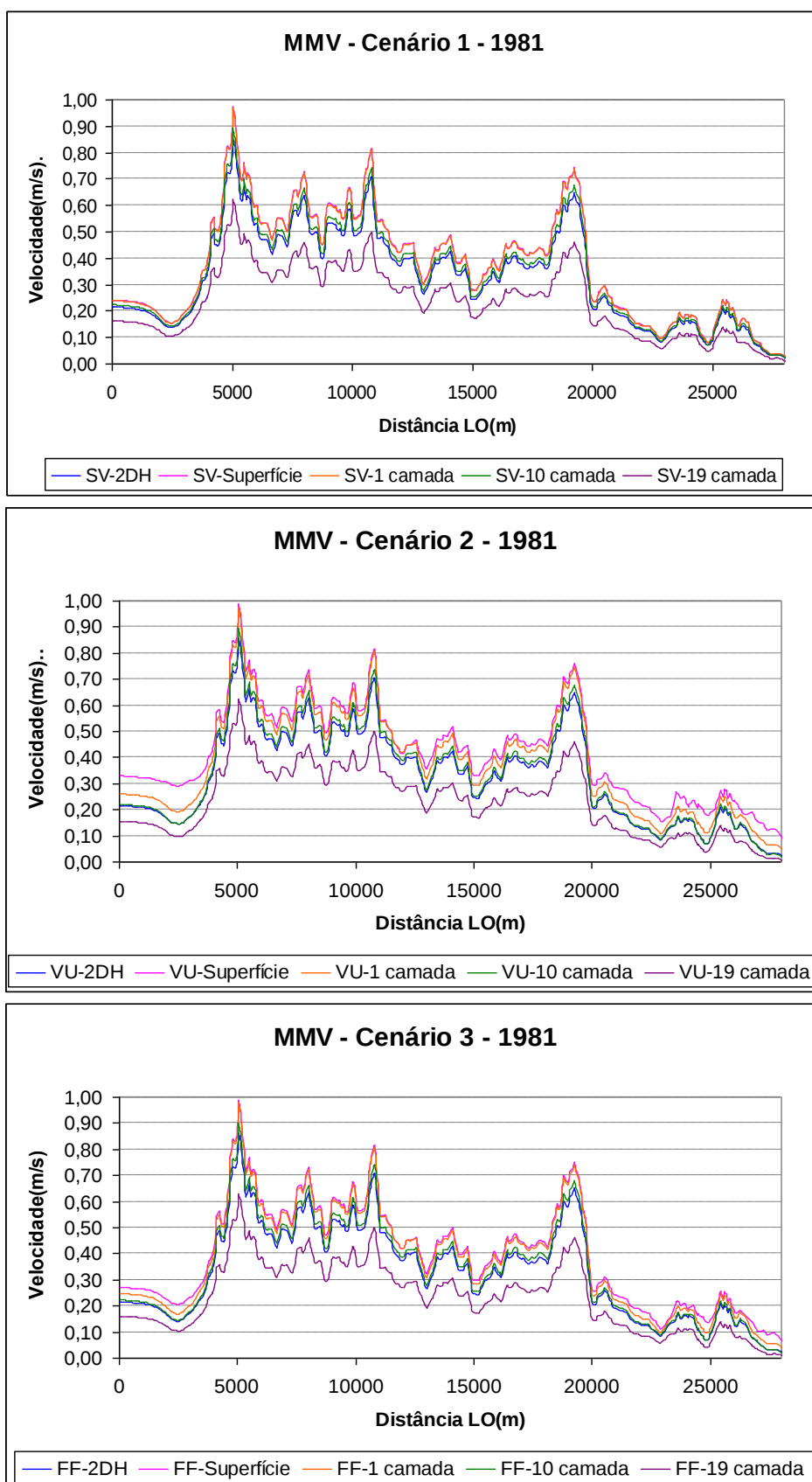


Figura 6-23: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de meia maré vazante para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 1981.

A Figura 6-24 apresenta os valores de velocidades ao longo da fatia LO no instante de meia maré vazante para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.

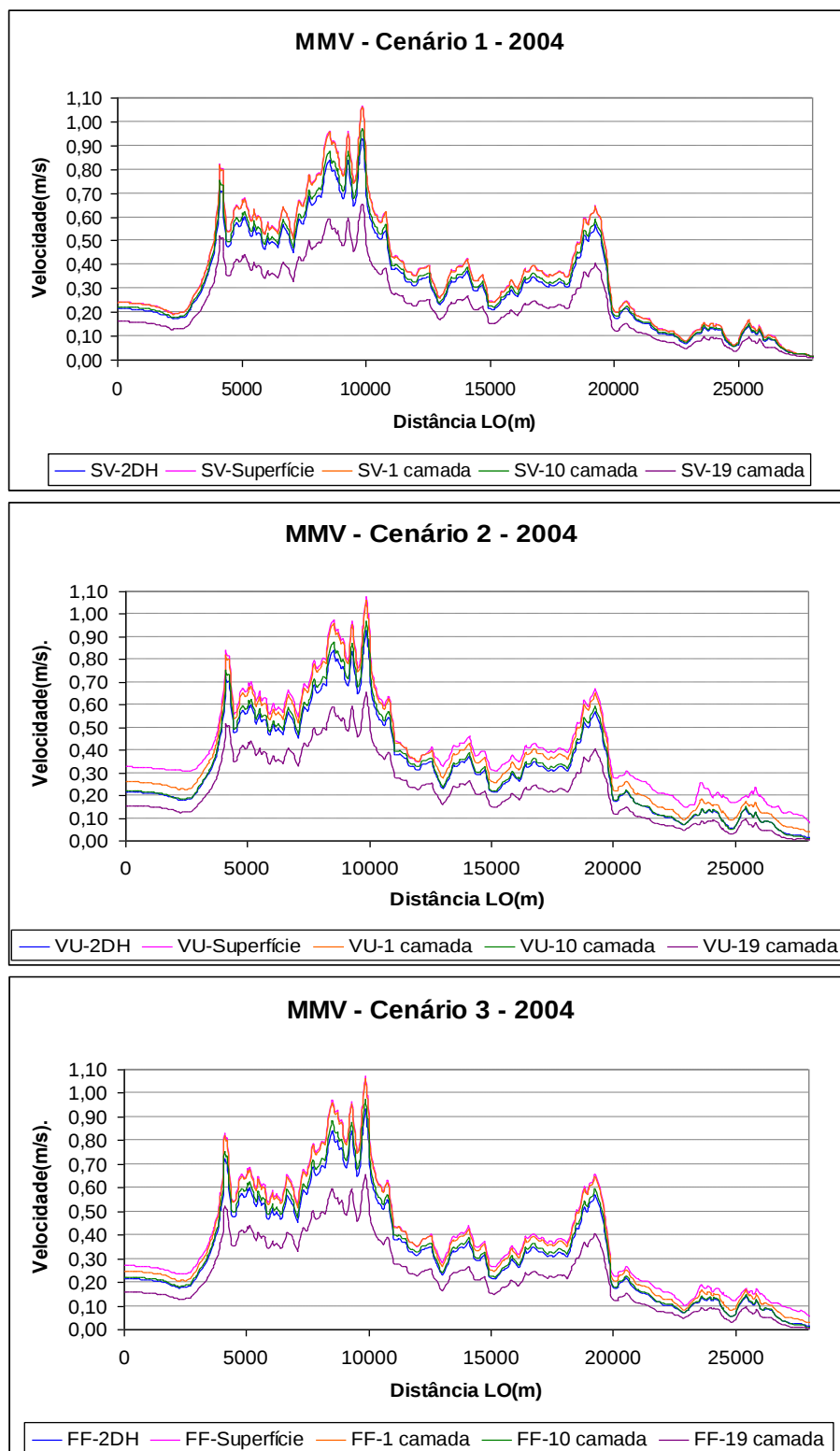


Figura 6-24: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de meia maré vazante para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.

A análise do comportamento das curvas de cada camada quanto a variação batimétrica pode-se perceber que para a batimetria de 2004 é semelhante à batimetria de 1981. Quanto à magnitude das velocidades para a batimetria de 2004 verifica-se que são maiores que para a batimetria de 1981, nos pontos onde a batimetria decresceu entre os anos, i.e., devido a processo de assoreamento do estuário devido à deposição de sedimentos e poluição. O volume de água nesses pontos diminuiu, permitindo assim que a velocidade aumentasse. No riacho do baldo, a velocidade aumentou em 32%, para o cenário 3. Já para pontos onde a profundidade aumentou, acontece o inverso, i.e, a velocidade diminuiu de uma forma insignificante. Na entrada do estuário, a velocidade diminuiu em 5%, para o cenário 3.

6.5.4 Baixa-Mar

Os valores do módulo da velocidade ao longo da fatia LO estão apresentados no gráfico da Figura 6-25, no qual se pode observar as diferenças entre as velocidades ao longo da coluna d'água, assim como ao longo da própria fatia LO.

Quanto a análise 3D, verifica-se que a magnitude das velocidades decrescem com a profundidade da camada, i.e., a curva da superfície livre apresenta maiores magnitudes que a 1ª camada abaixo da superfície. A magnitude da 1ª camada é superior a da 10ª camada. E a magnitude da 19ª camada (1ª camada acima do fundo) é a que apresenta menor magnitude. A magnitude da 2DH aproxima-se ao valor da 10ª camada, visto que os valores da 2DH corresponde a média dos valores obtidos em toda a coluna d'água, e os valores da 10ª camada corresponde ao valor obtido na modelagem 3D para o valor obtido no meio da coluna d'água.

6.5.5 Prisma de Maré

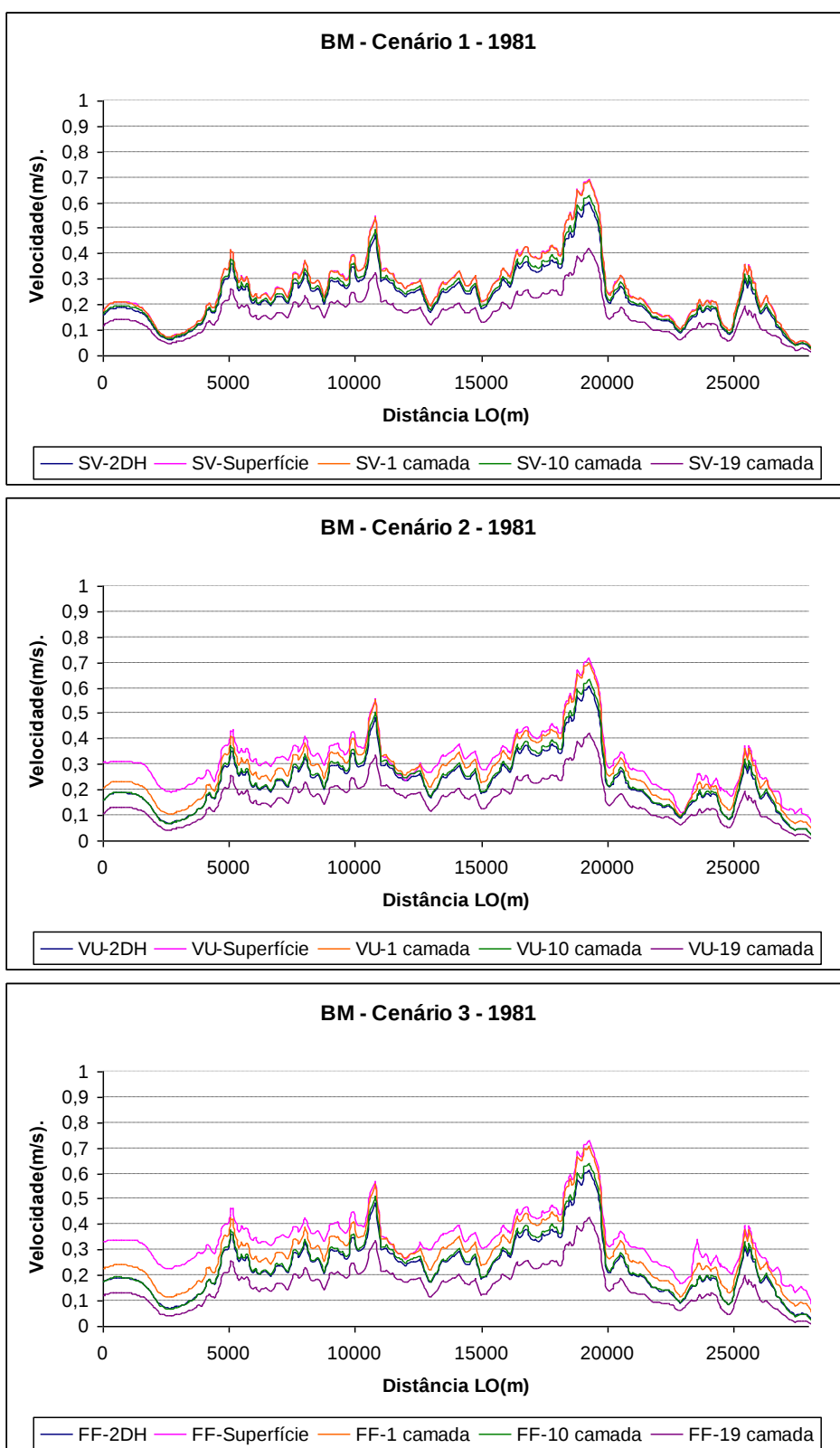


Figura 6-25: Velocidades ao longo da fatia LO no instante de baixa-mar para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 1981.

A Figura 6-26 apresenta os valores de velocidades ao longo da fatia LO no instante de baixa-mar para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.

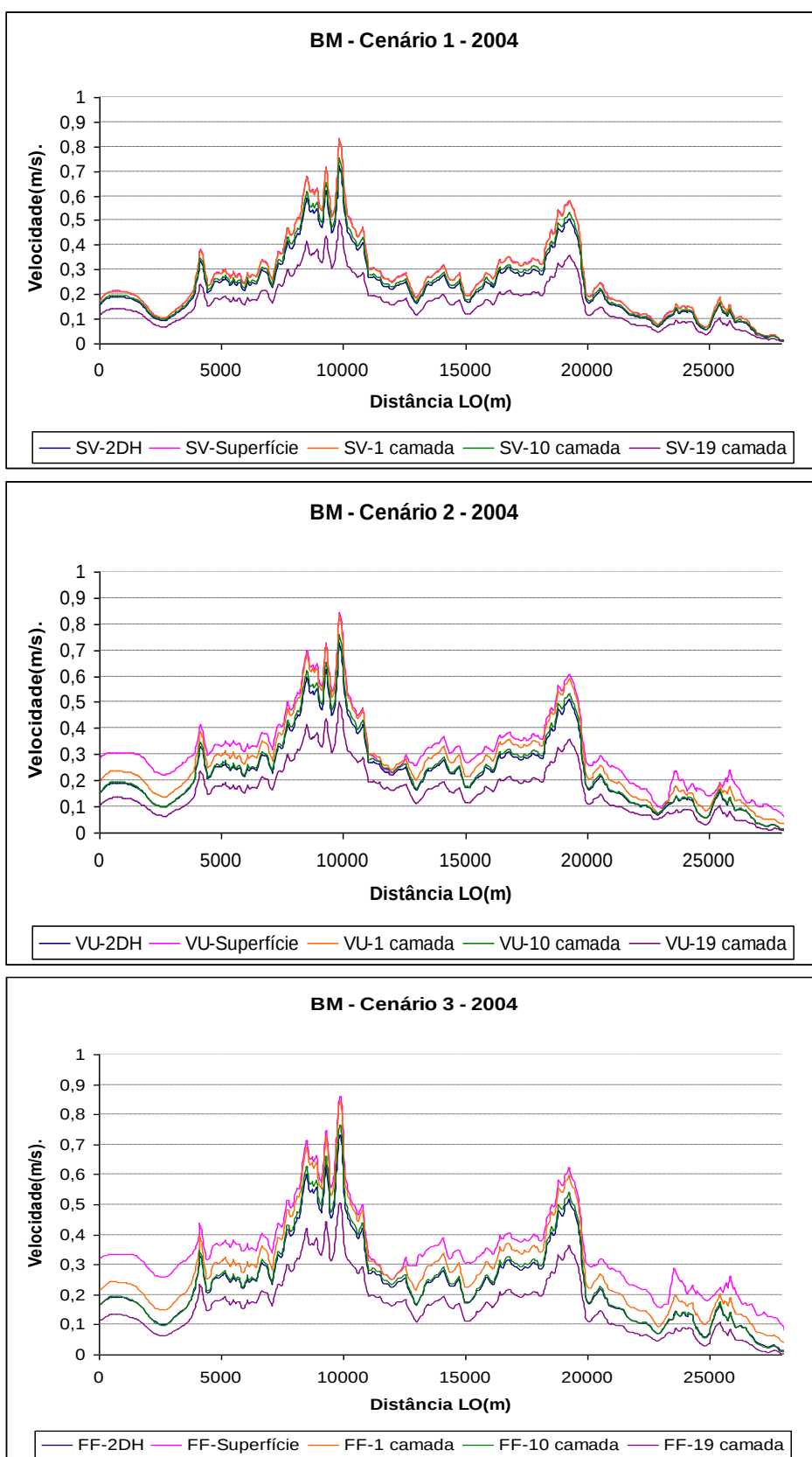


Figura 6-26: Valores de velocidades ao longo da fatia LO no instante de baixa-mar para os cenários 1,2 e 3 e batimetria de 2004.

A análise do comportamento das curvas de cada camada quanto a variação batimétrica pode-se perceber que para a batimetria de 2004 é semelhante à batimetria de 1981. Quanto à magnitude das velocidades para a batimetria de 2004 verifica-se que são maiores que para a batimetria de 1981, nos pontos onde a batimetria decresceu entre os anos, i.e., devido a processo de assoreamento do estuário devido à deposição de sedimentos e poluição. O volume de água nesses pontos diminuiu, permitindo assim que a velocidade aumentasse. No riacho do baldo, a velocidade aumentou em 60%, para o cenário 3. Já para pontos onde a profundidade aumentou, acontece o inverso, i.e, a velocidade diminuiu de uma forma insignificante. Na entrada do estuário, a velocidade diminuiu em 6%, para o cenário 3.

Capítulo VII

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Através da metodologia apresentada no capítulo 4, os padrões de circulação hidrodinâmica no estuário do Rio Potengi foram bem caracterizados. Os resultados obtidos foram plenamente satisfatórios, tendo-se alcançado os objetivos propostos neste trabalho. Portanto, conclui-se que a metodologia apresentada é adequada aos propósitos desta dissertação.

A aplicação do modelo 3D, com análise dos resultados obtidos em diversas camadas horizontais ao longo da coluna d'água, além de resultados promediados na vertical, permitiu diversas análises comparativas. Através desta metodologia foi possível analisar, por exemplo:

- Para um dado cenário, as diferenças entre padrões de correntes na superfície, próximos da superfície, próximos do fundo, e médios na vertical.
- Comparações de padrões em diferentes fases de um ciclo de maré, i.e., meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar.
- Comparações de padrões para diferentes cenários de vento.

Com relação à elevação do nível do mar, destacam-se as seguintes considerações:

- Os resultados de elevação nas estações de controle apresentadas no capítulo 5, mostram nitidamente o aumento da amplitude e diferenças de fase de maré, à medida que esta se propaga para o interior do estuário. Em decorrência disso, quando a preamar ocorre na porção interior do Estuário do Rio Potengi nota-se um maior gradiente de elevação do nível d'água do que o observado quando ocorre a preamar na entrada do EP. A mesma condição é verificada para a ocorrência da baixa-mar. Assim, o aumento da

amplitude da maré torna os níveis de preamares mais elevados e os de baixa-mares mais baixos à medida que se avança para o interior do estuário.

- Observou-se que o aumento do nível d'água na preamar leva cerca de 7 horas, enquanto que o decréscimo do nível d'água na baixa-mar dura, em média, 6 horas, característica comum em estuários de águas rasas como o ora estudado.
- A análise dos resultados de elevação do nível do mar durante um ciclo completo de maré, ao longo da fatia LO apresentado no capítulo 5, indo cerca de 28 km do mar até o interior do estuário indica que:
 - ✓ Nos primeiros 4 km da fatia LO, a circulação, e consequentemente as elevações de nível d'água, começam a ser percebidos pelo escoamento.
 - ✓ Os níveis na entrada do estuário (≈ 5 km) passaram a apresentar uma amplitude um pouco maior, percebendo o mesmo comportamento até a estação do Riacho do Baldo (≈ 11 km). Isso ocorre porque com o estreitamento do estuário, permite que um volume de água consideravelmente maior possa fluir da entrada do estuário do Rio Potengi para o corpo principal do estuário.
 - ✓ A partir dos 11 km ao longo da fatia LO, há um comportamento regido pelo estreitamento do estuário, mas que não indica resultados reais, devido à falta de dados de entrada reais.
- Pode-se observar que a ocorrência de ventos usuais e de frente fria não altera significativamente a elevação dos níveis d'água em comparação com a situação de calmaria. Notam-se alterações de níveis da ordem de 2 cm nos instantes próximos a preamar a baixa-mar nas estações situadas na porção oeste do Estuário do Rio Potengi. Entretanto, deve-se esclarecer que as situações de vento usuais e de frente fria não estão retratando efeitos meteorológicos de maior escala e, portanto, não simulam efeitos de marés meteorológicas.

Com relação à análise dos padrões de correntes, destacam-se as seguintes considerações:

- As velocidades máximas foram verificadas na fase de meia maré enchente e vazante e as mínimas na preamar.
- Quanto a análise 3D, verifica-se que a magnitude das velocidades decrescem com a profundidade da camada, i.e., a curva da superfície livre apresenta maiores magnitudes que a 1ª camada abaixo da superfície. A magnitude da 1ª camada é superior a da 10ª camada. E a magnitude da 19ª camada (1ª camada acima do fundo) é a que apresenta menor magnitude. Isso ocorre para todos os cenários simulados, em ambas batimetrias.
- As maiores velocidades do domínio de modelagem ocorrem no estreitamento do estuário do Rio Potengi, na região próxima a entrada do estuário, ao Porto de Natal e no Riacho do Baldo. As menores velocidades, como eram de se esperar, ocorrem nas faixas marginais.
- Na meia maré enchente:
 - ✓ Quantos a ocorrência de ventos, verifica-se que as magnitudes de velocidade são maiores para o cenário 2 – ventos usuais.
 - ✓ O comportamento das curvas de cada camada quanto à variação batimétrica de 1981 e 2004 são semelhantes, mas a magnitude das velocidades da batimetria de 2004 diferem da batimetria de 1981 e as mesmas variam de acordo com a magnitude da batimetria, i.e., para locais onde a batimetria aumentou, as velocidades diminuíram. E acontece o mesmo, para locais onde a batimetria diminuiu.
 - ✓ A magnitude das velocidades é inversamente proporcional a batimetria, explicada pela equação da continuidade, que afirma $Vazão = Área \times velocidade$, que para manter-se uma mesma vazão, a área tem que aumentar e a velocidade diminuir, e virse-versa.
 - ✓ No riacho do baldo (estação 6), a velocidade aumentou em 33% para o cenário 3. Já na entrada do estuário (estação 3), a velocidade diminuiu em 3%, para o mesmo cenário.
- Na preamar:
 - ✓ Ocorrem as menores magnitudes de velocidade dentre as 4(quatro) fases do ciclo de maré.

- ✓ Verifica-se que locais onde houve a redução de profundidade devido ao processo de assoreamento do estuário, problemas de poluição e sedimentos de contaminantes, a velocidade foi aumentada.
- ✓ No riacho do baldo (estação 6), a velocidade aumentou em 85% para o cenário 3. Já na entrada do estuário (estação 3), a velocidade diminuiu em 40%, para o mesmo cenário.
- Na meia maré vazante:
 - ✓ Verifica-se que locais onde houve a redução de profundidade devido ao processo de assoreamento do estuário, problemas de poluição e sedimentos de contaminantes, a velocidade foi aumentada.
 - ✓ No riacho do baldo (estação 6), a velocidade aumentou em 32% para o cenário 3. Já na entrada do estuário (estação 3), a velocidade diminuiu em 5%, para o mesmo cenário.
- Na baixa-mar:
 - ✓ Houve uma influência da ocorrência de ventos para os cenários simulados. A definição das camadas da coluna d'água verifica o crescimento da magnitude das velocidades pelo aumento da profundidade da coluna d'água.
 - ✓ No riacho do baldo (estação 6), a velocidade aumentou em 60% para o cenário 3. Já na entrada do estuário (estação 3), a velocidade diminuiu em 6%, para o mesmo cenário.

Portanto, a principal característica do Estuário do Rio Potengi é a influência das marés que fazem com que o escoamento nesse trecho adquira uma dinâmica que depende do ciclo da maré. Verifica-se também que a ocorrência dos ventos tem pouca, ou quase nenhuma influência na circulação hidrodinâmica do estuário estudado.

Recomenda-se para estudos futuros:

- Sugere-se o desenvolvimento de um estudo mais detalhado da circulação hidrodinâmica do estuário do Rio Potengi. Através de

levantamentos batimétricos com equipamento de alta resolução, além de elaboração de mapas faceológicos da região. Dados de ventos e de elevação de maré. Estes dados visam fornecer maiores subsídios para uma melhor compreensão do comportamento do nível d'água e dos padrões de correntes do estuário do Rio Potengi.

- Programas de monitoramento através de estações com medições dos dados reais serão um facilitador na entrada de dados de modelos hidrodinâmicos computacionais que servirão de suporte para geração de modelos de transporte de contaminantes (poluentes ou sedimentos). Estes modelos de transporte auxiliarão na gestão ambiental da região, através da mitigação de impactos ambientais com base em medidas corretivas e/ou preventivas.

Finalizando, conclui-se que os modelos hidrodinâmicos computacionais são ferramentas fundamentais para a gestão ambiental, unindo as ações antrópicas e o meio ambiente, de forma harmoniosa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOT, M. B.; BASCO, D. R..*Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers*. Logan Group, UK Limited,1989.

ATA BILGILI; JEFREY A. PROEHL; DANIEL R. LYNCH; KESTON W. SMITH; M. ROBINSON SWIFT. *Estuary/ocean exchange and tidal mixing in a Gulf of Maine Estuary: A Lagrangian modeling study*. Estuarine, Coastal and shelf science. Vol 65,pp 607-624,2005.

B. SHUTTLEWORTH; A. WOIDT; T. PAPARELLA; S. HERBIG; D. WALKER. *The dynamic behaviour of a river-dominated tidal inlet,River Murray, Austrália*. Estuarine, Coastal and shelf science. Vol 64,pp 645-657,2005.

CODERN – Companhia Docas do Rio Grande do Norte, 1996.

COSTA, W.D.*Estudos hidrogeológicos de Natal-RN*. Natal. CAERN,1971.

CUNHA, E.M.S.*Caracterização e Planejamento Ambiental do Estuário Potengi*. Dissertação de Mestrado.Universidade Federal do Rio Grande do Sul.Porto Alegre,1982.211p.

CUNHA, E.M.S. *Evolución Actual del Litoral de Natal – RN (Brasil) y Sus Aplicaciones a la Gestión Integrada*. Tese de Doutorado. Universidade de Barcelona, 2004.384p.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Porto de Natal - Carta náutica nº. 802.1981.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Porto de Natal - Carta náutica nº. 802.2000.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Proximidades do Porto de Natal - Carta náutica nº. 810.1972.

DYER, K..*Estuaries: a physical introduction*. John Wiley & Sons Ltd.,1997.

FIGUEIRÊDO, F.G. *Metais Pesados em sedimentos superficiais do Estuário Potengi*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 1997.65p.

FRAZÃO, E.P. *Caracterização Hidrodinâmica e Morfosedimentar do Estuário Potengi e Áreas Adjacentes: Subsídios para Controle e Recuperação Ambiental no caso de Derrames de Hidrocarboneto*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2003. 195p.

GOOGLE EARTH. Imagem de satélite do Estuário do Rio Potengi. 2005.Disponível em earth.google.com. Data de acesso: 09/09/2005.

IDEMA - INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONOMICO E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE. SEPLAN/IDEC. *Monitoramento para a gestão integrada da zona costeira do Rio Grande do Norte: Relatório Final 2*. Natal, 2002.

_____.Relatório de inspeção técnica. Natal, 2004. (Relatório Interno)

INDRANI GUPTA; SHIVANI DHAGE; A.A. CHANDORKAR; ANJALI SRIVASTAV. *Numerical modeling for Thane creek*. Environmental Modelling & Software. Vol 19, pp 571-579, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE. *Glossário geológico*. Rio de Janeiro:IBGE,1999.

J.M. Dias; J.F. Lopes. *Implementation and assessment of hydrodynamic, salt and heat transport models: The case of Ria de Aveiro Lagoon (Portugal)*. Environmental Modelling & Software. Vol 21, pp 1-15,2006.

MABESOONE, J.M. e Outros. *Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte*. São Paulo: Revista Brasileira de Geociências, 1972. Vol. 2 p.173-188.

MAIA, L.P.; JIMENEZ, J.A.; SERRA, J.; MORAIS, J.O..*The Fortaleza (NE Brazil) waterfront*. Port versus coastal management. Journal of Coastal Research.1998.

MENEZES, G. S. C. *Modelagem de Correntes Residuais na Baía do Espírito Santo*. Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo. 2005. 55p.

RIGO, D. *Análise do Escoamento em Regiões Estuarinas com Manguezais – Medições e Modelagem na Baía de Vitória, ES*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004. 156p.

RIZZINI, Carlos Toledo. *Tratado de fitogeografia do Brasil*. Rio de Janeiro: Ambito Cultural, 1997.

ROSMAN, P. C. C. *Modeling Shallow Water Bodies via Filtering Techniques*. Tese de Doutorado. Massachusetts Institute of Technology, 1987. 273p.

ROSMAN, P. C. C. *Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos*. In: *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos (Vol. 3)*, Capítulo 3, Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 1997.

ROSMAN, P. C. C. *Referência Técnica do SisBAHIA*, Fundação COPPETEC, 2006.

ROSMAN, P. C. C. *Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental*. In: *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos (vol. 5)*, Capítulo 1. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 2001.

SAMPAIO, M. *Estudo de Circulação Hidrodinâmica 3D e Trocas de Massas d'água da Baía de Guanabara – RJ*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2003. 220p.

SANTIAGO, D. I. *Simulação Numérica do Padrão de Escoamento no Canal de Acesso ao Porto de Vitória, ES*. Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo. 2004. 63p.

SOUZA, Henrique Clementino de. *Interpretação das Alterações Ambientais Decorrentes de Obras Portuárias no Estuário Potengi/Jundiaí, Natal/RN*. Monografia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2004.90p.

TC/BR TECNOLOGIA E CONSULTORIA BRASILEIRA. *Relatório de impacto ambiental –RIMA para execução de derrocamento, guia corrente e dragagem da boca a barra do Estuário do Rio Potengi*. CODERN-Companhia Docas do Rio Grande do Norte. Natal, 1996.

TECNOAMBIENTE. *Relatório de controle ambiental (RCA) para execução da dragagem de manutenção do canal de acesso do Porto de Natal*. CODERN-COMPANHIA DOCAS DO RIO GRANDE DO NORTE. Natal, 2001.

VARGAS B.M.;FREIRE,P.C. *Estudos de circulação d'água e de dispersão de poluentes no Complexo Lagunar Sul de Santa Catarina*. 2001.

WEN-CHENG LIU; JAN-TAI KUO; ALBERT Y. KUO. *Modelling hydrodynamics and water quality in the separation waterway of the Yulin offshore industrial park, Taiwan*. Environmental Modelling & Software. Vol 20, pp 309-328, 2005.

Sites pesquisados:

CAERN –Companhia de Agua e Esgoto do Rio Grande do Norte, www.caern.com.br, acessado em 14/03/2005.

FEMAR - Fundação de Estudos do Mar, <http://www.femar.com.br>, 2005.

SERHID – Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte, <http://www.serhid.gov.br>, 2005.

EMPARN – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte, <http://www.emparn.gov.br>, 2005.