



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO-UFPE
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS-CTG
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRÁFIA-DOCEAN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
OCEANOGRÁFIA**

**Circulação hidrodinâmica na região costeira
dos municípios de Recife e Jaboatão dos
Guararapes durante o verão austral**

PATRICIA FAÇANHA ROCHA DE SOUZA

**Recife/Brasil
2007**

S729c

Souza, Patrícia Façanha Rocha de.

Circulação hidrodinâmica na região costeira dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes durante o verão austral / Patrícia Façanha R. de Souza. - Recife: O Autor, 2007.

xiii, 109 folhas, il : figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2007.

Inclui bibliografia e Anexos.

1. Oceanografia Abiótica. 2. Modelagem Matemática. 3. Circulação Costeira. 4. SisBahia – Modelo. I. Título.

UFPE

551.46

CDD (22. ed.)

BCTG/2007-162

PATRICIA FAÇANHA ROCHA DE SOUZA

**Circulação hidrodinâmica na região costeira
dos municípios de Recife e Jaboatão dos
Guararapes durante o verão austral**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Oceanografia da Universidade Federal de
Pernambuco como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre em Ciências
na área de Oceanografia Abiótica.

Orientador: Dr. Moacyr Araújo

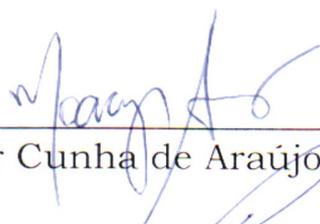
**Recife/Brasil
2007**

PATRICIA FAÇANHA ROCHA DE SOUZA

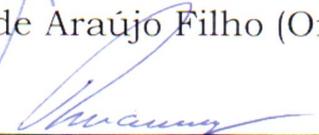
Circulação hidrodinâmica na região costeira dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes durante o verão austral

Dissertação de mestrado apresentada à seguinte banca examinadora em 31/08/2007:

Titulares:



Dr. Moacyr Cunha de Araújo Filho (Orientador/UFPE)



Dr. Valdir Vaz Amaral Manso (DGEO/UFPE)



Dr^a. Carmen Medeiros Limonji (UFPE)

Suplentes:

Dr. Héctor Raul Montagne Dutros (UFRN)

Dr^a. Tereza Cristina Medeiros de Araújo (UFPE)

A Deus e todos que amo.

Agradecimentos

O presente trabalho é o produto de uma longa jornada que não conseguiria concluir sem a participação das pessoas que estiveram presentes em toda ou em parte desta longa caminhada. Assim, deixo aqui meus sinceros agradecimentos:

Ao meu ex-orientador, Fernando Moraes, por ter me apoiado a mudar de área.

Ao meu orientador, Moacyr Araújo (Moa), por ter me aceitado como aluna e proposto um projeto de trabalho, como também pelas oportunidades inesquecíveis de ir a campo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por me fornecer subsídios para minha formação de pesquisadora.

Ao professor Paulo Cesar Colonna Rosman e sua equipe da COPPE/UFRJ, por nos ter acolhido (eu, Fabiana e Marcelo) em seu laboratório durante três instrutivas semanas para estagiar com o modelo SisBaHiA (por ele desenvolvido) e pela oportunidade de aprender sobre o mundo maravilhoso da Engenharia Oceânica.

Ao apoio dos integrantes (órgãos financiadores, executores e colaboradores) do Projeto Monitoramento Ambiental Integrado - MAI-PE, pela cessão dos dados de correntometria da 1ª. Campanha de correntometria realizada na região costeira adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes.

À divisão meteorológica do CINDACTA III, pelo fornecimento dos dados de vento, em especial ao Major Onildo Ivan de Freitas.

Aos professores do Departamento de Oceanografia, que muito me ensinaram sobre suas respectivas áreas e cujas experiências compartilharam comigo.

Aos funcionários do Departamento de Oceanografia, em especial Myrna Lins (sempre sorridente e disposta a nos ajudar com as burocracias do departamento), dona Edileuza (com o cafezinho), "seu Mano", "seu Beto", e os seguranças.

Às amigas da especialização Ariana, Larissa, Juliana (Jujuba), Flávia (galega), Suzana, Carol e Flavia (que me ajudou bastante, fornecendo material para a seleção do mestrado).

Aos meus amigos e colegas do Departamento de Física Antonius Almeida, Fernando Moraes, Gerson, Geraldo, José Américo, Lucas Furtado, Luiz Henrique, Márcio Miranda, Mathias Rufino, Pedro Hugo, Rebeca, Rafael Menezes, Ricardo Cesar, Sergio Coutinho Tâmara, Vladimir e aos integrantes da sala 315 A, Antonio Mário (Cioba), Augusto Cesar (Marion), Priscila Silva,

Erms, Bernardo, e Karllinha, pelo espaço concedido e companherismo na hora do estudo.

A Priscila e Karlla pela carinhosa acolhida no início do mestrado.

Aos meus amigos do LOFEC, Ana Clara, George, Isaac, Lucas, Mara Fisner, Marcio Cintra, Marcus, Vidal em especial, Ana Regina, Doris Veleda, Marcelo Rollnic, Fabiana Soares e Rodolfo Araújo que sempre estiveram dispostos a me ajudar e aconselhar.

Aos meus amigos e colegas do Departamento de Oceanografia, Alexandre Almeida, Arley Andrade, Danielle Laura, Danielle Menor, Elizabeth, George Miranda, Gilson, Jesser Fidelis, Leandro Cabanez, Lúcia Gusmão, Luis Ernesto, Renata Lopes, Sergio Mendonça, Thiago Reis, Victória Eugenia, Pedro Augusto e Valdylene Tavares, e demais amigos e colegas do departamento.

A todos que me acolheram no Rio de Janeiro durante o estágio e cuidaram de mim quando estava doente, Daniel Menezes, Marise, Maria, Gustavo, Regina, Hugo, em especial minha amiga pernambucana Anna Carolina Raposo (carol) que me acolheu em sua casa e esteve ao meu lado em todos os momentos.

À turma do apartamento, Izabel, Evaldení Moreira (Val), Xiomara Franchesca (Xio), Fernando Favero (Negaum), Anne Gabryelle (Gabi) e João Gabriel (Biel), pelo carinho, atenção e generosidade na hora do aperto.

À minha família, em especial aos meus pais, Antonio Rocha (Nêgo) e Maria Emir (Do-re-mi). Não posso deixar de mencionar as demais famílias que me adotaram e meus respectivos "pais": Garibaldi & Carolina e Antonio Oliveira & Maria de Fátima.

Aos meus amigos de longa jornada, Adriana Coutinho, Daniella Collier, Jeanne Cibelle, José Augusto Carvalho Filho (Guga), Leonardo Bull, Maíra Carvalho, Marconi Nóbrega, Patrícia Arcoverde, Patrícia Nóbrega (Zinha), e Yonara, que estando longe ou perto, sempre me ajudaram em tudo.

A Cristiano Nogueira, meu querido companheiro de todas as horas e toda a sua família, em especial Aurélio e Ednalda, por todo apoio e compreensão durante o mestrado, principalmente nos dias mais difíceis.

Mas não poderia deixar de fazer um agradecimento especial a Fabiana Soares, Rodolfo Araújo, Xiomara Franchesca e Evaldení Moreira que contribuíram inestimavelmente na finalização deste trabalho.

Por fim, agradeço a Deus por todas as oportunidades oferecidas, por todas as pessoas que Ele colocou em minha vida e por ter me ajudado a vencer mais uma etapa na minha vida.

Resumo

O sistema de modelos SisBaHiA foi utilizado para analisar a circulação hidrodinâmica e o potencial de transporte de partículas da região costeira dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes durante o verão austral. Na primeira parte do trabalho, os resultados do modelo hidrodinâmico foram comparados com os dados experimentais obtidos em campo com o perfilador de correntes *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP). Para isso foram traçados, perpendicularmente à linha de costa, 13 perfis de correntes, eqüidistantes a 1 km e limitados por isóbatas de 15 m com o uso da carta náutica nº 930. Os vetores resultantes de velocidade da corrente marítima foram calculados a partir das componentes vetoriais horizontais de corrente (U e V) para cada estágio de maré (baixa-mar e preamar) e escala de profundidade (superfície, meio e fundo da coluna d'água) de cada perfil. A análise comparativa mostra que o modelo representou melhor a situação real na superfície da coluna d'água nas áreas sul e central do domínio modelado durante a baixa-mar e a preamar, respectivamente. Estes resultados se devem à batimetria mais detalhada nestas áreas e à profundidade da coluna d'água para os respectivos estágios de maré. Posteriormente, foram analisados os resultados numéricos. Tais resultados evidenciaram que as correntes foram mais intensas nos estágios de maré mais energéticos (vazante e enchente) e na parte sul da área de estudo, devido à forte influência da foz do rio Jaboatão. As intensidades mais baixas ocorreram durante os estágios de maré preamar e baixa-mar, como também próximo à costa, sobre os bancos de recifes submersos (regiões com pouca profundidade), e nas áreas de transição de sentido de corrente. As direções das correntes superficiais durante a enchente foram preponderantemente para SO. Os demais estágios de maré (preamar, vazante e baixa-mar) apresentaram correntes para NO em quase toda a área de estudo, apresentando próximo à área estuarina vetores de corrente para O (preamar e vazante) e SO (baixamar). No meio e no fundo da coluna d'água, as direções das correntes durante a preamar e enchente foram para NO, SO e NE ao norte, sul e extremo leste da área de estudo respectivamente. Já durante a baixa-mar e a vazante, as direções preponderantes das correntes foram NE (em quase toda a área de estudo) e SO (na área estuarina). Na segunda parte do trabalho, duas simulações de transporte Lagrangeano foram realizadas em Barra de Jangadas (aporte continental e litorâneo) para retratar o transporte de sedimentos na área de estudo. A pluma de sedimentos permaneceu no domínio modelado durante dois dias, sendo conduzida principalmente pelo movimento oscilatório da maré.

Palavras-chave: modelagem matemática, SisBaHiA, circulação costeira, ADCP, Recife-PE, Jaboatão dos Guararapes-PE, Brasil.

Abstract

The SisBaHia model system was used to analyze the hydrodynamic circulation and the sediment transport potential on the coastal region of Recife and Jaboatão dos Guararapes cities during the austral summer. In the first part of the study, the results of the hydrodynamic model were analyzed and compared with the experimental data gathered at sea with the *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP). To achieve that, 13 profiles perpendicular to the coast were traced, equally spaced in 1km and limited by isobaths of 15 meters. The resulting current vectors of the field campaign were calculated from the horizontal components of the currents for each tidal stage (low and high tides) and at three different depths (surface, middle and bottom of the water column). The comparative analysis shows that the model represented better the real situation in the surface of the southern and central areas of the modeled domain during low and high tides, respectively. These results are due to the more detailed bathymetry in these areas and to the depth of the water column for each tidal stage. . Afterwards, the numeric results were analysed. Those results showed that the currents were more intense on the more energetic tidal stages (flow and ebb) and on the southern part of the studied área, due to the strong influence of the Jaboatão river. The lesser intensities happened during the full and low tides, as well as near the coast, over the submerged reef banks (shallow regions) and the current direction transition areas. The surface current directions during flow tides were to SW. The other tidal stages (full, ebb and low tides) showed residue currents to NW on almost all the studied area, with current vectors to W near the estuary area (full and ebb) and SW (low tide). On the middle and bottom of the water column, the current directions during flow and full tides were to NW, SW and NE on the north, south and further east of the studied area, respectively. During low tide and ebb, the direction of the residue currents was NE (on almost all the studied area) and SW (on the estuary area). In the second part of the study, two Lagrangean transport simulations were made in Barra de Jangadas (continental and shore contribution). The plume of sediments remained on the modeled domain for almost two days, being transported mainly by the oscillatory movement of the tide.

Keywords: Coastal circulation, ADCP, Mathematical modeling, Sediment transport, SisBaHia Model, Recife, Brazil.

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1. Edificações na praia de Candeias.

Figura 1.2. Enrrocamento na praia de Boa viagem. Fonte: CPRH (2006).

Capítulo 3

Figura 3.1. Trajetória de partículas superficiais com a passagem de um trem de onda.

Figura 3.2. Esquema da atração gravitacional. Fonte: Modificado de Baptista Neto *et al.* (2004).

Figura 3.3. Atuação da força gravitacional da Lua (FG) e da força “centrífuga” (F).

Figura 3.4. Dia lunar ao longo de um dia solar. Fonte: Modificado de Baptista Neto *et al.* (2004).

Figura 3.5. Marés de sizígia e quadratura. Fonte: Modificado de Baptista Neto *et al.* (2004).

Figura 3.6. Localização da Região Metropolitana do Recife. Fonte: Assis (2001)

Figura 3.7. Mapa de localização da área de estudo.

Figura 3.8. Destruição provocada pela ressaca do mar em Boa Viagem - 1995. Fonte: Assis (2001).

Figura 3.9. Restos de construções destruídas pela ressaca no bairro de Barra de Jangada. Fonte: Assis (2001).

Figura 3.10. Estuário de Barra de Jangadas. Fonte: CPRH (2006)

Capítulo 4

Figura 4.1. Sonda *GPSmap Garmin 298 Sounder* (a) e perfilador Rio Grande 600 kHz (b). Fonte: Garmin, 2007 e RD Instruments, 2007.B

Figura 4.2. Técnica de utilização do ADCP. Fonte: RD Instruments, 2003.

Figura 4.3. Detalhes dos equipamentos utilizados para perfilagem com ADCP.

Figura 4.4. Localização dos perfis transversais de coleta de dados de correntometria (ADCP) na região costeira adjacente aos municípios de Recife e de Jaboatão dos Guararapes.

Figura 4.5. Sistema de coordenadas da modelagem 3D e 2DH, onde NR é o nível de referência. Fonte: Rosman (2001).

Figura 4.6. Malha de discretização do domínio modelado adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes.

Figura 4.7. Batimetria da área de estudo utilizada nas simulações.

Figura 4.8. Velocidade do vento (m. s⁻¹) a 3 m de altura para o mês de janeiro de 2007. Fonte : CPTEC (2007).

Figura 4.9. Intensidade do vento (m.s⁻¹) a 10 m de altura para o mês de janeiro de 2007. Fonte: CINDACTA III (2007).

Figura 4.10. Direção do vento a 10 m de altura para o mês de janeiro de 2007. Fonte : CINDACTA III (2007).

Figura 4.11. Simulação do transporte de sedimentos: (a) Cenário 2 - Contribuição continental e (b) . Cenário 3 – Contribuição litorânea.

Capítulo 5

Figura 5.1. Vetores horizontais da velocidade das correntes na superfície durante a baixa-mar: (a) experimental e (b) numérico.

Figura 5.2. Valores médios da intensidade da corrente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) na superfície durante baixa-mar.

Figura 5.3. Vetores horizontais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água durante a baixa-mar: (a) experimental e (b) numérico.

Figura 5.4. Valores médios da intensidade da corrente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) no meio da coluna d'água durante baixa-mar.

Figura 5.5. Vetores horizontais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a baixa-mar: (a) experimental e (b) numérico.

Figura 5.6. Valores médios da intensidade da corrente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) próxima ao fundo durante a baixa-mar.

Figura 5.7. Vetores horizontais da velocidade das correntes na superfície durante a preamar: (a) experimental e (b) numérico.

Figura 5.8. Valores médios da intensidade da corrente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) na superfície durante a preamar.

Figura 5.9. Vetores horizontais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água durante a preamar: (a) experimental e (b) numérico.

Figura 5.10. Valores médios da intensidade da corrente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) no meio da coluna d'água durante a preamar.

Figura 5.11. Vetores horizontais da velocidade das correntes próxima ao fundo durante a preamar: (a) experimental e (b) numérico.

Figura 5.12. Valores médios da intensidade da corrente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) próxima ao fundo durante a preamar.

Figura 5.13. Pluma de sedimentos lançados do estuário de Barra de Jangadas. (a) 1 h, (b) 5 h, (c) 23 h e (d) 44 h após o início do lançamento das partículas na preamar.

Figura 5.14. Pluma de sedimentos lançados do estuário de Barra de Jangadas. (a) 1 h, (b) 5 hs, (c) 19 hs e (d) 44 h após o início do lançamento das partículas na preamar.

Figura 5.13. Velocidade das correntes no estágio de maré preamar: (a) superfície, (b) Meio, (c) Fundo da coluna d'água.

Figura 5.14. Velocidade das correntes no estágio de maré vazante: (a) superfície, (b) Meio, (c) Fundo da coluna d'água.

Figura 5.15. Velocidade das correntes no estágio de maré baixa-mar: (a) superfície, (b) Meio, (c) Fundo da coluna d'água.

Figura 5.16. Velocidade das correntes no estágio de maré enchente: (a) superfície, (b) Meio, (c) Fundo da coluna d'água.

Anexo A

Figura A.1. Campos cinemáticos da componente norte da corrente ($m \cdot s^{-1}$) dos perfis J01, J02, J03, J04, J05, durante a baixa-mar.

Figura A.2. Campos cinemáticos da componente norte da corrente ($m \cdot s^{-1}$) dos perfis J06, R01, R02, R03, R04, durante a baixa-mar.

Figura A.3. Campos cinemáticos da componente norte da corrente ($m \cdot s^{-1}$) dos perfis R05, R06, R07, durante a baixa-mar.

Figura A.4. Campos cinemáticos da componente norte da corrente ($m \cdot s^{-1}$) dos perfis J06, R01, R02, R03, R04, durante a preamar.

Figura A.5. Campos cinemáticos da componente norte da corrente ($m \cdot s^{-1}$) dos perfis R05, R06, R07, durante a preamar.

Lista de Tabelas

Capítulo 3

Tabela 3.1. Balanço sedimentar de uma praia. Fonte: Souza *et al* (2005).

Capítulo 4

Tabela 4.1. Cronograma das campanhas de mar (02 a 04 de janeiro de 2007). BM = baixa-mar; PM = preamar.

Tabela 4.2 Características das oscilações do nível do mar utilizadas como condição de contorno para as simulações na cidade do Recife e Jaboatão dos Guararapes-PE. Fonte: FEMAR (2006):.

Tabela 4.3. Opções de modelagem consideradas nas simulações da região costeira adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes.

Tabela 4.4. Condições de contorno consideradas nas simulações da região costeira adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes.

Sumário

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	XI
CAPITULO 1	1
INTRODUÇÃO.....	1
CAPITULO 2	6
OBJETIVOS	6
CAPITULO 3	7
<i>PROCESSOS COSTEIROS, PLATAFORMA CONTINENTAL E ÁREA DE ESTUDO</i>	7
3.1. <i>PROCESSOS COSTEIROS</i>	7
3.2. <i>PLATAFORMA CONTINENTAL</i>	18
.... 3.2.1. <i>Regime hidráulico da plataforma continental</i>	19
....3.2.2. <i>Características da plataforma continental brasileira</i>	22
.... 3.2.3. <i>Circulação oceânica sobre a plataforma continental brasileira</i>	25
3.3. <i>ÁREA DE ESTUDO</i>	27
3.3.1. <i>Localização e descrição</i>	26
3.3.2. <i>Forçantes meteorológicas, correntes e marés</i>	31
CAPITULO 4	34
ABORDAGEM METODOLOGICA	34
4.1. <i>CAMPANHAS DE MAR</i>	34
4.2. <i>MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS COSTEIROS</i>	38
4.3. <i>O MODELO SisBaHiA</i>	39
4.4. <i>O MÓDULO HIDRODINÂMICO EULERIANO</i>	41
4.4.1. <i>Equações básicas</i>	42
(a) <i>Módulo 3D</i>	43
(b) <i>Módulo 2DH</i>	47
4.5. <i>O MÓDULO LAGRANGEANO DE TRANSPORTE ADVECTIVO DIFUSIVO</i>	49
4.6. <i>APLICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO EULERIANO</i>	51
4.6.1. <i>Malhas de discretização espaço-temporal</i>	51
4.6.2. <i>Batimetria</i>	53
4.6.3. <i>Cisalhamento eólico</i>	54
4.6.4. <i>Forçante astronômica (marés)</i>	57
4.6.5. <i>Condições iniciais</i>	59
4.6.6. <i>Tratamento das condições de contorno horizontais</i>	60

4.6.7. <i>Cenários de simulação</i>	61
4.7. <i>APLICAÇÃO DO MODELO LAGRANGEANO</i>	62
CAPITULO 5	64
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
5.1. <i>MODELO HIDRODINÂMICO EULERIANO</i>	65
5.1.1. <i>Estágio de baixa-mar (BM)</i>	65
5.1.2. <i>Estágio de preamar (PM)</i>	72
5.1.3. <i>Análise dos resultados do modelo hidrodinâmico Euleriano</i>	78
5.2. <i>RESSULTADOS NUMÉRICOS DOS CAMPOS DE CORRENTES</i>	80
5.2.1. <i>Análise dos campos de correntes</i>	88
5.3. <i>MODELO LAGRANGEANO</i>	89
5.3.1. <i>Cenário 2 – Aporte estuarino de sedimentos</i>	889
5.3.2. <i>Cenário 3 – Aporte litorâneo de sedimentos</i>	91
5.3.3. <i>Análise dos resultados do modelo Lagrangeano</i>	933
CAPITULO 6	94
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	94
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	98
ANEXO A – CAMPOS CINEMATICOS OBTIDOS A PARTIR DAS PERFILAGENS DE ADCP	105

Capítulo 1

Introdução

O Brasil é um país de dimensões continentais, possuindo uma zona costeira que se estende por 9.200 km (IBGE, 2001). Ao longo dessa faixa litorânea é possível identificar uma grande variedade de paisagens como dunas, ilhas, recifes, costões rochosos, baías, estuários, brejos e falésias. Observa-se também que os seus ecossistemas, tais como praias, restingas, lagunas e manguezais, devido às diferenças climáticas e geológicas, apresentam diferentes espécies de animais e vegetais.

A linha de costa é um dos ambientes mais dinâmicos e sensíveis da natureza. Sua posição varia constantemente ao longo do tempo, sendo afetada por um grande número de fatores, de origem natural, relacionado à dinâmica costeira (balanço de sedimentos, variações do nível relativo do mar, etc.), como também a partir da intervenção humana (obras de engenharia, represamento de rios, dragagens, etc).

A dinâmica costeira, que condiciona a construção geomorfológica da linha de costa, é a principal responsável pelo desenvolvimento das praias arenosas e pelos processos de erosão e deposição, que as mantêm em constante alteração. As praias são compostas de material não consolidado, como areia e cascalho. São formadas na interface entre dois

grandes ambientes, a Terra e o oceano, ou outro corpo aquoso de grandes proporções como rios e lagos. Elas servem de habitat para várias espécies de animais e vegetais e agem como uma proteção costeira, tanto para os ecossistemas adjacentes, como contra o ataque erosivo das ondas. As praias são bastante utilizadas para atividades urbanas, recreação, turismo e encontram-se em constante modificação (sujeitas a processos atuais associados a ondas, marés, ventos e suas correntes induzidas).

Em escala mundial, alguns autores estimam que cerca de dois terços da população habite a zona costeira, que corresponde a menos de 15% da superfície terrestre. Desta forma, as praias desempenham um grande papel econômico, sobretudo associado à indústria do turismo. Esse tipo de atividade vem crescendo muito no Brasil, chegando a triplicar em menos de uma década (EMBRATUR, 2002 *apud* Souza *et al*, 2005). Com um crescimento explosivo e desordenado, o turismo, a especulação imobiliária e a mineração (ex.: retirada de areia das praias e dunas), sem qualquer planejamento ambiental e investimentos em infra-estrutura, as praias vêm sofrendo uma crescente descaracterização. Cerca de 20% das linhas de costa de todo o planeta são formadas por praias arenosas, das quais 70% estão predominantemente em processo de erosão, 20% em progradação e os 10% restantes encontram-se em equilíbrio relativo (Bird, 1985, 1999). No Brasil, são encontradas evidências de erosão marinha em praticamente toda a linha de costa.

No caso específico do Estado de Pernambuco, a faixa costeira apresenta graves problemas ambientais, com muitos trechos da costa em desequilíbrio, apresentando erosão marinha progressiva que varia de moderada a severa (CPRH, 1998). Atualmente, toda a faixa das praias de Boa Viagem, Piedade e Candeias (áreas de grande valor imobiliário), apresentam um alto índice de ocupação, com grande concentração de atividades econômicas, de lazer e de turismo. Toda a extensão dessas praias sofreu ação antrópica associada às construções civis. Em Boa Viagem destaca-se a Avenida Boa Viagem, enquanto que em Piedade e

Candeias, os edifícios. Algumas destas obras não respeitam os limites de pós-praia, essenciais para o suprimento de sedimentos, comprometendo assim vários trechos de praia que estão sob um forte processo de erosão.

O manejo deste problema tem sido feito de maneira espontânea e de certa forma desordenado, a partir de intervenções de ação individual e/ou municipal, geralmente após o problema já ter atingido proporções alarmantes, e muitas vezes sem o conhecimento e a devida observação do contexto. Estas intervenções se dão, em geral, através da colocação de muros e espigões nas áreas criticamente atingidas sem o devido suporte de informações sobre as características das praias e da hidrodinâmica costeira. As mesmas, freqüentemente, resultam em insucessos ou mesmo em intensificação do processo erosivo, localmente ou em áreas adjacentes, implicando no gasto de somas elevadas de recursos e prejuízo estético considerável (CONDERM/FIDEM, 2004). As Figuras 1.1 e 1.2 trazem alguns exemplos de intervenções recentes realizadas nas praias de Boa Viagem, Piedade e Candeias.

A erosão na linha de costa tem despertado a atenção de cientistas e planejadores em todo o mundo, como também a compreensão de suas causas e o que fazer para minimizar os prejuízos materiais decorrentes da mesma. Muitos países têm investido milhões na conservação, manutenção e restauração das praias. No Brasil, a conservação das praias tem se tornado uma preocupação cada vez mais freqüente, que acabou sendo inserida no contexto do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro, PNGC, pela Lei nº 7.661 de 16 de maio de 1998. O PNGC já definiu, em escala nacional, 133 áreas prioritárias para conservação e proteção da biodiversidade das zonas costeiras e marinhas, que incluem as praias a elas associadas (MMA, 2002).



Figura 1.1. Edificações na praia de Candeias



Figura 1.2. Enrrocamento na praia de Boa viagem. Fonte: CPRH (2006)

Em Pernambuco, o problema tem merecido atenção e preocupação de alguns setores do poder público, como a CONDERM/FIDEM, a CPRH e, principalmente, as Prefeituras dos Municípios das áreas atingidas. A população atingida também vem tomando medidas emergenciais e descontínuas. Desta forma, há a necessidade da implantação de medidas essenciais como um plano de gestão integrada e de uso adequado da zona costeira (CONDERM/FIDEM, 2004).

Diante destes fatos, surge a motivação do desenvolvimento deste trabalho, que consiste em apresentar uma aplicação técnica de modelagem matemática ao estudo da circulação costeira na área marítima adjacente às cidades do Recife e de Jaboatão dos Guararapes, utilizando o modelo hidrodinâmico SisBaHiA (Sistema de Base de Hidrodinâmica Ambiental) (ROSMAN, 2001).

Neste trabalho são também apresentados os primeiros resultados de medições de corrente costeira obtidas durante o período de 02 a 09 de janeiro de 2007, no âmbito do Projeto Monitoramento Ambiental Integrado (MAI-PE). O Projeto MAI-PE é um esforço inter-institucional que tem por objetivo principal o desenvolvimento de um monitoramento ambiental integrado – avaliação dos processos de erosão costeira dos municípios de Paulista, Olinda, Recife e Jaboatão dos Guararapes, estabelecido pelo Programa de Gerenciamento Costeiro Integrado de Proteção e Defesa da Zona Costeira (GIZC), e executado pela CPRH (CONDERM/FIDEM, 2004).

As medições de correntes foram realizadas com a utilização do perfilador de correntes *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), ou Correntômetro Acústico de Efeito Doppler Rio Grande 600 kHz. Estes dados foram comparados com os resultados numéricos gerados pelo modelo hidrodinâmico do SisBaHiA. Trata-se, portanto, do primeiro passo para viabilizar a futura utilização de modelagem matemática como uma ferramenta de gerenciamento e de tomada de decisões acerca das possíveis intervenções antrópicas visando minimizar o processo erosivo que vem sendo observado nesta área da costa pernambucana.

Capítulo 2

Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar a circulação e o potencial de transporte na região costeira dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes, característicos do período de verão austral (período de estiagem), utilizando-se de medições oceanográficas e de técnica de modelagem matemática e simulação numérica.

Mais especificamente, foram também estabelecidos os seguintes objetivos:

- Desenvolver metodologia para coleta (perfilagens) e posterior análise de dados de correntes com utilização do perfilador de correntes ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*);

- Aplicar técnica de modelagem matemática para avaliar o potencial de transporte longitudinal de sedimentos na região costeira dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes, característicos do período de verão austral (período de estiagem).

Capítulo 3

Processos Costeiros, Plataforma Continental e Área de Estudo

3.1. PROCESSOS COSTEIROS

Os processos sedimentares que atuam na linha de costa são resultantes da combinação de fatores oceanográficos, hidrológicos, meteorológicos, climáticos, biológicos, geológicos, químicos e antrópicos (Souza, 1997).

Os processos físicos são basicamente gerados pela ação de ondas, marés e ventos, e pelas correntes geradas por cada um desses agentes, e/ou pela interação entre eles.

Os fatores meteorológicos/climáticos estão associados a eventos de curta ou de longa duração. Os de curta duração, como tempestades, furacões, tormentas e ressacas, têm normalmente efeitos devastadores em função da sua potência e de sua força geradora. Os de longa duração estão ligados ao eustatismo climático, produto de períodos intercalados de glaciações e interglaciações que alteram o nível médio dos oceanos, provocando transgressões e regressões. Essas variações são responsáveis pelas feições atuais da zona costeira. Desta forma, os fatores

meteorológicos/climáticos têm maior influência na variação do nível do mar (diário, sazonal e de longo período) e na ação dos ventos, interferindo no comportamento do clima de ondas e, conseqüentemente, nas características das correntes costeiras (Souza *et al*, 2005).

Nos processos biológicos, os organismos que habitam a zona costeira são os responsáveis por modificações através da interação com os sedimentos e através da bioconstrução de estruturas e esqueletos carbonáticos.

Os processos químicos são resultantes do intemperismo das rochas e precipitação de materiais, como depósito de sal, conhecido como evaporitos (Baptista Neto *et al.*, 2004).

Os fatores geológicos podem estar associados a terremotos ligados a falhas geológicas ou à acomodação de camadas, ou mesmo deslizamento de terreno, que podem modificar a configuração do litoral. Alguns desses fenômenos, quando ocorrem em áreas submersas, trazem riscos potencialmente elevados, pois geram ondas de grande energia e alto poder destrutivo, como os maremotos ocorridos recentemente no sudeste asiático. Entretanto, dentre os diversos fatores geológicos atuantes no litoral, os de maior importância para as praias são os processos sedimentares, responsáveis pelos ganhos (deposição) e perdas (erosão) de areia na praia, que determinam o seu balanço sedimentar (Souza *et al*, 2005).

Os fatores antrópicos envolvem as intervenções do homem nos ecossistemas costeiros. Estas intervenções estão associadas em geral à ocupação desordenada, à falta de planejamento urbano, realizando aterros indiscriminados dos mangues e de obras de engenharia como portos e marinas, que alteram profundamente o equilíbrio dos processos de transporte de sedimentos na zona litorânea. Nos grandes centros urbanos podemos encontrar ainda obras de contenção de ondas como

enrrocamentos e espigões para proteger as praias erodidas da energia das ondas.

Nas próximas seções serão descritos sucintamente os principais agentes e processos responsáveis pela dinâmica sedimentar das praias:

- (a) Ondas e ventos;
- (b) Correntes geradas por ondas;
- (c) Maré e variações do nível do mar;
- (d) Balanço sedimentar das praias.

(a) Ondas e ventos

As ondas aparecem como um resultado da combinação de forças restauradoras em um fluido que foi retirado de seu estado de equilíbrio inicial.

As ondas são geradas pelos ventos no oceano aberto e dependem basicamente de sua velocidade, duração e extensão da pista na superfície do oceano (*fetch*) sobre a qual eles atuam. A quantidade de energia potencial absorvida pelas ondas é proporcional à duração do vento e ao comprimento da pista. Quando as ondas são geradas em locais de tempestade, dá-se origem a um trem regular de ondas conhecido como *swells* (ondulações), que perdem um pouco da energia ao longo do percurso. Assim, as ondas incidentes gravitacionais podem ter sido geradas a quilômetros de distância em áreas de tempestade. As ondas secundárias (*seas*) podem ser geradas nas proximidades da costa devido à forte ação dos ventos na costa ou mesmo devido a alterações na energia das ondas. A energia das ondas refletidas pela costa quando aprisionadas podem gerar ondas estacionárias (*standing waves*), e quando são reintegradas ao oceano geram ondas de ressonância (*edge waves*). Tais ondas atuam na zona de surfe e são responsáveis pela topografia acidentada. As ondas de infragravidade (*infragravity waves*) são geradas

pela interação ou interferência entre mais de um trem de onda na costa. O maremoto (*tsunami*) são ondas geradas por abalos sísmicos que ocorrem no assoalho oceânico, ondas estas que possuem baixa amplitude e longo período e um poder devastador quando atingem o continente (Souza *et al*, 2005).

O modelo clássico no estudo de ondas para dinâmica dos fluidos considera a onda ideal do tipo senoidal. Essa aproximação simplifica a progressão da onda sobre a superfície, mesmo quando são irregulares. Seus tipos irregulares aparecem constantemente modificados na superfície, de maneira a serem sempre sobrepostas por outras. Desta forma, qualquer onda observada é na verdade o somatório de várias ondas com alturas, comprimentos de onda e frequências diferentes. Seu ângulo de fase permite as várias defasagens de ondas, isto é, permite que o máximo ocorra em diferentes horários.

O vento pode ser considerado como o ar em movimento. Ele resulta do deslocamento de massas de ar, derivado dos efeitos das diferenças de pressão atmosférica entre duas regiões distintas e é influenciado por efeitos locais como a orografia e a rugosidade da superfície.

Os ventos, além de produzirem as ondas, são também um importante agente na dinâmica sedimentar das praias, sendo o principal responsável pela troca de areia entre praias e dunas. No caso específico de ondas de vento, estas são criadas a partir das forças de pressão e fricção, que perturbam o equilíbrio da superfície dos oceanos. O vento transfere parte da sua energia para a água através da fricção entre o vento e a água. Isso faz com que as partículas na superfície tenham um movimento elíptico, que é uma combinação de ondas longitudinais (para frente e para trás) e transversais (para cima e para baixo) (Figura 3.1).

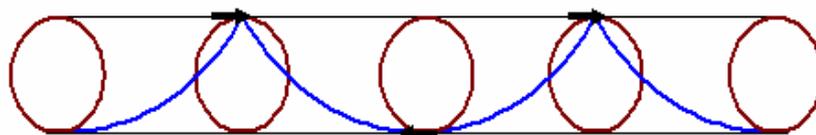


Figura 3.1. Trajetória de partículas superficiais com a passagem de um trem de onda.

Quando o trem de ondas se aproxima da costa, a espessura da lâmina de água começa a influenciar na velocidade, diminuindo-a e absorvendo energia. Em função da diminuição da profundidade e difração ao redor de obstáculos, as ondulações que chegam à costa sofrem o efeito de refração no fundo marinho. Esses fenômenos geram perturbações na direção de propagação das ondas (ortogonais) de tal modo que, quando as ortogonais convergem para um determinado local, há concentração de energia, predominando a erosão, e quando as ortogonais divergem, há dispersão de energia, predominando a deposição (Souza *et al*, 2005).

Quando as ondas atingem as zonas mais rasas, o seu comprimento diminui, e a altura da crista aumenta. Esse processo ocorre com a diminuição da profundidade até que a onda desliza e quebra, produzindo a arrebentação (Souza *et al*, 2005). Segundo Toldo Jr *et al.* (1993), existem quatro tipos de arrebentação ou quebra: deslizante (*spiling*), mergulhante (*plunging*), ascendente (*surging*) e frontal (*collapsing*).

(b) Correntes geradas por ondas

As correntes costeiras ou sistema de circulação são geradas pela incidência de ondas na linha de costa, e podem ser divididas em quatro partes: 1) transporte de massas de água costa-adentro; 2) correntes de deriva litorânea; 3) fluxo de retorno costa-afora, que inclui correntes de retorno e transporte de massas de água costa-afora; e 4) o movimento ao longo da costa das cabeças das correntes de retorno (CERC, 1977).

O tipo de circulação costeira é determinado pelo ângulo de incidência das ondas na praia. A corrente de deriva litorânea é a componente paralela à praia (corrente costeira mais importante), sendo a principal agente de distribuição de sedimentos ao longo da costa e a principal causa de afogamentos na praia.

A velocidade de uma corrente de deriva litorânea varia principalmente em função do ângulo de incidência das ondas (Muehe, 1994).

A deriva litorânea resultante tem o sentido no qual a maioria dos sedimentos se move durante um longo período de tempo, a despeito da ocorrência de qualquer sentido oposto, menor ou sazonal de movimento.

A “célula de circulação litorânea” é formada por cada setor de costa com um determinado sentido de deriva litorânea resultante. Para cada célula pode-se identificar três zonas:

- zona de erosão – local de maior energia e origem da corrente (barlamar);
- zona de transporte – transporta os sedimentos ao longo da costa;
- zona de deposição ou acumulação - local de diminuição de energia e término da corrente (sotamar).

Quando duas células estão lado a lado, podem ocorrer duas situações:

- convergência de correntes – pode ocorrer acumulação intensa e/ou desenvolver uma terceira componente, a corrente de retorno;
- divergência de corrente – local de processo erosivo acentuado.

A maior responsável pelas migrações laterais das desembocaduras fluviais, lagunares e estuarinas ao longo da costa é a deriva litorânea. Para muitos autores o principal mecanismo de construção das planícies “deltaicas” do nordeste e leste do Brasil é dada pelo bloqueio dessas correntes que são causadas pelos fluxos fluviais (Souza *et al*, 2005).

(c) Marés e variações do nível do mar

Maré é o movimento periódico das águas do mar, pelo qual elas se elevam ou abaixam em relação a uma referência fixa no solo. Elas são formadas pela ação combinada de forças de atração entre a Terra, Lua e Sol, e por forças centrífugas geradas pelo movimento de rotação em torno do centro de massa do sistema Sol-Terra-Lua (localizado no interior da Terra, a uma distância de 1/4 do raio terrestre). Os ciclos de maré são estabelecidos pela livre migração das partículas de água nos oceanos, que se movimentam associadas a estas forças mencionadas.

A atração gravitacional da Lua é dominante em relação à do Sol (mesmo a Lua tendo uma massa muito menor que a do Sol), devido à sua proximidade com a Terra, e faz com que a água dos oceanos avance sobre a parte da Terra que se encontra mais próxima à Lua e também sobre a parte diametralmente oposta (Figura 3.2).

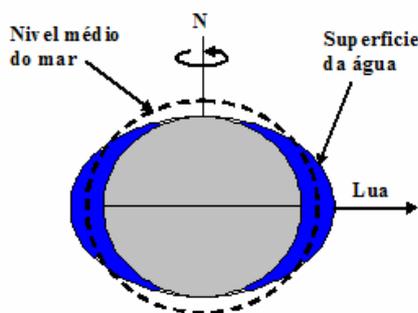


Figura 3.2. Esquema da atração gravitacional. Fonte: Baptista Neto *et al.* (2004)(modificado).

A força centrífuga é igual em qualquer local da superfície da Terra, no entanto, a força de atração gravitacional será maior quanto maior for a proximidade em relação à Lua. Portanto, na face da Terra voltada para a Lua, a força de atração gravitacional é maior do que a reação da força centrípeta, enquanto que na face oposta ocorre o contrário (Figura 3.3).

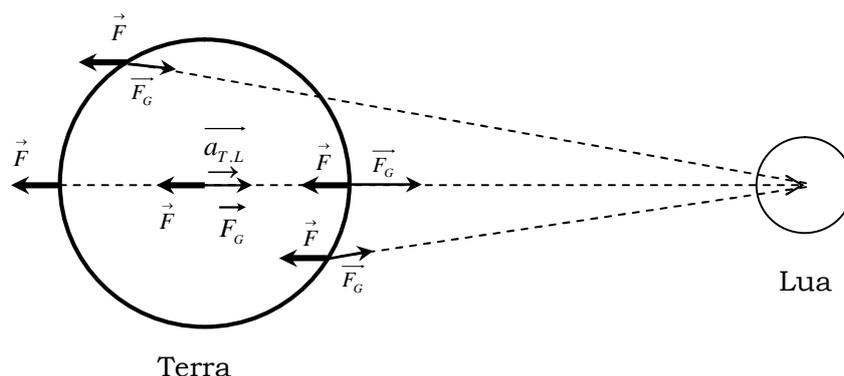


Figura 3.3. Atuação da força gravitacional da Lua (F_G) e da força “centrífuga” (F).

O movimento de translação da Lua, também conhecido como dia lunar, tem a duração de 24 h e 50 min., e corresponde ao tempo compreendido entre duas aparências sucessivas da Lua em um meridiano exatamente acima de um observador estacionário. Dividindo-se este tempo em quatro períodos, teremos quatro turnos de aproximadamente 6 h e 12 min, que é a duração de cada maré e suas variações, de preamar (nível máximo de uma maré cheia) a baixa-mar (nível mínimo de uma maré vazante).

Durante uma volta completa da Terra em torno do seu próprio eixo (24h ou dia solar), a Lua gira para leste de $12,2^\circ$, e a Terra ainda gira por mais 50 minutos para que o observador continue alinhado, como mostra a Figura 3.4.

Como a Terra está girando em torno do seu eixo, qualquer ponto em sua superfície passará duas vezes por um período de maré baixa e maré alta durante um dia lunar (24 h 50 min). A diferença de 50 minutos do dia lunar em comparação com o dia solar explica porque as variações entre maré alta e baixa ocorrem em horas diferentes durante os ciclos de maré. Logo, se acompanharmos os horários de pico de maré alta ou baixa em um determinado local, observamos que eles ocorreram com uma

defasagem horária de 50 minutos a cada dia sucessivo (Baptista Neto *et al.*, 2004).

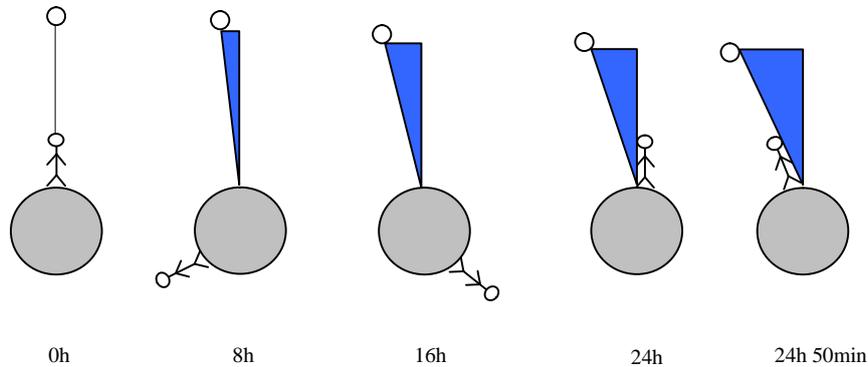


Figura 3.4. Dia lunar ao longo de um dia solar. Fonte: Modificado de Baptista Neto *et al.* (2004).

Nos períodos de Luas grandes (Cheias e Novas), onde a Terra, o Sol e a Lua estão em oposição ou conjunção, ocorre uma somatória de forças desses astros e o movimento das marés atinge seu ponto extremo (tanto nas preamares quanto nas baixa-mares). Desta forma, ocorrem as marés de sizígia ou de “águas-vivas” (marés de grande amplitude), onde as águas correm em grande velocidade (Figura 3.5).

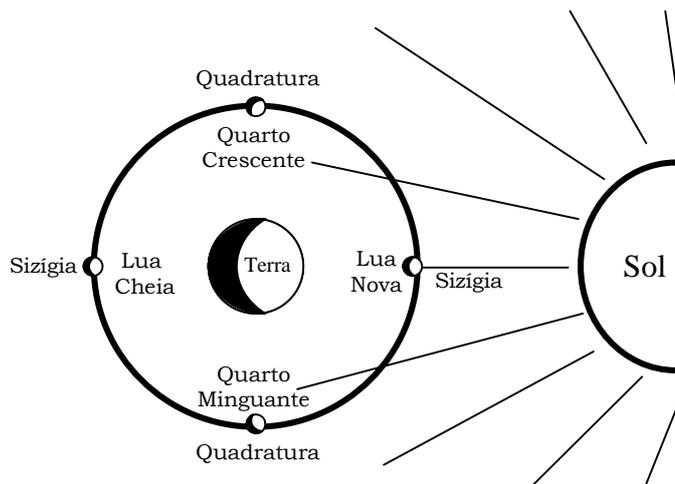


Figura 3.5. Marés de sizígia e quadratura. Fonte: Modificado de Baptista Neto *et al.* (2004).

Nos períodos de quarto-crescente e quarto minguante, ocorre o inverso das sizíguas, que são as marés “mortas” ou de quadratura, onde as águas são calmas e de pouca velocidade. Um ciclo completo mensal de maré ocorre aproximadamente em 29,5 dias.

Existe também a maré meteorológica, que é a diferença entre a maré observada e aquela prevista pela tábua de marés. As causas desse fenômeno pouco conhecido são, principalmente, as variações da pressão atmosférica e a ação do vento sobre a água, causando assim níveis mais baixos ou mais altos que os previstos.

O nível do mar (NM) pode variar em diferentes escalas de tempo: horária, diária, sazonal e de longo período (Mesquita, 2003). As variações horárias e diárias estão associadas às mudanças na intensidade e direção dos ventos, acompanhadas de variações na pressão atmosférica, ambas relacionadas à passagem de frentes frias (sistemas frontais). Elas podem causar oscilações horárias do NM de até 2 m e variações diárias da ordem de 70 cm acima do nível médio.

As oscilações do NM de longo período na costa brasileira, medidas desde 1781, indicam taxas de até 4 mm.ano⁻¹ ou cerca de 50 cm.século⁻¹. A causa mais provável para essa elevação é o aquecimento da temperatura global, que foi em média 0,6 ± 0,2 °C para o século XX, resultando em uma elevação do NM entre 0,1 e 0,2 m no mesmo período (IPCC, 2001).

(d) Balanço Sedimentar das Praias

O balanço sedimentar de uma praia é dado pela relação entre as perdas e ganhos de sedimentos. Este balanço depende de uma série de fatores, que na prática são difíceis de identificar e qualificar. Quando o balanço sedimentar da praia for negativo, ou seja, quando a perda de sedimento for maior que o ganho, a praia se encontra em um processo erosivo. A Tabela 3.1 a seguir traz a relação entre a perda e o ganho de sedimentos que ocorrem na praia.

Tabela 3.1. Balanço sedimentar de uma praia. Fonte : Souza et al (2005).

Suprimento de sedimentos para a praia	Perda de sedimentos da praia	Balanço Sedimentar
Provenientes dos rios e canais de maré.	Transportados rumo ao continente, para rios e canais de maré.	Processos deposicionais e erosivos no sistema praias em equilíbrio.
Provenientes de costões rochosos, praias e depósitos marinhos frontais.	Transportados ao longo da praia (correntes de deriva litorânea).	
Provenientes da Plataforma Continental (correntes geradas por ondas e marés).	Transportados para a Plataforma Continental (correntes de retorno e de costa-afora).	
Provenientes das dunas (transportadas pelo vento e ondas de tempestades).	Removidos para dunas (ventos e ondas de tempestade).	
Alimentação artificial das praias (contribuições antrópicas).	Extração/mineração de areia da praia e de desembocaduras.	
Aumento do volume de sedimentos produzidos no continente e na Plataforma Continental (causas naturais e antrópicas).	Redução do volume de sedimentos produzidos no continente e na Plataforma Continental (causas naturais e antrópicas).	

3.2. PLATAFORMA CONTINENTAL

As plataformas continentais margeiam os continentes ou mares interiores e ocupam cerca de 7% da superfície do assoalho oceânico, com

130 m de profundidade média (Reading, 1996). Segundo Souza *et al* (2005), estendem-se das áreas rasas (dominadas por processos costeiros), ao limite do talude continental (dominado por processos oceânicos).

As principais características desses ambientes são:

- Profundidades menores que 200 m;
- Gradiente suave (1 - 0,1°);
- Salinidade marinha normal (35 psu);
- Ampla variedade de processos físicos (correntes de maré, ondas, correntes geradas por tempestades e correntes oceânicas).

A plataforma continental é normalmente dividida em quatro faixas: (a) plataforma externa; (b) plataforma intermediária; (c) plataforma interna; e (d) zona de surfe.

(a) Plataforma externa – nesta região os fluxos geostróficos são mais importantes, as forças friccionais são menores e a agitação do fundo induzida por ondas é mínima. As camadas de limite de fundo e superficial são distintas e, muitas vezes, separadas por estratificação interna.

(b) Plataforma intermediária - geralmente caracteriza-se pela transição do regime do fluxo e pelo decréscimo em direção ao mar na frequência e intensidade da agitação das camadas de fundo.

(c) Plataforma interna – é dominada por forças friccionais, na qual a camada limite superficial e a camada limite de fundo sobrepõem-se e podem ocupar toda a coluna de água. As camadas limítrofes (isto é, interface meteorológica, superfície do oceano, fundo e sedimentar) interagem diretamente e não podem ser diferenciadas (Smith & Brink, 1994).

(d) Zona de surfe – é a zona que se estende da primeira linha de arrebentação de ondas até o ponto de última quebra da onda sobre a face da praia. Quando a zona de surfe é curta, toda a turbulência de arrebentação acontece na face da praia. O estoque de areia é normalmente pequeno, os grãos geralmente são mais grossos e as praias são mais suscetíveis a processos de erosão. Quando a zona de surfe é extensa, existe um grande estoque de areia geralmente fina e as praias são menos suscetíveis à erosão.

3.2.1. Regime hidráulico da plataforma continental

A hidrodinâmica da plataforma é determinada pela interação entre vários processos em diferentes escalas de tempo e de espaço, como os ventos, as ondas, as marés e a descarga de rios. O resultado direto dessas forças é dado pelo transporte e pela dispersão dos sedimentos na plataforma.

Segundo Souza *et al.* (2005), estes processos geram movimentação da água, resultando no transporte e na dispersão dos sedimentos. Pode-se dizer que a dinâmica dos sedimentos não-coesivos (grossos) ocorre essencialmente na camada limite do fluxo, enquanto a dinâmica dos sedimentos coesivos (finos) ocorre em toda a coluna de água. O transporte de sedimentos não-coesivos ocorre por tração e saltação, já o transporte de sedimentos coesivos ocorre basicamente por suspensão.

Com base no regime hidráulico, segundo Souza *et al.* (2005), quatro tipos principais de plataformas podem ser identificados: 1) plataforma dominada por maré; 2) plataforma dominada por ondas; 3) plataforma dominada por tempestades; e 4) plataforma dominada por corrente oceânica.

1) Plataformas dominadas por maré – diariamente são varridas por fortes correntes de maré, que podem causar erosão no fundo marinho

e transporte do sedimento da carga de fundo em grande escala, tanto paralela quanto transversalmente às formas de fundo. São comumente encontradas em bacias fechadas e indicam evidência de transporte de sedimento em direções opostas e a distribuição de sedimentos depende da posição em relação aos canais das correntes de maré. Sua granulometria varia de areia grossa para lama devido à diminuição da velocidade da corrente. No Brasil, elas ocorrem ao longo da costa norte (MA, PA e AM), onde as amplitudes das marés são de macromares (> 4 m).

2) Plataformas dominadas por ondas e tempestades – são combinadas, pois apresentam um regime hidráulico que varia no clima de onda - tempestade de relativamente baixa-energia e baixa-freqüência para alta-energia e alta-freqüência. Ambos os tipos são dominados por tempestades, desde que a dispersão dos sedimentos seja controlada principalmente por flutuações sazonais na intensidade de ondas e correntes com transporte máximo durante as tempestades. Os sedimentos finos são transportados por advecção, causada por correntes geradas durante tempestades, que transportam as plumas de sedimento fino em direção ao mar aberto, ou por difusão a para plataforma externa, onde são depositados sobre areias relíquias ou palimpsésticas. Sua granulometria diminui com a profundidade. No Brasil, esses tipos de plataforma ocorrem ao sul e sudeste, da costa do Rio Grande do Sul ao Espírito Santo, onde as amplitudes de marés são de micromaré (< 2 m).

3) Plataformas dominadas por correntes oceânicas – são regularmente varridas por correntes unidirecionais, as quais são geradas em bacias oceânicas, mas ocasionalmente migram sobre plataformas continentais adjacentes. São tipicamente estreitas, do tipo pericontinental. Assim, o desenvolvimento das formas de fundo está relacionado a três parâmetros principais: granulometria dos sedimentos, profundidade e

velocidade de fluxo, podendo ocorrer em várias escalas, desde ondulações até dunas e barras.

A margem continental brasileira possui uma diversidade de morfologia, ambiente, tipos de sedimentos, como também características de uma margem passiva clássica, com os elementos fisiográficos, tectono-magnéticos e sedimentares bem definidos em toda a sua extensão.

A evolução sedimentar da margem continental brasileira está intrinsecamente associada à evolução do Atlântico Equatorial Sul, que imprimiu características próprias às bacias marginais brasileiras. No início, elas apresentavam uma seção inferior, com falhas normais envolvendo o embasamento e vulcanismo de caráter básico associado, correspondente aos eventos de *rifteamento* iniciais à separação dos continentes, até a formação da crosta oceânica. Posteriormente, elas passaram a ter uma seção superior sedimentar, correspondente à fase de expansão do Oceano Atlântico, que desenvolveu a margem continental brasileira.

3.2.2. Características da plataforma continental brasileira

Segundo os Programas REVIZEE e o REMPLAC, a plataforma continental brasileira está dividida em quatro regiões: 1) Norte; 2) Nordeste; 3) Central; e 4) Sul.

1) Plataforma Norte – vai do Oiapoque (AP) ao Delta do Parnaíba (PI). É uma área constituída por costas muito baixas com extensas planícies de maré lamosa e por um gigantesco complexo deltaico-estuarino. O Rio Amazonas é considerado o maior do mundo em termos de área de drenagem (correspondendo a 6×10^6 km²) e de descarga de água (equivalente a 20% da água doce despejada nos oceanos), além de contribuir com uma carga de sedimentos fluviais estimada em 1.200 t/ano (Nittrouer *et al.*, 1995). Desta forma, a plataforma do Amazonas é

um ambiente complexo influenciado por processos terrestres na bacia do Rio Amazonas e por processos oceanográficos que atuam no Oceano Atlântico equatorial oeste.

2) Plataforma Nordeste – vai do delta do Rio Parnaíba (PI) a Salvador (BA). É uma plataforma estreita (63 km de largura média) e rasa (40 m, exceto a noroeste de Natal, 20 m) devido ao clima tropical e sedimentação terrígena desprezível e é uma das poucas áreas no mundo onde uma plataforma estável e aberta apresenta-se coberta, quase inteiramente, por sedimentos carbonáticos biogênicos. Os sedimentos carbonáticos são dominados por algas coralinas recentes e os sedimentos terrígenos são, na sua grande maioria, relíquias e a sua composição sugere que, no Pleistoceno, o clima foi muito similar ao atual (Milliman & Summerhayes, 1975).

Considerando os vários aspectos da morfologia e da distribuição dos diversos tipos de sedimentos, de acordo com Coutinho (1976), a plataforma do nordeste do Brasil apresenta três limites: plataforma interna (até a isóbata de 20 m), média (entre as isóbatas de 20 e 40 m) e externa (entre as isóbatas de 40 e 60 m). A *plataforma interna* apresenta relevo suave com algumas irregularidades devido à presença de recifes, canais e ondulações. É coberta por areia terrígena, com pouco cascalho e lama, e pobre em carbonato de cálcio, onde os componentes bióticos são muito retrabalhados. A *plataforma média* exibe um relevo mais irregular, sendo recoberta por sedimentos grossos de origem biogênica, sendo o mais comum o *maerl*, sedimento formado principalmente por talos livres ou ramificados de algas coralíneas, com um teor em carbonato de cálcio superior a 90% (Freire *et al.*, 2002), e os sedimentos carbonáticos não mostram sinais de retrabalhamento. A *plataforma externa* encontra-se coberta com areias biodetríticas, cascalhos de algas e lamas cinza-azuladas. As algas calcárias *Halimeda* tendem a ser mais abundantes e o

teor em carbonato de cálcio é superior a 75%. Os sedimentos carbonáticos são muito retrabalhados, particularmente nas areias de algas recifais.

2.a) Plataforma continental do Estado de Pernambuco- segundo Manso *et al.* (2003), a plataforma continental do Estado de Pernambuco apresenta, na sua quase totalidade, largura reduzida (35 Km), pouca profundidade, suave declive, quebra de plataforma entre as isóbatas de 50 e 60 m, águas relativamente quentes, salinidade elevada e cobertura sedimentar composta por sedimentos terrígenos e carbonáticos biogênicos.

Sua pouca profundidade está associada à ineficiência de processos marinhos nos últimos períodos geológicos, enquanto a largura reduzida está atribuída à pequena taxa de sedimentação e ao baixo índice de erosão continental, associados a fatores estruturais da área.

Um dos traços morfológicos mais característicos do litoral é a presença constante, na plataforma continental interna, de linhas de *beachrocks*, geralmente paralelas à costa, servindo de substrato para o desenvolvimento de algas e corais, além de construir uma efetiva proteção ao litoral na medida em que absorvem grande parte da energia das ondas incidentes, mesmo estando completamente submersos.

Outra característica da plataforma pernambucana é a pequena quantidade de corais, comparada ao grande desenvolvimento de algas. O crescimento desses corais ficou restrito aos substratos litificados, representados pelas antigas linhas de praia ou estruturas de recifes algálicos. O crescimento atual dos corais é restrito ao lado externo dos *beachrocks* ou sobre construções de algas calcárias incrustantes.

3) Plataforma Central – vai de Salvador (BA) a São Tomé (RJ). A morfologia reflete sua evolução geológica associada aos processos erosivos e sedimentares relacionados à transgressão marinha quaternária

observada durante os últimos 20.000 anos (Silva & Lopes, 2002 *apud* Souza *et al.*, 2005).

A sedimentação predominante nessa plataforma é a carbonática, e os sedimentos mais comuns são compostos de algas coralinas incrustantes, que formam extensos recifes vivos (cobrindo a maior parte da plataforma externa).

A sedimentação terrígena (taxas muito baixas) está restrita principalmente à plataforma interna e consiste de areias lamosas e areias subarcozianas, mineralogicamente submaturas e relíquias.

A plataforma central é muito estreita na sua parte norte, com largura variando entre 10 km (em frente a Salvador) e 30 km (em frente a Belmonte). Entre Belmonte e São Tomé, a plataforma apresenta largura variável e pode estender-se até 100 km, para fora do banco Charlotte, e 200 km, para fora do banco de Abrolhos. Tais bancos foram formados pela acumulação de sedimentos entre os montes submarinos e a margem continental (Bacoccoli & Meister, 1974 *apud* Souza *et al.*, 2005).

A plataforma interna apresenta topografia suave devida à sedimentação holocênica. Já a superfície das plataformas médias e externas é marcada pela presença de vários pequenos bancos e canais estreitos e íngremes.

4) Plataforma Sul – vai de São Tomé (RJ) ao Arroio Chuí (RS) e apresenta largura variando de 90 km, adjacente a Cabo Frio (RJ), até mais de 180 km, adjacente aos estados de São Paulo e Rio Grande do Sul. A plataforma é larga e as isóbatas apresentam-se mais próximas, indicando maior declividade, de São Paulo a Santa Catarina; a plataforma torna-se mais estreita e o traçado das isóbatas é bastante homogêneo de Santa Catarina a Mostardas (RS); a plataforma volta a ficar mais larga e cortada por vários paleocanais fluviais, apresentando uma série de bancos arenosos de Mostardas (RS) ao Arroio Chuí (RS) (Corrêa & Villwock, 1996).

As feições que mais se destacam na plataforma continental sul são os registros de paleolinhas de costas, representados pelo aumento significativo da declividade. É a única do Brasil que apresenta um ambiente subtropical a temperado e conseqüentemente os sedimentos são pobres em carbonatos. Tal plataforma é dominada por sedimentos relíquias que foram depositados quando o nível do mar estava aproximadamente 120 m abaixo do nível atual. Poucos sedimentos modernos chegam à plataforma atualmente devido aos sistemas de lagunas e lagoas costeiras que retêm grande parte dos sedimentos transportados pelos rios. Seu mapa textural mostra a presença de oito províncias texturais, dominadas por sedimentos terrígenos que variam de areia (média a fina) a argila siltica.

3.2.3. Influência da circulação oceânica sobre a plataforma continental brasileira

A costa brasileira é influenciada basicamente pela corrente quente Sul-Equatorial, que se bifurca no Rio Grande do Norte em Corrente Norte do Brasil e Corrente do Brasil. A Corrente Norte do Brasil segue para o Golfo do México, já a Corrente do Brasil desce ao longo do litoral, até encontrar-se com a corrente fria das Malvinas (oriunda da Argentina). Grande parte da plataforma brasileira está sob influência de correntes quentes, enquanto a plataforma continental sul brasileira ora é dominada pelas águas frias sub-Antárticas, ora pela águas tropicais da Corrente do Brasil.

Na plataforma continental sul do Brasil, segundo Lima *et al.* (1996), a circulação varia sazonalmente. No verão, o predomínio do vento nordeste favorece a penetração da Corrente do Brasil em latitudes mais altas, e por efeito do mecanismo de Ekman, o fluxo das águas costeiras para mar aberto propicia a ressurgência de águas frias. No outono, a atuação de fortes ventos de sul e sudeste impulsiona as águas frias da Corrente das

Malvinas para a costa brasileira. No inverno, a Corrente das Malvinas domina grande parte da plataforma. No final da primavera, os ventos nordeste e leste voltam a dominar na região, a Corrente das Malvinas retrai para o sul, e no verão, as águas quentes da Corrente do Brasil voltam a ocupar a plataforma.

A plataforma continental norte do Brasil, adjacente à foz do rio Amazonas, caracteriza-se como de alta energia e extrema variabilidade decorrente da combinação de fortes correntes de maré, grande descarga de água doce, ventos constantes e intensos fluxos longitudinais associados à Corrente do Brasil.

3.3. ÁREA DE ESTUDO

3.3.1. Localização e descrição

As informações para esta seção foram fundamentadas, principalmente, nos trabalhos de Assis (2001) e Gusmão Filho (1993).

A área de estudo está inserida na Região Metropolitana do Recife (referenciada a seguir por RMR), que possui uma área de 2.742,4 km², totalizando 2,82% do Estado de Pernambuco, com 3.350.654 habitantes correspondendo a aproximadamente 40% do total do Estado (IBGE 2001). A Região Metropolitana do Recife está localizada no nordeste do Brasil entre os meridianos 34° 45' e 35° 00 oeste, e entre os paralelos 8° 45' e 7° 40' sul (Figura 3.6).

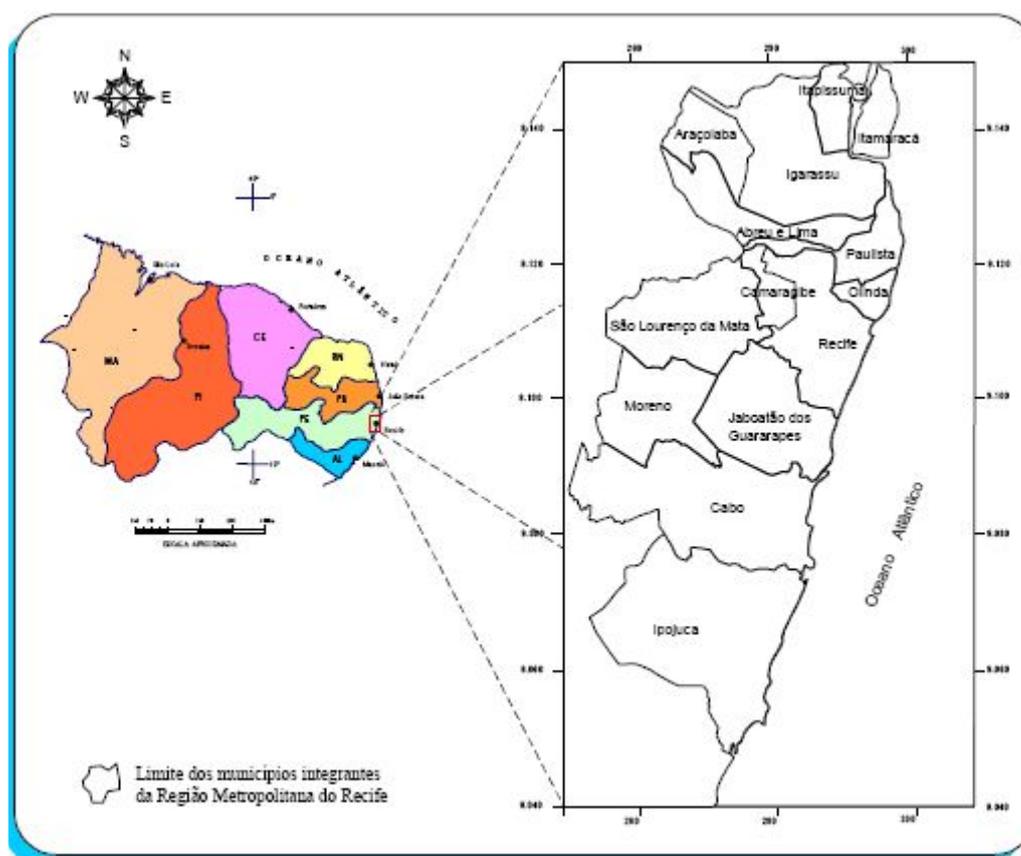


Figura 3.6. Localização da Região Metropolitana do Recife. Fonte: Assis (2001).

A Região Metropolitana do Recife é formada por quatorze municípios e, dentre eles, Recife encontra-se no meio, dividindo-a em duas sub-regiões geologicamente distintas, com aptidões naturais e com respostas ao manejo do meio físico também diferenciadas. Tal característica favorece a subdivisão geográfica da área em duas partes: Região Metropolitana - parte Norte, englobando os municípios de Araçoiaba, Igarassu, Itapissuma, Itamaracá, Paulista, Olinda, Abreu e Lima, Camaragibe, São Lourenço da Mata e a capital do Estado, Recife; e a Região Metropolitana - parte Sul, formada pelos municípios de Moreno, Jaboatão dos Guararapes, Ipojuca e Cabo de Santo Agostinho.

A área de estudo compreende a zona costeira adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes do Estado de Pernambuco, correspondente a uma faixa com cerca de 15 km de

extensão, limitada ao sul pelo estuário de Barra de Jangadas e ao norte pela Praia do Pina, conforme apresentado na Figura 3.7.

Na parte norte da RMR os problemas ambientais são especialmente associados ao uso extensivo dos recursos hídricos superficiais, como barragens e retirada de areia para construção civil, e ao desencadeamento dos processos erosivos, decorrentes do uso não sustentável da região de transição, onde atuam fenômenos concomitantes dos ambientes continental e marinho. Já a parte sul apresenta um desenvolvimento maior para o turismo, o que intensifica o comércio e a indústria imobiliária, gerando problemas de ocupação sem o suporte de uma infraestrutura urbana básica, como saneamento e drenagem.

Em todo o litoral da RMR, podem ser citados vários pontos que vêm sofrendo graves problemas de erosão. Alguns autores estimam que as causas mais prováveis dessa erosão sejam: 1) as obras de modernização e dragagem dos portos da cidade do Recife e de Suape; 2) o déficit de sedimento transportado pelos rios, devido à construção de barragens, e à mineração de areia nos diversos cursos d'água; 3) alto índice de ocupação, com grande concentração de atividades econômicas, de lazer e turismo; 4) obras de engenharia de costa que propiciam mudança no curso das correntes marinhas e nos ciclos de erosão e deposição. Do mesmo modo, outras causas naturais também podem contribuir para esse processo erosivo, tais como a possível elevação do nível do mar e a presença de recifes acompanhando o litoral, impedindo a circulação de sedimentos ao longo da costa.

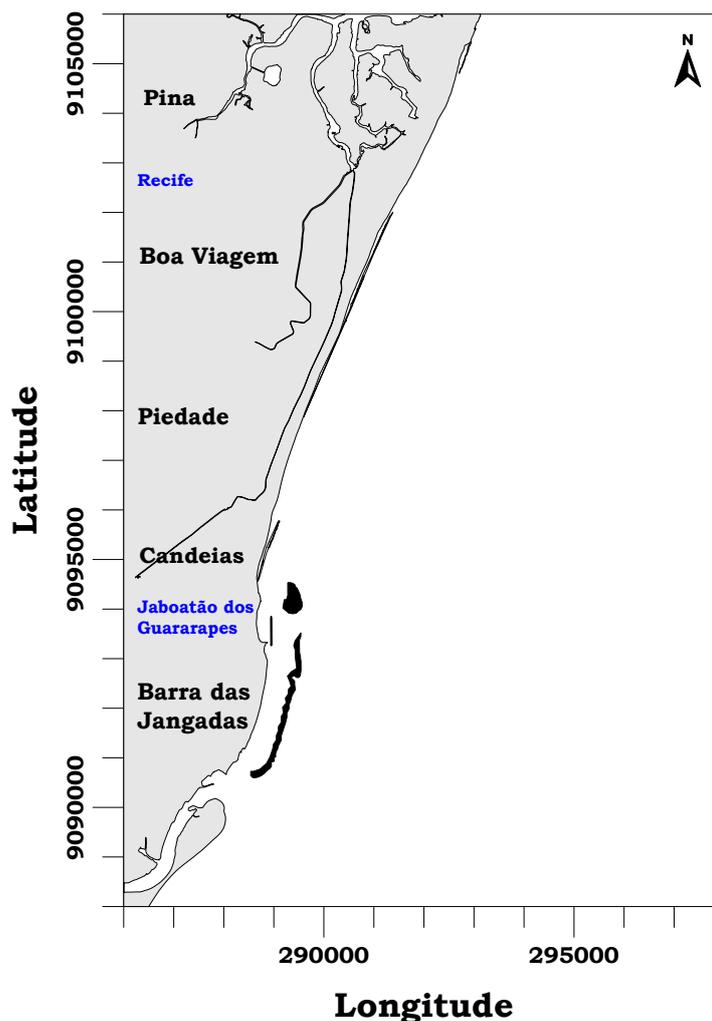


Figura 3.7. Mapa de localização da área de estudo.

Em Recife e Jaboatão dos Guararapes a erosão costeira é bastante atuante (Figuras 3.8 e 3.9). Na praia de Boa Viagem (zona sul da cidade), o mar tem feito estragos, como a destruição de trechos do calçamento com mais de um quilômetro de extensão, ao longo da linha de costa, constatado durante a ressaca de 1995. Essa destruição obrigou a prefeitura a construir um enrocamento para proteção da orla marítima no trecho da praia afetado pela erosão.



Figura 3.8. Destruição provocada pela ressaca do mar em Boa Viagem - 1995. Fonte: Assis (2001).

Em Jaboatão dos Guararapes, ao sul do Recife, a erosão marinha também é atuante e a destruição está muito ativa nas áreas próximas à foz do rio Jaboatão (principalmente em sua margem esquerda), intensificada principalmente a partir do final da década de 80 e meados da década de 90 do século XX (Assis, 2001).



Figura 3.9. Restos de construções destruídas pela ressaca no bairro de Barra das Jangadas. Fonte: Assis (2001).

3.3.2. Forçantes meteorológicas, correntes e marés.

A zona costeira de Pernambuco está situada em uma região de baixa latitude, com altitudes pouco acima do nível do mar (3-4 m), recebendo, assim, influência dos ventos alísios. As velocidades médias dos ventos alísios variam de 6,1 a 9,3 nós (3,1 a 4,7 m.s⁻¹), vindos principalmente de L-SE, no período de abril a setembro, e de L-NE, de outubro a março (Cavalcanti & Kempf, 1970, apud Manso *et al.*, 1995).

Segundo a classificação climática de Köppen, a RMR apresenta dois tipos de climas, o As' e o AMs' (Albuquerque, 1978). O clima é o As' na parte norte da RMR, a partir, aproximadamente, do norte do município de Olinda, com temperaturas altas, estação seca mais demorada e chuvas em período mais definido (março a julho). A partir dos municípios de Olinda e Recife para o sul, o clima é AMs', ou seja, quente e úmido com chuvas durante quase todo o ano, com uma estação seca menor (outubro a dezembro), com temperatura média anual de 26°C, e com pluviosidade média de 1.720 mm (IBGE, 1977).

Existem pelo menos seis sistemas atmosféricos que produzem precipitação significativa na região: 1) a Zona de convergência intertropical (ZCIT); 2) as bandas de nebulosidade associadas às frentes frias; 3) os distúrbios de Leste; 4) os vórtices ciclônicos de ar superior (VCAS); 5) as brisas terrestres e marítimas; e 6) as oscilações de 30-60 dias. Esses fenômenos atuam em sub-regiões distintas.

Na área de estudo o principal agente causador da pluviosidade são os distúrbios de Leste (perturbações e ondas de Leste), que ocorrem de maio a agosto, caracterizando o período chuvoso. Os demais meses correspondem ao período seco. A umidade relativa do ar média anual oscila de 50% a 90% (Moura *et al.*, 2000).

A área de estudo (localizada no Oceano Atlântico Equatorial Sul) sofre ação da Corrente Norte do Brasil, oriunda da bifurcação do ramo sul da Corrente Sul Equatorial.

Junto à linha de praia atuam ainda as correntes longitudinais, correntes de retorno, correntes geradas por ondas e pelas marés. As longitudinais são as mais importantes, movendo-se paralelamente à linha da costa, com velocidade que varia de acordo com o ângulo de incidência das ondas. As correntes de retorno são as responsáveis pelo movimento do sedimento costa afora, através do retorno das águas acumuladas pelos sucessivos trens de ondas. As correntes geradas pelas ondas estão relacionadas com o movimento antepraia-costa afora (vice-versa), variando com o local e o clima de onda (Rollnic, 2002).

O regime de marés da área é do tipo semidiurno (período de 12,42 horas). Os parâmetros de classificação são:

- amplitude das marés (MTR) = $2.2 \times M_2$;
- amplitude média de quadratura (NTR) = $2(M_2 - S_2)$;
- amplitude média de sizígia (STR) = $2(M_2 + S_2)$.

Para o Porto do Recife, têm-se os seguintes valores médios: MTR = 1,67 m; NTR = 0,97 m e STR = 2,07 m (Schureman *apud* Medeiros, 1991).

Quanto à hidrografia, apenas um rio deságua na área de estudo (Figura 3.7), caracterizando um baixo afluxo de sedimentos. O estuário de Barra de Jangadas (Figura 3.10), que é formado pelo encontro dos rios Jaboatão e Pirapama, está localizado no município de Jaboatão dos Guararapes a 20 km do Recife (limite sul de nossa área de estudo).



Figura 3.10. Estuário de Barra de Jangadas. Fonte: CPRH (2006)

Capítulo 4

Abordagem Metodológica

4.1. CAMPANHAS DE MAR

Com o objetivo de caracterizar as correntes costeiras e o transporte potencial ao longo da RMR, foram realizadas, no âmbito do Projeto MAI-PE, uma série de campanhas de mar no período de 02 a 09 de janeiro de 2007, característico de verão austral. Parte destas informações foram comparadas com os resultados gerados pelo exercício de modelagem matemática realizado neste estudo.

Para as coletas foram utilizados a sonda *GPSmap Garmin 298 Sounder* e o perfilador de correntes ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) Rio Grande 600 kHz (Figura 4.1), conectados a um computador portátil. A sonda auxiliava também na navegação e na marcação das coordenadas de início e fim dos transectos. Os dados coletados foram armazenados simultaneamente no computador.

A técnica do ADCP consiste na emissão de ondas sonoras através da coluna d'água. As partículas transportadas pela corrente de água refletem o som de volta para o instrumento que registra o eco através de sensores, fazendo com que ele reconheça as diferentes profundidades e as

velocidades das respectivas linhas de corrente através do efeito *Doppler* (Figuras 4.2 e 4.3).

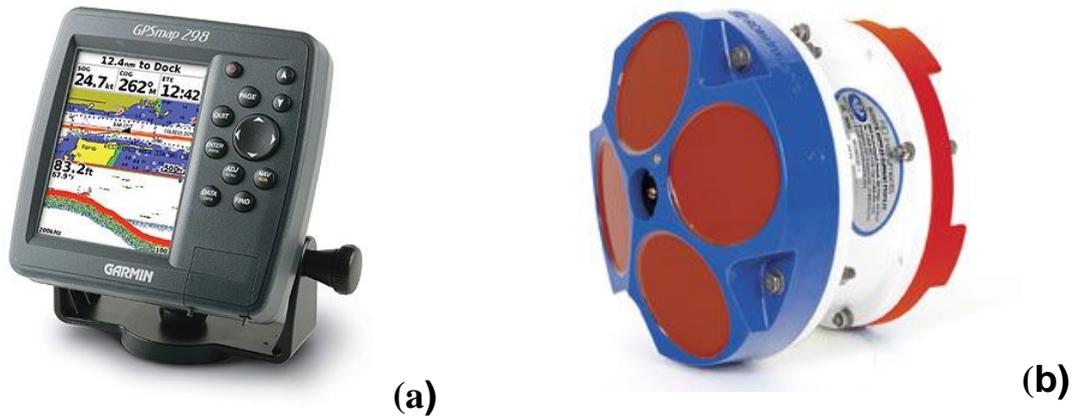


Figura 4.1. Sonda GPSmap Garmin 298 Sounder (a) e perfilador Rio Grande 600 kHz (b). Fonte: Garmin (2007) e RD Instruments (2007) respectivamente.

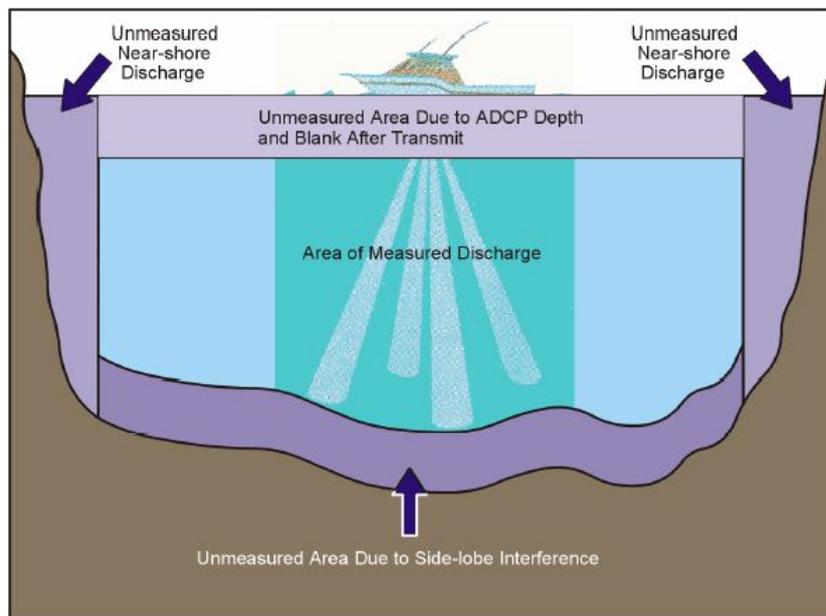


Figura 4.2. Técnica de utilização do ADCP. Fonte: RD Instrumentst, 2003.

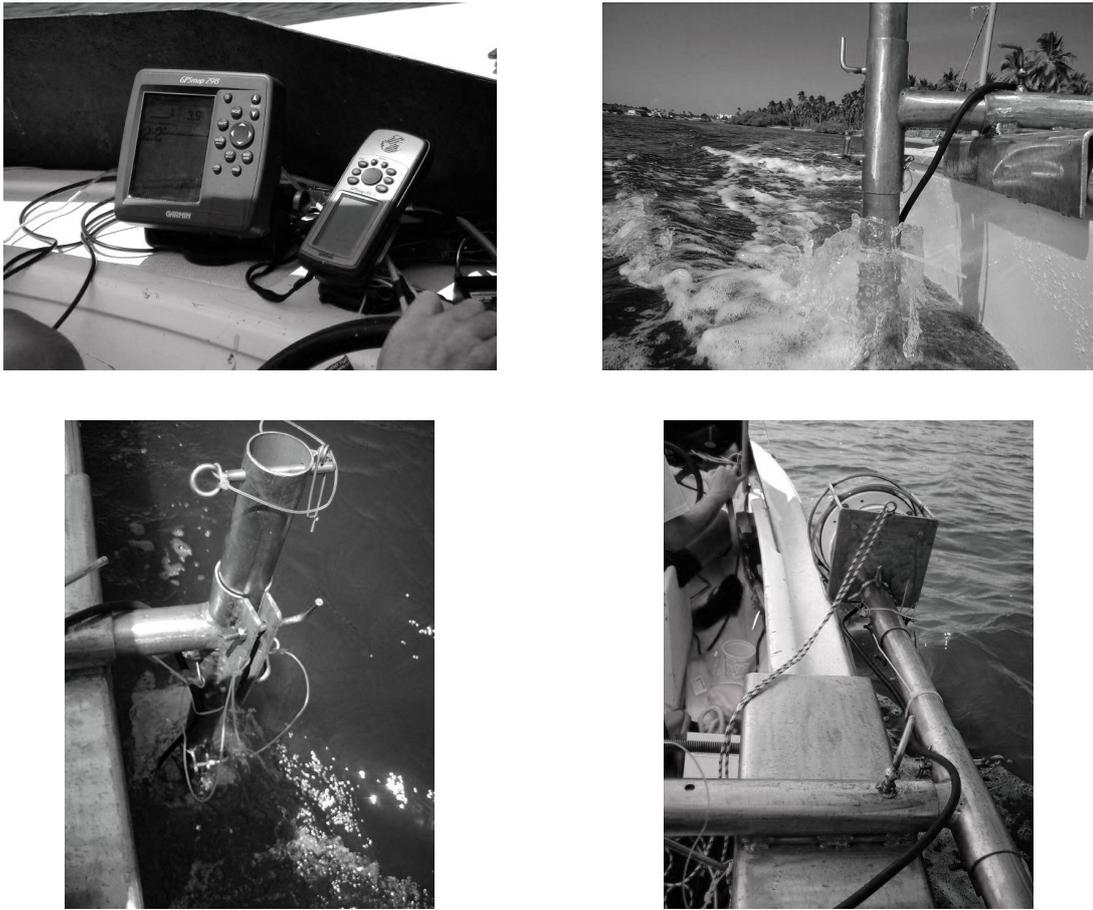


Figura 4.3. Detalhes dos equipamentos utilizados para perfilagem com ADCP.

Em laboratório, os dados obtidos com o ADCP foram transferidos do *laptop* para microcomputadores e em seguida filtrados, reduzidos e editados através de algoritmos computacionais. Posteriormente, estes dados foram utilizados na edição de planilhas, gráficos e mapas temáticos com enfoque na distribuição horizontal do campo de correntes ao longo da costa estudada na superfície, no meio e no fundo da coluna d'água, e transectos verticais da distribuição da intensidade da componente norte de velocidade, para determinar a tendência do sentido das correntes ao longo dos perfis traçados na área de estudo.

Durante o período de coleta (02 a 09 de janeiro de 2007), foram monitorados, no âmbito do Projeto MAI-PE, 31 (trinta e um) perfis de

corrente distribuídos entre o estuário de Barra de Jangadas, localizado no município de Jaboatão dos Guararapes, e o Rio Timbó, localizado no município de Paulista. Os perfis ficaram distribuídos da seguinte forma: seis para Jaboatão dos Guararapes (J01, J02, J03, J04, J05 e J06), nove para Recife (R01, R02, R03, R04, R05, R06, R07, R08 e R09), seis para Olinda (O01, O02, O04, O05, O06 e O07) e dez para Paulista (P01, P02, P03, P04, P05, P06, P07, P08, P09 e P10). Destes, apenas os transectos situados no interior da área do presente estudo (R01, R02, R03, R04, R05, R06 e R07) foram aqui utilizados (Figura 4.4).

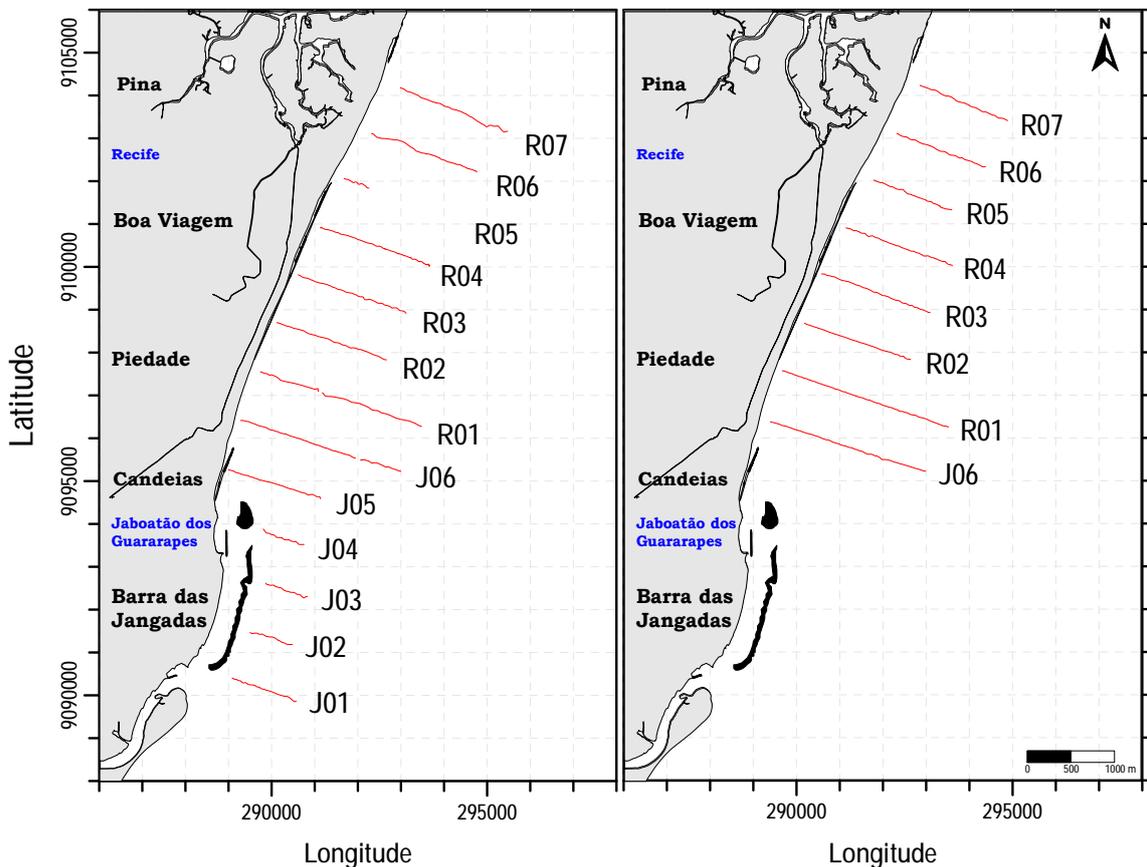


Figura 4.4. Localização dos perfis transversais de coleta de dados de correntometria (ADCP) na região costeira adjacente aos municípios de Recife e de Jaboatão dos Guararapes.

Para as coletas, os perfis foram previamente definidos como perpendiculares à linha de costa, com o uso da carta náutica nº 930 (DHN/MM, 1988), eqüidistantes a 1 km e limitados por isóbatas de 15 m. Estes perfis foram percorridos durante os estágios de maré de baixa-mar (BM) e de preamar (PM), com uma velocidade média de navegação nos perfis de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$, possibilitando assim a aquisição dos dados de corrente. Problemas relacionados ao ajuste inicial da metodologia de coleta resultaram em perda parcial dos dados coletados em alguns perfis (preamar do primeiro dia de coleta). A Tabela 4.1 mostra o cronograma da campanha oceanográfica com as datas de coleta dos perfis e seus respectivos estágios de maré.

O Anexo A (Figuras A.1 a A.5) traz exemplos dos campos cinemáticos obtidos a partir das perfilagens.

Tabela 4.1. Cronograma das campanhas de mar (02 a 04 de janeiro de 2007). BM = baixa-mar; PM = preamar.

Data	Perfis	Maré
02/01/2007	J01, J02, J03, J04, J05	BM
03/01/2007	J06, R01, R02, R03	BM
	J06, R01, R02, R03	PM
04/01/2007	R04, R05, R06, R07	BM
	R04, R05, R06, R07	PM

4.2. MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS COSTEIROS

Diante da complexidade do ambiente marinho, como também dos corpos de águas naturais (rios, lagos, reservatórios, estuários e zonas costeiras e oceânicas), a aplicação de técnicas de modelagem matemática e simulação numérica surge como uma ferramenta auxiliar importante na elaboração de projetos e no auxílio à gestão dos sistemas naturais. Estas permitem integrar informações espacialmente dispersas, através de uma

abordagem sistêmica, auxiliando na interpretação e propiciando um maior entendimento da dinâmica de processos e previsão de cenários futuros.

A ferramenta computacional utilizada neste estudo foi o modelo SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), que é fruto do desenvolvimento conjunto da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica e da Área de Banco de Dados do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação - ambos pertencentes à Coordenação de Programas de Pós Graduação em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Rosman, 2001). Em sua forma completa, o SisBaHiA é um sistema para modelagem da circulação hidrodinâmica e do transporte de escalares ativos e/ou passivos em corpos de água naturais, tais como rios, canais, lagos, lagoas, reservatórios, estuários, baías e águas costeiras. Na próxima seção são descritas as principais características do modelo SisBaHiA.

4.3. O MODELO SisBaHiA

Para descrever o modelo de circulação 3D utilizado neste estudo foram consultados, principalmente, a Referência Técnica do SisBaHiA (Rosman, 2005), o capítulo 1 do livro Métodos Numéricos, volume 5, coleção ABRH (Rosman, 2001) e o Manual do Usuário do SisBaHiA (COPPE, 2004). Sendo assim, para esta seção, estas são as três publicações indicadas como referência para um maior aprofundamento da base teórica e desenvolvimento numérico.

O SisBaHiA é um sistema profissional de modelos computacionais para estudos e projetos em uma vasta gama de corpos de água naturais. Desde 1986, novas versões deste sistema vêm sendo continuamente implementadas no COPPE/UFRJ. Dissertações e teses (Malta, 2005; Trento, 2005; Soto, 2004; Feitosa, 2003; Amaral, 2003; Gabioux, 2002), bem como publicações em periódicos (Cunha *et al.*, 2006; Gabioux *et al.*,

2005; Martins *et al.*, 2002), têm sido desenvolvidas, desde então, utilizando este sistema.

Este sistema computacional se divide em diversos módulos, dentre eles o hidrodinâmico, o de transporte Lagrangeano (probabilístico e determinístico), o de transporte Euleriano, o de qualidade de água e o de geração de ondas. Ainda, este disponibiliza diversas ferramentas (gerenciador de animações, conversor de tempo entre dados, e cópia de malhas e modelos) que são integradas em uma interface de trabalho amigável e também interage diretamente com os programas de pré- e pós-tratamento de dados. Neste estudo, apenas os módulos hidrodinâmico e de transporte Lagrangeano (probabilístico e determinístico) foram utilizados.

O modelo hidrodinâmico é um módulo de circulação hidrodinâmica 3D ou 2DH dominado por forçantes barotrópicos e otimizado para corpos de água naturais onde possam ser desprezados os efeitos de densidade variável.

O módulo de transporte Lagrangeano é utilizado para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, como, por exemplo, lançamento de efluentes e derrame de óleo, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH (determinístico). Acoplado a este é possível obter resultados probabilísticos computados a partir de vários eventos ou de resultados ao longo de um determinado período. Exemplo: probabilidade de passagem de manchas ou plumas com concentração acima de um valor limite e probabilidade de toque no litoral. O padrão de fluxo de um fluido é considerado Lagrangeano, segundo Pond & Pickard (1983), quando é descrita a trajetória de cada partícula fluida, especificando quando cada partícula alcança cada ponto no seu caminho.

O módulo de transporte Euleriano é um módulo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D. O

padrão de fluxo de um fluido é considerado Euleriano quando é descrita a velocidade (intensidade e direção) em cada ponto no fluido a cada instante de tempo.

4.4. O MÓDULO HIDRODINÂMICO EULERIANO

Modelagem hidrodinâmica nada mais é do que a determinação da quantidade de movimento da água, a qual resulta na definição dos padrões de corrente. O módulo hidrodinâmico é a base fundamental para qualquer modelo usado para analisar a circulação em corpos de água naturais.

Tal módulo no SisBaHiA segue a linhagem FIST (*Filtered in Space and Time*), onde a modelagem da turbulência do modelo hidrodinâmico é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes àquelas empregadas na Simulação dos Grandes Vórtices (*Large Eddy Simulation*). Para o modelo hidrodinâmico do SisBaHiA o modelo adotado foi o FIST3D, que é um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional para escoamentos de grande escala e homogêneos.

Esta versão 3D da linhagem FIST resolve as equações de *Navier-Stokes* considerando a aproximação da pressão hidrostática. A técnica numérica desta versão divide-se em dois módulos. Primeiramente, calcula-se os valores de elevação da superfície livre através de uma modelagem bidimensional integrada na vertical (2DH) e, em seguida, calcula-se o campo de velocidades que pode ser computado de modo tridimensional (3D) ou bidimensional (2DH), dependendo dos dados de entrada.

A discretização temporal ocorre implicitamente através de diferenças finitas. A discretização espacial é feita de forma preferencial por elementos finitos quadrangulares biquadráticos, podendo também ser feita por elementos finitos triangulares quadráticos ou ambos.

Já a discretização vertical da coluna de água faz uso das diferenças finitas com transformação sigma, ou seja, utiliza coordenadas sigma (adimensionais) para representar a coordenada cartesiana vertical z . Assim, distorções nas profundidades de amostragem que ocorrem durante um ciclo completo de maré, as quais são ocasionadas por flutuações periódicas da espessura da coluna d'água, podem ser corrigidas pela transformação sigma. Tal versatilidade traz grande facilidade computacional ao ser utilizada em regiões costeiras, área esta caracterizada por fortes gradientes topográficos.

O modelo hidrodinâmico utiliza preferencialmente interpolação biquadrática para valores de profundidade e rugosidade equivalente do fundo. No entanto, a interpolação seguirá o tipo de elemento utilizado na discretização.

O tratamento da turbulência baseia-se em técnicas de filtragem, conforme mencionado acima, e é auto-ajustável na escala de submalha.

Para este estudo foi utilizada a modelagem 3D, que acopla os dois módulos hidrodinâmicos, o promediado na vertical ou bidimensional na horizontal (2DH) e o 3D, o qual calcula o campo de velocidades tridimensional através do módulo analítico-numérico, no caso deste estudo. Para uma abordagem tridimensional (3D), estes dois módulos tornam-se interdependentes. Assim, as elevações da superfície livre obtidas no módulo 2DH são utilizadas pelo módulo 3D que, por sua vez, calcula as tensões de atrito no fundo obtidas dos perfis verticais de velocidade e que são usadas pelo módulo 2DH.

4.4.1. Equações básicas

O sistema de coordenadas usado para as modelagens 3D e 2DH é esquematizado na Figura 4.5, onde as coordenadas e velocidades horizontais são representadas como $(x, y) \equiv (x_1, x_2)$ e $(u, v) \equiv (u_1, u_2)$

utilizando o índice $i = 1,2$. Para a modelagem 2DH, U_i representa a velocidade promediada na vertical.



$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \sin \theta u \quad (2)$$

Equação da quantidade de movimento na direção z :

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) - \frac{\rho}{\rho_o} g \quad (3)$$

onde u, v, w são as componentes do vetor velocidade nas direções $x, y, e z$, respectivamente. A direção vertical z é positiva para cima e sua origem pode ser convenientemente definida no nível médio da superfície da água. P é a pressão, ρ é a densidade local do fluido e ρ_o é uma densidade constante de referência. Φ é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local e os termos com Φ são as forças de *Coriolis*, no qual θ é o ângulo de Latitude. τ_{ij} é o tensor de tensões turbulentas e é expresso por:

$$\tau_{ij} = \nu_{ij} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad [i, j = 1, 2, 3] \quad (4)$$

Com a intenção de reduzir o tamanho da equação, a notação indicial é utilizada na equação acima, onde se considera $(x, y, z) \equiv (x_1, x_2, x_3)$ e $(u, v, w) \equiv (u_1, u_2, u_3)$.

A compressibilidade da água é mínima sob condições normais na natureza, ou seja, a água comporta-se como fluido incompressível no meio ambiente. Assim, um escoamento incompressível em um corpo d'água deve ser interpretado como “escoamento de um fluido comportando-se de forma incompressível”, uma vez que qualquer fluido é compressível.

Desta forma, a equação da continuidade (do volume, por ser escoamento ambiental) representa a imposição da condição de escoamento incompressível e é expressa por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Quando as escalas dos movimentos horizontais são de ordem n -vezes maior do que a profundidade, os escoamentos são considerados de grande escala e também podem ser chamados de escoamentos quase horizontais ou escoamentos em águas rasas. Nestes casos, as equações governantes do movimento são chamadas equações de águas rasas.

Para estes escoamentos, uma densidade constante pode ser considerada em todos os termos destas equações, exceto no termo que considera a aproximação *Boussinesq* (empuxo). No entanto, o empuxo pode ser desconsiderado se a coluna de água for bem misturada não se aplicando, assim, a equação de estado e as respectivas equações de transporte para os constituintes.

Ainda, a equação de quantidade de movimento na direção vertical pode ser reduzida à aproximação hidrostática, ou seja, é desprezada a pressão dinâmica por estar considerando escoamentos de águas rasas. Para isso, integra-se a equação da quantidade de movimento na direção z (3) que é expressa como:

$$P(z) = P(\zeta) + \int_z^\zeta \rho g dz + P_d \quad (6)$$

A aproximação hidrostática para a pressão em qualquer profundidade z , ao considerar a densidade constante ($\rho = \rho_0$), pode ser obtida ao integrar a equação (6) acima, resultando em:

$$P(z) = P_{atm} + \rho_0 g (\zeta - z) \quad (7)$$

Considerando que a pressão atmosférica P_{atm} permanece praticamente homogênea quando esta se encontra em domínios relativamente pequenos e utilizando a equação (7) acima nas equações da quantidade de movimento na direção x (1) e y (2), a equação da quantidade de movimento efetivamente usada no modelo hidrodinâmico pode ser obtida conforme exibida abaixo.

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \text{sen} \theta v \quad (8)$$

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \text{sen} \theta u \quad (9)$$

No entanto, diante das 3 equações descritas – (5), (8) e (9) – há 4 incógnitas (u, v, w, ζ) sendo, então, necessária uma quarta equação. Para tanto, é obtida uma equação para ζ ao integrar a equação da continuidade ao longo da vertical e utilizando, em seguida, a regra de *Leibniz*, as condições de contorno cinemáticas, bem como considerando o fundo com topohidrografia fixa durante o período de simulação, ou seja, $z = -h(x, y)$. Sendo assim:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0 \quad (10)$$

Assim, as equações governantes necessárias para calcular as quatro incógnitas (u, v, w, ζ) da circulação hidrodinâmica no módulo 3D, observadas na Figura 4.1, para escoamentos em águas rasas se resumem à equação da continuidade (5), às equações da quantidade de movimento horizontais na direção x (8) e y (9), e à equação da continuidade promediada na vertical (10).

O módulo 3D calcula diretamente as tensões verticais atuando nos planos horizontais (τ_{iz}). Porém, os efeitos de tensões horizontais atuando em planos verticais, ($\tau_{xx}, \tau_{xy} = \tau_{yx}$ e τ_{yy}) são indiretamente incluídos neste. Contudo, estes mesmos efeitos são totalmente incluídos no módulo 2DH.

As tensões de atrito vertical para o SisBaHiA são modeladas como:

$$\tau_{iz} = \nu_{iz} \left(\frac{\partial u_i}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x_i} \right) \quad [i = 1, 2] \quad (11)$$

A viscosidade turbulenta, ν_{i3} , é calculada utilizando uma distribuição parabólica bem conhecida ao longo da vertical:

$$\nu_{i3} = k|u_*|_i(z+h)\left(1 - \frac{z+h}{H}\right) \quad (12)$$

onde $H(x, y, t) = h(x, y) + \zeta(x, y, t)$ é a profundidade total instantânea, o parâmetro k é a constante de *Von Karman* e u_* é a velocidade de atrito característica.

(b) Módulo 2DH

As equações governantes do módulo 2DH originam-se da integração vertical analítica das equações governantes do modelo hidrodinâmico tridimensional, onde as dimensões do problema são reduzidas ao plano horizontal.

As elevações da superfície livre $z = \zeta(x, y, t)$ e as componentes das velocidades médias na vertical, nas direções x e y – $U(x, y, t)$ e $V(x, y, t)$, respectivamente – são determinadas pelo módulo 2DH para cada passo de tempo. Tais componentes da velocidade são definidas pelas seguintes promediações:

$$U(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u(x, y, z, t) dz \quad \text{e} \quad V(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} v(x, y, z, t) dz \quad (13)$$

A equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical para um escoamento 2DH, considerando tais promediações acima (13) e uma batimetria permanente durante o período de simulação, $z = -h(x, y)$, pode ser definida como:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

As condições de contorno cinemáticas dizem respeito às superfícies, livre e no fundo, onde estas são consideradas permanentes, ou seja, elas

não se movem como um todo. Assim, pode ser dito que a velocidade global destas superfícies é igual a zero ou mesmo dizer que sua posição global não varia ao longo do tempo.

Portanto, para obter as equações de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, nas direções x e y , integra-se as equações de quantidade de movimento 3D (8) e (9) utilizando a regra de *Leibniz* e as condições de contorno cinemáticas. Assim, definem-se tais equações 2DH nas direções x e y , respectivamente, como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\Phi_{sen}\theta V \quad (15)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B) - 2\Phi_{sen}\theta U \quad (16)$$

onde τ_i^S e τ_i^B são as tensões de atrito na superfície livre e no fundo, respectivamente.

O cisalhamento turbulento decorrente da ação eólica é escrito em termos de uma formulação de velocidade quadrática, o que é comum em modelos de escoamento com superfície livre, ou seja:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} C_D W_{10}^2 \cos \phi_i \quad [i=1, 2] \quad (17)$$

onde, a notação indicial é utilizada considerando $i=1$ que representa x e $i=2$ que representa y . τ [Pa] é a tensão de cisalhamento superficial induzida pela ação do vento; ρ_{ar} é a densidade do ar ($\cong 1,5 \text{ kg.m}^{-3}$); W_{10} [m.s^{-1}] é o valor local da velocidade do vento medida 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 . C_D é o coeficiente de arraste do vento, cuja fórmula adotada é a apresentada por Wu (1982): $C_D = (0,80 + 0,065W_{10}) \times 10^{-3}$.

Já o cálculo da tensão de atrito no fundo dá-se através da seguinte expressão:

$$\tau_i^B = \rho_0 \beta U_i \quad [i=1,2] \quad (18)$$

onde, devido à modelagem 3D ter sido usada neste estudo e, portanto, o módulo 2DH estar acoplado ao 3D, β depende da velocidade de atrito característica u_* , a qual é função do perfil de velocidade 3D. Assim:

$$\beta = \frac{\sqrt{g}}{C_h} |u_*| \quad (19)$$

onde C_h é o coeficiente de *Chézy* e é definido por:

$$C_h = 18 \log_{10} \left(\frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (20)$$

sendo a rugosidade equivalente no fundo representada por ε .

4.5. O MÓDULO LAGRANGEANO DE TRANSPORTE ADVECTIVO DIFUSIVO

O modelo Lagrangeano é ideal para simular o transporte de escalares que estejam flutuando, misturados ou ocupando apenas uma camada na coluna d'água. Ele é eficiente para situações em que as fontes são de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico, assim como também em situações com fortes gradientes. Tal eficiência se deve ao fato deste modelo utilizar os campos de velocidade gerados pelo modelo hidrodinâmico sem restringir-se à escala de resolução imposta pela grade de discretização do mesmo.

Para este modelo, as fontes contaminantes são representadas por um número finito de partículas lançadas e dispostas aleatoriamente na região fonte a cada intervalo de tempo. O lançamento das partículas pode ser instantâneo, por intervalo especificado ou contínuo, inclusive com vazão variável.

A trajetória das partículas é calculada através da soma de um componente determinístico (advecção), o qual usa as velocidades e a

elevação da superfície fornecidas pelo modelo hidrodinâmico 2DH, e outro aleatório independente (difusão turbulenta), representado por um pequeno deslocamento aleatório na posição da partícula (Horita, 1996).

O transporte advectivo das partículas lançadas em cada instante é definido pela trajetória de cada partícula, onde a expansão em série de *Taylor* é utilizada para calcular a posição de uma partícula no instante seguinte (P^{n+1}) a partir da posição anterior (P^n). Tem-se, então:

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2 P^n}{dt^2} + T.A.D. \quad (21)$$

onde T.A.D. são termos de alta ordem desprezados.

A partir do campo de velocidades resultantes do modelo hidrodinâmico são obtidas as derivadas temporais da posição P da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \vec{V}(u, v, w) \\ \frac{d^2 P}{dt^2} &= \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \end{aligned} \quad (22)$$

admitindo-se que nas escalas resolvíveis, as velocidades para o transporte advectivo das partículas, $\vec{V}(u, v, w)$, são as mesmas das velocidades das correntes do modelo hidrodinâmico.

As partículas são consideradas pontos discretos que apresentam a mesma quantidade de massa no instante do lançamento, onde o somatório da massa das partículas neste instante equivale à massa total de poluente lançada no corpo d'água. Ou seja, a relação entre a quantidade de partículas lançadas e a carga do poluente num determinado instante (concentração x vazão da fonte) permite calcular a massa de cada partícula.

Assim, para efluentes saindo de uma fonte, a massa (M_a) do efluente a em cada partícula lançada é determinada por:

$$M_a = \frac{QC_a \times \Delta t}{N_p} \quad (23)$$

onde Q é a vazão na fonte com concentração C_a de um contaminante a , e N_p é o número de partículas que entra no domínio através da fonte a cada passo de tempo Δt .

Depois de determinada a nova posição de cada partícula, pode ser incluído um desvio aleatório provocado por movimentos em escalas não resolvíveis geradores de “velocidades turbulentas”. A magnitude de tal desvio é função das derivadas espaciais das difusividades turbulentas, cuja difusividade se divide em duas partes: uma que acrescenta incerteza à advecção e outra estritamente difusiva.

Para o modelo Lagrangeano de transporte de partículas há dois tipos de condições de contorno: contorno aberto e contorno de terra. O primeiro se dá quando uma partícula atravessa um segmento de contorno saindo, assim, do domínio e sendo, conseqüentemente, perdida. O segundo tem duas situações a serem consideradas. A situação padrão ocorre quando a partícula atinge a fronteira e retorna ao meio sem perder massa. A outra situação é quando um coeficiente de absorção é definido e a partícula que atinge a fronteira retorna ao meio, mas parte de sua massa fica no trecho atingido da fronteira.

4.6. APLICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO EULERIANO

4.6.1. Malhas de discretização espaço-temporal

A região modelada compreende a área entre as coordenadas 9089573.14 e 9105188.30 N, cobrindo aproximadamente 16 km de costa e 5 km de mar, e 286509,57 E (próximo ao estuário de Barra de Jangadas) a 286533,65 E (próximo a Brasília Teimosa).

O estudo da circulação hidrodinâmica é feito através de algumas simulações, que visam descrever a dinâmica das correntes na região. Tais

simulações são obtidas através de alguns cenários, que esboçam um caso de vento atuante sobre a região de estudo.

A malha de elementos finitos gerada para a região de estudo (Figura 4.6), foi construída computacionalmente mediante o programa gerador de malhas e módulos auxiliares do SisBaHiA. A malha é constituída por 835 elementos quadráticos de tamanho variável, contendo 3508 nós, dos quais 203 são de contorno de terra e 135 de fronteira aberta. No módulo 3D foram definidos 21 níveis de profundidade ao longo da coluna d'água (da superfície ao fundo), formando um conjunto com 73668 pontos de cálculo.

Todas as simulações foram realizadas com um intervalo de tempo de integração (Δt) de 60 segundos, onde foi obtido o valor médio do número de Courant de 6,1.

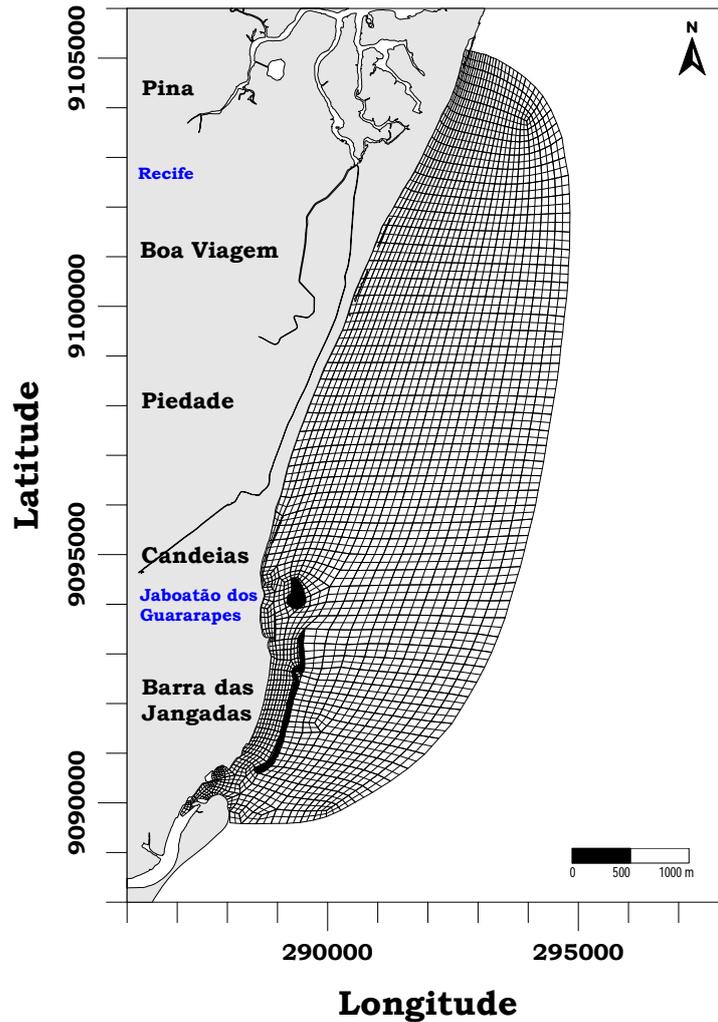


Figura 4.6. Malha de discretização do domínio modelado adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes.

4.6.2. Batimetria

As informações dos dados batimétricos utilizadas neste estudo foram obtidas a partir de duas fontes: a carta náutica N° 930 (DHN/MM, 1988), e o levantamento batimétrico realizado por Araújo & Medeiros (2004) utilizando um sonar de varredura lateral mod. *EGC260*, ecobatímetro *RAYTHEON* e um sistema de posicionamento *DGPS Garmin*, mod. *SURVEYOR*. A Figura 4.7 traz a carta batimétrica da área de estudo utilizada nas simulações. E de acordo com essa figura, observa-se uma elevação paralela à costa. Segundo Araújo e Dias (2000), essa feição

corresponde a bancos de recifes submersos, e entre esses bancos e as linhas de recifes (que afloram na baixa-mar próximo à costa), observa-se a presença de um canal, que encontra-se coberto por lama.

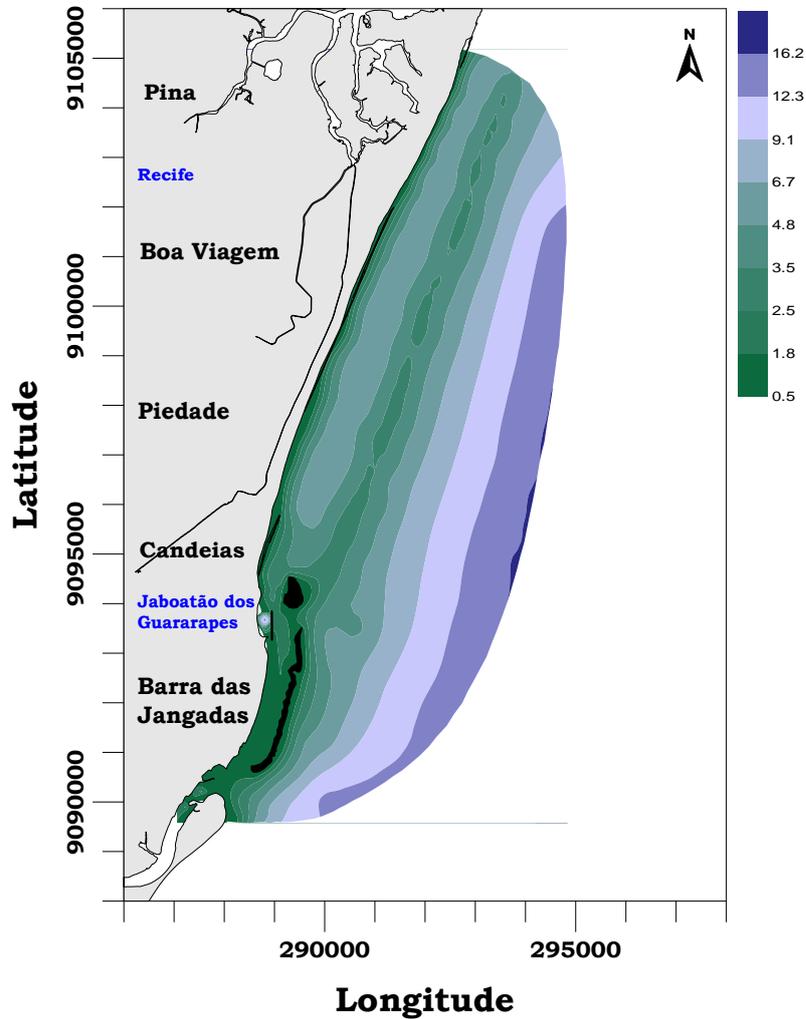


Figura 4.7. Batimetria da área de estudo utilizada nas simulações.

4.6.3. Cisalhamento eólico

De acordo com as medições fornecidas pelo CPTEC/INPE (2007), a velocidade média do vento, medida a 3 m de altura, para o mês de janeiro de 2007 foi de 1,40 m.s⁻¹, apresentando um mínimo de 0,15 m.s⁻¹ e um máximo de 3,40 m.s⁻¹. Para o período de coleta dos dados oceanográficos

(02 a 04 de janeiro de 2007), a velocidade média do vento foi de $1,30 \text{ m.s}^{-1}$, com um mínimo de $0,15 \text{ m.s}^{-1}$ e um máximo de $2,80 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 4.8).

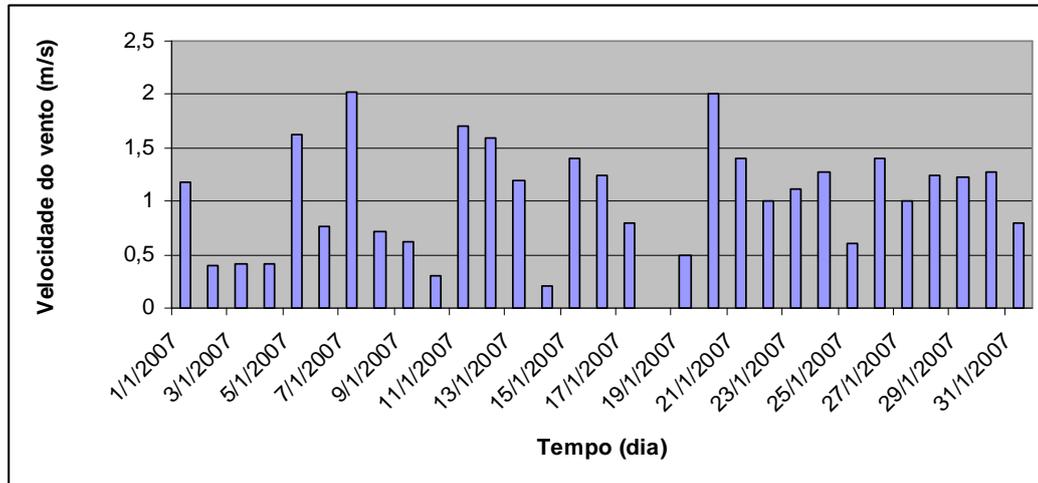


Figura 4.8. Velocidade do vento (m.s^{-1}) a 3 m de altura para o mês de janeiro de 2007. Fonte : (CPTEC, 2007).

O cisalhamento eólico considerado nas simulações foi estimado com a obtenção do vetor velocidade de vento, calculado a partir dos registros de intensidade e direção obtidos a 10 m de altura, para o mês de janeiro de 2007. Estes dados foram fornecidos pela estação meteorológica do Aeroporto dos Guararapes junto à Divisão Meteorológica do CINDACTA III. A velocidade média do vento para o mês de janeiro de 2007 (a 10 metros de altura) foi de $16,40 \text{ m.s}^{-1}$, apresentando um mínimo de $0,0 \text{ m.s}^{-1}$ e um máximo de $31,10 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 4.9). Se considerarmos apenas o período de simulação, a velocidade média do vento para o período de coleta (02 a 04 de janeiro de 2007) foi de $14,7 \text{ m.s}^{-1}$, apresentando um mínimo de $0,0 \text{ m.s}^{-1}$ e um máximo de $27,20 \text{ m.s}^{-1}$.

A direção dos ventos (para o mês de janeiro de 2007) foi predominante no sentido E-NE, como mostra a Figura 4.10.

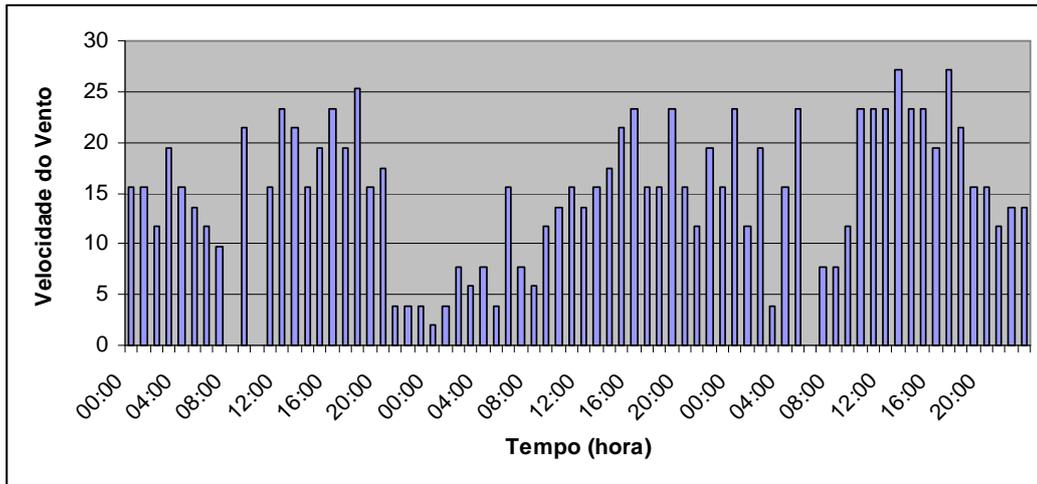


Figura 4.9. Intensidade do vento (m.s^{-1}) a 10 m de altura para o mês de janeiro de 2007. Fonte: CINDACTA III (2007).

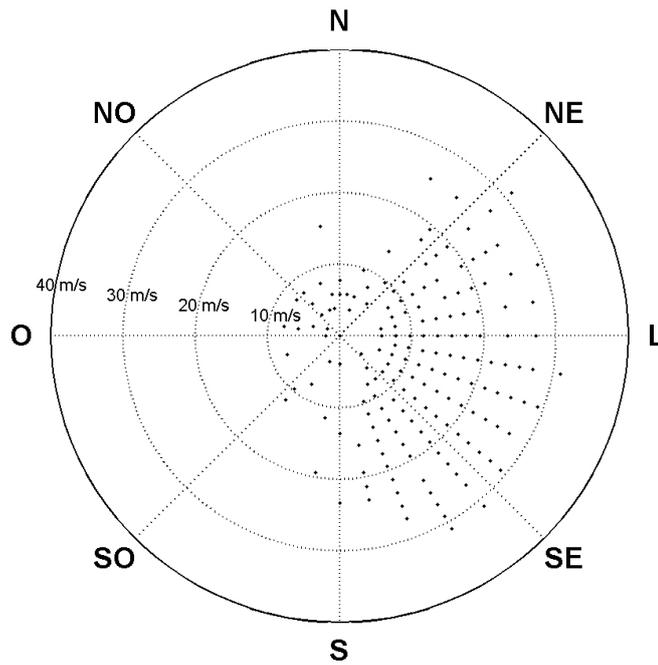


Figura 4.10. Direção do vento a 10 m de altura para o mês de janeiro de 2007. Fonte : CINDACTA III (2007).

4.6.4. Forçante astronômica (marés)

As marés, tanto astronômica quanto meteorológica, são as principais responsáveis pela circulação hidrodinâmica na região em estudo. Desta forma, o escoamento é bastante influenciado pela variabilidade temporal do nível d'água no domínio modelado.

Nos limites da malha utilizada neste estudo foi sugerida uma maré semidiurna a partir das constantes harmônicas (Tabela 4.2), obtidas para a estação no Porto do Recife no catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2006).

Tabela 4.2 Características das oscilações do nível do mar utilizadas como condição de contorno para as simulações nas cidades do Recife e Jaboatão dos Guararapes-PE. Fonte : FEMAR (2006).

Componente	Período (seg.)	Amplitude (m)	Fase (rad)
Mm	2380713,137	0,01	0,8029
MNS2	42430,07142	0,006	1,309
2N2	46459,34814	0,024	1,5882
mu2	46338,32748	0,027	1,6232
nu2	45453,61588	0,03	1,7802
N2	45570,05368	0,153	1,7977
M3	29809,44293	0,008	1,9199
M2	44714,16439	0,762	1,9373
Q1	96726,08402	0,014	1,9897
M4	22357,0822	0,009	2,042
K2	43082,04524	0,081	2,0769
T2	43259,21711	0,014	2,0944
S2	43200	0,275	2,1991
L2	43889,83274	0,015	2,3213
O1	92949,62999	0,05	2,4435
P1	86637,20458	0,014	3,8223
K1	86164,09076	0,043	3,9444
MS4	21972,0214	0,006	5,2709
M1	89399,69409	0,005	5,9865
MSf	1275721,388	0,01	6,1087

Esta estação maregráfica está localizada no Porto de Recife, na latitude 08°03,4' S e longitude 34°51,9' W. No caso, trata-se de uma maré semidiurna, onde é estabelecido um Nível Médio (Z_0) de 114 cm acima do NR (Nível de Redução), com médias de preamares de sizígia (MHWS) de 218 cm acima do NR, média das preamares de quadratura (MHWN) de 163 cm acima do NR, média das baixa-mares de sizígia (MLWS) de 10 cm acima do NR e média das baixa-mares de quadratura (MLWN) de 65 cm acima do NR.

4.6.5. Condições iniciais

As condições iniciais (condição do sistema no tempo $t = t_0$), definidas para todos os nós modelados do modelo hidrodinâmico, são fornecidas através da determinação das componentes do vetor velocidade 2DH, U e V (na direção X e Y , respectivamente), e da elevação na superfície livre (ζ). Para o módulo 3D, as condições iniciais são geradas automaticamente de acordo com os valores acima, a velocidade do vento e a rugosidade equivalente do fundo.

Dessa forma, as simulações dos três cenários foram realizadas com velocidades horizontais começando do zero, denominada de “partida a frio”, e com elevação inicial da superfície livre (ζ) de 2,42 m, correspondendo ao estágio de preamar da maré de sizígia.

Na Tabela 4.3 são exibidas as opções de modelagem consideradas nas simulações.

Tabela 4.3. Opções de modelagem consideradas nas simulações da região costeira adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes.

Modelo FIST3D	Estima a circulação hidrodinâmica tridimensional (equações de <i>Navier-Stokes_3D</i> para fluido incompressível com pressão hidrostática)
Período de simulação	864000 segundos (10 dias)
Passo de tempo (Δt)	60 segundos
Número <i>Courant</i> médio	6,1
Níveis verticais	21
Fechamento turbulência	Calculada internamente

4.6.6. Tratamento das condições de contorno horizontais

Para as simulações é necessário estabelecer as condições de contorno para os campos de velocidade e elevação da superfície livre da água.

Os contornos abertos e os contornos de terra são os dois tipos de contornos horizontais. Os contornos abertos representam os limites do domínio de modelagem e, geralmente, a imposição da elevação da superfície livre é a principal forçante para estes contornos. Os contornos de terra representam as margens e seções de rios ou canais que estejam no domínio, sendo as vazões ou velocidades dos rios geralmente prescritas.

As características das condições de contorno utilizadas nas simulações são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Condições de contorno consideradas nas simulações da região costeira adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes.

Superfície	Cisalhamento eólico	Variável e uniforme com intervalo de 1 hora entre as leituras
Fundo	Batimetria	Carta Náutica no. 930 (DHN/MM, 1988), e perfis complementares (Araújo & Medeiros, 2004)
Fronteiras	Aberta	Contorno oceânico (leste, norte e sul)
	Fechada	Contorno de terra
Estuário de Barra de Jangadas	Vazão afluente	Calculada internamente pelo modelo
Constantes harmônicas	Fonte: : FEMAR (2006).	

4.6.7. Cenários de simulação

Com o objetivo de caracterizar a circulação hidrodinâmica da região costeira adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes, durante a estação seca, foi considerado para simulação o mês de janeiro de 2007, período que engloba os dias de coleta de dados oceanográficos, ou seja:

Cenário 1 – simulação hidrodinâmica considerando as forçantes eólica (ventos) e astronômica (marés de sizígia e quadratura) do mês de janeiro de 2007.

Foi utilizado o método de *Kriging* para elaborar os mapas temáticos horizontais. Nestes casos, foram também realizadas previamente interpolações manuais, visando conferir a fidelidade das distribuições espaciais geradas pelos algoritmos de interpolação.

4.7. APLICAÇÃO DO MODELO LAGRANGEANO

O modo Lagrangeano do modelo SisBaHiA foi aplicado a dois cenários distintos para o mesmo mês de janeiro de 2007, com o objetivo de avaliar o transporte de sedimentos na área de estudo. São eles:

Cenário 2 – simulação do transporte de sedimentos oriundos do estuário de Barra de Jangadas – Contribuição continental (Figura 4.11);

Cenário 3 – simulação do transporte de sedimentos oriundos da deriva litorânea, a partir do litoral sul adjacente à área de estudo – Contribuição litorânea (Figura 4.12).

O período de simulação considerado foi de 10 dias (864.000 s) que teve início na preamar na primeira maré de sizígia, instante em que se iniciam os lançamentos das partículas, com passo de tempo de 60 segundos.

Para ambos os cenários, as condições de contorno aberto ocorrem quando uma partícula atravessa um segmento de contorno e é perdida. Já para o contorno de terra ocorre a situação padrão, onde a partícula atinge a fronteira e retorna ao meio sem perder massa.

O tipo de sedimento considerado para a simulação lagrangeana foi areia fina, com tensão crítica de arraste $\tau_0 \left(\frac{N}{m^2} \right) = 0,178$, para sedimentos oriundos do estuário de Barra de Jangadas e $\tau_0 \left(\frac{N}{m^2} \right) = 0,187$, para sedimentos oriundos da deriva litorânea.

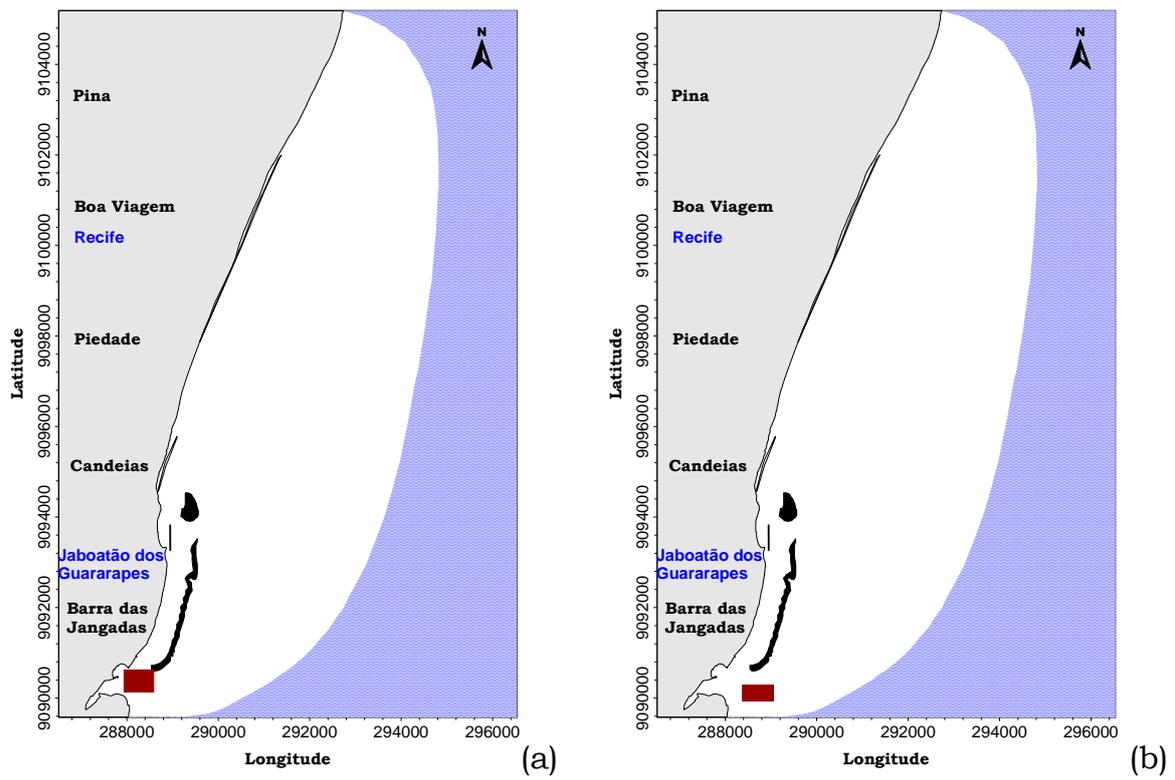


Figura 4.11. Simulação do transporte de sedimentos: (a) Cenário 2 - Contribuição continental e (b) . Cenário 3 – Contribuição litorânea.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo, os resultados deste estudo são apresentados e discutidos. Estes foram organizados de modo a possibilitar tanto a análise das informações obtidas *in situ* (campanhas oceanográficas) quanto a comparação destas com os resultados das simulações numéricas realizadas com o modelo SisBaHiA.

A área de estudo foi, então, dividida em três partes para uma melhor análise dos resultados. A parte norte está localizada entre as praias do Pina e de Boa Viagem (R04, R05, R06 e R07); a central, entre as praias de Boa Viagem e Candeias (J06, R01, R02 e R03); e a sul, entre as praias de Candeias e Barra de Jangadas (J01, J02, J03, J04 e J05).

No primeiro momento, são exibidos os resultados do modelo hidrodinâmico e, posteriormente, são apresentados e analisados os resultados da aplicação do modelo Lagrangeano.

5.1. MODELO HIDRODINÂMICO EULERIANO

Os resultados da modelagem hidrodinâmica euleriana foram comparados com os dados das campanhas de campo de acordo com o cenário descrito na seção 4.6.7 e considerando as devidas datas de coleta.

Os vetores resultantes de velocidade da corrente marítima dos dados experimentais e numéricos foram calculados a partir das componentes vetoriais das velocidades horizontais de corrente (U e V) para cada estágio de maré (baixa-mar e preamar) na superfície, meio e fundo da coluna d'água de cada perfil.

As figuras e gráficos a seguir trazem os valores médios da intensidade das correntes (m.s^{-1}) dos dados experimentais e numéricos para os dois estágios de maré nas três profundidades da coluna d'água. Para os gráficos de barra (Figuras 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 5.10 e 5.12), os valores positivos indicam transporte para o Norte, enquanto que valores negativos representam transporte para o Sul.

Os resultados numéricos de circulação obtidos na área de estudo encontram-se apresentados no Anexo B, inclusive os estágios de maré vazante e enchente.

5.1.1. Estágio de baixa-mar (BM)

Os resultados dos campos de correntes medidas e simuladas durante a baixa-mar na superfície da coluna d'água são apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2.

As intensidades das correntes medidas no mar apresentaram valores entre $0,00$ e $0,33 \text{ m.s}^{-1}$ na superfície, e entre $0,01$ e $0,27 \text{ m.s}^{-1}$ no meio e no fundo da coluna d'água. De forma semelhante, as intensidades das correntes simuladas foram entre $0,08$ e $0,31 \text{ m.s}^{-1}$ na superfície, entre $0,01$

e $0,25 \text{ m.s}^{-1}$ à meia água e entre $0,01$ e $0,19 \text{ m.s}^{-1}$ no fundo da coluna d'água.

De acordo com a Figura 5.1, o sentido predominante das correntes para os resultados experimentais foi para o sul, enquanto que, nos resultados numéricos, alguns perfis apresentaram sentido predominante para o norte.

Para a parte sul, os resultados numéricos são da mesma ordem de grandeza e sentido dos dados experimentais. No entanto, as correntes apresentaram sentidos distintos na parte central e intensidade e sentido correspondentes no perfil R04 da parte norte.

Sendo assim, os perfis J01, J02, J03, J04, J05 e R04 mostraram maior semelhança com os dados obtidos em campo.

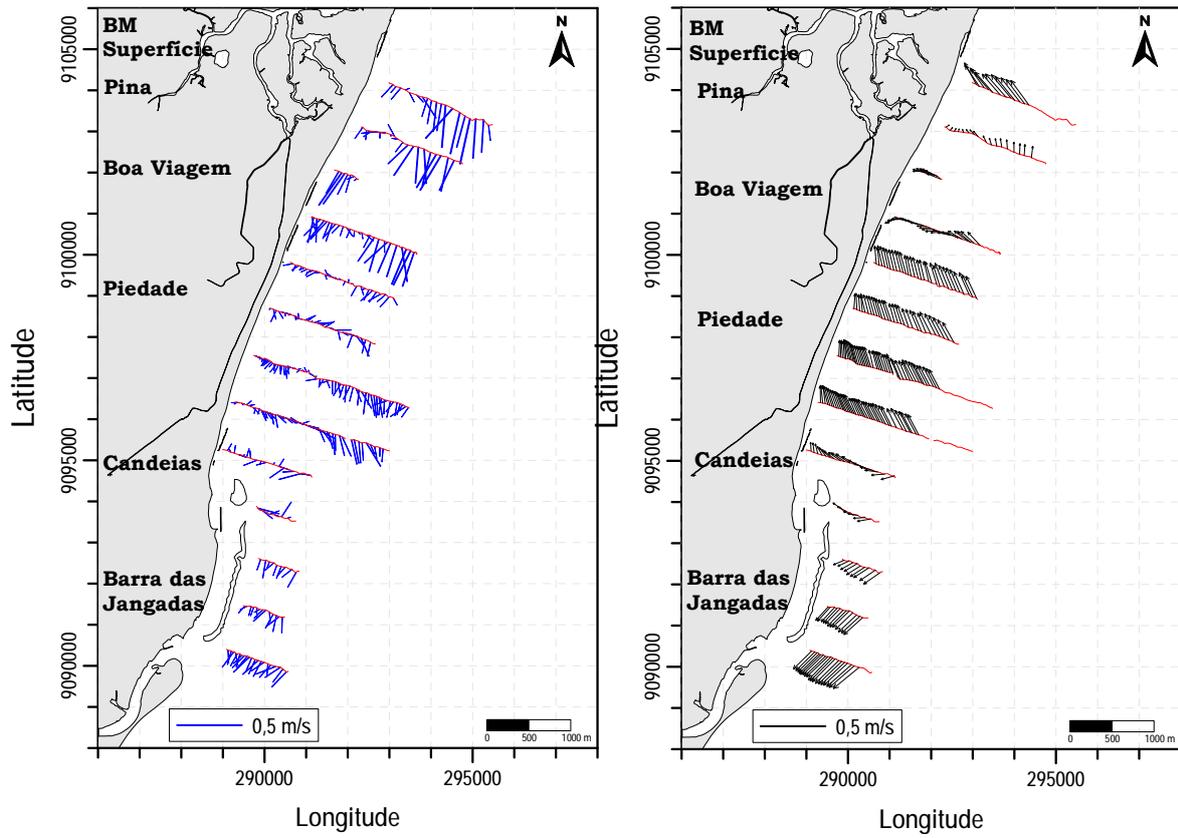


Figura 5.1. Vetores horizontais da velocidade das correntes na superfície durante a baixa-mar: (a) experimental e (b) numérico.

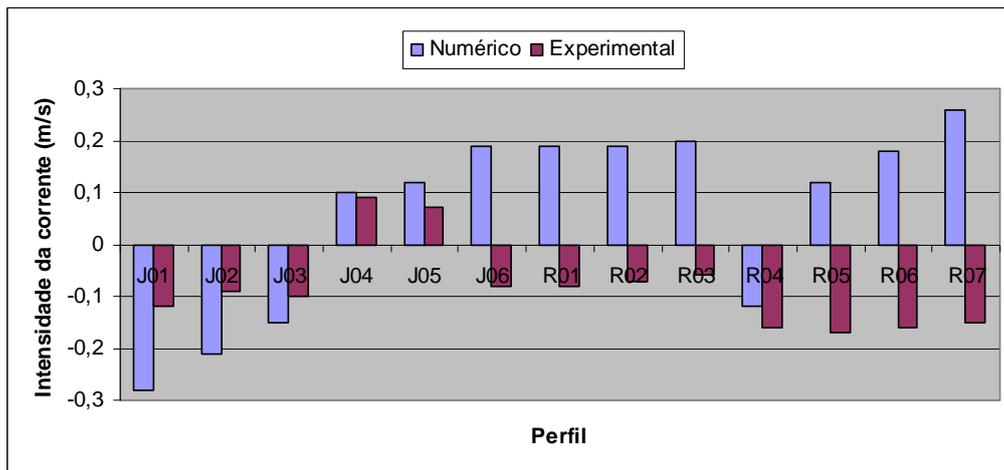


Figura 5.2. Valores médios da intensidade da corrente ($m.s^{-1}$) na superfície durante baixa-mar.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam os resultados das correntes medidas e simuladas no meio da coluna d'água durante a baixa-mar.

Da mesma forma que o observado para a superfície, o sentido predominante das correntes para os resultados experimentais foi para o sul. Contudo, parte dos perfis numéricos apresentaram sentido para o norte.

Na região sul do domínio em estudo, os resultados numéricos e experimentais se assemelharam mais nos perfis J01, J04 e J05. Na parte central, os resultados apresentaram sentidos distintos e, na parte norte, este foram semelhantes nos perfis R04 e R05.

Os resultados numéricos que representaram melhor os dados experimentais foram os dos perfis J01, J04, J05, R04 e R05.

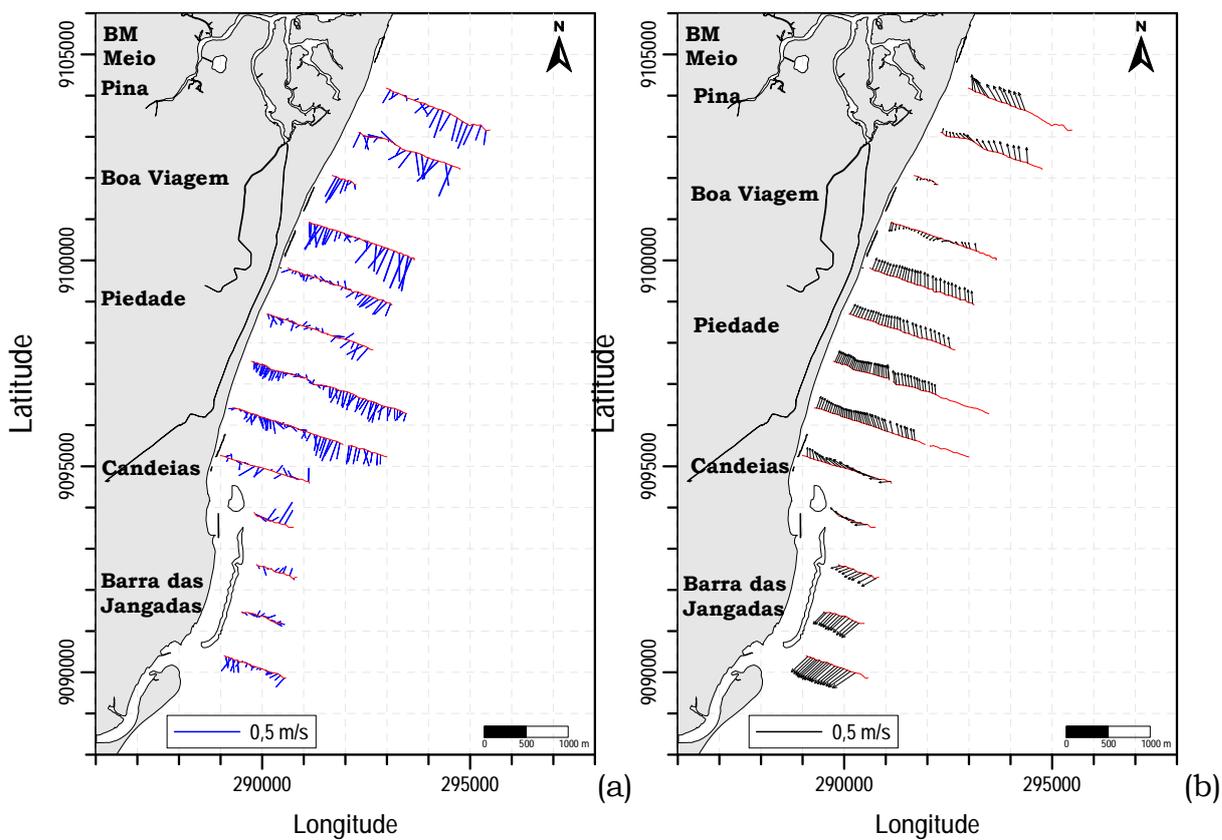


Figura 5.3. Vetores horizontais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água durante a baixa-mar: (a) experimental e (b) numérico.

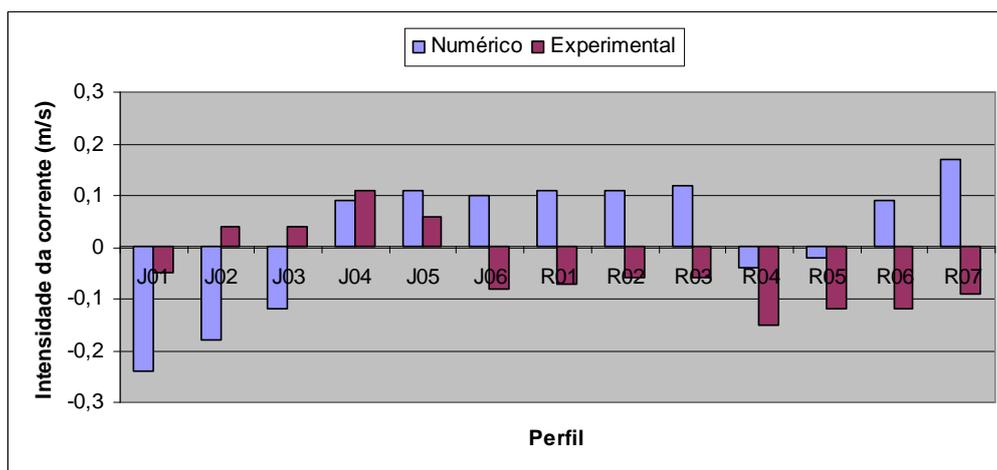


Figura 5.4. Valores médios da intensidade da corrente ($m.s^{-1}$) no meio da coluna d'água durante a baixa-mar.

Ao analisar os resultados das correntes próximas ao fundo obtidas em campo durante a baixa-mar (Figuras 5.5 e 5.6), observa-se que estas apresentaram um transporte predominante para sul. No entanto, os resultados numéricos apresentaram alguns perfis direcionados também para o norte.

Os perfis que obtiveram os valores numéricos médios de corrente mais próximos do experimental na parte sul foram: J01, J04 e J05. Porém, as correntes apresentaram sentidos distintos na parte central (exceto o perfil R03) e, na parte norte, certa semelhança nos perfis R04 e R05.

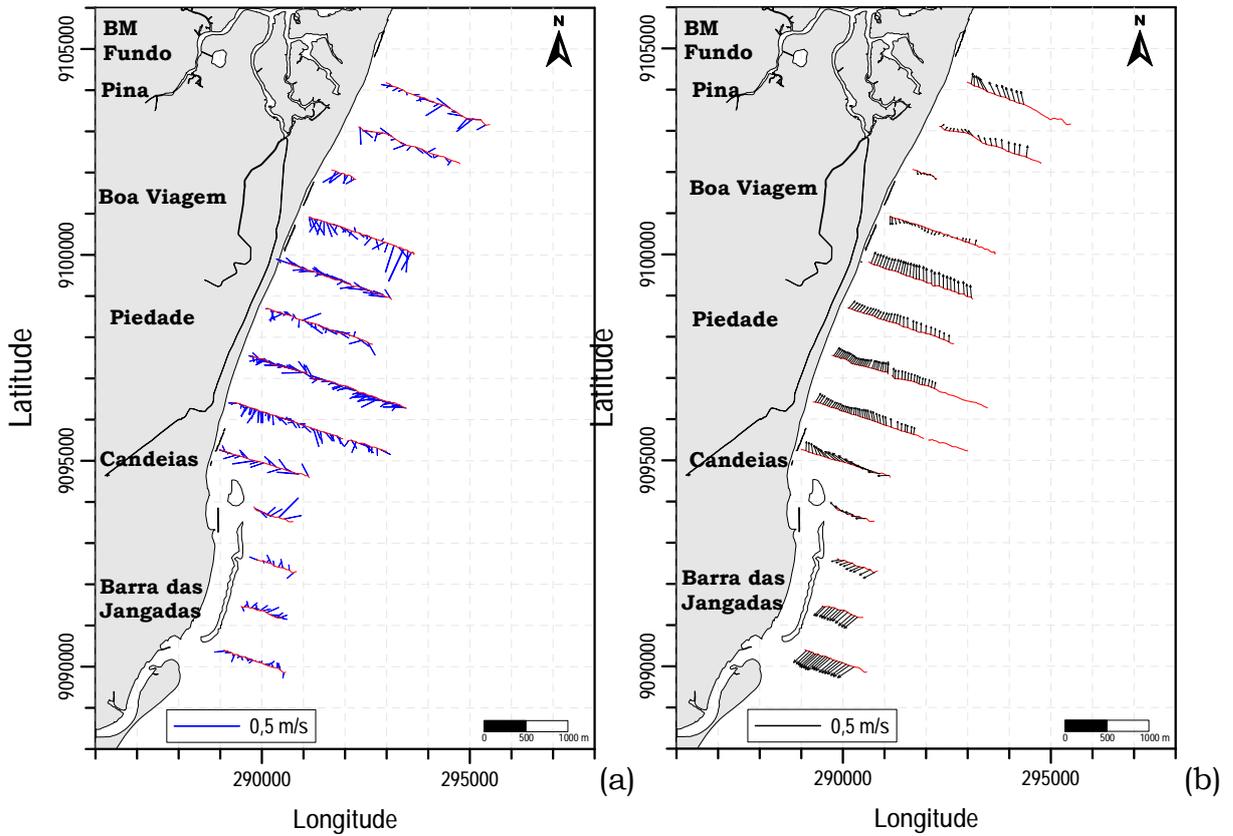


Figura 5.5. Vetores horizontais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a baixa-mar: (a) experimental e (b) numérico.

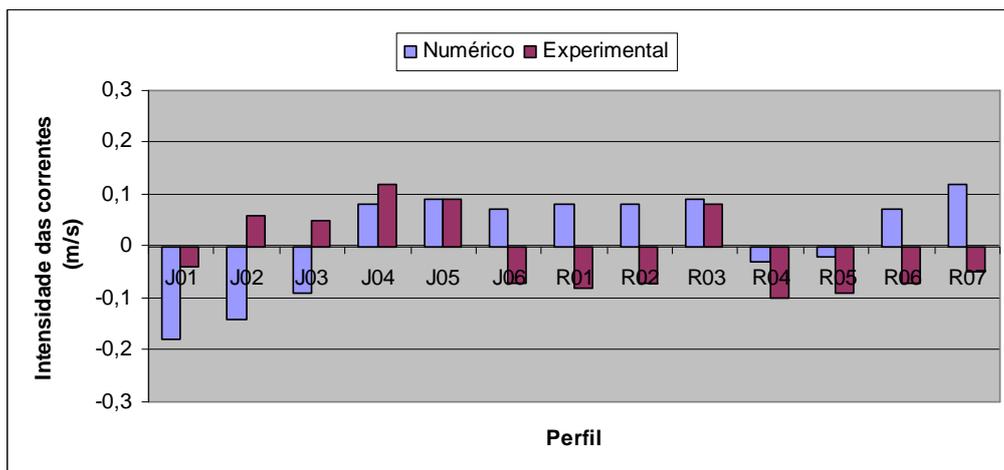


Figura 5.6. Valores médios da intensidade da corrente ($m \cdot s^{-1}$) próxima ao fundo durante a baixa-mar.

5.1.2. Estágio de preamar (PM)

As Figuras 5.7 a 5.12 a seguir apresentam os resultados experimentais e numéricos relativos ao estágio de maré da preamar. Os dados relacionados a este estágio foram coletados apenas nas partes norte e central da região em estudo, pois os dados da parte sul do domínio foram perdidos devido a problemas relacionados ao ajuste inicial da metodologia de coleta.

As intensidades das correntes obtidas em campo apresentaram valores entre: 0,00 e 0,34 m.s⁻¹ na superfície; 0,00 e 0,15 m.s⁻¹ no meio; e 0,01 e 0,18 m.s⁻¹ próximo ao fundo da coluna d'água. Para as intensidades das correntes simuladas, os valores extremos obtidos em relação a toda coluna d'água variaram de 0,00 a 0,18 m.s⁻¹.

De acordo com as Figuras 5.7 e 5.8, as medidas na superfície realizadas em campo apresentaram um transporte médio para o norte na parte central, o que foi reproduzido satisfatoriamente na simulação. Na parte norte, observa-se uma inversão do vetor corrente na altura do perfil R04, a qual foi também reproduzida pelo modelo. Para os demais perfis, as medidas de mar acusam um transporte para o sul, enquanto que os resultados numéricos mantêm o sentido médio de transporte para norte.

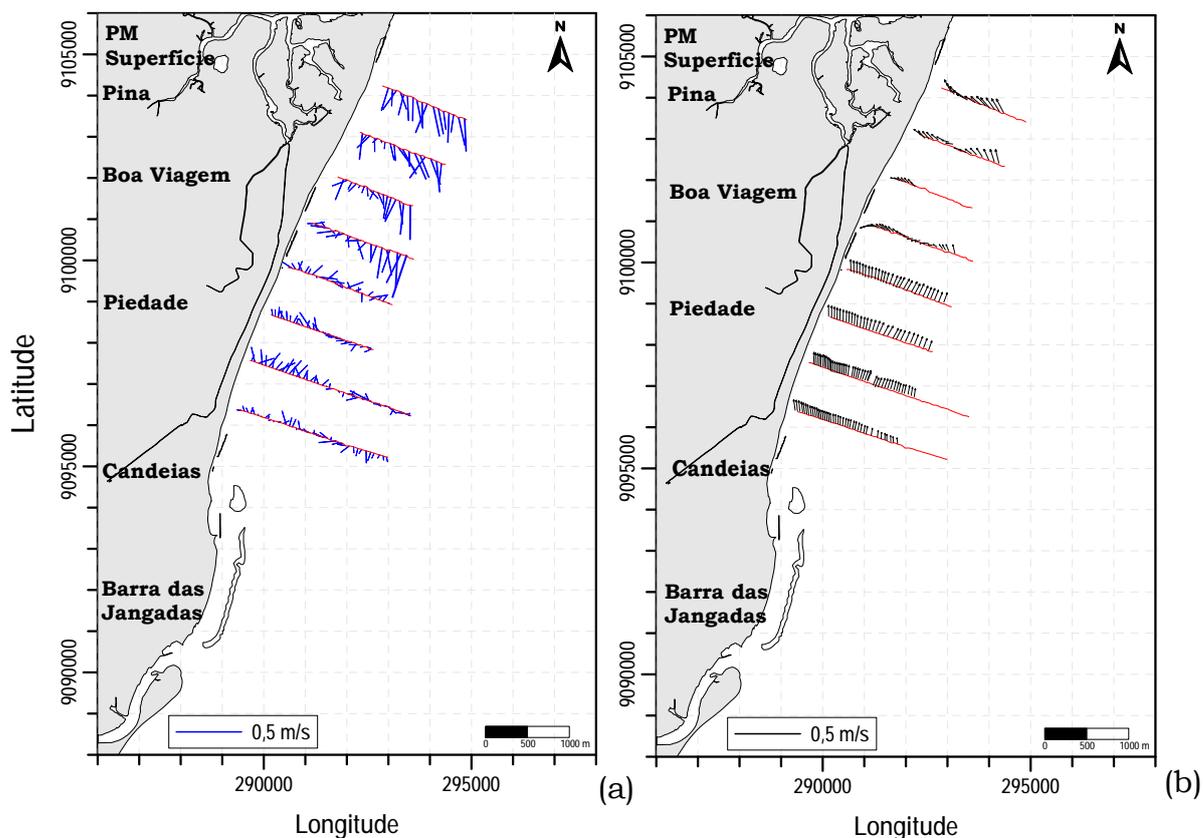


Figura 5.7. Vetores horizontais da velocidade das correntes na superfície durante a preamar: (a) experimental e (b) numérico.

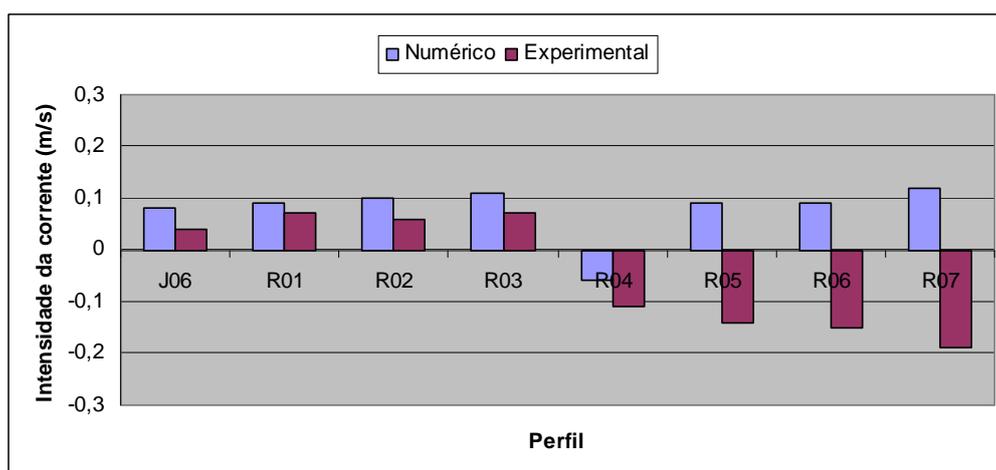


Figura 5.8. Valores médios da intensidade da corrente ($m.s^{-1}$) na superfície durante a preamar.

As Figuras 5.9 e 5.10 trazem os resultados para o meio da coluna d'água durante a preamar. Estes indicam, no geral, a presença de intensidades fracas (em sua maioria inferior a $0,1 \text{ m.s}^{-1}$) que são características de períodos de estofo. Observa-se também que os resultados das simulações mostram, para todos os perfis, um transporte médio para o norte, enquanto que as medidas de ADCP acusam um transporte para o sul. Isto é particularmente claro na Figura 5.10.

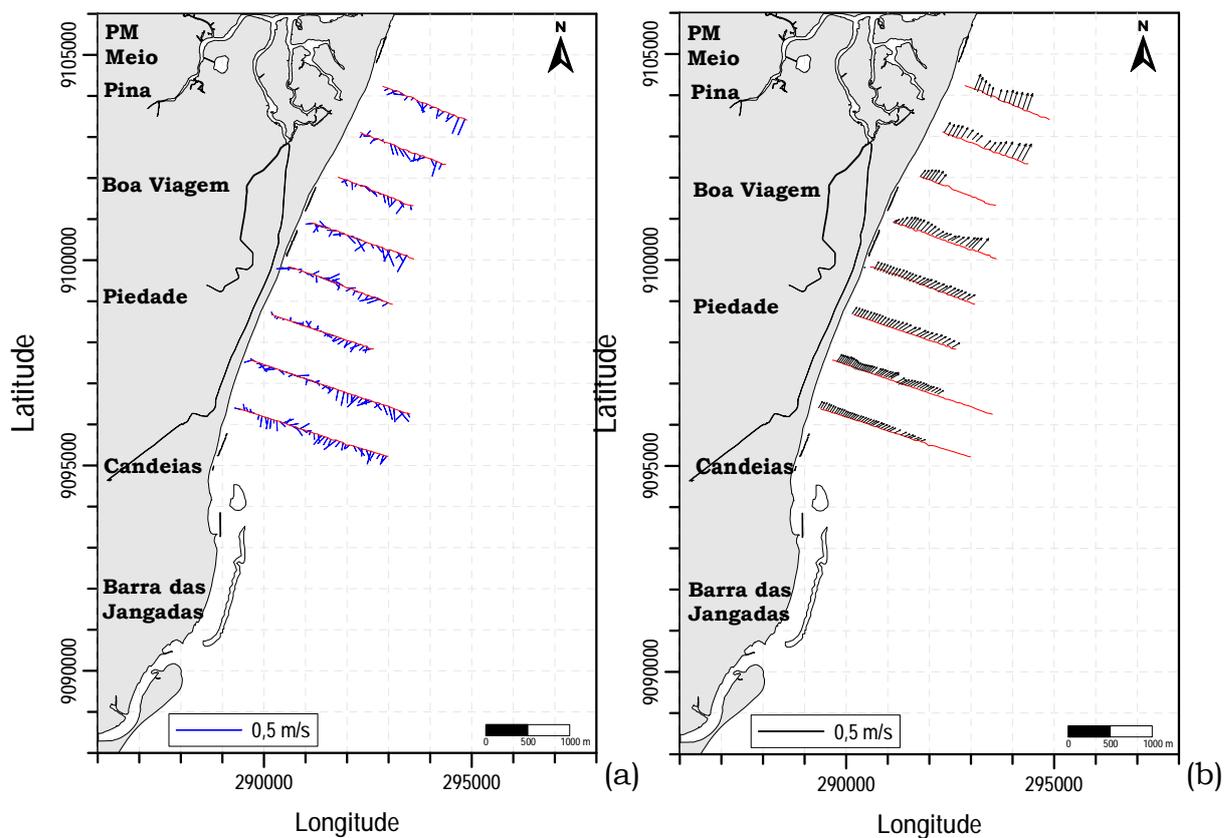


Figura 5.9. Vetores horizontais da velocidade das correntes no meio da coluna d'água durante a preamar: (a) experimental e (b) numérico.

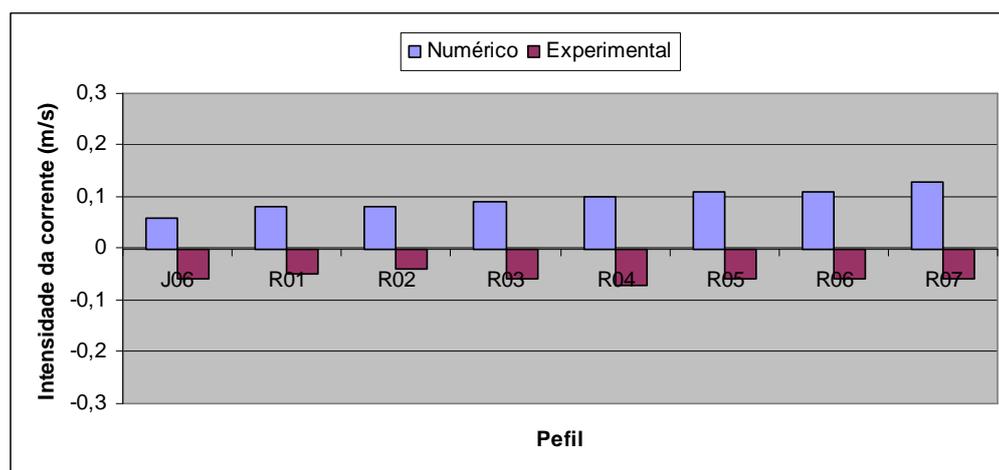


Figura 5.10. Valores médios da intensidade da corrente ($m.s^{-1}$) no meio da coluna d'água durante a preamar.

Da mesma forma que para os resultados medidos e simulados à meia água, verificam-se baixas intensidades de corrente próximo ao fundo durante a preamar. De acordo com as Figuras 5.11 e 5.12, o sentido predominante das correntes para os dados experimentais é para o norte para os perfis R02, R03, R04 e R05, o que foi relativamente bem reproduzido nas simulações. Para os demais perfis, os resultados apresentaram sentidos de transporte distintos.

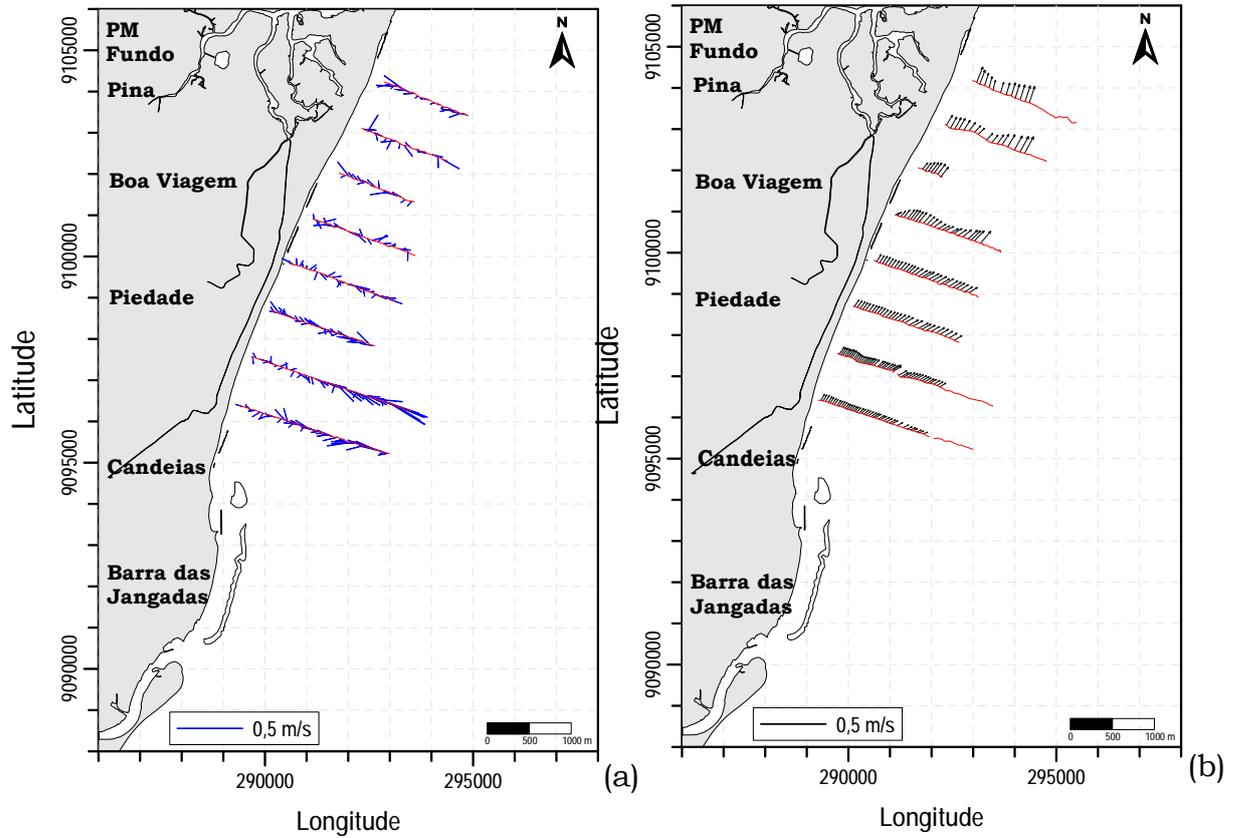


Figura 5.11. Vetores horizontais da velocidade das correntes próximas ao fundo durante a preamar: (a) experimental e (b) numérico.

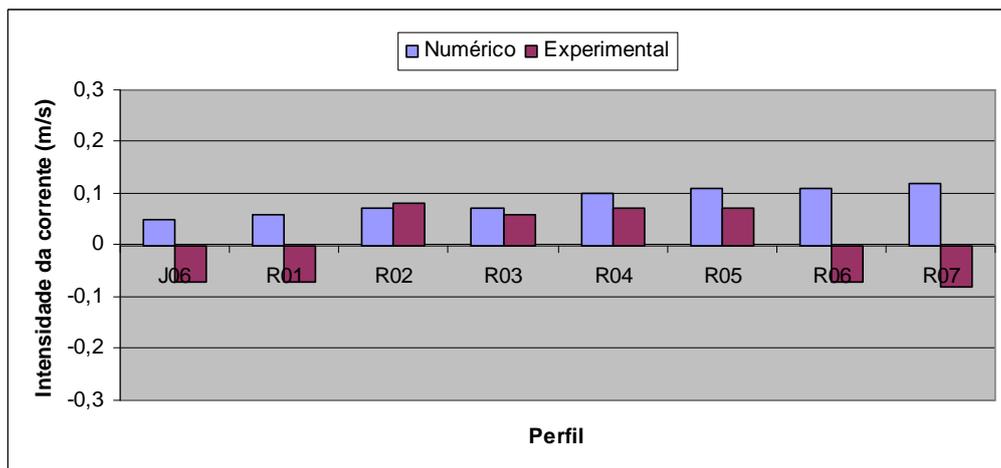


Figura 5.12. Valores médios da intensidade da corrente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) próxima ao fundo durante a preamar.

5.1.3. Análise dos resultados do modelo hidrodinâmico Euleriano

Os resultados apresentados nas seções anteriores permitiram verificar que as correntes simuladas em toda a coluna d'água representaram satisfatoriamente as medidas de mar nos perfis J01, J04 e R04 para o estágio de maré de baixa-mar.

Para este mesmo estágio, a simulação reproduziu relativamente bem o transporte de correntes na parte sul do domínio em estudo, diferentemente das partes central e norte onde a maioria dos perfis apresentaram comportamentos distintos entre os dados experimentais e numéricos. Ainda, as intensidades das correntes simuladas corresponderam à mesma ordem de grandeza das correntes das medidas experimentais. Esta melhor representação na parte sul do domínio modelado se deve à batimetria mais detalhada nesta região juntamente com a propagação da onda de maré durante a baixa-mar, quando ocorre a menor profundidade do ciclo.

Durante o estágio de maré de preamar, com dados coletados apenas nas partes central e norte da região em estudo, as correntes obtidas na simulação reproduziram de forma coerente o transporte obtido *in situ* nos perfis R02, R03 e R04 na superfície e fundo da coluna d'água. Como a coleta de dados foi realizada no período de estofa, as correntes apresentaram medidas fracas de intensidade de corrente, em sua maioria inferiores a $0,10 \text{ m.s}^{-1}$, sendo condizentes com os dados do modelo.

As correntes resultantes dos dados experimentais neste estágio de maré foram bem representadas pela simulação na parte central do domínio modelado, principalmente na superfície da coluna d'água. A melhor representatividade nesta região se deve à ação conjunta da maré e da batimetria durante o período de estofa em que há maior profundidade, fazendo, assim, que haja maior influência na superfície do mar.

Ao comparar os dois estágios analisados, considerando que não há medidas experimentais na parte sul durante a preamar, observa-se que a baixa-mar reproduziu melhor a situação real nos três níveis de profundidade (superfície, meio e fundo da coluna d'água). Isto sugere que haja maior influência da batimetria em toda a coluna d'água devido à profundidade mais rasa correspondente à baixa-mar.

5.2. RESULTADOS NUMÉRICOS DOS CAMPOS DE CORRENTES

Os campos de correntes, dos quatros estágios de maré, referentes ao período de simulação (10 primeiros dias do mês de janeiro), durante a maré de sizígia, são representadas nas Figuras 5.13 a 5.16.

Durante o estágio de preamar (Figura 5.13), as correntes superficiais apresentaram intensidades que variaram entre 0,06 e 1,25 m.s⁻¹ e mediana 0,67 m.s⁻¹. As intensidades das correntes na superfície foram praticamente uniformes, sendo mais intensas no extremo sul da área de estudo. De acordo com a Figura 5.13-a, a direção das correntes foi para O e SO, a última na altura de Barra de Jangadas.

No meio da coluna d'água, as correntes apresentaram intensidades que variaram entre $3,6 \times 10^{-3}$ e 0,78 m.s⁻¹ e mediana 0,34 m.s⁻¹. De acordo com a Figura 5.13-b, as intensidades das correntes foram mais intensas próximas à costa, principalmente no extremo sul da malha. Quanto à direção, as correntes apresentaram direção predominante para o Sul, embora apresentem vetores de corrente para o Norte, no Pina (extremo norte da área de estudo) e no extremo leste da malha. Entre estas regiões, pode-se observar a ocorrência de áreas de transição cujas intensidades são baixas.

As correntes próximas ao fundo da coluna d'água (Figura 5.13-c) apresentaram valores que variaram entre 5×10^{-3} e 0,47 m.s⁻¹ e mediana 0,24 m.s⁻¹. As direções das correntes apresentaram o mesmo padrão que as do meio da coluna d'água, mas neste nível d'água, as intensidades são mais baixas e as áreas de transição são maiores.

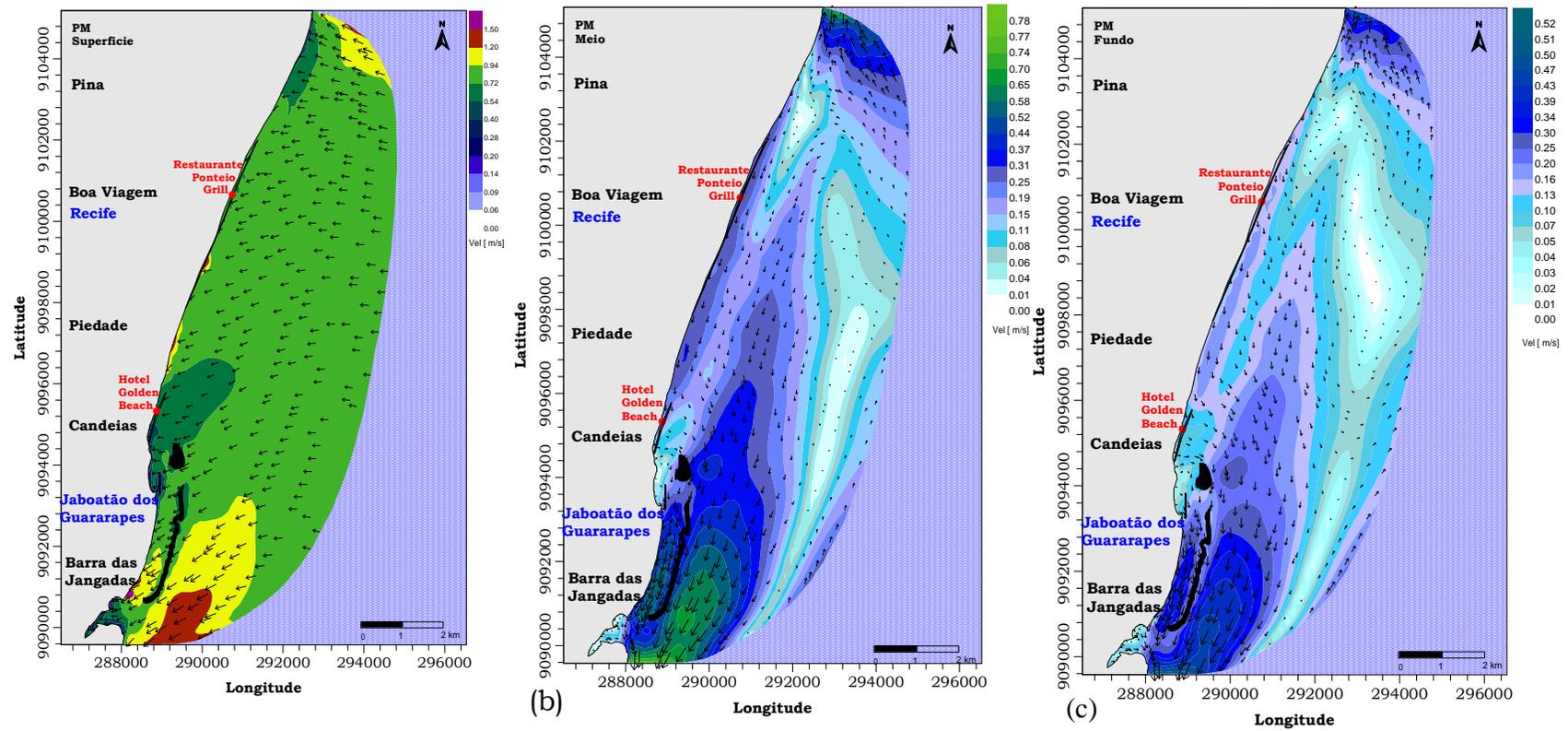


Figura 5.13. Velocidade das correntes no estágio de maré preamar: (a) superfície, (b) Meio, (c) Fundo da coluna d'água.

No estágio de maré vazante (Figura 5.14), as intensidades das correntes superficiais apresentaram valores entre 0,18 e 1,25 m.s⁻¹ e mediana 0,86 m.s⁻¹. As correntes apresentaram intensidades uniformes em quase toda a área de estudo (Figura 5.14-a). No entanto, apresentaram intensidades mais baixas ao longo da costa e na área estuarina, e foram mais intensas no extremo norte da área de estudo. As direções predominantes das correntes foram para NO, apresentando, ainda, vetores de corrente para O.

Na metade da coluna d'água, as correntes apresentaram intensidades entre 0,16 e 0,98 m.s⁻¹ e mediana 0,86 m.s⁻¹. As correntes foram mais intensas ao norte do Hotel Golden Beach, cuja direção foi para NE, e próximo à área estuarina, cuja direção foi para SO (Figura 5.14-b). As intensidades das correntes foram mais baixas na área de transição, localizada entre as duas regiões mais intensas.

As intensidades das correntes próximas ao fundo (Figura 5.14-c) apresentaram valores entre 6×10^{-3} e 0,65 m.s⁻¹ e mediana 0,29 m.s⁻¹. Neste nível d'água, as intensidades foram mais baixas e as direções apresentaram o mesmo padrão que no meio da coluna d'água.

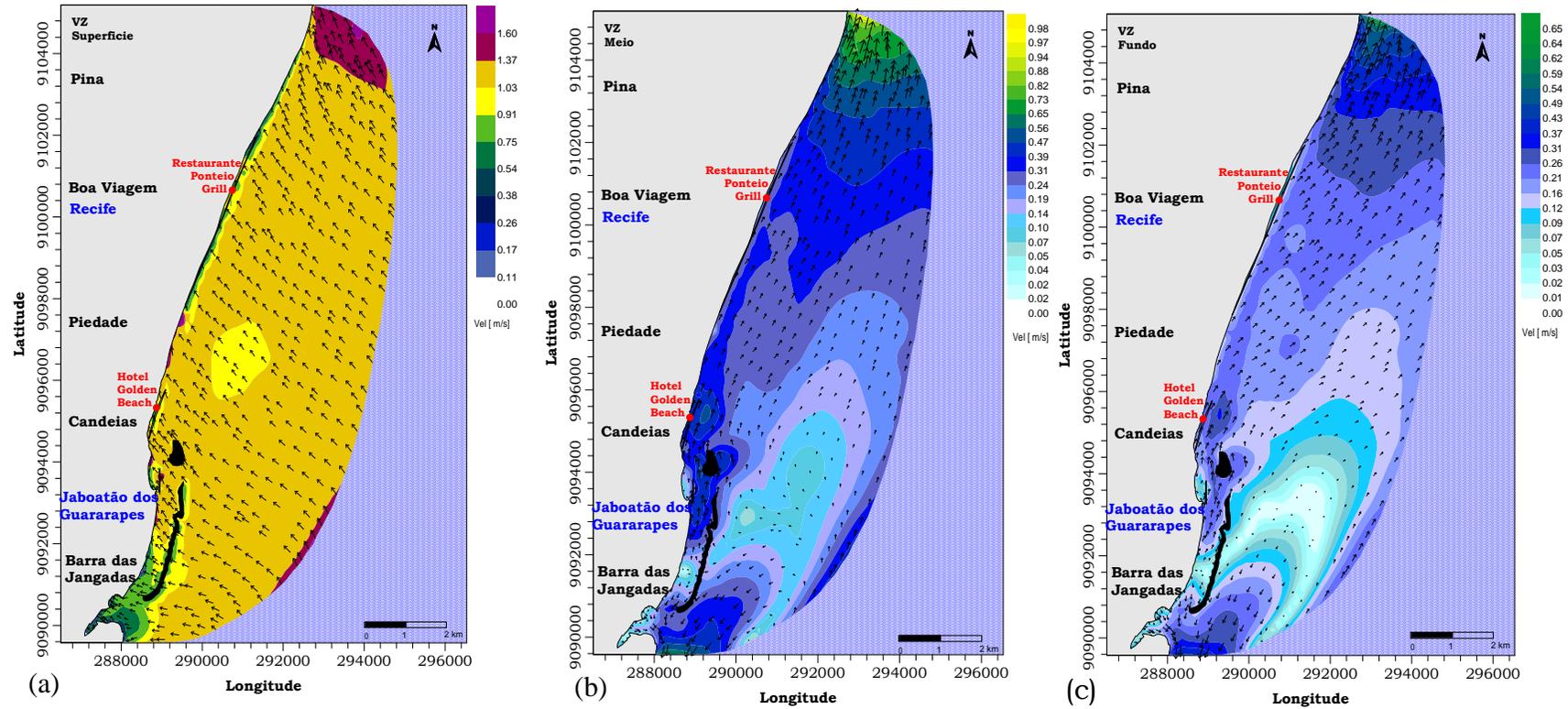


Figura 5.14. Velocidade das correntes no estágio de maré vazante: (a) superfície, (b) Meio, (c) Fundo da coluna d’água.

Durante a baixa-mar (Figura 5.15-a), as correntes superficiais apresentaram valores entre 0,18 e 0,9 m.s⁻¹ e mediana 0,74 m.s⁻¹. As intensidades das correntes foram mais baixas próximas à costa e sobre os bancos de recifes submersos (paralelos à costa), e foram mais intensas no extremo L da malha (área com maior profundidade). As direções predominantes das correntes foram para NO (ao norte do Hotel Golden Beach) e SO (na área estuarina).

No meio da coluna d'água (Figura 5.15-b), as intensidades das correntes apresentaram valores entre 0,03 e 0,45 m.s⁻¹ e mediana 0,35 m.s⁻¹. As correntes foram mais intensas próximas à área estuarina e no extremo L da área de estudo. As direções das correntes foram para NO e para SO, ao norte e ao sul do Hotel Golden Beach respectivamente, apresentando uma área de transição com baixas intensidades próximas ao Hotel Golden Beach. As correntes foram, novamente, mais baixas ao longo da costa e sobre os bancos de recifes submersos, apresentando valores menores quando comparados ao nível anterior.

As correntes próximas ao fundo da coluna d'água (Figura 5.15-a), apresentaram valores entre 0,01 e 0,30 m.s⁻¹ e mediana 0,23 m.s⁻¹. As intensidades e as direções das correntes apresentaram o mesmo padrão que no meio da coluna d'água, embora as velocidades das correntes sejam mais baixas.

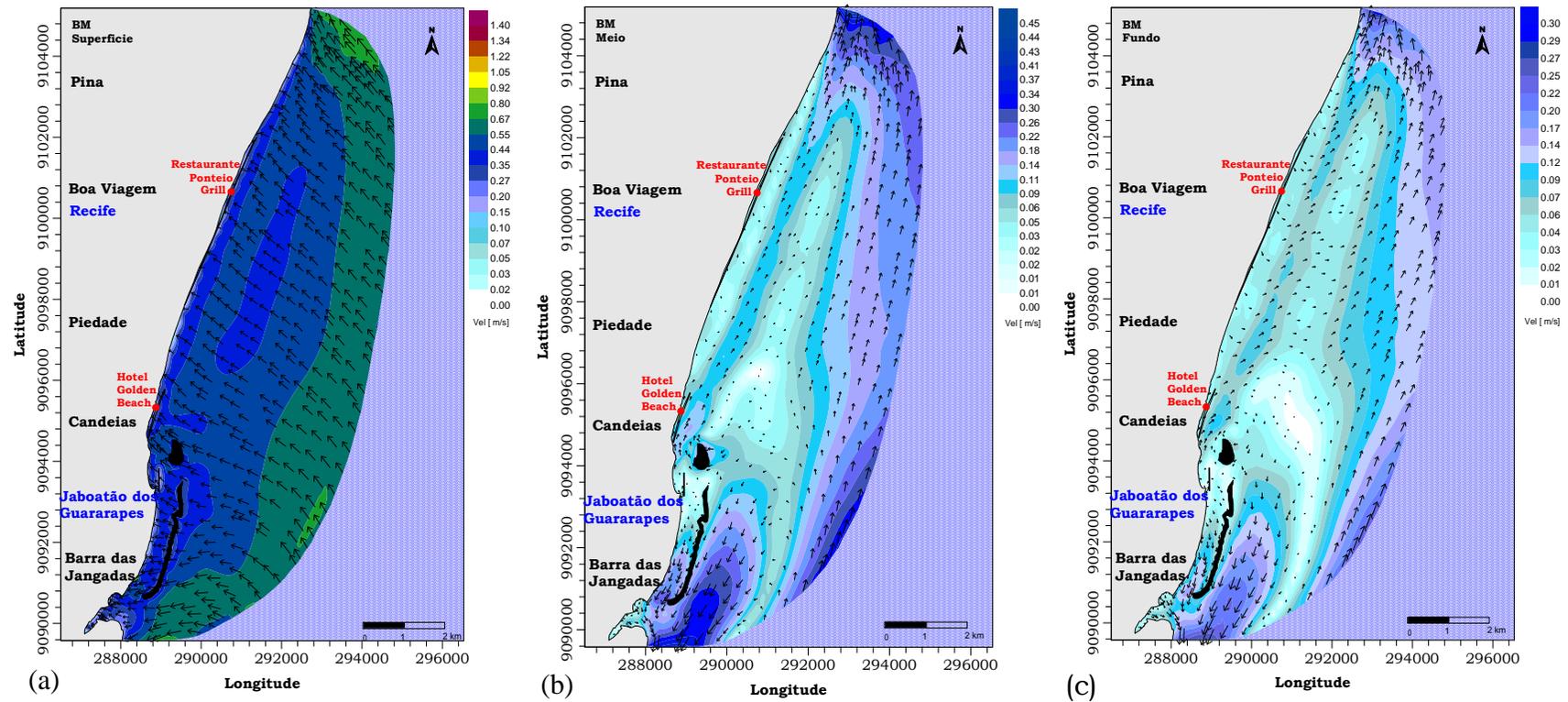


Figura 5.15. Velocidade das correntes no estágio de maré baixa-mar: (a) superfície, (b) Meio, (c) Fundo da coluna d'água.

A Figura 5.16 mostra as correntes durante o estágio de maré enchente. Na superfície (Figura 5.16-a), as correntes apresentaram valores entre 0,10 e 1,46 m.s^{-1} e mediana 0,77 m.s^{-1} . As intensidades das correntes foram uniformes em quase toda a área de estudo, embora tenham sido mais intensas no extremo sul da malha. As correntes apresentaram direções para SO, apresentando, ainda, direções para O no extremo norte da área de estudo.

No meio da coluna d'água (Figura 5.16-b), as correntes apresentaram valores entre 0,03 e 0,40 m.s^{-1} e mediana 0,38 m.s^{-1} . As intensidades das correntes foram mais intensas no extremo norte, sul, e sudeste da malha, direcionando-se para NO, SO e NE, respectivamente. As correntes apresentaram intensidades baixas sobre os bancos de recife, ao longo da costa e principalmente nas áreas de transição de direção.

Próximo ao fundo da coluna d'água, as correntes apresentaram valores entre 0,01 e 0,30 m.s^{-1} e mediana 0,25 m.s^{-1} . As direções e intensidades das correntes apresentaram o mesmo padrão do nível anterior, embora com intensidades mais baixas.

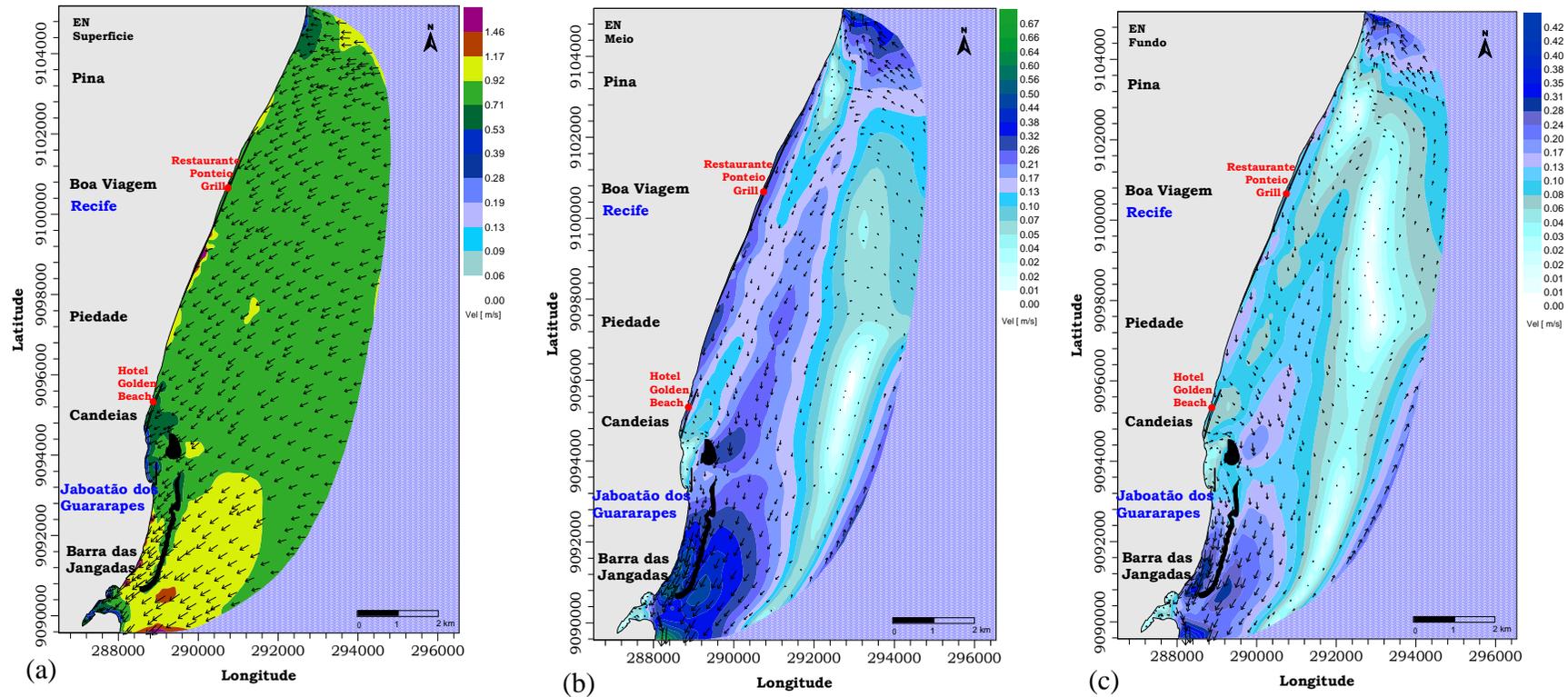


Figura 5.15. Velocidade das correntes no estágio de maré baixa-mar: (a) superfície, (b) Meio, (c) Fundo da coluna d’água.

5.2.1. Análise dos campos de correntes

Diante das informações descritas anteriormente, verifica-se que as correntes foram mais intensas (medianas mais alta) durante os estágios de maré mais energéticos (vazante e enchente), principalmente durante o estágio de maré vazante. As intensidades mais baixas (medianas mais baixas) ocorreram durante a preamar (na superfície e meio da coluna d'água) e baixa-mar (fundo da coluna d'água), por corresponderem ao período de estofo (menos energético).

Foi possível observar, ainda, que as correntes foram mais intensas na parte sul da área de estudo (próxima à área estuarina), devido à proximidade da foz do rio Jaboatão. As intensidades foram mais baixas próximo à costa, sobre os bancos de recifes e nas áreas de transição de sentido das correntes.

As direções predominantes das correntes superficiais durante a enchente foram para SO. Para os demais estágios de maré (preamar, vazante e baixa-mar) as correntes tiveram direção para NO em quase toda área de estudo, apresentando próximo à área estuarina vetores de corrente para O (preamar e vazante) e SO (baixamar).

No meio da coluna d'água, as direções predominantes das correntes durante a preamar e enchente foram para NO, SO e NE ao norte, sul e extremo leste da área de estudo respectivamente. Já durante a baixa-mar e a vazante, as direções das correntes foram para NE (em quase toda área de estudo) e SO (na área estuarina).

Próximo ao fundo da coluna d'água, as direções das correntes apresentaram o mesmo padrão do nível anterior, embora com intensidades mais baixas.

5.3. MODELO LAGRANGEANO

5.3.1. Cenário 2 – Aporte estuarino de sedimentos

O transporte de sedimentos oriundos do estuário de Barra de Jangadas para a área de estudo iniciou com 3266 partículas e teve como base de simulação os resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico Euleriano, correspondente ao Cenário 1.

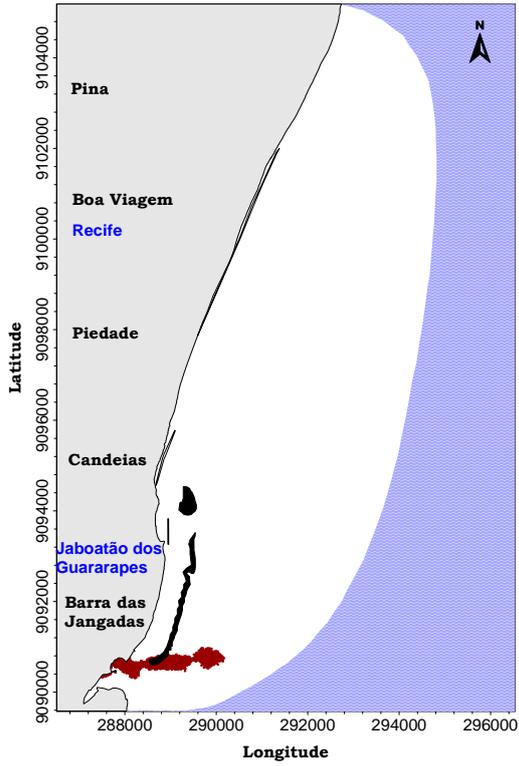
Na primeira hora após o início da simulação (Figura 5.13-a), a pluma de sedimentos sofreu dispersão e deslocou-se para leste (L), provavelmente devido ao período natural de vazamento da maré, levando à situação de efluxo (continente → oceano).

A pluma foi se deslocando para noroeste em direção à costa e, 5 horas após o início da simulação (Figura 5.13-b), esta se encontrava ao norte (N) da fonte, praticamente toda distribuída na costa entre as praias de Barra de Jangadas e de Candeias.

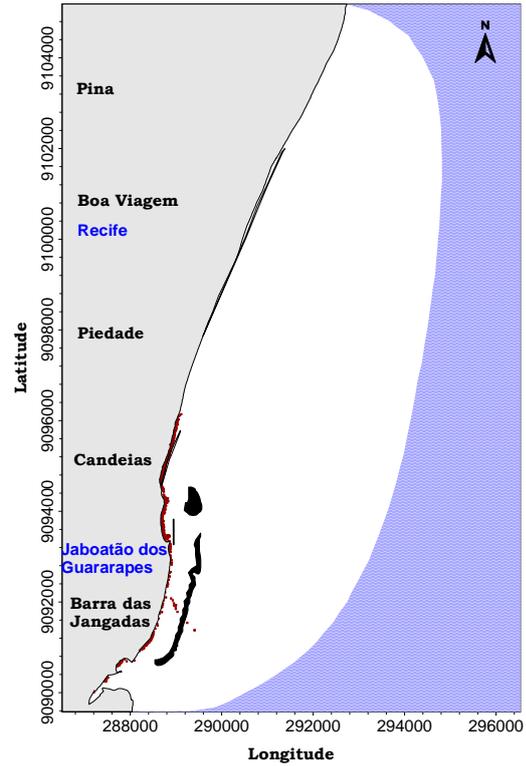
Em seguida, a pluma percorreu toda a área de estudo no sentido norte (N), com maior predominância na praia do Pina, chegando à extremidade do domínio modelado no primeiro dia de simulação (Figura 5.13-c), quando apresentou 2573 partículas. Este comportamento ocorreu devido ao sentido da corrente ter prevalecido para o norte no modelo hidrodinâmico, conforme pode ser observado na Figura 5.2-b acima.

Após 25 horas de lançamento das partículas (não apresentada aqui), a pluma de sedimentos havia percorrido a costa no sentido sul (S), apresentando uma maior concentração de partículas entre as praias de Candeias e de Piedade.

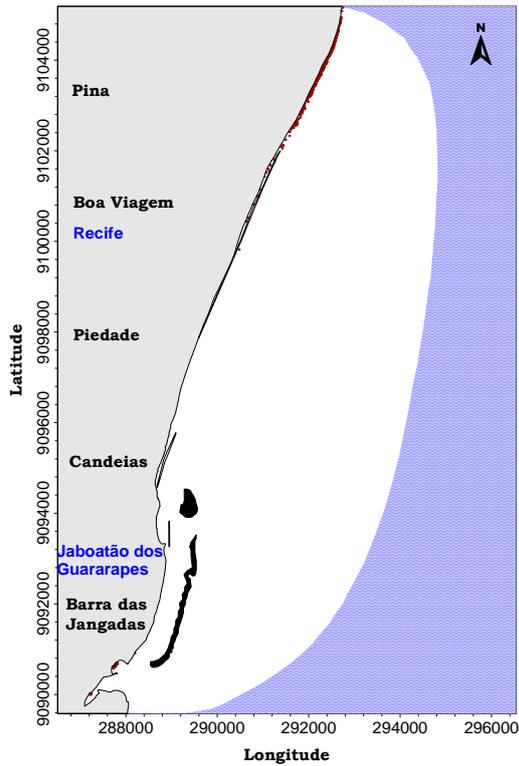
Por fim, a pluma chegou à extremidade sul do domínio modelado ao fim do segundo dia de simulação (Figura 5.13-d), adentrando também no estuário. No momento seguinte, esta sai totalmente do domínio modelado.



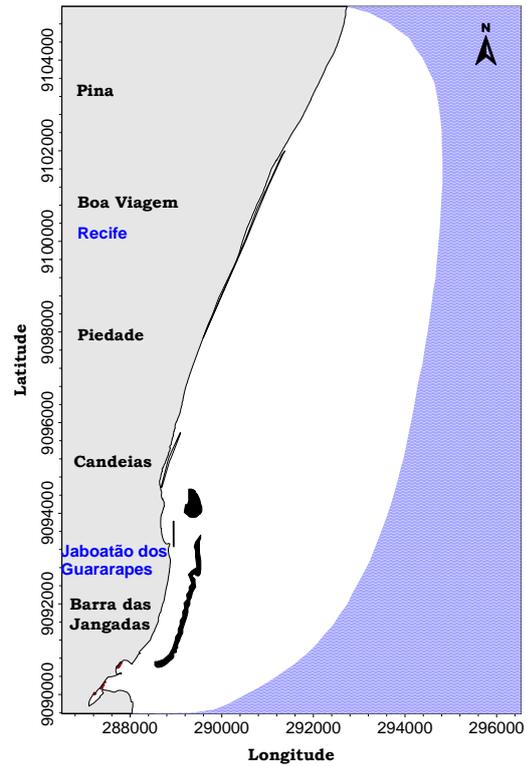
(a)



(b)



(c)



(d)

5.3.2. Cenário 3 – Aporte litorâneo de sedimentos

A simulação do transporte de sedimentos, para a área de estudo, teve início com 1952 partículas transportadas pela deriva litorânea ao sul do domínio modelado, em frente à desembocadura do rio Jaboatão (Figura 5.14). Igualmente ao Cenário 2, esta modelagem foi realizada considerando os campos cinemáticos obtidos no Cenário 1.

Na primeira hora de simulação (Figura 5.14-a), a pluma de sedimentos sofreu dispersão deslocando-se para leste (L) e, levemente, para nordeste (NE), devido à localização inicial desta estar sob influência do estuário de Barra de Jangadas.

A pluma de sedimentos se deslocou para o norte (N) no primeiro dia de simulação (Figura 5.14-b) acompanhando o ciclo da maré, uma vez que o sentido da corrente na simulação estava para o norte. Neste momento, constavam 1533 partículas e a maior predominância destas ocorreu entre as praias de Barra de Jangadas e de Candeias.

Com 19 horas de simulação (Figura 5.14-c), os sedimentos se apresentaram ainda mais ao norte, quando chegaram mais próximos à extremidade norte do domínio em estudo.

25 horas após o início do modelo (não apresentado aqui), a pluma havia se deslocado para o sul (S) havendo maior concentração de partículas nas proximidades da praia de Piedade.

Ao fim do segundo dia de simulação (Figura 5.14-d), a pluma de sedimentos havia se deslocado completamente para o sul entrando também no estuário de Barra de Jangadas. Após este momento, os sedimentos saíram totalmente do domínio modelado.

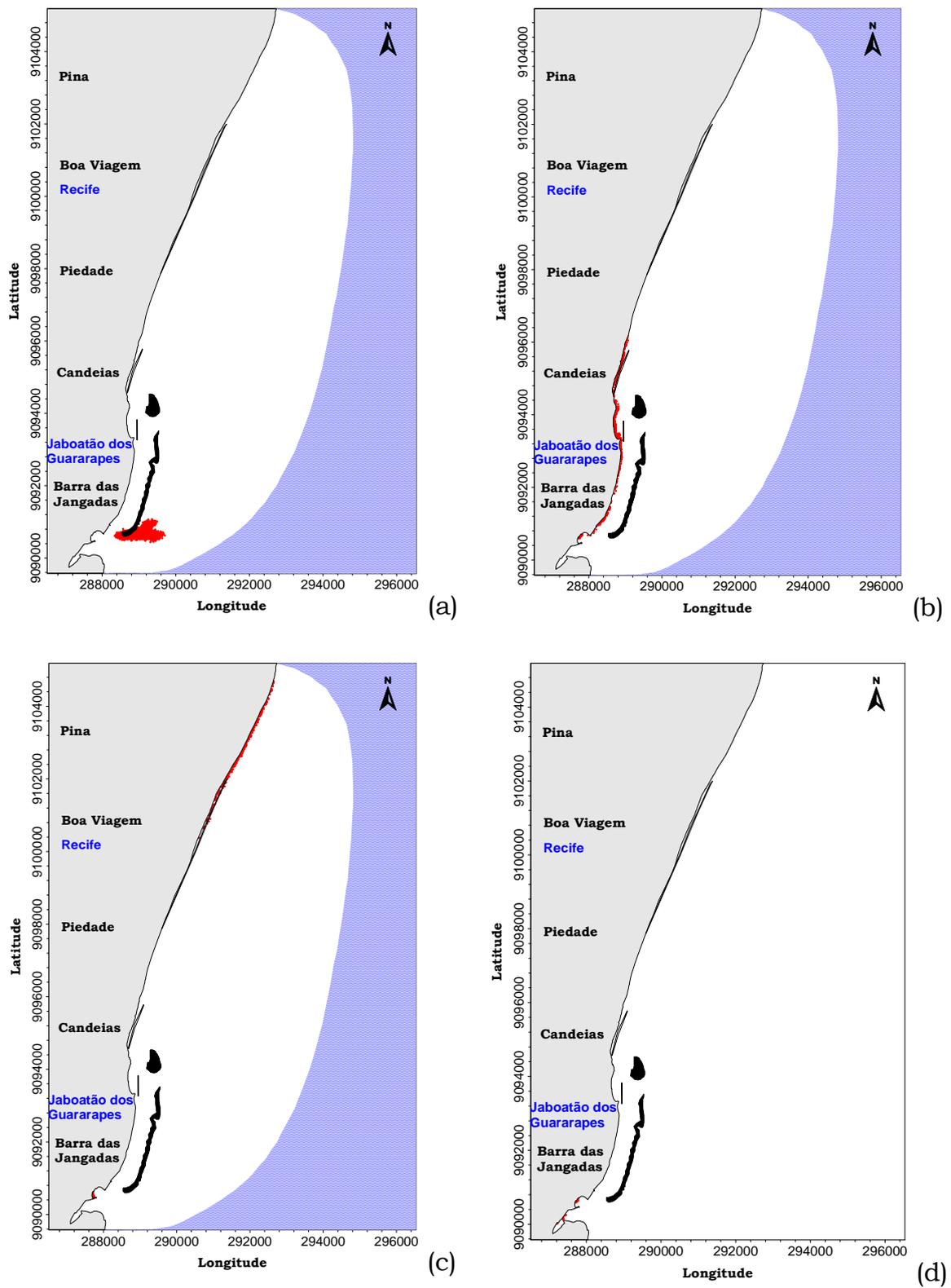


Figura 5.14. Pluma de sedimentos lançados na deriva litorânea. (a) 1 h, (b) 5 h, (c) 19 h e (d) 44 h após o início do lançamento das partículas na preamar.

5.3.3. Análise dos resultados do modelo Lagrangeano

Diante das informações descritas anteriormente para as simulações Lagrangeanas, é possível verificar que o transporte de sedimentos se assemelhou bastante entre os dois cenários.

Na primeira hora após o início da simulação, a pluma de sedimentos apresentou um deslocamento mais disperso para leste (L) com o aporte estuarino (Cenário 2). Contudo, esta se deslocou também para nordeste (NE) durante a simulação com o aporte litorâneo (Cenário 3). Este comportamento sugere que esta pequena diferença entre os cenários ocorreu devido à influência predominante do fluxo estuarino para o deslocamento dos sedimentos no Cenário 2, além de ter sido lançada inicialmente uma maior quantidade de partículas no mesmo.

Posteriormente, ambas as plumas percorreram a costa no sentido norte e sul, no primeiro e segundo dia de simulação, respectivamente, por estarem sob influência da propagação da onda de maré e correspondendo ao comportamento dos campos cinemáticos modelados, cujos sentidos estão para o norte e sul neste mesmo período de simulação. No entanto, os sedimentos chegaram mais rapidamente na parte norte da costa (com 19 horas de simulação) durante a simulação considerando a deriva litorânea, o que é justificado pelo fato desta fonte estar em maior evidência na Plataforma Continental interna.

Finalmente, quando localizadas na região sul da área em estudo, as plumas relativas aos dois cenários saem do domínio modelado pela parte sul ao fim do segundo dia, mais especificamente 44 horas depois do início da modelagem Lagrangeana. Tal observação propõe que o transporte de sedimentos, tanto por aporte continental quanto por aporte litorâneo, seja dominado pela propagação da onda de maré na costa, não sofrendo praticamente qualquer influência quanto à posição da fonte destes sedimentos nesta região.

Capítulo 6

Conclusões e Recomendações

Neste trabalho foram utilizados dados de campanhas oceanográficas e técnicas de modelagem matemática para analisar a circulação e o potencial de transporte da região costeira adjacentes aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes, durante o período de verão austral.

Na primeira parte do estudo, foi desenvolvida (e utilizada) uma metodologia para coleta (perfilagens) e posterior análise de dados de correntes na região de estudo, com utilização de equipamento ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Estas informações, coletadas durante o mês de janeiro de 2007, foram comparadas com os resultados de uma simulação hidrodinâmica, quando foram consideradas as forçantes eólica (ventos) e astronômicas (marés de sizígia e quadratura) verificadas no mesmo período.

A análise dos resultados das simulações com o módulo Euleriano (Cenário 1) mostrou que os campos de velocidades medidos durante o estágio de maré de baixa-mar foram mais bem reproduzidos do que os de preamar, tanto para as correntes de superfície, quanto para as do meio e fundo da coluna d'água. Isto sugere que existe uma maior influência da

batimetria sobre toda a coluna d'água durante este estágio de maré (baixa-mar).

Espacialmente, os resultados numéricos indicaram uma melhor reprodução da estrutura de correntes medidas na porção sul do domínio de estudo, com valores numéricos de mesma ordem de grandeza das correntes experimentais. Esta melhor representatividade verificada na parte sul do domínio modelado pode, em parte, ser explicada pela existência de um levantamento batimétrico mais detalhado nesta região.

As correntes resultantes das medidas de mar obtidas durante o estágio de preamar foram bem representadas pela simulação na parte central do domínio modelado, principalmente na superfície da coluna d'água. Problemas de aquisição de dados *in situ* ocorridos durante este estágio de maré impossibilitaram a obtenção das correntes marinhas na parte sul da região de estudo, e em conseqüência, a avaliação comparativa dos resultados experimentais e numéricos..

É importante destacar aqui que a dificuldade verificada em se reproduzir numericamente de forma mais satisfatória os resultados experimentais podem em parte ser atribuídas a: (i) deficiência de detalhamento da batimetria na região de estudo, marcada pela presença de irregularidades significativas do fundo marinho, tais como bancos de recifes; [ii] falta de compatibilidade entre as escalas de tempo dos dados disponíveis representativos das forçantes naturais (ventos e marés) e a escala de tempo de coleta das informações em campo. Uma solução para isto seria incrementar significativamente a coleta de informações de campo, com utilização posterior de filtros numéricos de passa-baixo para intervalos de tempos semelhantes aos das forçantes.

Posteriormente foram analisados os resultados obtidos na simulação com o módulo Euleriano. Tal análise mostrou que as intensidades das correntes foram mais intensas durante os estágios de maré vazante e

enchente (estágios de maré mais energéticos), e mais baixas durante a baixa-mar e a preamar (período de estofo).

Devido à proximidade com a foz do rio Jaboatão, a região adjacente à área estuarina apresentou correntes mais intensas. As intensidades foram mais baixas próximo à costa, sobre os recifes submersos e nas áreas de transição de sentido de corrente. Tais resultados sugerem uma maior influência da morfologia da região.

As correntes superficiais apresentaram direção para SO durante a enchente. Durante a preamar, a vazante e a baixa-mar, as correntes foram predominante para NO em quase toda a malha, apresentando, ao sul da área de estudo, vetores de corrente para O (preamar e vazante) e SO (baixa-mar).

No meio e no fundo da coluna d'água as direções das correntes durante os estágios de preamar e enchente foram para NO, SO e NE ao norte, sul e extremo leste da área de estudo respectivamente. Já durante a baixa-mar e a vazante, as direções das correntes foram para NE (em quase toda área de estudo) e SO (na área estuarina).

Na segunda parte do estudo, foi também aplicada técnica de modelagem matemática para avaliar o potencial de transporte longitudinal de sedimentos na região costeira dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes, sempre considerando o período de verão austral. Neste caso, foram realizadas duas simulações Lagrangeanas, uma com sedimentos oriundos do estuário de Barra de Jangadas (Cenário 2) e outra com sedimentos oriundos da deriva litorânea (Cenário 3). Para ambos os cenários foi possível constatar uma influência significativa da ação da maré sobre a evolução das plumas. Os resultados das simulações indicaram, para os dois cenários, que cerca de 25 % dos sedimentos são transportados para fora do domínio de integração através de seu limite norte, enquanto que cerca de 75 % das plumas de sedimento originais deixa o domínio de integração através do seu limite sul. Isto ocorre

aproximadamente 48 horas após o lançamento das plumas dos dois cenários, apesar de ser verificado que sob influência da deriva litorânea (Cenário 3), os sedimentos são transportados mais rapidamente.

Parte das principais recomendações deste estudo está associada à continuidade das atividades previstas do Projeto MAI-PE (Monitoramento Ambiental Integrado), quais sejam:

- Obtenção de uma malha batimétrica com melhor resolução espacial, o que sem dúvida irá contribuir para a obtenção de uma maior reprodutividade numérica das situações reais;
- Ampliação das campanhas de coleta de dados de mar (perfilagens de ADCP, correntometria/ondografia com a utilização de equipamentos do tipo S4). Neste caso, devem ser realizadas coletas ao longo de todo o ano (coletas sazonais), e considerando todos os estágios de mar;
- Realização de medições de ondografia que permitam avaliar as alterações do campo de ondas que chegam ao largo, à medida que esta se aproxima da região costeira, quantificando dessa forma as interações primárias entre as ondas e o relevo submarino (recifes, bancos de areia, etc.). Isto seria possível, por exemplo, com a utilização simultânea de dois ou mais correntômetros do tipo S4;
- Realização de testes com outras ferramentas numéricas capazes de quantificar com maior precisão (e detalhes) os mecanismos físicos de interação campo de ondas-sedimentos e campos de correntes-sedimentos.

Estas duas últimas recomendações extrapolam as atividades previstas no âmbito do Projeto MAI-PE. Suas realizações, entretanto, trariam informações complementares importantes para subsidiar o planejamento e operacionalização de ações preventivas, corretivas e de controle e monitoramento ambiental, além de índices e critérios de

estabilidade/vulnerabilidade, de forma a reduzir os impactos nos ambientes costeiros da Região Metropolitana do Recife.

Referências Bibliográficas

- Albuquerque, J.P.T. 1978. *Inventário hidrogeológico do Nordeste, Folha 21*. Recife: SUDENE, 183 p.
- Amaral, K.J. 2003. Estuário do Rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. *Dissertação (Mestrado) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ*, Rio de Janeiro: RJ, 150 p.
- Araujo, T.C. & Medeiros, C. 2004. Evidência de variação do nível do mar na Plataforma Continental interna adjacente à cidade do Recife- PE, Brasil. Congresso Brasileiro de Oceanografia, XVI Semana Nacional de Oceanografia. Univale, Itajaí, SC.
- Assis, H.M.B. 2001. *Atividades impactantes sobre o meio ambiente da Região Metropolitana do Recife/Coordenação e Organização de Hortencia M. B. de Assis; Pedro Augusto dos S. Pfaltzgraff. Série Degradação Ambiental 2*, Recife: CPRM, 81 p.
- Baptista Neto, J.A., Ponzi, V.R.A. & Sichel, S.E. (Orgs.). 2004. *Introdução à geologia marinha*. 1a. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, vol. 1, 279 p.
- Bird, E.C.F. 1985. The study of coastline changes. *Zeitschirisft für Gemorphologie N.F.*, Supplement-Band 57, p.1-9.
- Bird, E.C.F. 1999. *Beach management*. New York: John Wiley & Sons, 292 p.
- CINDACTA III – Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo 2007 - Divisão Meteorologia do CINDACTA III localizada na estação meteorológica do Aeroporto dos Guararapes, Recife, PE.
- CERC - Coastal Engineering Research Center. 1977. *Shore protection manual*. 3a. ed. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, vol. 3.
- CONDERM/FIDEM - Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco. 2004. Programa Gestão Integrada da Zona Costeira da

- Região Metropolitana do Recife (GIZC/RMR). *Resumo executivo*. Recife, 14 p.
- COPPE - Coordenação de Programas de Pós Graduação em Engenharia. 2004. Guia do Usuário do SisBaHiA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/ManualSisBaHiA.htm>. Arquivo consultado em 16 de junho de 2005.
- Corrêa, I. C. S. & Villwock, J. A. 1996. Continental shelf and coastal plain sediments of the southeast and south coast of Brazil. In Martins, L. R. & Corrêa, I.C.S. (Eds). Explanatory text of the atlas: Morphology and sedimentology of the southwest atlantic coastal zone and continental shelf from Cabo Frio (Brazil) to Península Valdés (Argentina). Porto Alegre: Evangraf/ UFRGS-IG-CECO. p.41-54
- Coutinho, P. N. 1976. Geologia marinha da plataforma Alagoas-Sergipe. Recife. 119p. Tese (livre docência). Departamento de Geologia (CTG). Universidade Federal de Pernambuco
- CPRH - Companhia Pernambucana do Meio Ambiente. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. 1998. *Estudo da erosão marinha na região de Maracáipe – Ipojuca*. Recife: PE, 74 p.
- CPRH - Companhia Pernambucana do Meio Ambiente. 2006. Fotos da Região Metropolitana do Recife. Documento existente em formato eletrônico acessível via computador. 1 CD-ROM. Recife.
- CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. 2007. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: <http://satelite.cptec.inpe.br/PCD/>. Acesso em fevereiro de 2007.
- Cunha, C.L.N., Rosman, P.C.C., Ferreira, A.P. & Monteiro, T.C.N. 2006. Hydrodynamics and Water Quality Models Applied to Sepetiba Bay. *Continental Shelf Research*, 26: 1940-1953.
- DHN, 1997 Carta náutica nº 930. Escala 1: 100.000.
- Feitosa, R.C. 2003. Modelagem da pluma do emissário submarino da Barra da Tijuca - RJ com T90 variável. *Dissertação* (Mestrado) do

- Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: RJ, 151 p.
- FEMAR - Fundação de Estudos do Mar. 2006. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.femar.com.br>. Arquivo consultado em 06 de junho de 2006.
- Gabioux, M. 2002. Influência da lama em suspensão na propagação da maré na plataforma Amazônica. *Dissertação* (Mestrado) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: RJ, 99 p.
- Gabioux, M., Vinzon, S. & Paiva, A.M. 2005. Tidal propagation over fluid mud layers in the Amazon Shelf. *Continental Shelf Research*, 25(1): 113-125.
- Garmin, 2007. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.garmin.pt>. Arquivo consultado em 05 de junho de 2007.
- Gusmão Filho, J. 1993. Risco geológico no Recife. *In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia*, 10, 1993, Poços de Caldas. *Anais*. São Paulo: ABGE, 3v. il., vol. 3, 41 p.
- Horita, C.O. 1996. Estudos de validação e aplicação de um modelo Lagrangeano para transporte de contaminantes em corpos d'água rasos. *Dissertação* (Mestrado) do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: RJ, 92 p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1977. *Geografia do Brasil – Região Nordeste*. Recife.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2001. Censo geográfico e estatístico 2000. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.ibge.gov.br>. Arquivo consultado em 22 de junho de 2006.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. Climate change 2001: the scientific basis. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/. Arquivo consultado em 22 de junho de 2006.

- Lima, I.D., Garcia, C.A.E., Möller, O.O., 1996. Ocean surface processes on the southern Brazilian shelf: characterization and seasonal variability. *Continental Shelf Research*, v.16, n.10, p.1307-1317.
- Malta, F.S. 2005. Estudo de correntes de maré do complexo estuarino da Baía de Guanabara – RJ. *Dissertação (Mestrado)* do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: RJ, 132 p.
- Manso, V.A.V., Coutinho, P.N., Lima, A.T.O., Medeiros, A.B., Almeida, L. E.S.B., Borba, A.L.S., Lira, A.R.A., Pedrosa, F.J.A., Chaves, N.S., Duarte, R.X. & Ivo, P.S. 1995. Estudos da erosão marinha na praia da Boa Viagem. *Relatório Técnico*. Convênio EMLURB/FADE/LGGM – UFPE. Recife, 98 p.
- Manso, V.A.V., Coutinho, Corrêa, I.C S., Guerra, N.C., 2003. Morfologia e sedimentologia da plataforma continental interna entre as praias Porto de Galinhas e Campos - litoral sul de Pernambuco, *Pesquisas em Geociências*, 30(2): 17-25.
- Martins, R.P., Vilela C.P.X. & Rosso, T.C.A. 2002. Hydrodynamic numerical modeling of Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brasil: a preliminary calibration. *In: 6th International Conference - Littoral 2002, 2002, Porto. Proceedings*. Porto: European Coastal Association for Science and Technology, 3: 329-335.
- Medeiros, C. 1991. Circulation and mixing processes in the Itamaracá Estuarine System, Brazil. PhD Thesis, University of South Carolina, Marine Science/Physical Oceanography, 131 p.
- Mesquita, A.R. 2003. Sea level variations along the Brazilian coast: a short review. *Journal of Coastal Research*, Itajai-Santa Catarina, 35: 21-31.
- Milliman, J. D. & Summerhayes, C. P. 1975. Upper continental margin sedimentation of Brazil. *Contributions to Sedimentology*, v.4.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. 2002. Avaliações e ações prioritárias para conservação da biodiversidade das Zonas Costeira e Marinha. [online] Disponível na Internet via WWW. URL:

- <http://www.anp.gov.br/ibamasismica/areas.html>. Arquivo consultado em 02 de abril de 2006.
- Moura, G.B.A., Aragão, J.O.R., Lacerda, F.F. & Passavante, J.Z.O. 2000. Gestão e controle ambiental - Relação entre a precipitação no setor leste do Nordeste do Brasil e a Temperatura nos oceanos Atlântico e Pacífico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, 4(2): 247-251.
- Muehe, D.1994. Geomorfologia costeira. In : Guerra, A. J. T. & Cunha, S.B.*Geomorfologia : uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro : Ed Bertrand Brasil S.A.
- Pond, S. & Pickard, G.L. 1983. *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press, Elmsford: NY, 349 p.
- RD Instruments 2003. Guia do usuário. Documento existente em formato eletrônico acessível via computador. 1 CD-ROM.
- RD Instruments 2007. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.rdinstruments.com>. Arquivo consultado em 05 de junho de 2007.
- Reading, H.G. 1996. *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy*. 3 ed. Oxford: Blackwell Science. University of Oxford.
- Rollnic, M. 2002. Hidrologia, clima de onda e transporte advectivo na zona costeira de Boa Viagem, Piedade e Candeias-PE. *Dissertação (Mestrado) do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da UFPE*, Recife: PE, 111 p.
- Rosman, P.C.C. 2001. Um sistema de hidrodinâmica ambiental *In*: Rosman, P.C.C., Mascarenhas, F.C.B., Miguez, M.G., Campos, R.O.G. & Eiger, S. (eds.). *Métodos numéricos em recursos hídricos 5*. ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Fundação COPPETEC, vol. 5, pp. 1-163.
- Rosman, P.C.C. 2005. *Referência Técnica do SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental*. Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-PEEnO/UFRJ), Rio de Janeiro, 188 p.

- Soto, Y.J.M. 2004. A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá - PR. *Dissertação* (Mestrado) do Programa de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da UFPR, Curitiba: PR, 166 p.
- Souza, C.R.G. 1997. As células de deriva litorânea e a erosão nas praias do Estado de São Paulo. *Tese* (Doutorado) do Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da USP, São Paulo: SP, 174 p.
- Souza, C.R.G., Suguio, K., Oliveira, A.M.S. & Oliveira, P.E. 2005. Quaternário do Brasil. Riberão Preto (SP): Holos Editora, 378 p.
- Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R., Almeida, L.E.S.B., Tabajara, L.L., Martins, R.R. & Cunha, L.O.B.P. 1993. Parâmetros morfodinâmicos da praia de Imbé, RS. *Pesquisas*, Porto Alegre: RS, 19(1): 27-32.
- Trento, A.E. 2005. Dinâmica da flocculação no transporte de sedimentos finos. *Tese* (Doutorado) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: RJ, 170 p.
- Wu, J. 1982. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *Journal of Geophysical Research*, 87(C12): 9704-9706.

Anexo A – Campos cinemáticos obtidos a partir das perfilagens de ADCP

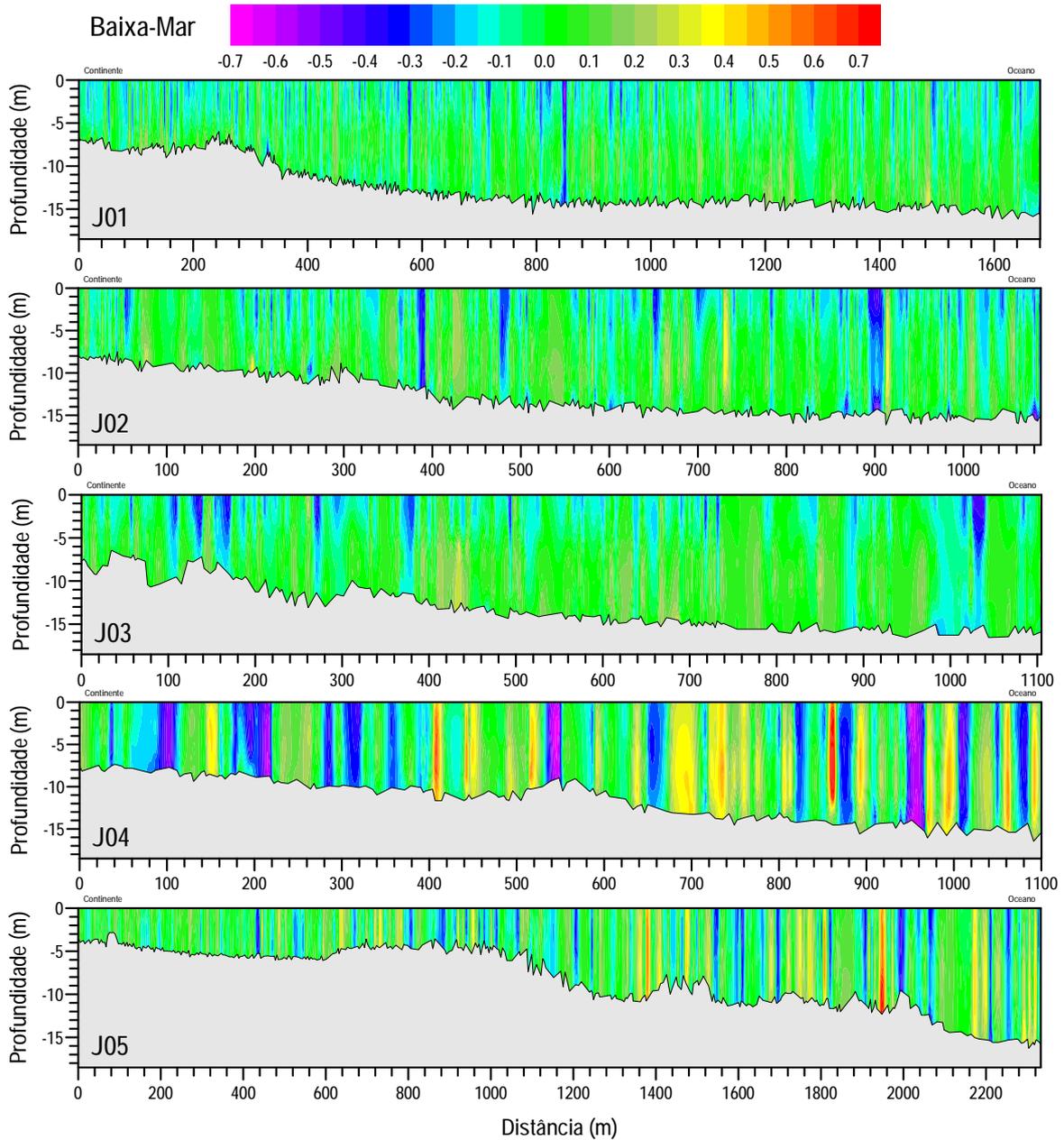


Figura A.1. Campos cinemáticos da componente norte da corrente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) dos perfis J01, J02, J03, J04, J05, durante a baixa-mar.

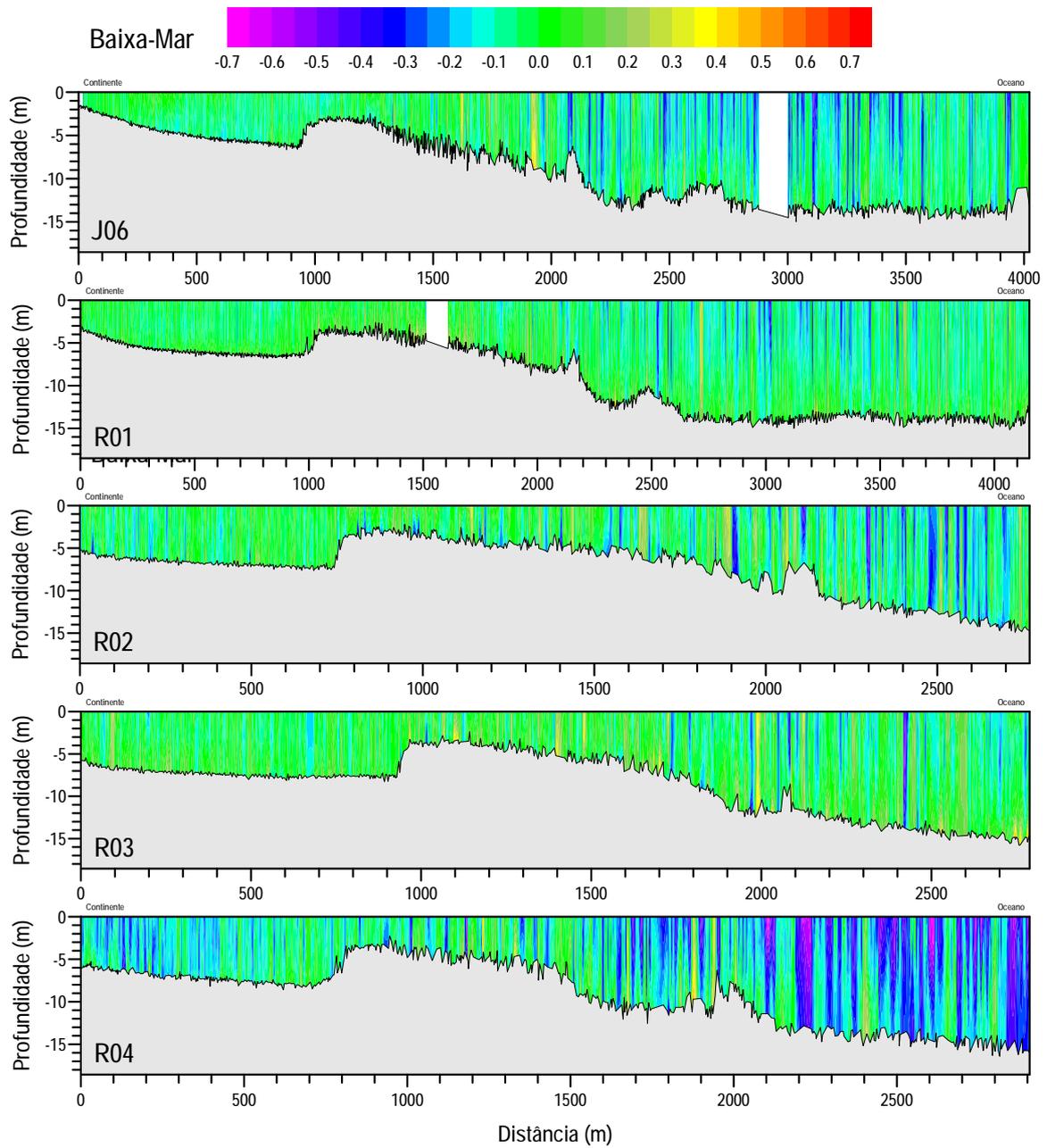


Figura A.2. Campos cinemáticos da componente norte da corrente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) dos perfis J06, R01, R02, R03, R04, durante a baixa-mar.

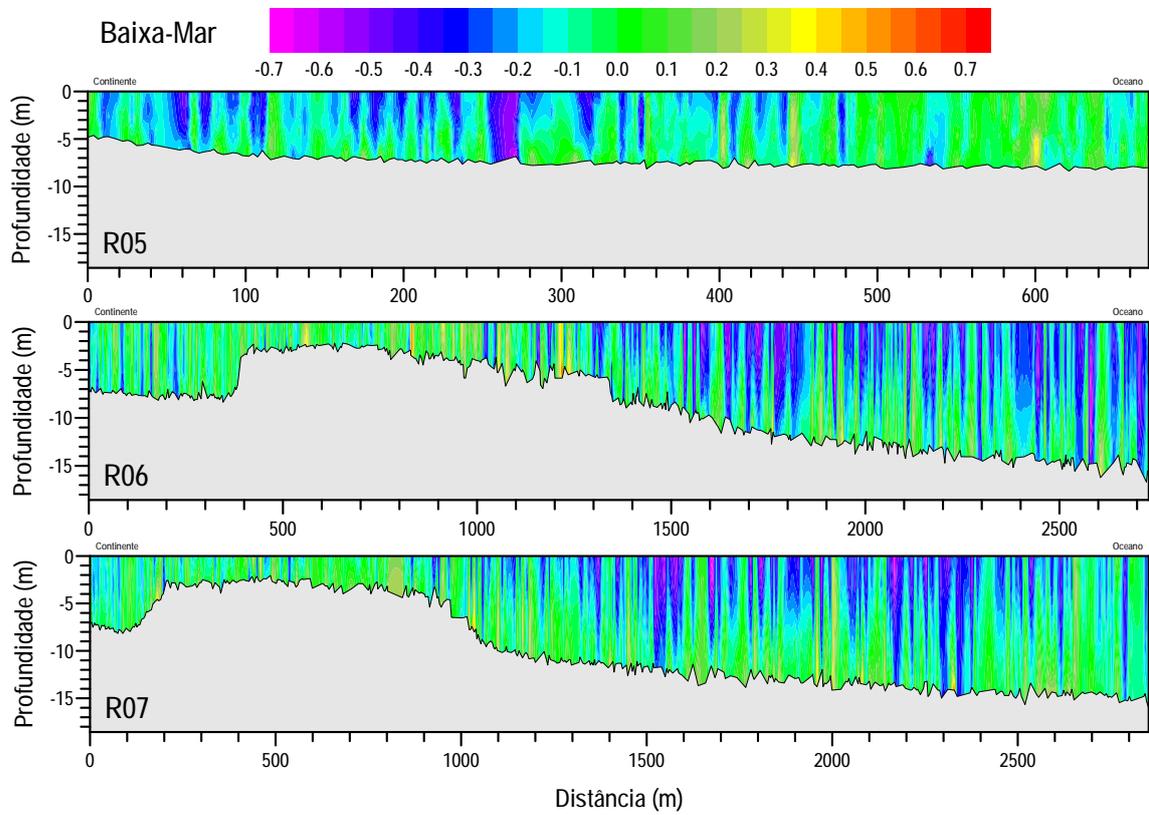


Figura A.3. Campos cinemáticos da componente norte da corrente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) dos perfis R05, R06, R07, durante a baixa-mar.

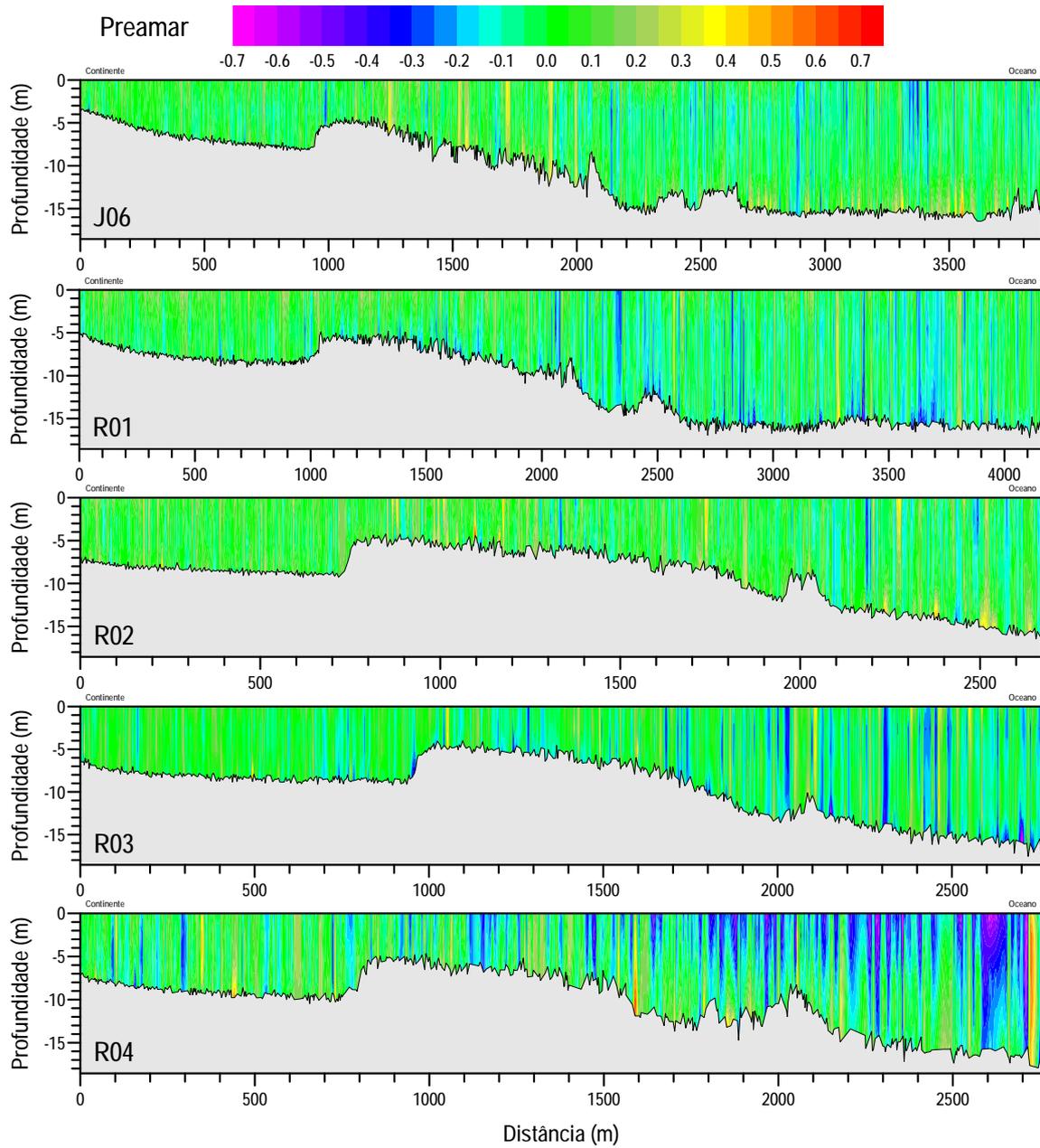


Figura A.4. Campos cinemáticos da componente norte da corrente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) dos perfis J06, R01, R02, R03, R04, durante a preamar.

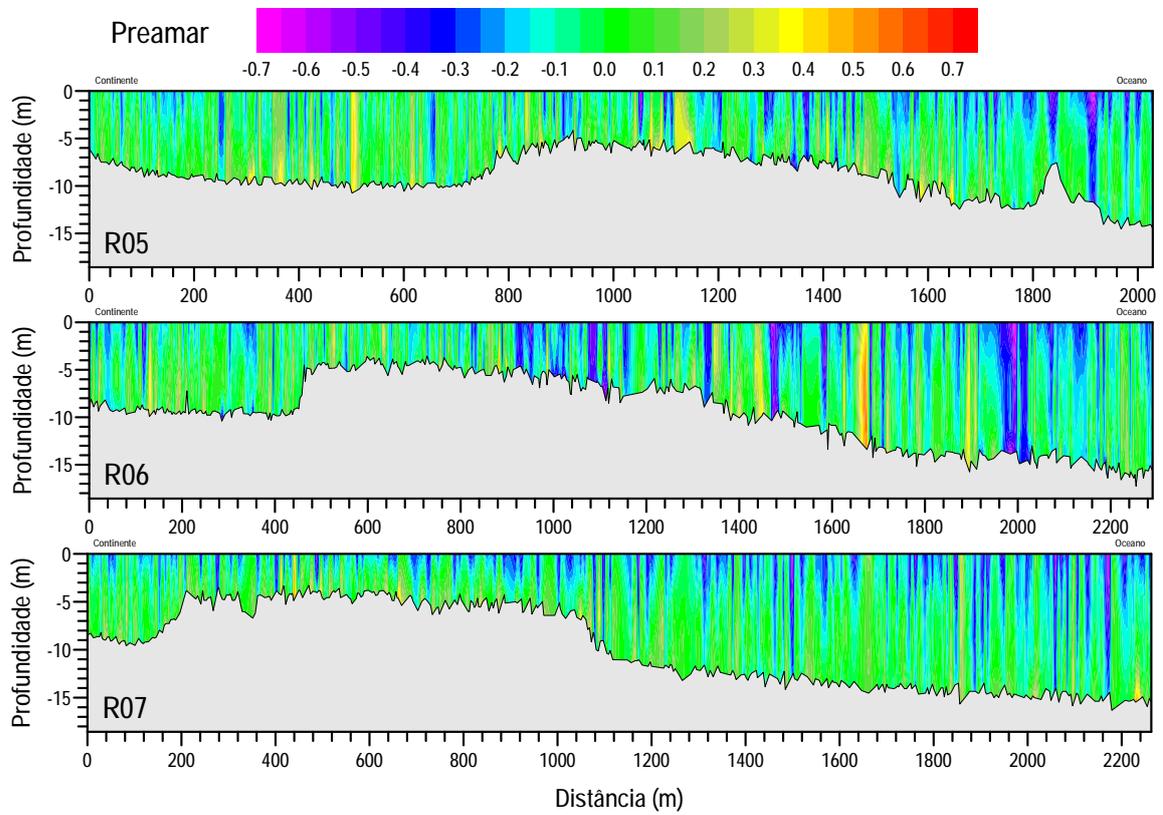


Figura A.5. Campos cinemáticos da componente norte da corrente ($m \cdot s^{-1}$) dos perfis R05, R06, R07, durante a preamar.