



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**Centro de Tecnologia e Geociências**

**DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Oceanografia**



**DINÂMICA DAS ONDAS E CIRCULAÇÃO NO LITORAL DA REGIÃO  
METROPOLITANA DO RECIFE – IMPLICAÇÕES PARA O  
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E ESTABILIDADE DA COSTA**

por

**MARCELO ROLLNIC**

**RECIFE**  
**2008**

**MARCELO ROLLNIC**

**DINÂMICA DAS ONDAS E CIRCULAÇÃO NO LITORAL DA REGIÃO  
METROPOLITANA DO RECIFE – IMPLICAÇÕES PARA O  
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E ESTABILIDADE DA COSTA**

**Tese apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Oceanografia da  
Universidade Federal de Pernambuco,  
como requisito parcial para obtenção  
do grau de Doutor em Ciências na  
área de Oceanografia Abiótica.**

**Orientadora:**

**Dra. Carmen Medeiros**

**RECIFE  
2008**

**R754d Rollnic, Marcelo**

Dinâmica das ondas e circulação no litoral da região metropolitana do Recife: implicações para o transporte de sedimentos e estabilidade da costa / Marcelo Rollnic. – Recife: O Autor, 2008.

124 f.; il., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2008.

Inclui referências bibliográficas.

**1. Oceanografia. 2. Dinâmica das Ondas. 3. Circulação Costeira. 4. Transporte de Sedimentos. 6. Erosão Costeira. I. Título.**

551.46 CDD (22.ed.)

UFPE/BCTG/2008-225

DINÂMICA DAS ONDAS E CIRCULAÇÃO NO LITORAL DA REGIÃO  
METROPOLITANA DO RECIFE – IMPLICAÇÕES PARA O  
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E ESTABILIDADE DA COSTA

Marcelo Rollnic

Tese defendida em 25 de Agosto de 2008 e aprovada em estilo e conteúdo.

EXAMINADORES:



Dra. Carmen Medeiros



Dr. Moacyr Cunha de Araújo



Dra. Tereza Cristina Medeiros de Araújo



Dr. Elirio Ernestino Toldo Jr.



Dr. Valdir Amaral Vaz Manso

Dr. Silvio José de Macedo

Dra. Lidriana de Souza Pinheiro

## AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco;

Ao Programa de Pós Graduação em Oceanografia;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que através da concessão de bolsa de Doutorado e apoio a projeto de pesquisa possibilitaram a realização do presente trabalho;

À Dr<sup>a</sup> Carmen Medeiros pela sábia orientação, pelos ensinamentos, pelas lições, pelos conselhos, pela ajuda, compreensão, paciência e acima de tudo pela amizade;

Ao Dr. Moacyr Araújo pela cooperação, ensinamentos e amizade;

A todos os colegas do LOFEC;

A todos que participaram dos trabalhos de mar, em especial para os amigos Isaac, Vidal, Rodolfo e Fá;

À divisão de meteorologia do CINDACTA-III, pela cessão dos dados meteorológicos;

À COPPE na pessoa do professor Paulo Cesar Colonna Rosman, por ter me acolhido em seu laboratório para treinamento com o modelo SisBaHiA;

A todos do laboratório de Oceanografia Geológica pelo apoio na realização deste trabalho em especial à Dr<sup>a</sup> Tereza Cristina Medeiros de Araújo;

A FIDEM e aos integrantes do Projeto MAI (Monitoramento Ambiental Integrado) pela utilização de dados gerados e pelo convívio estimulante;

Ao GERCO-CPRH por cessão de fotos aéreas da área de estudo;

A todos os professores e funcionários do DOCEAN-UFPE;

A todos os colegas da UFPE em especial para Chris e Marcus;

A todos da marina Acqua-marine em especial a Ricardo e Marcio;

À tripulação do barco: Flor das Candeias sempre safa nas coletas de mar;

À minha família;

À Ariella pelas lições;

A todos, presentes ou não, que de alguma forma influenciam no meu crescimento;

Obrigado Mar pelos ensinamentos.

**Marcelo Rollnic**

**DINÂMICA DAS ONDAS E CIRCULAÇÃO NO LITORAL DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE – IMPLICAÇÕES PARA O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E ESTABILIDADE DA COSTA**

**RESUMO**

**Palavras-chave:** Oceanografia, Dinâmica das ondas, Circulação costeira, Transporte de sedimentos, Erosão costeira.

As praias do Pina, Boa Viagem, Piedade e Candeias-PE, são área de alto valor imobiliário, densamente ocupada, que concentram atividades econômicas, industriais, de lazer e de turismo e que apresentam tanto trechos sob erosão, quanto trechos em equilíbrio. A compreensão dos processos físico-oceanográficos que controlam a disponibilidade e o transporte de sedimentos para a área em uma diversidade de cenários (presença ou não de recifes, obras de contenção, dunas, estuários) é necessária para orientar a gestão e a tomada de decisão para a proteção daquelas praias e constituíram ao mesmo tempo desafio e motivação da presente pesquisa. Os trabalhos enfocaram a obtenção de informações detalhadas sobre as características morfobatmétricas e sedimentológica da área, forçantes meteorológicas atuantes, regime das marés, clima de onda, padrão de distribuição de variáveis físico-oceanográficas e da circulação costeira e sua variabilidade espacial e sazonal, bem como suas implicações para o transporte de material na área. Enfocaram igualmente a utilização de modelos de previsão do perfil de equilíbrio e modelos de simulação da circulação costeira e do transporte de sedimentos visando testar sua validade e aplicabilidade e buscar determinar as condições e parâmetros que melhor o adequassem para aplicações na área. Os trabalhos foram conduzidos de julho/2005 a maio/2008 de modo a representarem os períodos de verão, inverno, e equinócios de primavera e outono, ao longo de dez perfis amostrais englobando uma faixa desde a linha de praia até a parte externa aos recifes (isóbata de 15m) e um total de quarenta estações amostrais. Os vários perfis foram estabelecidos em função da presença ou não de recifes, de obras de contenção e do estado de equilíbrio da praia. Cada estação foi amostrada durante um ciclo de maré de sizígia, considerando-se os quatro estágios de maré vazante, baixa-mar, enchente e preamar. Registros da intensidade e direção das correntes próximos à superfície, à meia-água e próximo ao fundo foram obtidos com uso de correntômetro Sensordata SD30 paralelamente à obtenção de perfis verticais da distribuição da salinidade, temperatura e do sinal de retroespalhamento ótico com emprego de CTD Seabird SBE19. Registros contínuos com 8 dias de duração das oscilações das marés e do clima de ondas próximo à costa para os períodos chuvoso e de ventos mais intensos foram obtidos em 2 pontos do sistema através da ancoragem de ondógrafo/marégrafo InterOcean S4. Modelos de perfil teórico de equilíbrio foram confrontados com os perfis batimétricos levantados, na determinação dos processos dissipativos ou reflectivos nos vários setores das praias e na avaliação dos possíveis processos sazonais de déficit ou ganho de sedimentos. Os dados levantados serviram também para aplicar e testar modelos de perfil de equilíbrio e forçar a simulação com do comportamento hidrodinâmico através do modelo SisBaHiA. Os anos de 2005-2007 apresentaram precipitação anual de 1963 a 2216 mm e uma marcada sazonalidade. Os ventos predominantes foram de sudeste, com maior incidência de ventos SSE e SE durante os meses mais chuvosos e de ventos mais intensos e maior incidência de ventos E e ESE a partir de finais de outubro. Na área de estudo, a plataforma continental é pouco extensa e apresenta relevo suave. Localmente, verifica-se a presença de uma linha de recife próxima à costa, ao longo do trecho entre os perfis P3 e P10, a cerca de 7m de profundidade, formando um canal próximo à costa. Nesta região, o declive é mais acentuado e um melhor ajuste do perfil de equilíbrio é obtido para um valor de parâmetro A de 0,87. Ao longo do perfil

predomina a areia fina próxima à costa e a profundidade de fechamento do perfil de equilíbrio ocorre a uma profundidade de 5,1 a 5,2m. Déficit de sedimentos próximo à costa são mais acentuados nos trechos norte das praias estudadas, relativo ao trecho sul, com presença de depósitos arenosos, próximo a barra das Jangadas. Nos meses de julho e setembro a temperatura e a salinidade das águas apresentaram os menores valores, mas, maior variabilidade vertical e horizontal enquanto que nos meses de janeiro e março os valores de temperatura e salinidade foram mais elevados, mas com pouca variação vertical e horizontal. A capacidade de retroespalhamento ótico, OBS, aumentou com a profundidade, com os maiores valores no inverno e no equinócio de primavera. As marés na área são semidiurna ( $F=0,09$ ) e apresentam altura média de 1,67 m, com alturas médias de sizígia de 2,07 m e alturas médias de quadratura de 0,97 m. O transporte líquido apresenta uma modulação sazonal em função dos ventos predominantes e descarga fluvial. Durante o período chuvoso e de ventos mais intensos, o transporte superficial é preferencialmente para norte e contra a costa, mas, costa-a-fora, próximo a Barra das Jangadas. Já durante o período de estiagem, o transporte preferencial é em direção ao sul à superfície e costa-a-fora próximo ao fundo. As maiores correntes foram medidas próximas à superfície, durante os períodos chuvosos e de equinócio de primavera, quando atingiram  $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ . No período de estiagem e de equinócio de outono as correntes medidas foram sempre inferiores a  $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ . As ondas de gravidade apresentam alturas e períodos significativos entre 0,4 e 0,6m e entre 6,3 e 6,8 segundos, respectivamente em Jaboatão e entre 0,7 e 1,0m e entre 5,9 e 6,0 segundos, respectivamente em Recife. As maiores ondulações ( $H_{\text{max}}=1,57\text{m}$ ) foram registradas no mês de agosto em Recife. O modelo SisBaHiA simulou com boa aproximação o padrão de circulação verificado na área.

**Marcelo Rollnic**

**WAVE DYNAMICS AND CIRCULATION AT THE COAST OF THE METROPOLITAN REGION OF RECIFE – IMPLICATIONS TO THE SEDIMENT TRANSPORT AND COAST STABILITY**

**ABSTRACT**

**Keywords:** Oceanography, Wave dynamics, Coastal circulation, Sediment transport, coastal erosion

The beaches of Pina, Boa Viagem, Piedade and Candeias-PE, are high-value real estate area, densely occupied, which concentrated economic activities, industrial, leisure and tourism and which have both sections that experience erosion and sections that are stable. The understanding of the physical and oceanographic processes that control the availability and sediment transport to the area in a variety of scenarios (presence or absence of reefs, coastal defense structures, dunes, estuaries, etc.) is needed to guide the management and decision-making for protection of those beaches were at the same time challenge and motivation of this research. The work focused on obtaining detailed information about the morphobathymetric and sedimentologic characteristics the area, forcing acting meteorological, tidal regime, wave clima, pattern of distribution of physical oceanographic variables and coastal circulation, its spatial and seasonal variability, and its implications for the transport of material in the area. Focused also on the use of models to predict the equilibrium profile and simulation models of the coastal hydrodynamics and transport of sediments aiming testing its validity and applicability and seek to determine the conditions and parameters that are best adequate for applications in the area. The work was conducted from julho/2005 to maio/2008 in a way to represent the dry and raining periods, as well as the periods of spring and fall equinoxes, along ten shore normal profiles, encompassing from the beach line to the region outside to reefs (isobath of 15m) and a total of forty sampling stations. The various profiles have been established as a function of the presence or absence of sandstone, coastal structures and sediment balance state of the beach. Each station was sampled during a spring tidal cycle, considering the stages of ebb, low water, flooding and high water. Records of the intensity and direction of currents at the surface, mid-depth and near the bottom were obtained using a Sensordata SD30 current meter concomitantly to the gathering of the vertical distribution of salinity, temperature and backscattering signal employing a Seabird SBE19 CTD profiler. Continuous records, 8-days long of the tidal fluctuations and wave climate near the coast during the rainy season and season of stronger winds were obtained at 2 points of the system through the mooring of current/wave/tide gauge InterOcean S4DWi. Model of the theoretical beach equilibrium profile were confronted with the prospected bathymetric profiles the determination dissipatives or reflective process in various sectors of the beaches and evaluation of possible cases of deficiency or gain of sediment. The data raised also served to implement and test models of profile of balance and forcing the simulation with the behaviour through the hydrodynamic model SisBaHiA. The years 2005-2007, submitted annual rainfall of 1963 to 2216 mm and a marked seasonality. The prevailing winds were southeast, with higher incidence of SSE winds and SE during the rainy months more and more intense winds and higher incidence of E and ESE winds from the end of October. In the study, the continental shelf is very extensive and provides relief smooth. Locally, there is the presence of a line of reef near the coast along the passage between the profiles P3 and P10, about 7m deep, forming a channel near the coast. In this region, the slope is greater and better fit the profile of balance is achieved for a value of the parameter of 0.87. Throughout the profile dominates the fine sand near the coast and depth of closing the profile of balance occurs at a depth of 5.1 to 5.2 m. Deficit of sediments near the coast are more pronounced in the northern stretches of the beaches studied on the southern stretch, with the presence of sand deposits near the bar of Jangadas. In the months of July and

September the temperature and salinity of the water showed the lowest values, but greater variability vertical and horizontal while in the months of January and March showed the temperature and salinity values were higher, but with little variation vertical and horizontal. The capacity of optical retroespalhamento, OBS, increased with depth, with the highest values in winter and the spring equinox. The tides in the area are semidiurna ( $F = 0.09$ ) and have average height of 1.67 m, with average spring range of 2.07 times I mean square of 0.97 m. The net transport varies seasonally, in response to changes in prevailing winds and discharge. During the rainy season when more intense winds occurs, the surface transport is mainly northwards and against the coast, but eastwards, next to the Jaboatão/Pirapama estuary bar. Even during the period of drought, the transport is preferential toward the south at the surface and eastwards near the bottom. Stronger currents were measured closer to the surface during the rainy periods and the spring equinox, when they reached  $0.7 \text{ ms}^{-1}$ . In the period of drought and autumn equinox, the measured currents were always less than  $0.3 \text{ ms}^{-1}$ . Significant wave height and periods varied between 0.4 and 0.6 m and between 6.3 and 6.8 seconds, respectively in Jaboatão and between 0.7 and 1.0 m and 5.9 and 6.0 seconds in Recife. The largest waves ( $H_{\text{max}}=1.57 \text{ m}$ ) were recorded in the month of August in Recife. The SisBaHia model yield consistent result and proved to be a useful tool to infer the circulation pattern in the area.

# SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
Agradecimentos	
Resumo	
Abstract	
Lista de Tabelas	
Lista de Figuras	
1. INTRODUÇÃO .....	01
2. ANTECEDENTES .....	03
3. JUSTIFICATIVA. ....	09
4. OBJETIVOS. ....	10
5. MATERIAL E MÉTODOS. ....	11
5.1 Área de Estudo. ....	11
5.2 Base Cartográfica. ....	24
5.3 Condições Meteorológicas .....	25
5.4 Batimetria .....	25
5.5 Cobertura Sedimentar .....	27
5.6 Perfil Teórico de Equilíbrio .....	28
5.7 Profundidade de Fechamento .....	28
5.8 Hidrologia e Pluma Estuarina. ....	29
5.9 Correntometria .....	30
5.10 Clima de Onda .....	30
5.11 Modelagem Matemática e Simulação Numérica. ....	32
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO. ....	48
6.1 Condições Meteorológicas. ....	48
6.2 Morfobatimetria. ....	51
6.3 Perfil Teórico de Equilíbrio .....	61
6.4 Profundidade de Fechamento .....	66
6.5 Hidrologia e Pluma Estuarina .....	68
6.6 Correntometria. ....	93
6.7 Clima de Ondas .....	100
6.8 Modelagem Matemática e Simulações Numéricas .....	102
7. CONCLUSÕES .....	116
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	118

## LISTA DE TABELAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabela 1</b> Coordenadas das estações amostrais. Perfis 1 a 10 . . . . .	24
<b>Tabela 2</b> Principais constantes harmônicas para o Porto do Recife. . . . .	46
<b>Tabela 3</b> Condições iniciais para as simulações com o SisBaHiA . . . . .	46
<b>Tabela 4</b> Altura significativa ( $H_s$ ), altura máxima ( $H_{max}$ ), período significativo ( $T_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção das ondulações de superfície ao longo da área de estudo respectivamente para o período de ago-out /maio-junho e indicação dos pontos amostrais. . . . .	98

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Vista geral da área de estudo. . . . .	12
<b>Figura 2</b> Vista geral das praias do Pina, Boa viagem, Piedade e Candeias	13
<b>Figura 3</b> Limite norte da área. Acesso ao Porto do Recife . . . . .	13
<b>Figura 4</b> Limite sul da área de estudo. Estuário dos rios Jaboatão e Pirapama. . . . .	14
<b>Figura 5</b> Vista geral da praia de Candeias e dique. Ao fundo, a desembocadura dos rios Pirapama e Jaboatão, no limite sul da área de estudo. . . . .	15
<b>Figura 6</b> Vista geral da praia de Piedade, com trecho um protegido por recife natural e outro exposto. . . . .	16
<b>Figura 7</b> Vista geral da praia da Boa Viagem. Trecho com recifes costeiros, pós praia bem preservada e dunas. . . . .	16
<b>Figura 8</b> Localização das estações e perfis amostrais . . . . .	17
<b>Figura 9</b> Vista geral do Perfil 1. . . . .	18
<b>Figura 10</b> Vista geral do Perfil 2 . . . . .	19
<b>Figura 11</b> Vista geral do Perfil 3 . . . . .	19
<b>Figura 12</b> Vista geral do Perfil 4 . . . . .	20
<b>Figura 13</b> Vista geral do Perfil 5 . . . . .	20
<b>Figura 14</b> Vista geral do Perfil 6 . . . . .	21
<b>Figura 15</b> Vista geral do Perfil 7 . . . . .	21
<b>Figura 16</b> Vista geral do Perfil 8 . . . . .	22
<b>Figura 17</b> Vista geral do Perfil 9 . . . . .	22
<b>Figura 18</b> Vista geral do Perfil 10 . . . . .	23
<b>Figura 19</b> Perfis de coleta de sedimentos . . . . .	27
<b>Figura 20</b> Vista geral da área de ancoragem do ondógrafo S4, Praia de Piedade . . . . .	31
<b>Figura 21</b> Domínio discretizado . . . . .	43
<b>Figura 22</b> Batimetria utilizada nas simulações . . . . .	43
<b>Figura 23</b> Padrão de distribuição da rugosidade para a área . . . . .	44
<b>Figura 24</b> Curvas de maré utilizadas na simulação . . . . .	45
<b>Figura 25</b> intensidade e direção do vento em julho/2005 . . . . .	47
<b>Figura 26</b> Precipitação mensal em Recife durante os anos de 2005, 2006 e 2007 e Normal Climatológica 1960-91 . . . . .	49
<b>Figura 27</b> Regime dos Ventos. Médias mensais. Aeroporto dos Guararapes. 2002 a 2008. CINDACTA III. . . . .	50
<b>Figura 28</b> Modelo digital de terreno (MDT) para a área de estudo . . . . .	52
<b>Figura 29</b> Indicação dos perfis de sondagem batimétrica . . . . .	53
<b>Figura 30</b> Detalhe dos perfis batimétricos 1 a 12. Praia do Pina. . . . .	55
<b>Figura 31</b> Detalhe dos perfis batimétricos 13 a 24. Praia do Pina. . . . .	56
<b>Figura 32</b> Detalhe dos perfis batimétricos 25 a 36. Praia da Boa Viagem. . . . .	57
<b>Figura 33</b> Detalhe dos perfis batimétricos 37 a 48. Praia de Piedade. . . . .	58
<b>Figura 34</b> Detalhe dos perfis batimétricos 49 a 60. Praias de Piedade e Candeias . . . . .	59
<b>Figura 35</b> Detalhe dos perfis batimétricos 61 a 72. Praia de Candeias próximo ao estuário de Barra das Jangadas. . . . .	60

<b>Figura 36</b>	Perfis batimétrico e de equilíbrio ao longo das praias do Pina e da Boa Viagem. Perfis 10-7. ....	62
<b>Figura 37</b>	Perfis batimétrico e de equilíbrio ao longo das praias da Boa Viagem e Piedade. Perfis 6-3. ....	63
<b>Figura 38</b>	Posição da profundidade de fechamento do perfil de equilíbrio ao longo da área de estudo. ....	68
<b>Figura 39</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 1, estações A-D, período chuvoso. ....	69
<b>Figura 40</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 2, estações A-C, período chuvoso. ....	70
<b>Figura 41</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 3, estações A-D, período chuvoso. ....	71
<b>Figura 42</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 4, estações A-D, período chuvoso. ....	72
<b>Figura 43</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 5, estações A-D, período chuvoso. ....	73
<b>Figura 44</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 6, estações A-D, período chuvoso. ....	74
<b>Figura 45</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 7, estações A-D, período chuvoso. ....	75
<b>Figura 46</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 8, estações A-D, período chuvoso. ....	76
<b>Figura 47</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 9, estações A-D, período chuvoso. ....	77
<b>Figura 48</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 10, estações A-D, período chuvoso. ....	78
<b>Figura 49</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 1, estações A-D, período estiagem. ....	79
<b>Figura 50</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 2, estações A-C, período estiagem. ....	80
<b>Figura 51</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 3, estações A-D, período estiagem. ....	81
<b>Figura 52</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 4, estações A-D, período estiagem. ....	82
<b>Figura 53</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 5, estações A-D, período estiagem. ....	83

<b>Figura 54</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 6, estações A–D, período estiagem . . . . .	84
<b>Figura 55</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 7, estações A–D, período estiagem . . . . .	85
<b>Figura 56</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 8, estações A–D, período estiagem . . . . .	86
<b>Figura 57</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 9, estações A–D, período estiagem . . . . .	87
<b>Figura 58</b>	Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 10, estações A–D, período estiagem . . . . .	88
<b>Figura 59</b>	Região sob influencia da pluma estuarina do sistema Pirapama/Jaboatão na preamar (PM) e baixa-mar (BM) . . . . .	91
<b>Figura 60</b>	Distribuição do sinal de retroespalhamento ótico ao longo da região sob influencia da pluma estuarina do sistema Pirapama/Jaboatão na preamar (PM) e baixa-mar (BM) . . . . .	92
<b>Figura 61</b>	Transporte líquido à superfície nos períodos chuvoso e de estiagem ao longo das 7 estações paralelas à costa . . . . .	94
<b>Figura 62</b>	Transporte líquido no fundo nos períodos chuvoso e de estiagem ao longo das 7 estações paralelas à costa . . . . .	95
<b>Figura 63</b>	Plote vetorial do transporte líquido durante os períodos chuvoso e de estiagem na camada superficial. . . . .	96
<b>Figura 64</b>	Plote vetorial do transporte líquido durante os períodos chuvoso e de estiagem na camada próxima ao fundo . . . . .	97
<b>Figura 65</b>	Representação polar dos registros de corrente obtidos com correntografo/ondografo S4DWi em maio-junho/2008 e ago-set/2007. . . . .	98
<b>Figura 66</b>	Diagrama stick das correntes de fundo registradas com correntografo/ondografo S4DWi em maio-junho/2008 e ago-set/2007. . . . .	99
<b>Figura 67</b>	Parâmetros característicos das ondulações de superfície no litoral dos municípios de Jaboatão dos Guararapes (Edf. Ancoradouro) e Recife (P5, Hotel Atlantico Plaza) nos períodos de setembro-outubro e maio-junho. . . . .	100
<b>Figura 68</b>	Intensidade das correntes medidas <i>in situ</i> (amostral) e geradas pelo SisBaHiA (numérico) para as camadas superficial e de fundo. Perfis 3, 5 e 8. . . . .	103
<b>Figura 69</b>	Simulação da circulação superficial durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma quadratura no Período chuvoso . . . . .	104
<b>Figura 70</b>	Simulação da circulação superficial durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma sizígia no Período chuvoso. . . . .	105
<b>Figura 71</b>	Simulação da circulação de fundo durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma quadratura no Período chuvoso . . . . .	107

<b>Figura 72</b>	Simulação da circulação de fundo durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma sizígia no Período chuvoso. ....	108
<b>Figura 73</b>	Indicação das áreas onde as correntes de fundo durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) poderiam transportar as diferentes frações granulométricas. ....	110
<b>Figura 74</b>	Distribuição da probabilidade de transporte das diferentes frações granulométricas de sedimentos. Período chuvoso. ....	112
<b>Figura 75</b>	Simulação da circulação superficial durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma quadratura sob regime de vento NE. ....	114
<b>Figura 76</b>	Simulação da circulação superficial durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma sizígia sob regime de vento NE. ....	115

## 1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras constituem 1,6 % das terras emersas exercendo um forte papel socioeconômico. Hoje, 70% delas sofrem processo de erosão marinha, devido principalmente à intensificação desordenada do uso e da ocupação destas áreas, as quais abrigam cerca de 70% da população mundial (UNESCO, 1993).

As causas mais comuns da erosão no mundo são as interrupções do transporte de sedimentos pela deriva litorânea; o decréscimo do suprimento de sedimentos para as praias, modificações naturais do clima de onda e do regime de ventos, a elevação do nível do mar e as intervenções antrópicas.

No Brasil, evidências de erosão marinha são encontradas em quase toda extensão de costa. A ocupação da faixa litorânea brasileira vem ocorrendo desde o início da colonização. Inicialmente a ocupação esteve principalmente ligada às atividades portuárias, voltadas ao suporte de um modelo primário exportador (Diegues, 1988). Posteriormente, a ocupação esteve ligada aos processos de êxodo rural e de crescimento populacional. Esta preferência pelas zonas costeiras vem aumentando a cada dia, acentuando cada vez mais o problema de erosão.

A faixa costeira do estado de Pernambuco representa cerca de 4% do seu território, onde abriga 43,8% da população (Muehe, 2006). Esta faixa, que em vários pontos possui cotas inferiores ao nível da preamar, apresenta graves problemas ambientais, com muitos trechos da costa em desequilíbrio, apresentando erosão marinha progressiva que varia de moderada a severa (CPRH, 1998), atingindo aproximadamente 1/3 das praias. Este processo é intensificado pela ocupação urbana desordenada.

Esta estrutura urbana foi moldada pela economia açucareira, que impulsionou a concentração de terra na mão de poucos, e pelo fato da cidade estar situada entre o oceano e os rios, nos alagados, tendo portanto seu espaço físico delimitado e confinado entre estes recursos naturais (Bryon, 1994).

As praias da Região Metropolitana do Recife (RMR) começaram a ser urbanizadas em 1707. Na década de 40, a maior parte dos terrenos dessas praias foram loteados. À partir de 1965 o preço dos imóveis na área se elevou, e as construções se multiplicaram. O adensamento populacional repercutiu negativamente sobre a infra-estrutura da área (Barthel, 1989).

Atualmente toda a faixa de praia de Pina, Boa Viagem, Piedade e Candeias, apresenta um alto índice de ocupação, sendo uma área de grande valor imobiliário, com grande concentração de atividades econômicas, industriais, de lazer e de turismo. Nesta área, verifica-se tanto trechos com erosão, quanto trechos em equilíbrio. A diversidade de cenários (presença ou não de recifes, obras de contenção, dunas, estuários) nos motivou a pesquisar os processos que interferem nesta área de grande importância da Região Metropolitana do Recife.

## 2. ANTECEDENTES

Estudos enfocando o conhecimento dos processos físico-oceanográficos costeiros ao longo do litoral da Região Metropolitana do Recife e seu entorno são ainda escassos. Sem demérito dos esforços realizados e refletindo a realidade da disponibilidade de especialistas e equipamentos nas instituições de pesquisa à época, os poucos estudos realizados anteriores ao ano de 2000 registrados em literatura, ou correspondem a áreas de mar aberto ou limitam-se à zona de arrebentação, e em geral correspondem a observações instantâneas e pontuais conduzidas empregando metodologia e equipamentos não específicos para a medição das ondas e correntes, limitando a resolução e acuidade dos dados e resultados obtidos.

Estudos realizados nas áreas profundas da costa de Pernambuco mostrou que as ondas têm direção E-SE, estão associadas aos ventos de mesma direção, e têm altura média de 1,0 a 1,5 metros e períodos de 5 a 7 segundos, dominando durante todo o ano (Hog-Bem & Lumb, 1967; U.S. Navy, 1978; *apud* Dominguez *et al.*, 1992).

Para o litoral Norte de Pernambuco, um dos poucos estudos realizados para parâmetros de ondas foi o de Suhayda *et al.*, (1977) *apud* Lira,(1997).

Na praia de Maracaípe, litoral sul de Pernambuco, a altura e o período significativos das ondas na zona de arrebentação foi estimado com emprego de miras e observações de 5 minutos (CPRH, 1998).

Na área do porto do Recife, o INPH registrou que a altura significativa de onda excedeu 1,0 metros durante 81% do ano. A variação na altura entre a primavera, o verão e o outono, não foi significativa, apenas no inverno as condições foram mais severas, com altura significativa passando de 2,5 metros. Encontrou-se uma tendência de ondas com direção NE estarem associadas a períodos de 6,5 segundos, enquanto que, ondas com direção SE a períodos de 10 a 12 segundos (Honsi, 1978).

Análises de registro maregráficos para a América do Sul apontam uma tendência recente de elevação relativa do nível do mar (Dominguez, 1995). Na região de Recife, registros medidos entre 1946 e 1988, indicaram um aumento relativo do nível do mar de  $5,6 \text{ mm.ano}^{-1}$  (Harari & Camargo, 1994). Este aumento influencia diretamente os processos costeiros, devendo portanto, sempre ser considerado em estudos relacionados à contenção de processos erosivos.

Estimativas instantâneas foram obtidas com uso de miras das alturas e períodos das ondas na zona de arrebentação na praia de Boa Viagem ao longo do período de Setembro/94 a Janeiro/95 (LGGM, 1995) e para a região da praia de Candeias, próximo ao estuário do rio Jaboatão (LGGM, 1997).

Estimativas, também com emprego de mira, da altura e período médios das ondas na zona de arrebentação na praia do Paiva, foram realizadas por Madruga Filho, (1999). As correntes litorâneas superficiais, naquela área, foram estimadas através do uso de um flutuador e seu deslocamento relativo a duas balisas. Devemos considerar, porém, a influência do vento sobre os flutuadores.

Registros do clima de ondas na região do porto de Suape foram levantados pela NUCLEOBRAS de Fevereiro/80 a Janeiro/84 e analisados pelo INPH. No período, a altura média significativa da onda era cerca de 1 metro e a direção mais freqüente (60%) era de  $105^\circ\text{Az}$  a  $120^\circ\text{Az}$  (CONSULPLAN ENGENHARIA, 1989 *apud* Muehe & Neves, 1995). Os maiores valores observados foram: altura significativa de 3,0 m, altura máxima de 4,5 m e período de 10 s. A direção mais freqüente foi de  $105^\circ\text{Az}$  (Neumann *et al.*, 1996).

Observações realizadas pela PORTOBRÁS na mesma região indicaram uma predominância de valores de cerca de 1 m no outono e primavera, de 0,85 a 1,0 m no verão e em torno de 1,25 m para o inverno. Os períodos das ondas foram de 6,5 s para as condições de outono (março a maio), inverno (junho a agosto) e primavera (setembro a novembro). Durante o verão (dezembro a fevereiro) o período das ondas ficou em 5,0 segundos (LGGM, 1995).

Os primeiros estudos sistemáticos sobre as distribuições das características físico-oceanográficas, sobre a circulação costeira e sobre o clima de ondas na Região Metropolitana do Recife, foram conduzidos ao longo dos anos de 2000-2001. Levantamentos das condições hidrológicas com obtenção de perfis CTD, medições de correntes com uso de correntômetro e registros do clima de onda com emprego de marégrafo/ondógrafo foram obtidos e ao longo das praias de Candeias, Piedade e parte da praia de Boa Viagem (Rollnic, 2002).

A extensão, comportamento e influência da pluma do estuário de Barra das Jangadas nas praias da Região Metropolitana do Recife sul, foram enfocadas no estudo de Rollnic & Medeiros (2003a), enquanto a caracterização do padrão de transporte líquido ao longo das praias de Candeias, Piedade e Boa Viagem foi estudado por Rollnic & Medeiros (2006).

Paralelamente, o agravamento do problema da erosão costeira deu também novo impulso ao desenvolvimento de estudos voltados para o conhecimento das características geológicas e geomorfológicas costeiras bem como do uso e saúde das praias.

Estudo sedimentológico, morfodinâmico e da vulnerabilidade das praias de Piedade, Candeias e Barra das Jangadas foram conduzidos por Borba (2000).

Os primeiros trabalhos enfocando a aplicação do conceito de perfil de equilíbrio a praias do litoral pernambucano correspondem aos trabalhos de Manso *et al.* (2001) para a praia de Serinhaém-PE e Rollnic & Medeiros (2003b), para três trechos distintos de costa da Região Metropolitana do Recife.

Uma caracterização da cobertura sedimentar ao longo das praias do Pina e da Boa Viagem é apresentada em Gregório *et al.*, (2003). Neste estudo, os autores indicam na área uma cobertura sedimentar com predominância de areia média e fina, moderadamente selecionada, constituídas por 80% de grãos de quartzo e 20% por fragmentos bioclásticos.

A caracterização da cobertura sedimentar do arco praiial e o estado erosivo ao longo das praias do Pina e da Boa Viagem foram investigados por Gregório & Araújo (2003) e Gregório,(2004). A partir da caracterização granulométrica dos sedimentos e do monitoramento de perfis praiiais ao longo daquelas áreas, os autores concluíram que os trechos mais ao norte das praias do Pina e da Boa Viagem mostravam-se em maior equilíbrio volumétrico que os localizados ao sul.

Mais recentemente, uma avaliação geoambiental das praias de Piedade e Candeias foi conduzida por Torres (2008).

Dentre os estudos voltados a avaliação de parâmetros ambientais e sócio econômicos nas praias do Pina e da Boa Viagem destacam-se os trabalho de Souza (2004) e Araújo (2008), que realizaram um diagnóstico sócio-ambiental da praia de Boa Viagem o qual foi utilizado como subsídio na elaboração de propostas de ordenamento daquela praia.

Dentre os trabalhos que tratam da saúde da praia, destacam-se o de Silva *et al.* (2008a) que trata das possíveis fontes de resíduos sólidos para a praia de Boa Viagem e Silva *et.al.* (2008b) que enfoca os padrões espaciais e temporais desses resíduos. Já a percepção dos usuários quanto à erosão costeira na praia de Boa Viagem foi alvo do trabalho de Leal (2006).

Dentre os trabalhos enfocando aspectos da biota realizados na zona costeira do Recife podemos citar os de: Luz (1991), que estudou a fauna dos recifes de Boa Viagem, e Dominguez *et al.* (1990) com estudo sobre a geologia do quaternário costeiro de Pernambuco. Na praia de Piedade, Ottmann *et al.* (1959), fizeram um estudo topográfico e sedimentológico de um perfil de praia. Em Barra das Jangadas podemos citar os trabalhos de: Okuda & Nóbrega (1960) que estudou a distribuição da concentração de clorinidade em função da maré, a intensidade das correntes e a vazão do estuário; Carneiro e Coelho (1960), que fizeram um estudo ecológico da área; e Ottmann *et al.* (1965), que analisaram o efeito da poluição sobre a ecologia do estuário.

Outros trabalhos de caráter biológico foram realizados, como os de: Eskinazi & Satô (1963), Eskinazi (1965), Coelho (1963), Couto (1988), Santos (1994), Santos & Coelho (1994) e Santos e Coelho (1998) que tratam principalmente sobre a fauna planctônica e a carcinofauna e sua distribuição e relação com os fatores ambientais.

Mais recentemente, medições de correntes com perfilador ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) e simulações numéricas para um cenário de estiagem (janeiro de 2007) com o modelo SisBaHiA (Façanha, 2007) foram conduzidos e aplicados a área. Segundo aquela autora, as correntes foram mais intensas durante os estágios de maré vazante e enchente, e menos intensas durante a baixa-mar e preamar, com correntes superficiais na direção SO durante a enchente e para NO na preamar, vazante e baixa-mar em quase toda a malha. Ao sul da área de estudo, os vetores de corrente foram para O (preamar e vazante) e SO (baixa-mar). Naqueles estudos, os campos de velocidades medidos durante a baixa-mar foram melhor reproduzidos nas simulações com o SisBaHiA do que os de preamar, e uma melhor representatividade foi obtida para o trecho sul do domínio modelado. A dificuldade verificada em se reproduzir numericamente os resultados experimentais de forma mais satisfatória foram atribuídas à deficiência de detalhamento da batimetria até então disponível para a região de estudo, qual seja, a constante na carta náutica DHN 903. Complementando o seu estudo, Façanha (op. Cit.) aplicou o módulo do SisBaHiA de transporte lagrangeano para avaliar o potencial de transporte longitudinal de sedimentos na região no período de verão e observou que 25% dos sedimentos foram transportados para norte e 75% dos sedimentos foram transportados para Sul.

Devido a esta carência de informação, este trabalho foi realizado utilizando instrumentos indispensáveis à Oceanografia Física, como: CTD, marégrafo, ondógrafo, correntômetros e anemômetro além de toda uma estrutura de embarcação, GPS e ecobatímetro, para trabalhar em áreas mais distantes da linha de costa, levantando dados inéditos, os quais serviram de referência para modelos de gerenciamento da costa.

O agravamento da situação da erosão em vários trechos da RMR e baixo sucesso das intervenções pontuais de proteção à praia estimulou a organização de um

esforço conjunto entre grupos de pesquisadores da UFPE, prefeituras dos Municípios de Jaboatão dos Guararapes, Recife, Olinda e Paulista, órgão de planejamento e ambiental, na busca de informações que permitissem formular uma política de ações conjuntas e articuladas para gestão e proteção da costa e que deu origem ao Projeto de Monitoramento Ambiental Integrado (Projeto MAI), que recebeu financiamento da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e das prefeituras diretamente envolvidas. O presente autor participou ativamente dos trabalhos desse grupo, respondendo pelo planejamento e levantamento batimétrico, coletas de sedimentos, ancoragem de ondógrafo/marégrafo e geração de dados. Parte dos dados gerados serão incluídos nas análises oferecidas.

### 3. JUSTIFICATIVA

Esta área representa atualmente um dos principais pólos urbanos de Pernambuco. Devido ao problema evidente de erosão em alguns trechos, várias intervenções e construções têm sido realizadas ao longo das praias da Região Metropolitana Sul, desrespeitando os limites de pós-praia, e assim, comprometendo o estoque natural de sedimentos e desencadeando forte processo erosivo.

A necessidade de ações emergenciais para contenção do avanço do mar nessas áreas tem com frequência, justificado ações pontuais sem o devido suporte de informações sobre as características das praias e da hidrodinâmica costeira resultando quase sempre em insucessos ou mesmo em intensificação do processo erosivo no local e/ou em áreas adjacentes. Ainda, em muitos casos, intervenções emergenciais e/ou obras que não tinham caráter definitivo sofreram descontinuidade (colocação de pedras, sacos de areias, molhes para tráfego de máquinas, etc.), ou não são removidas. Um exemplo é a obra de caráter emergencial de contenção na praia de Boa Viagem que teve início em 1994 e prossegue até a atualidade, com um custo mensal alto para Prefeitura da Cidade do Recife (Souza & Costa, 2003).

A realização de um plano de gestão costeiro eficaz se faz necessário, e requer o levantamento detalhado das condições da área, tais como a hidrodinâmica local, clima de onda, perfis batimétricos e análises granulométricas dos sedimentos, informações estas parcialmente inéditas. Com uma boa base de dados, foi possível aplicar modelos matemáticos, fornecendo assim ferramentas eficazes para um plano de gestão da costa na Região Metropolitana do Recife.

## 4. OBJETIVOS

O presente trabalho enfocou a obtenção de informações detalhadas sobre o clima de onda e da hidrodinâmica da costa sul da Região Metropolitana do Recife, analisando suas variabilidades espaciais e temporais ao longo de 10 perfis amostrais, que englobam da linha de praia até a parte externa aos recifes (isóbata de 15m), bem como testar a validade e aplicabilidade de modelos na região, adequando-os à área.

No desenvolver dos trabalhos, foram testadas as seguintes hipóteses:

- As linhas de recifes ao longo da costa da RMR, tanto podem atuar como estruturas de proteção da costa, amenizando a ação das ondas, como tornarem a costa mais vulnerável, por dificultarem o transporte de sedimento pelas correntes litorâneas,
- Os modelos de perfis de equilíbrio podem não ser adequados para serem diretamente aplicados a costa da RMR uma vez que a presença das linhas de recifes acentua a reflexão das ondas, não consideradas em muitos deles. Modificações alternativas serão testadas visando otimizar a utilização deles na área de estudo,
- O processo erosivo ao longo das praias da RMR tem sido intensificado pela ocupação da área de berma e estirâncio e pela instalação de obras de proteção não adequadas e/ou não concluídas,
- O modelo de simulação SisBaHiA, é capaz de simular o padrão de circulação na área com um bom grau de confiabilidade,

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

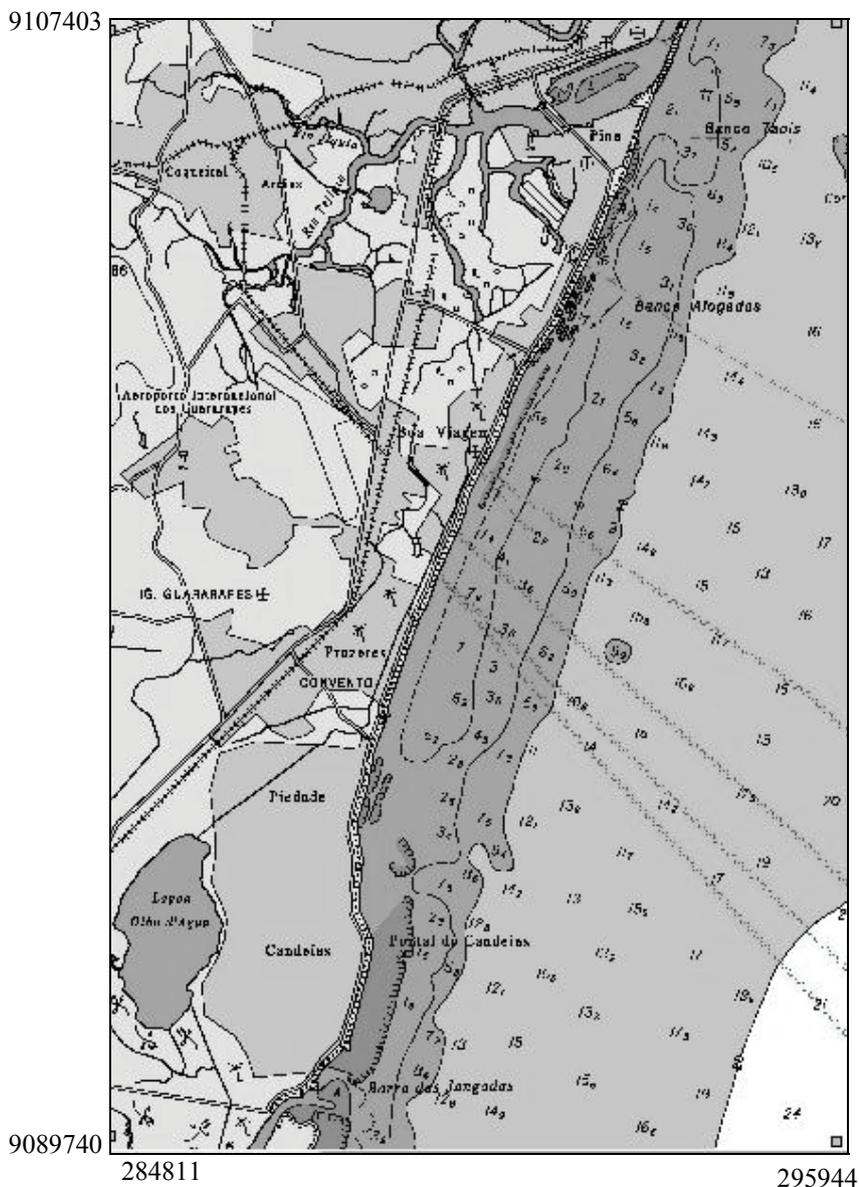
Os trabalhos foram desenvolvidos nos anos de 2005, 2006, 2007 e 2008 e englobaram a elaboração de base cartográfica, a geração e compilação de dados voltados à caracterização da região costeira sul da Região Metropolitana do Recife em termos de sua morfobatimetria, forçantes meteorológicos atuantes, clima de ondas, e da distribuição de suas características físico-oceanográficas e padrão de circulação.

Os trabalhos foram programados de modo a permitir a obtenção de informações ao longo da área estudada levando em consideração sua variabilidade temporal e espacial, representada principalmente por flutuações das descargas fluviais, dos ventos predominantes, e pelas marés.

Esta estratégia visou permitir por exemplo, analisar o padrão de circulação em níveis distintos de profundidade (superfície, meia-água e próximo ao fundo), bem como observar a influência da sazonalidade dos ventos, das descargas fluviais e da morfologia do relevo, sobre o clima de ondas e correntes litorâneas.

### 5.1 Área de Estudo

A área de estudo corresponde a uma faixa de 16 km de extensão do litoral do estado de Pernambuco, na zona costeira da Região Metropolitana do Recife-PE, abrangendo os municípios de Jaboatão dos Guararapes e do Recife entre as coordenadas UTM 9105000 e 9089969 N ; 0297000 e 0289227 W, englobando desde a linha de praia até a isóbata de 12 metros da plataforma continental, (Fig 1).



**Figura 1.** Vista geral da área de estudo.

A área abrange as praias do Pina, Boa Viagem, Piedade e Candeias (Fig. 2). O limite Norte da área corresponde ao acesso ao Porto do Recife (Fig. 3) e o limite sul na foz do estuário de Barra das Jangadas. A seleção da área se deveu a importância sócio-econômica da mesma, ao processo de erosão evidente e a deficiência de informações sobre o clima de onda e regime das correntes no local.



**Figura 2.** Vista geral das praias do Pina, Boa viagem, Piedade e Candeias



**Figura 3.** Limite norte da área. Acesso ao Porto do Recife

Geologicamente, a área esta constituída por terrenos planos, de baixa declividade e de larguras variáveis, que se acham preenchidos por sedimentos quaternários. Na região, é possível distinguir dois níveis de terraços marinhos, (Pleistoceno e Holoceno), depósitos de mangues, de praia, arenitos de praia, além de resquícios de leques aluviais pleistocênicos e depósitos quaternários indiferenciados. Estes últimos, dentro da "Planície do Recife" (Coutinho *et al.*, 1994).

Ainda segundo aquele autor, o setor no qual está inserido a área de estudo caracteriza-se por uma intensa sedimentação quaternária, a qual está relacionada ao maior desenvolvimento da planície costeira, especialmente no grande anfiteatro, onde se localiza a cidade do Recife. A linha de costa é mais retilínea, assume direção NE-SW, devido à presença de recifes de arenito e restingas, apresenta praias arenosas com ausência quase total de dunas, o que reflete em condições desfavoráveis à acumulação de depósitos causando vulnerabilidade nos processos de erosão.

No limite sul da área de estudo, encontra-se o estuário de barra de Jangadas. Na sua desembocadura ocorre grande deposição de sedimentos, formando bancos arenosos que migram sazonalmente (Fig. 4).



Fonte: CPRH

**Figura 4.** Limite sul da área de estudo. Estuário de barra das Jangadas.

Mais ao norte encontra-se a praia de Candeias, na qual ocorre por toda sua extensão uma linha de recifes distantes 500m da praia. Na baixa-mar de sizígia, alguns poucos pontos deste recife afloram, ficando o restante numa cota muito próxima a zero. Apesar desta proteção natural, a praia de Candeias apresenta muitos trechos em erosão. Ao longo de sua extensão, existem enrocamentos, espigões e, no limite de Candeia com Piedade, um dique, construído na frente da única abertura existente nos recifes (Fig. 5). Em Candeias, muitas construções não respeitaram os limites da pós-praia o que acentua mais ainda os problemas de erosão.



Fonte: CBR

**Figura 5.** Vista geral da praia de Candeias. Ao fundo, a desembocadura dos rios Pirapama e Jaboatão, no limite sul da área de estudo.

Na Praia de Piedade, observa-se no seu limite Sul, um grave problema de erosão, comprometendo algumas estruturas edificadas. Este problema teve início após a construção do dique acima mencionado. Observam-se ainda nesta praia dois ambientes distintos: um com a presença de uma linha de recifes na costa, e outro sem recifes e com uma pós-praia ainda preservada (Fig. 6).



Fonte: CPRH

**Figura 6.** Vista geral da praia de Piedade, com trecho protegido por recife natural e outro exposto.

A praia de Boa Viagem possui próximo do seu limite sul, um trecho de 2 km de praia protegido por um enrocamento. Dentro deste trecho, tanto ocorre a presença de recifes como as praias abertas. Seguindo para norte, aumenta a incidência de recifes, aparecendo uma pós-praia bem preservada, com a formação de dunas (Fig. 7).



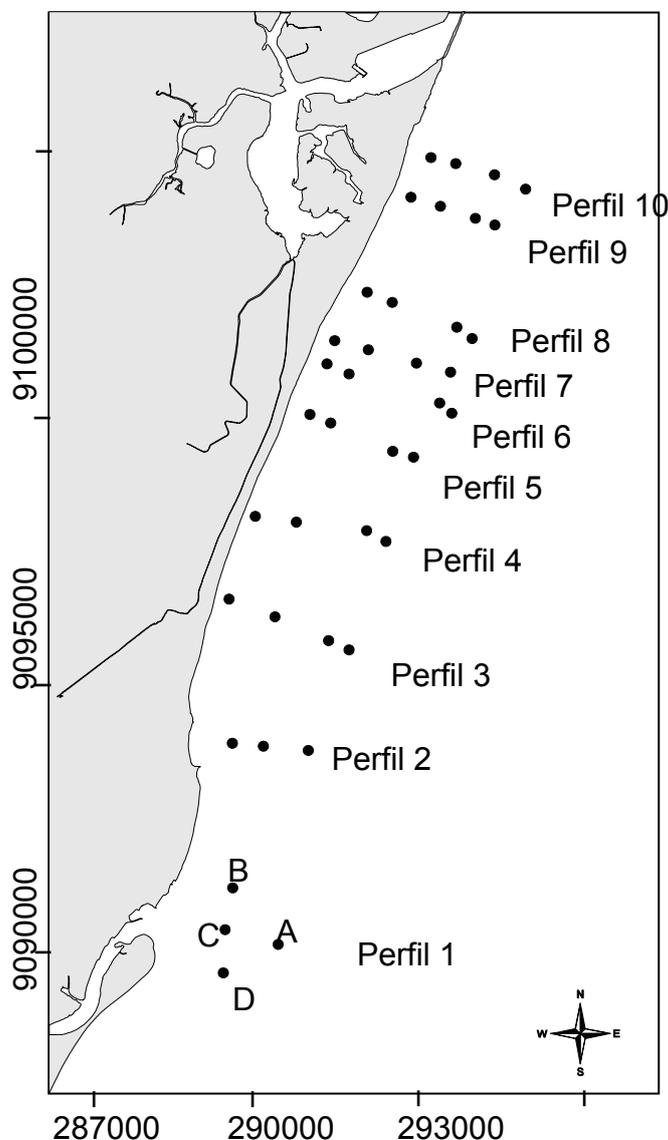
Fonte: CPRH

**Figura 7.** Vista geral da praia da Boa Viagem. Trecho com recifes, pós-praia bem preservada e dunas.

A praia do Pina se caracteriza pela presença de recifes semi-submersos próximo à costa, e pela pós-praia preservada com presença de dunas.

### 5.1.1 Perfis de Monitoramento e Estações de Coleta

Foram demarcados dez perfis de amostragem (Fig. 8). O critério utilizado para a demarcação dos mesmos foi a presença ou não de recifes, obras de contenção e o estado de equilíbrio da praia.



**Figura 8.** Localização das estações e perfis amostrais.

Procurou-se fazer uma combinação dessas variáveis, de modo que, pudéssemos analisar cenários diferentes:

- Presença de arenitos que afloram em trechos de praia com e sem erosão,
- Presença de arenitos submersos em trechos de praia com e sem erosão,
- Praias abertas com e sem erosão,
- Praia com obra de contenção,
- Proximidade da foz de estuário.

O perfil 1 (P1), localiza-se em frente ao estuário da barra das jangadas, importante aporte para a área (Fig. 9),



**Figura 9.** Vista geral do Perfil 1.

O perfil 2 (P2) na praia de Candeias, em frente ao SESC, está alinhado com uma abertura nos recifes que margeiam, a 900m da costa, toda extensão da praia de Candeias, aflorando na baixa-mar. A praia neste perfil encontra-se em erosão acentuada (Fig. 10).



**Figura 10.** Vista geral do Perfil 2.

O perfil 3, na praia de Piedade, em frente à igreja de Piedade, é uma praia aberta, sem presença de recifes com uma pós-praia conservada (Fig. 11),



**Figura 11.** Vista geral do Perfil 3.

O perfil 4 (P4), na praia de Piedade, alinhado com o Hospital da Aeronáutica, encontra-se em uma faixa de praia aberta em provável estado de equilíbrio (Fig. 12).



**Figura 12.** Vista geral do Perfil 4.

O perfil 5 (P5), na praia de Boa Viagem, defronte do Hotel Atlante Plaza, em uma área sob erosão, onde existe um enrrocamento aderente ocupando a pós-praia e recifes que afloram na baixa-mar (Fig. 13),



**Figura 13.** Vista geral do Perfil 5.

O perfil 6 (P6), localizado na praia de Boa Viagem em frente ao edifício Castelinho, numa faixa de praia sem presença de recifes junto à costa e com uma pós-praia bem reduzida (Fig. 14).



Fonte: CPRH

**Figura 14.** Vista geral do Perfil 6.

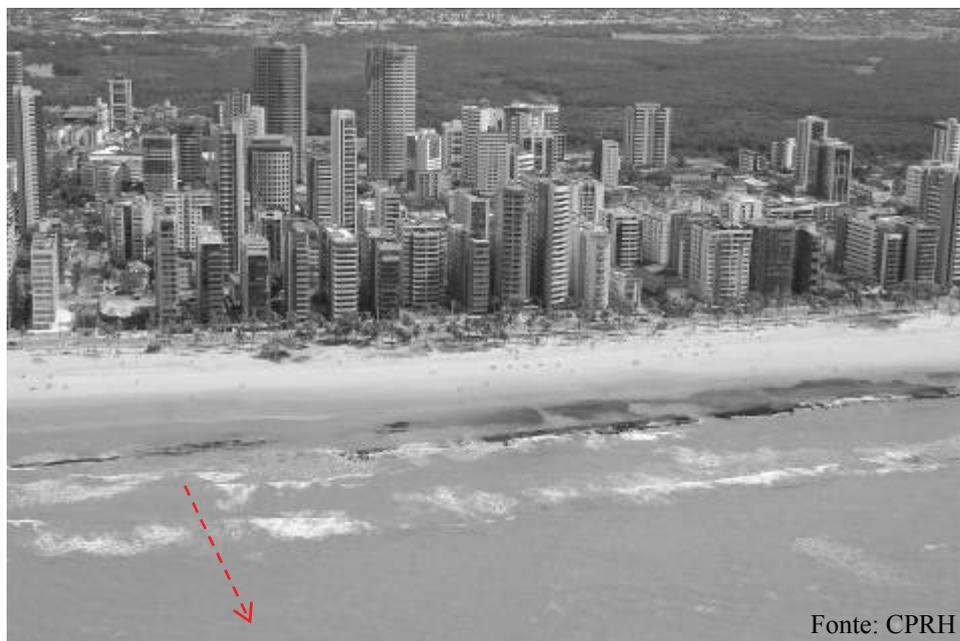
O perfil7 (P7), na praia de Boa Viagem, em frente ao edifício Ana Celina, localizada numa faixa de praia com um extenso recife que aflora na baixa-mar. Neste trecho, observa-se uma pós-praia preservada (Fig. 15).



Fonte: CPRH

**Figura 15.** Vista geral do Perfil 7.

O perfil 8 (P8), na praia de Boa Viagem alinhado com a padaria Boa Viagem, também com a pós-praia bem preservada, o Recife está semi-submerso e de forma descontínua (Fig.16).



**Figura 16.** Vista geral do Perfil 8.

O perfil 9 (P9), na praia do Pina, representa uma região de dunas bem preservadas, possui duas linhas de arenitos submersos próximos à costa. (Fig. 17).



**Figura 17.** Vista geral do Perfil 9.

O perfil 10 (P10) na praia do Pina, em frente ao edifício Cassino Americano. Este perfil conserva uma extensa faixa de areia na pós-praia (Fig. 18),



**Figura 18.** Vista geral do Perfil 10.

Ao longo dos perfis 2 (P2) a 10 (P10) foram selecionadas quatro estações de coletas. As estações (A), correspondendo ao ponto mais costa-à-fora, aproximadamente sobre a isóbata de 15 m, representando as condições oceânicas próximas, livre da interferência dos recifes. As estações (B), localizadas no limite oceânico da linha principal de recife, aproximadamente sobre a isóbata 10m. As estações (C) localizadas na interface do canal costeiro com a linha de recifes submersos com intuito de verificar a importância do mesmo na hidrodinâmica da área. As estações (D) imediatamente a barra-mar da zona de arrebatção, região de grande importância para os processos costeiros.

A estação D do perfil 2, (P2D) correspondia a uma área interna ao dique, e não foi ocupada, pelas dificuldade impostas a navegação.

Na região da foz do estuário, perfil 1 (Figura 8), por suas características, foram selecionadas quatro estações, sendo três paralelas à desembocadura, com

intuito de analisar a orientação da pluma ao longo da costa, e uma estação central distante da costa, onde se observou o alcance da mesma ao largo.

As coordenadas das 39 estações consideradas ao longo dos perfis 1 a 10 são indicadas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Coordenadas das estações amostrais. Perfis 1 a 10

ESTAÇÃO	LONGITUDE	LATITUDE	ESTAÇÃO	LONGITUDE	LATITUDE
P1-A	290212	9089983	P6-A	293418	9099960
P1-B	289373	9091047	P6-B	293193	9100150
P1-C	289233	9090262	P6-C	291522	9100696
P1-D	289200	9089450	P6-D	291114	9100885
P2-A	290769	9093626	P7-A	293395	9100730
P2-B	289939	9093707	P7-B	292765	9100899
P2-C	289367	9093762	P7-C	291878	9101151
			P7-D	291257	9101323
P3-A	291522	9095515	P8-A	293793	9101361
P3-B	291142	9095690	P8-B	293511	9101575
P3-C	290153	9096137	P8-C	292318	9102040
P3-D	289307	9096470	P8-D	291855	9102232
P4-A	292203	9097551	P9-A	294212	9103494
P4-B	291846	9097755	P9-B	293853	9103619
P4-C	290548	9097914	P9-C	293209	9103846
P4-D	289790	9098024	P9-D	292665	9104015
P5-A	292711	9099135	P10-A	294781	9104168
P5-B	292329	9099244	P10-B	294207	9104437
P5-C	291183	9099776	P10-C	293492	9104648
P5-D	290799	9099936	P10-D	293034	9104760

## 5.2 Base Cartográfica

Inicialmente, uma base cartográfica na escala 1:10.000, foi elaborada a partir de uma composição do mapa topográfico Ponte dos Carvalhos, folha SC.25-V-A-III-1-SO (SUDENE,1972) e carta náutica N° 930 (DHN, 1988) existentes para a área. Esta base inicial foi então complementada e atualizada, a partir de dados extraídos de

imagem Google Earth e observações diretas em campo de forma a permitir incluir estruturas como molhe, diques e enrocamentos.

A atualização e refinamento da linha de costa atual para o trecho da área de estudo foi possível pela obtenção de seu posicionamento (2001 pontos) empregando GPS Garmin III Plus. Neste levantamento empregou-se sistema de coordenadas UTM e Datum WGS, utilizou-se como referência a linha da preamar de sizígia. A base assim produzida serviu de apoio a programação e realização dos trabalhos de campo e para a apresentação dos resultados obtidos, na forma de mapas temáticos, bem como na delimitação das fronteiras da área nas simulações numéricas.

### **5.3 Condições Meteorológicas**

Dados diários da intensidade e direção dos ventos, temperatura do ar e precipitação, para os anos do estudo, foram obtidos junto à Divisão de Meteorologia do CINDACTA III. Esses dados foram analisados juntamente com os dados dos campos de ondas e correntes, para inferência da circulação costeira e empregados para forçar o modelo de simulação SisBaHiA.

### **5.4 Batimetria**

O relevo do fundo marinho exerce grande influência no comportamento das ondas, no transporte e distribuição dos sedimentos e na circulação costeira. Visando obter um conhecimento de suas características um levantamento batimétrico detalhado da área foi planejado e executado pelo presente autor durante o desenvolver do projeto MAI (Monitoramento Ambiental Integrado).

O levantamento batimétrico foi realizado durante o mês de dezembro de 2006, período em que o estado do mar é mais propício à navegação, permitindo uma maior acuidade dos levantamentos.

A área prospectada abrangeu desde a desembocadura do estuário de Barra das Jangadas até a área de acesso ao Porto do Recife, com uma extensão aproximada de 24km, englobando os municípios de Jaboatão dos Guararapes e Recife.

Na programação dos perfis de sondagem considerou-se uma malha com um espaçamento de 200m entre perfis normal a costa e com uma extensão aproximada de 4 km, começando na zona de arrebentação e se estendendo até a isóbata aproximada de 15m além de dois perfis paralelos à costa, para permitir uma amarração dos perfis e refinamento dos pontos próximo à costa. Essa programação foi realizada utilizando-se o softwear Garmin MapSource, tomando como base a carta náutica da DHN nº 930 e empregando-se o sistema de coordenadas UTM e o Datun WGS 84.

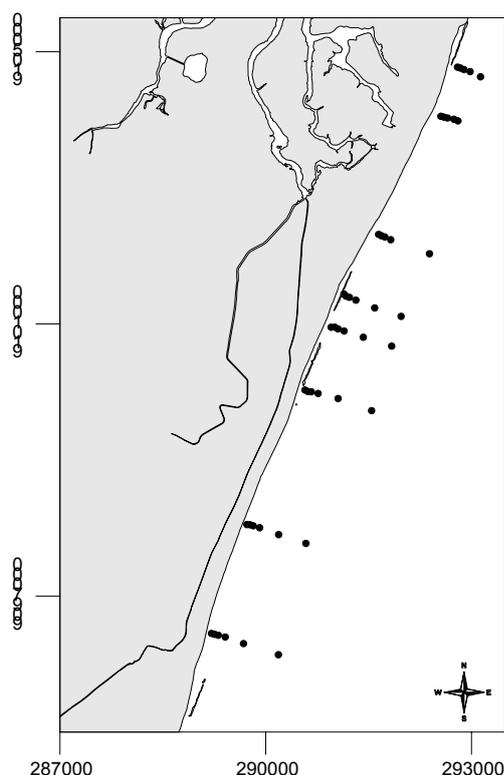
Os levantamentos batimétricos foram efetuados utilizando-se uma ecossonda Garmin GPSMap 298 acoplada à embarcação Mattang. O instrumento foi programado para operar numa frequência de 200 KHz e para armazenar internamente os registros a cada 3 segundos. Na execução dos levantamentos, considerou-se ainda o estágio de maré e as condições climáticas, uma vez que a área possui trechos de pouca navegabilidade, com cotas chegando à zero na baixa-mar.

No total foram levantados de forma contínua 101 perfis perpendiculares e dois paralelos à costa, totalizando 44.323 pontos de sondagem. O trabalho consumiu 11 dias de mar, com os registros armazenados na ecossonda sendo diariamente descarregados em laboratório. Posteriormente foram realizadas as correções de altura do transdutor e da variação da maré desses registros.

Os dados corrigidos foram então interpolados pelo método Kriging e plotados na base cartográfica desenvolvida para construção do modelo digital de terreno da área. Os dados obtidos foram igualmente empregados na construção dos perfis reais para comparação com os perfil teóricos de equilíbrio.

## 5.5 Cobertura Sedimentar

Amostras da cobertura sedimentar foram obtidas ao longo dos perfis 3 a 10. (Fig. 19). No perfil 1 e 2 não foram coletadas amostras, uma vez que devido a interrupção dos mesmo por dique e ou recifes não seria adequado ajustar o perfil teórico de equilíbrio.



**Figura 19:** perfis de coleta de sedimentos

Ao longo de cada perfil, as amostras foram obtidas, sempre que a navegação permitiu, a 50, 100, 200 e 500 metros da zona de arrebentação, além de uma última amostra no limite do canal com os recifes (a aproximadamente 1000m).

Em laboratório as amostras foram secas em estufa a peso constante, quarteadas e submetidas a peneiramentos úmido e seco para identificação de sua composição granulométrica. Todas as análises foram realizadas pelo laboratório de Oceanografia Geológica da UFPE. Estes dados foram então utilizados no cálculo do perfil teórico de equilíbrio, bem como na determinação da rugosidade a ser empregada como dado de entrada no modelo SisBaHiA.

## 5.6 Perfil Teórico de Equilíbrio

O perfil teórico de equilíbrio foi computado usando-se a expressão matemática de Dean (1977).

$$h = Ay^m$$

Para essa expressão, foram testados o valor médio de  $m$  proposto por Dean (1977) de  $m=0,67$  e outros valores de  $m$  dentro da faixa indicada na literatura pelo método dos mínimos quadrados, para identificar o que apresentava melhor ajuste. O valor do parâmetro  $Y$  representa a extensão do perfil, enquanto que  $A$ , está relacionado ao tamanho do grão e à velocidade de assentamento do mesmo. O valor de  $A$  empregado foi estabelecido considerando-se as informações sobre a granulometria levantada ao longo dos perfis, e aplicando-se a tabela proposta por Dean (1997).

## 5.7 Profundidade de Fechamento

A profundidade de fechamento ( $h_*$ ) representa a profundidade limite no qual um perfil é equilibrado pela ação das ondas Dean, ( *op Cit* ). Para se determinar a profundidade de fechamento (Lermeier, 1978 *apud* Dean, 1997) desenvolveu a primeira formulação:

$$h_* = 2,28H_e - 68,5 \left( \frac{H_e^2}{gT_e^2} \right)$$

onde  $H_e$  e  $T_e$  são a altura significativa e o período das ondas que foram excedidas apenas doze horas por ano, ou 0,14% do tempo. (Birkemeier, 1985 *apud* Dean, 1997 ), valendo-se de dados amostrais, revisou a formulação propondo modificações no coeficiente:

$$h_* = 1,75H_e - 57,9 \left( \frac{H_e^2}{gT_e^2} \right)$$

Para a determinação da profundidade de fechamento na área de estudo, empregou-se a formulação proposta por Birkemeier (*op cit.*), utilizando os registros de onda medidos com um ondógrafo S4.

## 5.8 Hidrologia e Pluma Estuarina

Perfis verticais contínuos da superfície até próximo ao fundo, da distribuição vertical da temperatura, salinidade e da capacidade de retroespalhamento ótico foram obtidos nas 39 estação amostrais, com uso de um perfilador CTD Seabird SBE19 dotado de um sensor de retroespalhamento ótico (OBS). Os levantamentos foram realizados durante os estágios de preamar, vazante, baixa-mar e enchente, em marés de sizígia, a cada três meses, de forma a representar os períodos de estiagem e chuvoso, e os períodos de equinócio de outono e de primavera. Essa estratégia visou possibilitar investigar sazonalidade na distribuição dos parâmetros monitorados. Cada etapa de levantamento correspondeu a um período de cinco dias de mar, durante os quais eram amostrados dois perfis por dia. Este experimento possibilitou investigar principalmente a variabilidade entre as estações ao longo dos vários perfis (perpendicular a praia).

Durante sizíguas nos períodos de estiagem e chuvoso, foram também realizadas amostragens considerando-se apenas as estações mais próximas à praia, formando um perfil paralelo à mesma. Esse esquema visou permitir uma amostragem ao longo de toda a extensão da área de estudo em um único dia, e assim acessar a variabilidade ao longo da costa. Esses levantamentos foram igualmente conduzidos de forma a caracterizar os estágios de preamar, vazante, baixa-mar e enchente em cada período sazonal.

Perfis adicionais de CTD foram obtidos ao longo da área de estudo durante estágios de preamar e baixa-mar para os períodos de estiagem e chuvoso, visando identificar e delimitar a extensão de influência da Pluma Estuarina. A posição dos perfis bem como do limite visual da pluma foi igualmente identificada com uso de GPS.

Todos os perfis CTD obtidos, durante as várias campanhas foram submetidos a rotinas de filtragem para eliminação de valores espúrios e então integrados em sub-camadas de 10 cm de espessura, sendo considerado como representativos da camada superior, aqueles registrados para os primeiros 5 cm da coluna d'água.

## 5.9 Correntometria

Os levantamentos hidrodinâmicos foram realizados paralelamente a condução dos levantamentos hidrológicos e incluíram medições instantâneas da intensidade e direção das correntes, com uso de correntômetro Sensordata SD30. Essas medições foram realizadas a três níveis de profundidade: próximo a superfície, à meia-água e próximo ao fundo, durante estágios de preamar, baixa-mar, enchente e vazante de marés de sizígia.

Em laboratório, os dados de direção das correntes, obtidos em relação ao Norte magnético, foram então corrigidos da declinação magnética local para compatibilizá-los com o referencial da base cartográfica (Norte verdadeiro). Os vetores velocidades assim referidos foram empregados no cálculo de uma malha uniforme para a área, empregando-se o método de interpolação Kriging, considerando-se a variabilidade espacial como parâmetro de ajuste do tamanho da malha.

Os dados obtidos durante esses levantamentos foram utilizados na inferência da circulação na área e na avaliação do desempenho do modelo hidrodinâmico aplicado na área.

## 5.10 Clima de Onda

Para caracterização do clima de onda ao longo da área de estudo, um ondógrafo InterOcean S4AWI foi ancorado em dois pontos críticos da orla. Um na praia de Piedade (Fig. 20), defronte do Edf. Ancoradouro onde o processo erosivo já

está avançado, e outro ponto na praia de Boa Viagem na região do Perfil 5 (Fig. 13), onde um enrrocamento foi efetuado para mitigar o processo erosivo.

Em ambos os locais, o ondógrafo foi ancorado próximo à costa, a um metro do fundo, por um período de 8 dias, com obtenção de 2 registros por segundo durante períodos de 30 minutos, em ciclos de três horas.



Fonte: CPRH

**Figura 20.** Vista geral da área de ancoragem do ondógrafo S4, Praia de Piedade.

Os registros obtidos foram então submetidos a rotinas computacionais para permitir a geração dos seguintes parâmetros: alturas significativa e máxima, períodos significativo e de pico, ângulo de incidência e energia da onda. Paralelamente foram também obtidos registros da direção e intensidade de corrente próximo ao fundo, dados estes, importantes para se determinar o transporte sedimentar ao longo da costa.

## 5.11 Modelagem Matemática e Simulação Numérica

Modelos são ferramentas integradoras que nos fornece uma visão dinâmica de processos nos sistemas ambientais, podendo ser aplicado no auxílio à gestão ambiental. Os modelos podem ser utilizados na:

- Análise de diagnóstico, integrando informações espacialmente dispersas, estendendo o conhecimento para áreas sem medições e auxiliando no entendimento dos processos dinâmicos, facilitando a interpretação de medições em estações pontuais.
- Análise de prognóstico, prevendo situações através de simulações de cenários, auxiliando nas tomadas de decisões em licenciamento ambiental, planos de emergência e mitigação.

A modelagem matemática de sistemas naturais engloba um conjunto de equações capazes de reproduzir tanto a dinâmica de um escoamento quanto os processos físico-químicos que fazem parte do transporte de uma grandeza escalar. Estas equações normalmente são acopladas, não lineares e raramente possuem solução analítica conhecida devido à complexidade dos escoamentos naturais e dos processos envolvidos. A solução destas equações é obtida através de técnicas numéricas, as quais consistem basicamente na representação de um domínio contínuo em um domínio discreto, transformando equações diferenciais em sistemas algébricos cujas soluções podem ser obtidas por algoritmos computacionais (Rosso, 1996).

O uso de modelos computacionais neste estudo dá enfoque a rotinas para previsão de escoamentos de corpos de água (quantidade), também conhecidos como “modelos hidrodinâmicos”.

A ferramenta computacional utilizada nesta pesquisa 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.

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 de modelos computacionais para estudos e projetos aplicável 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 têm sido desenvolvidas, desde então, utilizando este sistema, como> Malta (2005); Trento(2005); Soto(2004); Feitosa(2003); Amaral(2003); Gabioux(2002) e Santos(2002), bem como publicações em periódicos: Cunha *et al.*, (2006); Gabioux *et al.*(2005); Martins *et al.*(2002).

Este sistema computacional se divide em diversos módulos, dentre eles o hidrodinâmico, o de transporte Lagrangeano (probabilístico e determinístico), os quais foram utilizados nesta pesquisa.

O Modelo Hidrodinâmico é um modelo de circulação hidrodinâmica 3D ou 2DH dominado por forçantes barotrópicos, e otimizado para corpos de água naturais nos quais os efeitos de densidade variável possam ser desprezados.

O Modelo de Transporte Lagrangeano - Determinístico é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH. Este modelo é especialmente adequado para simular: plumas de emissários ou pontos de lançamento de efluentes ao longo da costa, derrames de óleo, instantâneos ou por período definido, Transporte

de detritos flutuantes, determinação de tempos de residência em corpos de água naturais, Determinação de tendências de deriva, determinação de correntes residuais lagrangeanas. O modelo permite optar por transporte livre ou condicionado. Modelagens com transporte condicionado são especialmente úteis em análises de processos sedimentológicos. O transporte pode ser condicionado por valores mínimos de velocidade ou de tensão no fundo exercida só por correntes, ou de tensão no fundo exercida conjuntamente por ondas e correntes.

Modelo de Transporte Lagrangeano - Probabilístico: acoplado ao modelo anterior, permite obtenção de resultados probabilísticos computados a partir de  $N$  eventos ou de resultados ao longo de um período de tempo.

A modelagem hidrodinâmica consiste na 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 (Filted 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 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 sub-malha.

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.

### **5.11.1 Equações básicas**

#### **(a) Módulo 3D**

Os modelos matemáticos que descrevem o movimento de um fluido são simplificações das equações de Navier-Stokes, as quais representam a equação de conservação da quantidade de movimento, em conjunto com a equação de continuidade, uma equação de estado e uma equação de transporte para cada constituinte da equação de estado (Rosman, 2001; Soto, 2004).

A equação da conservação da quantidade de movimento para escalas resolvíveis para as três direções, considerando um referencial Euleriano, é escrita abaixo.

Equação da quantidade de movimento na direção x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \sin \theta v \quad (\text{Eq.1})$$

Equação da quantidade de movimento na direção y:

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

Equação da quantidade de movimento na direção z:

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

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,  $\rho$  é a densidade local do fluido e  $\rho_o$  é uma densidade constante de referência.  $\Phi$  é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local e os termos com  $\Phi$  são as forças de Coriolis, no qual  $\theta$  é o ângulo de Latitude.  $\tau_{ij}$  é o tensor de tensões turbulentas e é expresso por:

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

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

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:

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

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  $z$  (Eq.3) que é expressa como:

$$P(z) = P(\zeta) + \int_z^{\zeta} \rho g dz + P_d \quad (\text{Eq.6})$$

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 (Eq.6) acima, resultando em:

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

Considerando que a pressão atmosférica  $P_{atm}$  permanece praticamente homogênea quando esta se encontra em domínios relativamente pequenos e utilizando a equação (Eq.7) acima nas equações da quantidade de movimento na direção  $x$  (Eq.1) e  $y$  (Eq.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  $x$ :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \sin \theta v \quad (\text{Eq.8})$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \sin \theta u \quad (\text{Eq.9})$$

No entanto, diante das 3 equações descritas – (5), (8) e (9) – há 4 incógnitas ( $u, v, w, \zeta$ ) sendo, então, necessária uma quarta equação. Para tanto, é obtida uma equação para 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:

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

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

O módulo 3D calcula diretamente as tensões verticais atuando nos planos horizontais ( $\tau_{iz}$ ). Porém, os efeitos de tensões horizontais atuando em planos verticais, ( $\tau_{xx}, \tau_{xy} = \tau_{yx}$  e  $\tau_{yy}$ ) 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:

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

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

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

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 deste 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  $z = (x, y, t)$  e as componentes das velocidades médias na vertical, na direção  $x$  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:

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

A equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical para um escoamento 2DH, considerando tais promediações acima (Eq.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 (Eq.8) e (Eq.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:

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

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

onde,  $\tau_i^S$  e  $\tau_i^B$  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  $P_{air}$  é a densidade do ar,  $C_D$  é o coeficiente de arraste do vento,  $W_{10}$  é o valor local da velocidade do vento medida a 10 metros acima da superfície livre, e  $\phi_i$  é o ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção  $x_i$ . O coeficiente de arraste do vento,  $C_D$ , pode ser determinado a partir de uma série de fórmulas empíricas. A fórmula adotada no modelo FIST3D é a apresentada por Wu (1982):

$$C_D = (0,80 + 0,065 W_{10}) \times 10^{-3} \quad [W_{10} \text{ em m/s}]$$

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

$$\tau_i^B = \rho_0 \beta U_i \quad [i=1,2] \quad (\text{Eq.18})$$

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

$$\beta = \frac{\sqrt{g}}{C_n} |u_*| \quad (\text{Eq.19})$$

onde, é o coeficiente de Chézy e é definido por:

$$C_n = 18 \log_{10} \left( \frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (\text{Eq.20})$$

sendo  $\varepsilon$  a rugosidade equivalente no fundo.

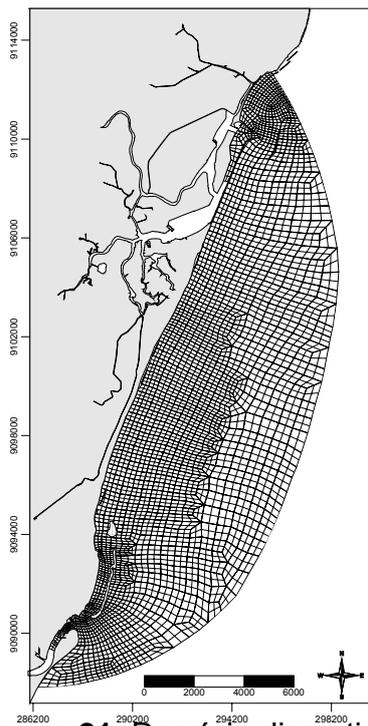
### 5.11.2 Aplicação do Modelo Hidrodinâmico

A aplicação do módulo hidrodinâmico do modelo SisBaHiA visou, através de algumas simulações, determinar o padrão de circulação na área sob diversos cenários. Os resultados numéricos foram comparados com os dados amostrados em campo. Uma vez validado, o modelo pode ser empregado em várias situações, como por exemplo, para determinar as alterações no campo de correntes com a colocação ou retirada de estruturas rígidas de contenção.

O domínio modelado compreende uma faixa de costa de aproximadamente 27 km, indo da praia do Paiva (25L 291693; 9096034) até a praia de Del Chifre (25L 295854; 9112605), abrangendo desde a linha de costa até a isóbata aproximada de 17 metros. O domínio englobou o estuário de Barra das Jangadas e a Bacia do Pina. O volume total do corpo d'água é subdividido em volumes parciais por meio de uma rede de grades, convenientemente definidas. A intersecção dessas grades determina os chamados pontos nodais (ou nós), nos quais as soluções das equações são determinadas. Para a área gerou-se computacionalmente uma malha de elementos finitos com 876 elementos quadráticos.

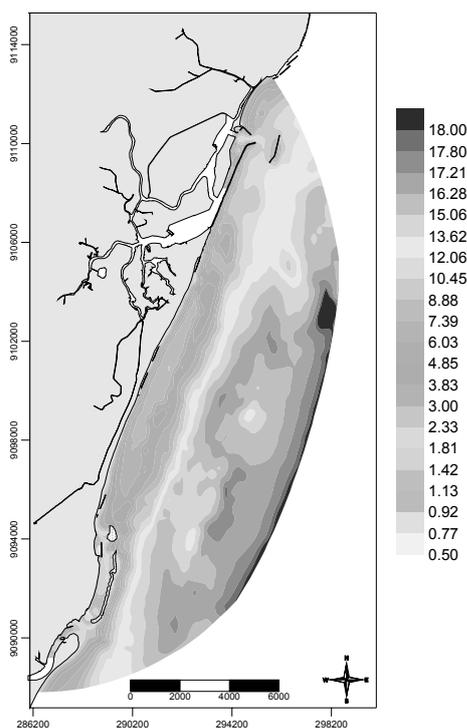
As regiões de maior interesse para os processos costeiros, como saída de estuário e proximidade à praia, houve um refinamento, com maior quantidade de elementos por área. No total foram gerados 3703 nós, sendo: 3307 nós internos, 283 nós no contorno de terra e 115 no contorno de mar.

No total o domínio discretizado (Fig. 21) teve uma área de 135691229,155 m<sup>2</sup> e um volume de 1678610678,300 m<sup>3</sup>. No módulo 3D foram definidos 21 níveis de profundidade ao longo da coluna d'água (da superfície ao fundo). As simulações foram realizadas com um intervalo de tempo de integração ( $\Delta t$ ) de 50 segundos, onde foi obtido o valor médio do número de Courant de 4,57.



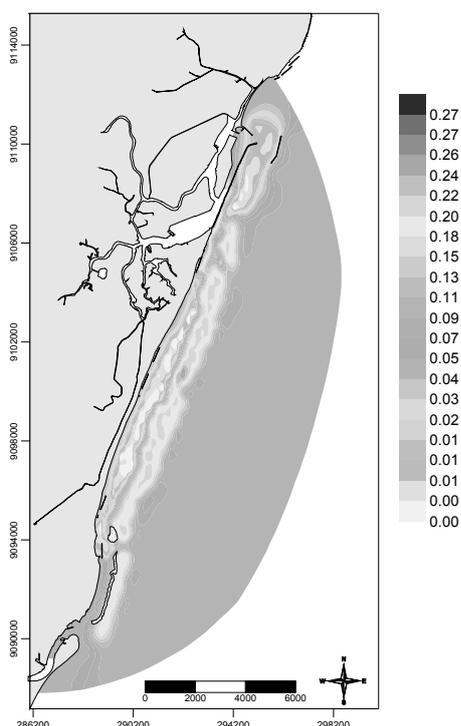
**Figura 21.** Domínio discretizado

Uma vez gerada a malha discretizada, a mesma foi alimentada com os dados de entrada, como a batimetria, a rugosidade e as constantes harmônicas da maré. A batimetria utilizada nas simulações (Fig. 22) foi a do levantamento realizado na área durante esta pesquisa.



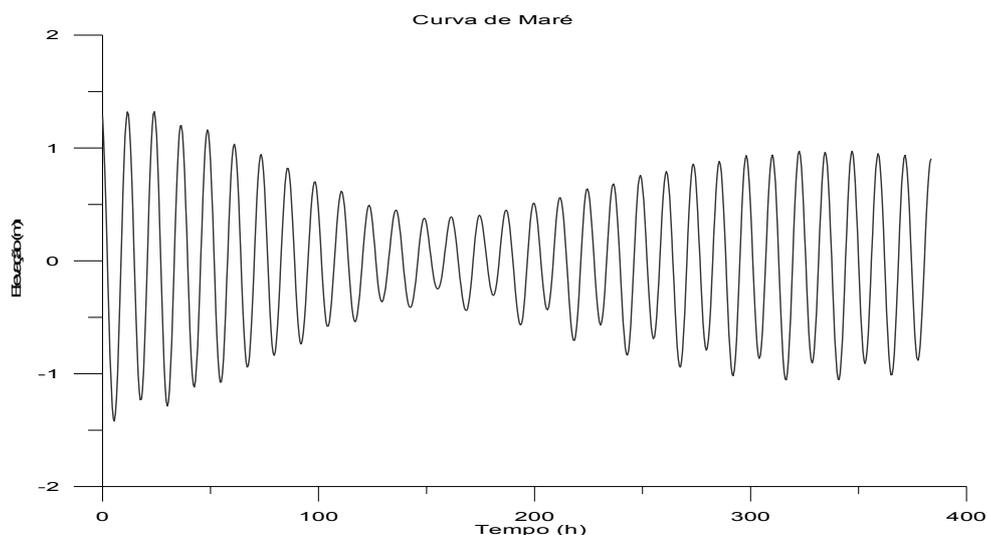
**Figura 22.** Batimetria utilizada nas simulações

Para se determinar a rugosidade a ser empregada na área, utilizaram-se os resultados da cobertura sedimentar da plataforma e empregou-se a tabela de Valores recomendados para a rugosidade equivalente de fundo proposta por Abbot e Basco (1989) *apoud* Rosman 2001. Os valores foram interpolados pelo método Krigim e ajustados em função da análise batimétrica, gerando o Padrão de distribuição da rugosidade para a área (Fig. 23).



**Figura 23.** Padrão de distribuição da rugosidade para a área

Para as simulações, utilizou-se como condição de contorno de elevação do nível do mar, as curvas de maré apresentadas na Figura 24, geradas com as principais constantes harmônicas para o Porto do Recife do catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2006) listadas na Tabela 2.



**Figura 24:** Curvas de maré utilizadas na simulação

As condições iniciais 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 ( $\zeta$ ). 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.

As simulações foram realizadas com velocidades horizontais começando do zero, denominada de “partida a frio”, e com elevação inicial da superfície livre ( $\zeta$ ) de 2,42 m, correspondendo ao estágio de preamar da maré de sizígia. Os parâmetros utilizados na condição inicial do Modelo hidrodinâmico, são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 2:** Principais constantes harmônicas para o Porto do Recife.

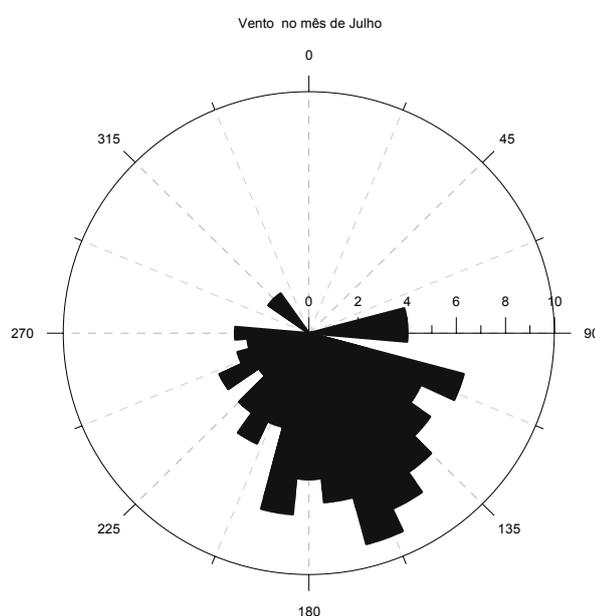
CONSTANTE	PERÍODO (SEG)	AMPLITUDE (M)	FASE (RAD)
2N2	46459.348	0.024	1.5882
K1	86164.091	0.043	3.9444
K2	43082.045	0.081	2.0769
L2	43889.833	0.015	2.3213
M1	89399.694	0.005	5.9865
M2	44714.164	0.762	1.9373
M3	29809.443	0.008	1.9199
M4	22357.082	0.009	2.042
MNS2	42430.071	0.006	1.309
MS4	21972.021	0.006	5.2709
MSf	1275721.388	0.01	6.1087
Mm	2380713.137	0.01	0.8029
N2	45570.054	0.153	1.7977
O1	92949.630	0.05	2.4435
P1	86637.205	0.014	3.8223
Q1	96726.084	0.014	1.9897
S2	43200.000	0.275	2.1991
T2	43259.217	0.014	2.0944
mu2	46338.327	0.027	1.6232
nu2	45453.616	0.03	1.7802

**Tabela 3** Condições iniciais para as simulações com o SisBaHiA

PERÍODO SIMULADO	1382400 SEG. (16 DIAS)
Passo de tempo ( $\Delta t$ )	50 seg.
Número <i>Courant</i> médio	4,57
Níveis verticais	21
Vento	Variável e uniforme
Nível médio	1,14m
Elevação	2,42m

Dois cenários foram simulados:

**Cenário 1** – Período chuvoso, onde 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 para o mês de julho de 2005 (Fig. 25) de modo a representar um período mais extremo típico de inverno. Neste cenário predominaram ventos vindo de S, SE com intensidades chegando a  $8\text{m.s}^{-1}$ . Estes dados foram fornecidos pela estação meteorológica do Aeroporto dos Guararapes junto a Divisão Meteorológica do CINDACTA III.



**Figura 25:** intensidade e direção do vento em julho/2005.

**Cenário 2** - Simulação do cenário NE, considerou-se um vento com direção de 60 graus, valor este estipulado através da análise de registro de 3 anos, onde esse valor obteve a maior frequência dentre os registros de N NE. Nesta direção prevaleceu a intensidade média de  $4,11\text{ m.s}^{-1}$ , valor este considerado na simulação.

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos ao longo do presente trabalho são apresentados e discutidos nas seções a seguir.

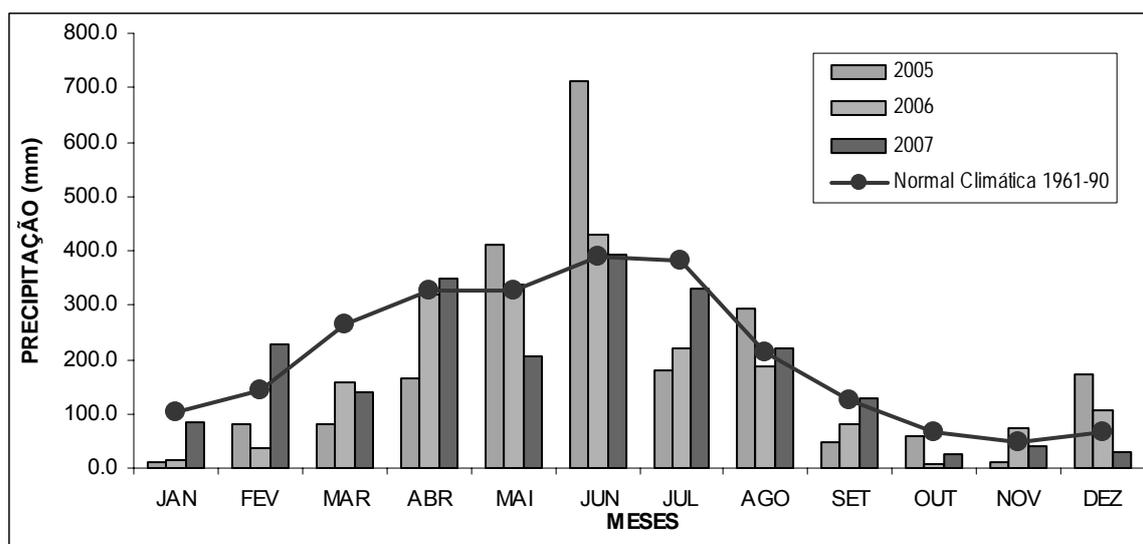
### **6.1 Condições Meteorológicas**

A região onde está inserida a área de estudo apresenta clima tropical úmido. A temperatura do ar é elevada, com média anual entre 22 °C e 26 °C. A área apresenta alta insolação com totais anuais de horas de brilho de sol de 2200 a 3200. A evaporação é também elevada, variando de 800 a 1800 mm anuais. A umidade relativa do ar média anual oscila entre 50% e 90%. (Aragão, 2004).

#### **6.1.1 Precipitação Pluviométrica**

O volume de precipitação pluviométrica anual na região é de cerca de 2000 mm e responde a seis sistemas atmosféricos: a Zona de convergência intertropical (ZCIT), as bandas de nebulosidade associadas a frentes frias, os vórtices ciclônicos de ar superior (VCAS), as brisas terrestres e marítimas, as oscilações de 30-60 dias e, principalmente aos distúrbios de Leste (perturbações e ondas de leste) que localmente ocorrem de maio a agosto caracterizando o período chuvoso, com os demais meses correspondendo ao período de estiagem.

A precipitação mensal acumulada para os anos de 2005, 2006 e 2007 para a estação meteorológica do Curado, é apresentada ao lado de sua normal climática de 31 anos (1960-1991) (Fig. 26).

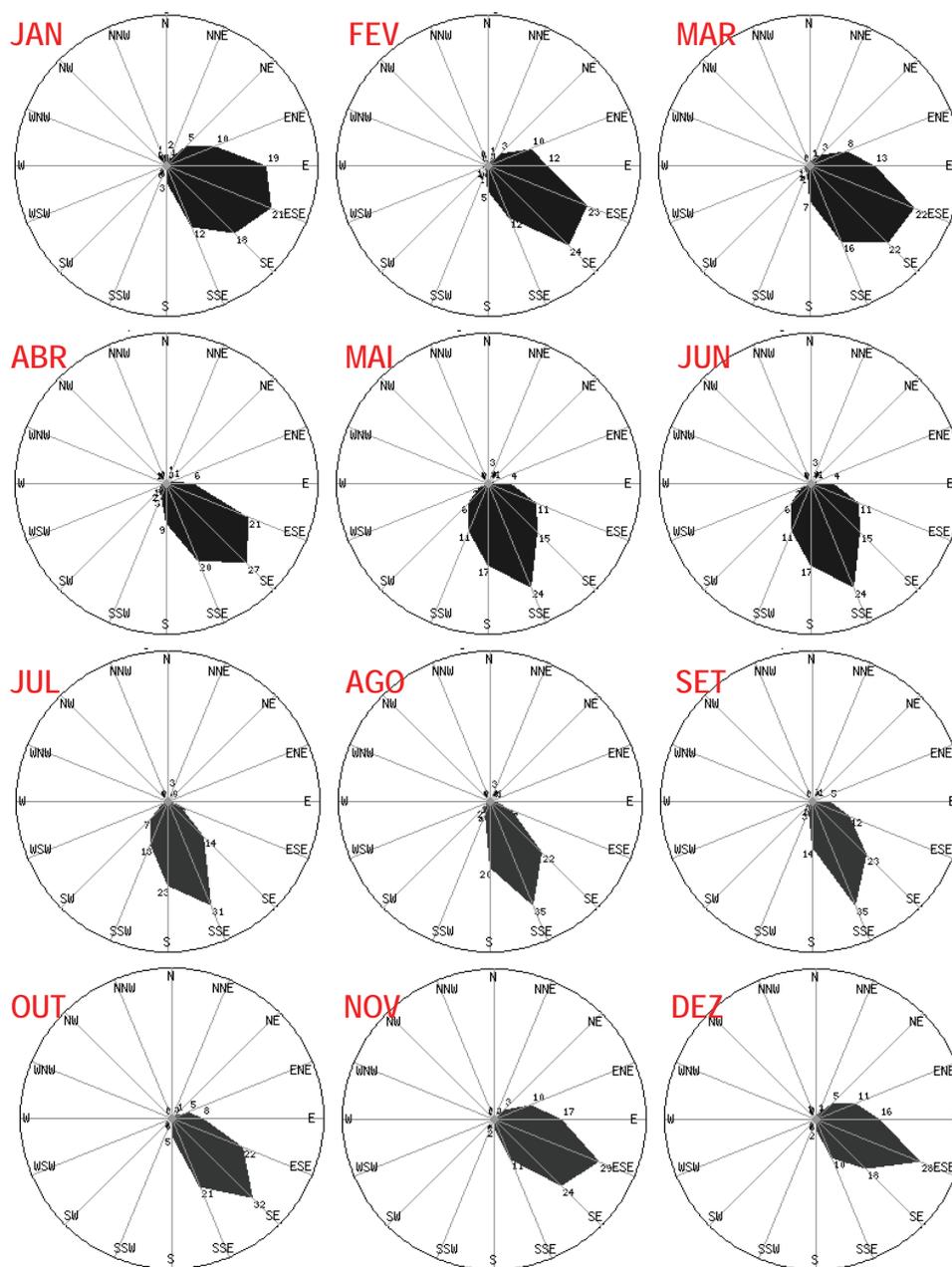


**Figura 26** Precipitação mensal em Recife durante os anos de 2005, 2006 e 2007 e Normal Climatológica 1960-91.

Relativo à normal climática, o ano de 2005 apresentou-se mais seco durante os períodos de jan-abril e de set-nov, e excepcionalmente chuvoso nos meses de dezembro e junho, neste último com um volume de chuvas superior a 700 mm. O ano de 2006 apresentou um regime de chuvas mais próximo da normal climática, mas baixa precipitação de jan-março. O regime de chuvas durante o ano de 2007 foi típico da região, aproximando bem a normal climática.

### 6.1.2 Regime de Ventos

A zona costeira de Pernambuco está situada em região de baixa latitude e altitude, sujeita a baixas pressões atmosféricas (1016 mBar), com grandes extensões 3 a 4 m acima do nível médio do mar e sob influência de ventos alísios. Ventos predominantes nos meses de janeiro a dezembro para o período de 2002-2008 para a área da Região Metropolitana do Recife (Aeroporto dos Guararapes) são apresentados na Figura 27



**Figura 27.** Regime dos Ventos. Médias mensais. Aeroporto dos Guararapes. 2002 a 2008. CINDACTA III.

Durante o período de fevereiro a setembro predominam ventos de SE com velocidades médias de  $2,6$  a  $4,0 \text{ m.s}^{-1}$ , com ventos mais intensos nos meses de julho e agosto. Durante os meses de outubro e janeiro, predominam ventos E-SE com velocidades de  $3,0$  a  $3,2 \text{ m.s}^{-1}$ . Ventos de ventos E-NE e menos intensos ( $2,0$  a  $2,1 \text{ m.s}^{-1}$ ) ocorrem com mais frequência nos meses de novembro e dezembro.

## 6.2 Morfobatimetria

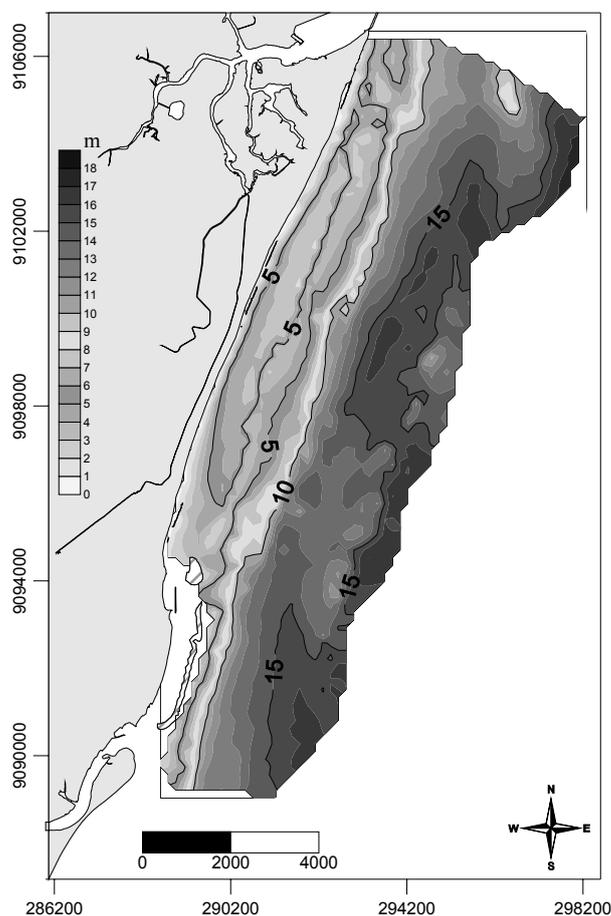
A ecobatimetria é uma ferramenta geofísica utilizada para o estudo do fundo dos oceanos. Os levantamentos com emprego de ecobatímetro, funciona através da emissão, transmissão e reflexão de ondas acústicas entre dois ou mais meios físicos de propriedades elásticas distintas (coluna d'água, camadas sedimentares, etc.). Em estudos costeiros, a ecobatimetria pode ser empregada para determinar a profundidade da lâmina d'água, mapear o fundo, identificar sedimentos superficiais e variações na sua distribuição bem como para determinar feições de fundo e localizar estruturas feitas pelo homem.

O levantamento batimétrico da área gerou informações essenciais para a execução dos outros experimentos, como a análise de correntes e ondas, permitindo também a programação dos pontos de ancoragem do ondógrafo S4 e a seleção dos perfis e estações de coleta, otimizando as informações sobre os parâmetros físicos da área.

A determinação de feições como linhas de recifes e canais, além de favorecer o entendimento geológico da plataforma local, foi fundamental para as coletas sedimentológicas. Os pontos cotados durante o levantamento batimétrico serviram ainda como base de entrada para as simulações numéricas realizadas com o modelo SisBAHIA.

O levantamento batimétrico permitiu a detecção de feições importantes para os processos costeiros da área. Observa-se por quase toda a extensão da área de estudo, a presença de um recife submerso distando aproximadamente 1000 metros da costa, com seu topo localizado a uma profundidade variável de quatro a dez metros. Um modelo digital de terreno (MDT) elaborado para a área de estudo a partir do levantamento batimétrico realizado, é apresentado na Fig. 28.

Ao norte da área levantada o recife se localiza mais próximo à praia, à cerca de aproximadamente 500 metros. A largura aproximada do recife entre as praias do Pina e Piedade é de 1000 metros.



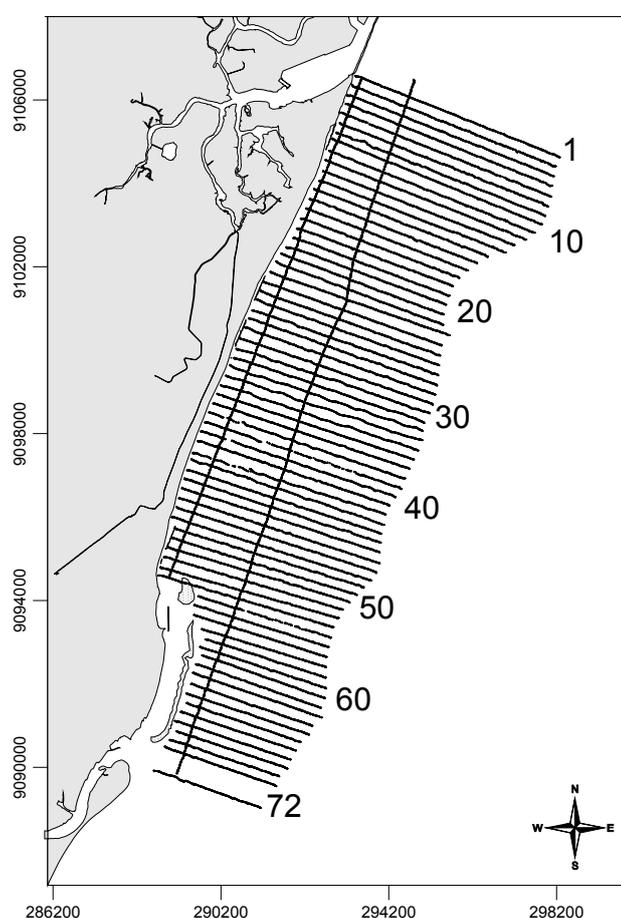
**Figura 28.** Modelo digital de terreno (MDT) para a área de estudo

Na praia de Candeias o recife tem uma largura menor, aflorando em alguns pontos durante a baixa-mar de sizígia.

Ao longo das praias do Pina e Boa viagem, verifica-se a formação de um canal entre a linha principal de recifes e a linha de praia com uma profundidade de cerca de 7 m. Na direção sul o canal vai se tornando mais raso, com profundidades de cerca de 4 metros ao longo da praia de Piedade, e ao longo da praia de Candeias, já o canal já não é mais encontrado. Não foi possível prospectar com eco-sonda o trecho da praia de Candeias próximo à costa ao sul do dique, uma vez que o mesmo é extremamente raso (cerca de

50 cm), não permitindo a navegação. A região externa aos recifes e norte da área apresenta igualmente baixas profundidades sendo conhecida como *Banco Ituaba*.

Para uma melhor caracterização da área, foram plotados 72 perfis verticais extraídos dos levantamentos batimétricos (Fig. 29), estando o perfil 1 no extremo norte da área e o perfil 72 no extremo sul.



**Figura 29.** Indicação dos perfis de sondagem batimétrica

Os perfis 1 a 12 (Fig. 30) abrangem o bairro de Brasília Teimosa e o início da praia do Pina. Este trecho caracteriza-se pela presença de uma pós-praia preservada e de pequenas dunas e pela ocorrência de recifes semi-submersos a cerca de 100 metros da costa.

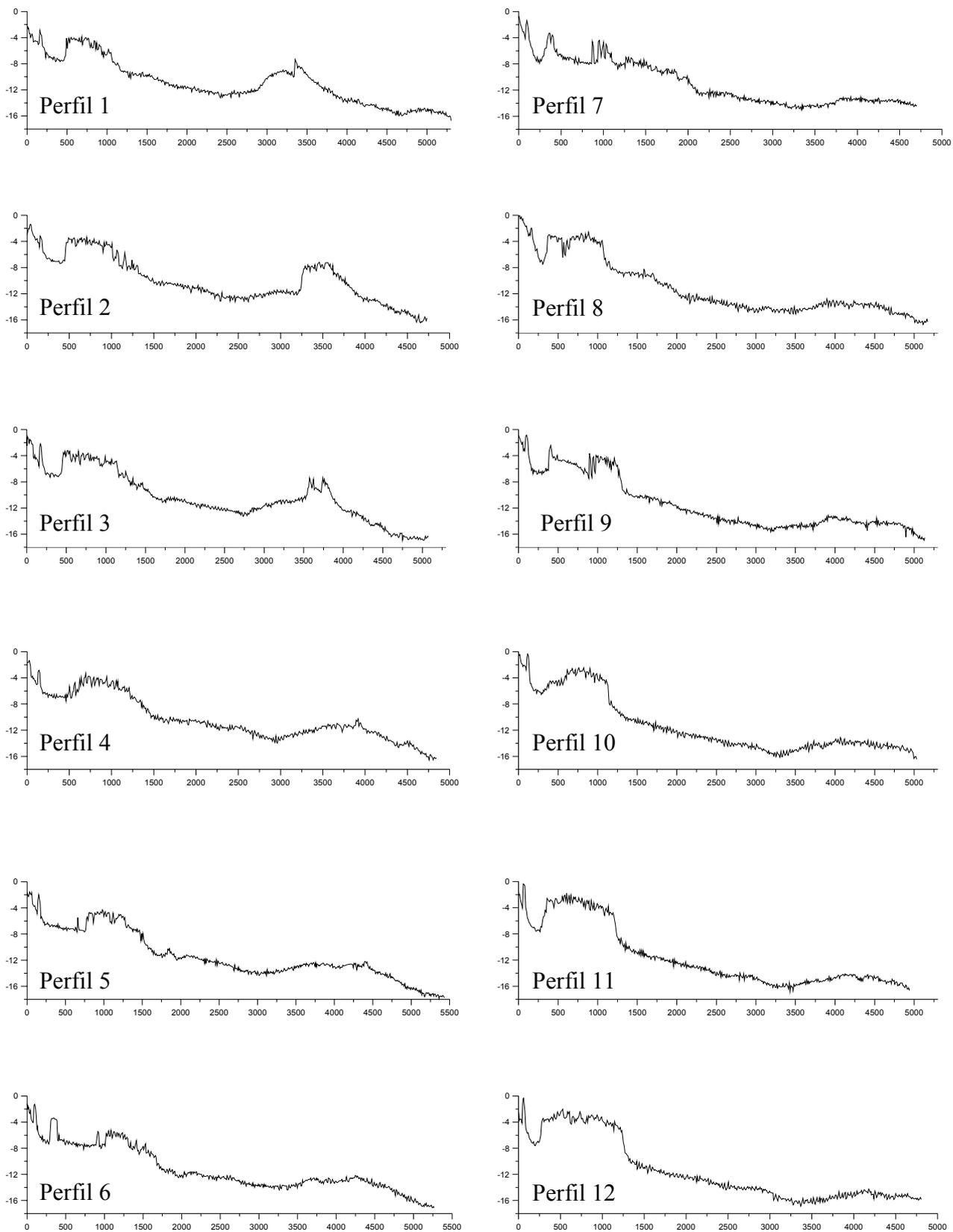
Os perfis 13 a 24 (Fig. 31) estão localizados na praia do Pina. Aqui o recife tende a se afastar da costa e uma segunda linha de recifes bem próxima a costa está presente no trecho correspondendo aos perfis de 13 a 18.

Os perfis 25 a 36 em Boa Viagem são apresentados na figura 32. É nesta região que o recife apresenta-se mais afastado da costa e o canal costeiro é mais profundo, atingindo 7m. A praia de Boa Viagem possui próximo do seu limite sul, um trecho de 2 km de praia protegido por um enrocamento. Ao longo deste setor tanto ocorre praias abrigadas por recifes quanto expostas.

Os perfis 37 a 48, correspondendo ao trecho da praia de Piedade está representado na figura 33. Nesta região a profundidade do canal tende a diminuir em direção ao sul, bem como a declividade do perfil. O trecho sul da praia apresenta grave problema de erosão, comprometendo algumas estruturas edificadas. O início deste problema parece estar relacionado a construção de um dique no litoral de Candeias.

Os perfis de 49 a 54 (Fig. 34) encontram-se no limite sul da praia de piedade. A partir do perfil 55, a navegação não pode ser feita até próximo a praia, estando o zero do gráfico na face externa do recife que se entende por toda praia de Candeias, distante 500m da linha de praia. Na baixa-mar de sizígia, alguns poucos pontos deste recife afloram, ficando o restante numa cota muito próxima a zero. Apesar desta proteção natural, a praia de Candeias apresenta muitos trechos em erosão. Ao longo de sua extensão, existem enrocamentos, espigões e, no limite de Candeia com Piedade, um dique, construído na frente da única abertura existente nos recifes. Em Candeias, muitas construções não respeitaram os limites da pós-praia o que acentua mais ainda os problemas de erosão.

Os perfis 61 a 72 (Fig. 35), próximo à saída do estuário de barra de jangadas. Na sua desembocadura ocorre grande deposição de sedimentos, formando bancos arenosos que migram sazonalmente.



**Figura 30.** Detalhe dos perfis batimétricos 1 a 12. Praia do Pina.

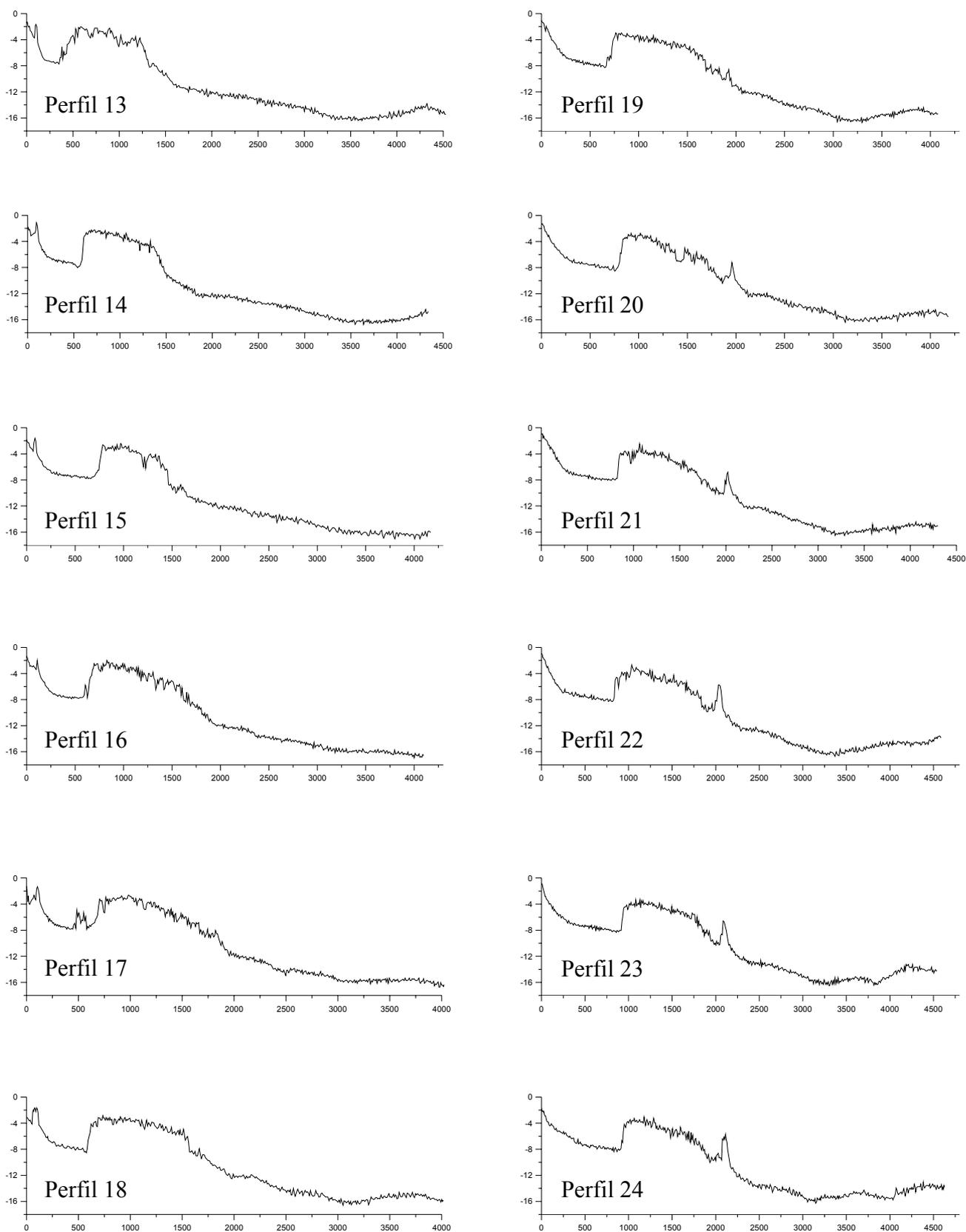


Figura 31. Detalhe dos perfis batimétricos 13 a 24. Praia do Pina.

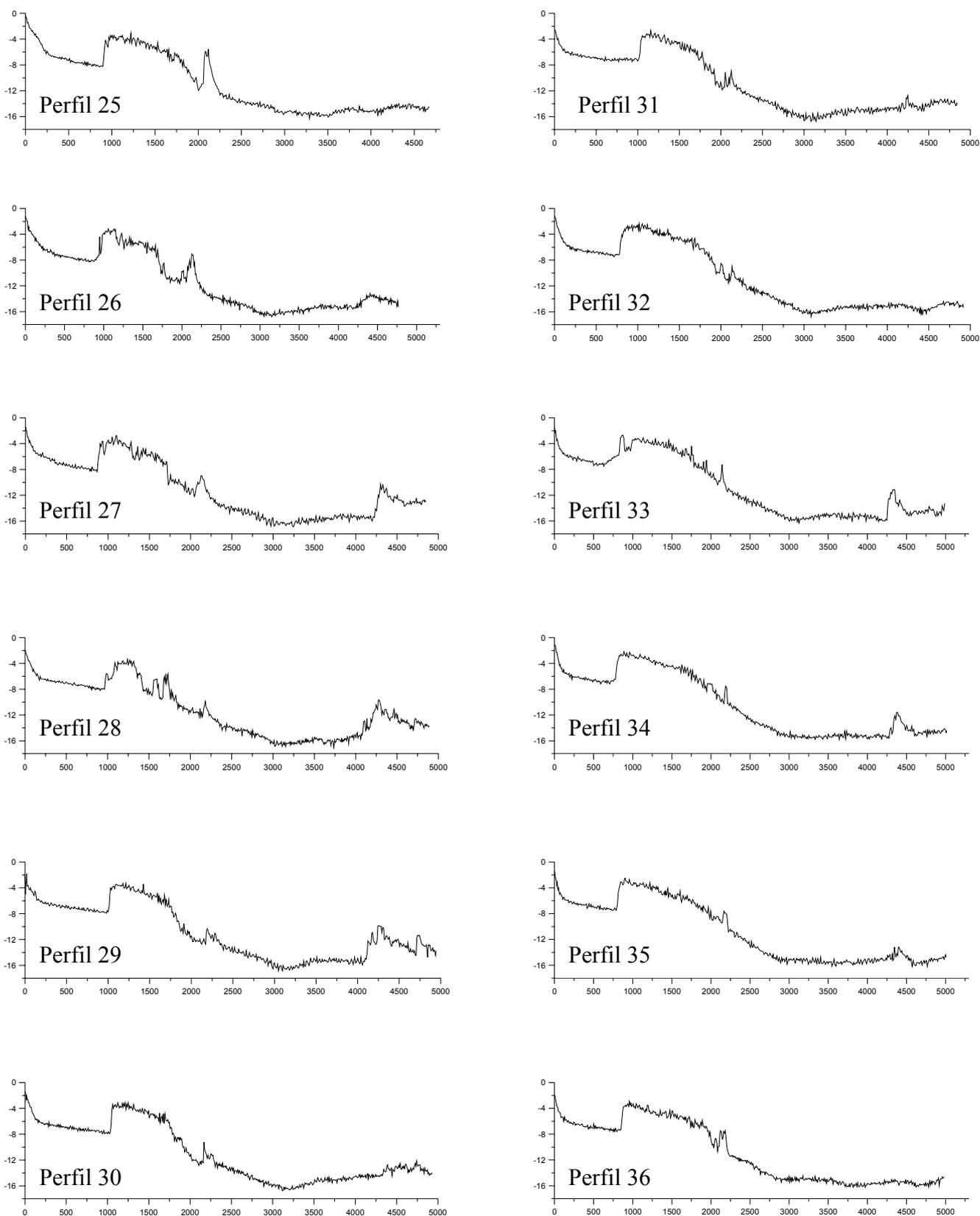
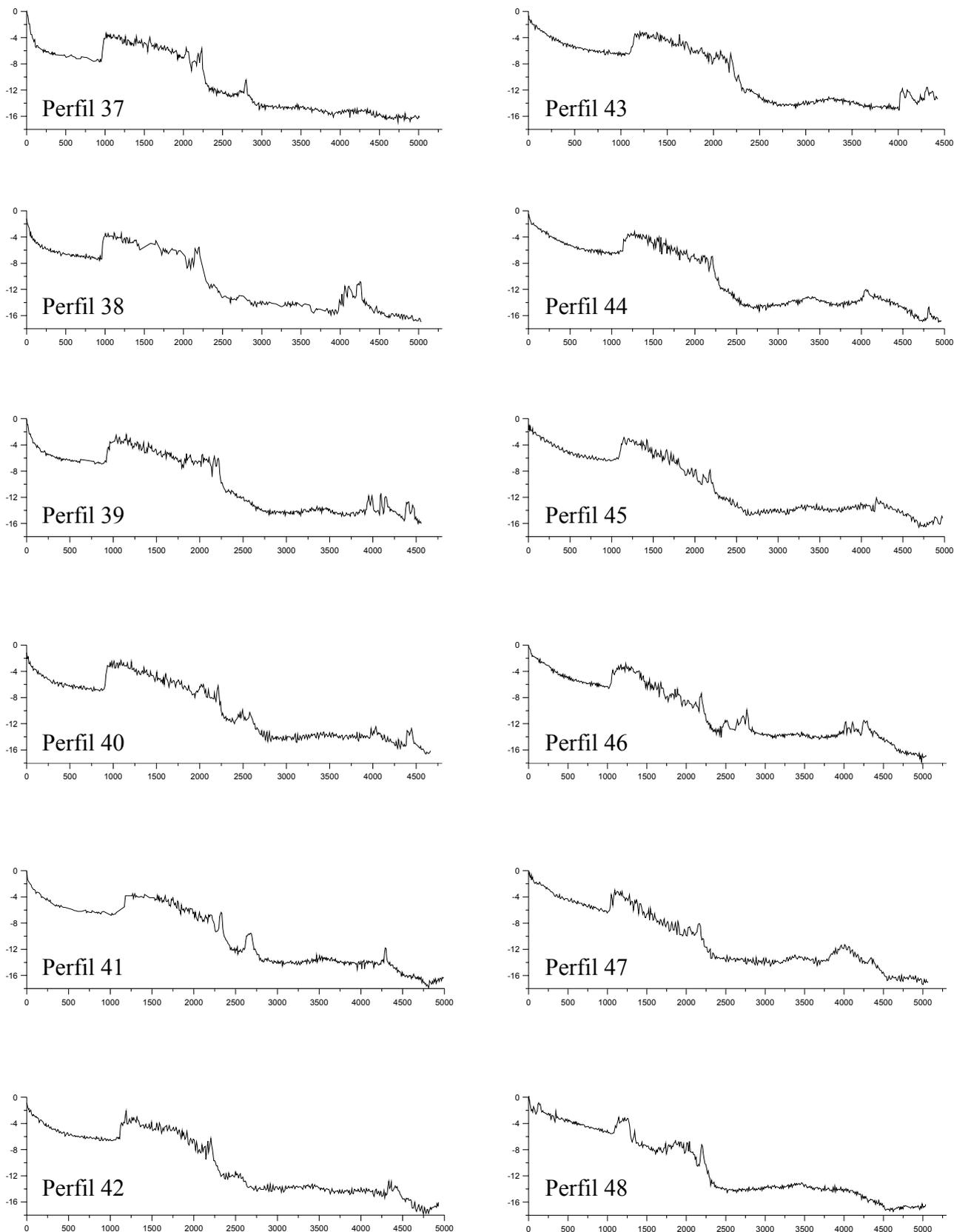


Figura 32. Detalhe dos perfis batimétricos 25 a 36. Praia da Boa Viagem.



**Figura 33.** Detalhe dos perfis batimétricos 37 a 48. Praia de Piedade.

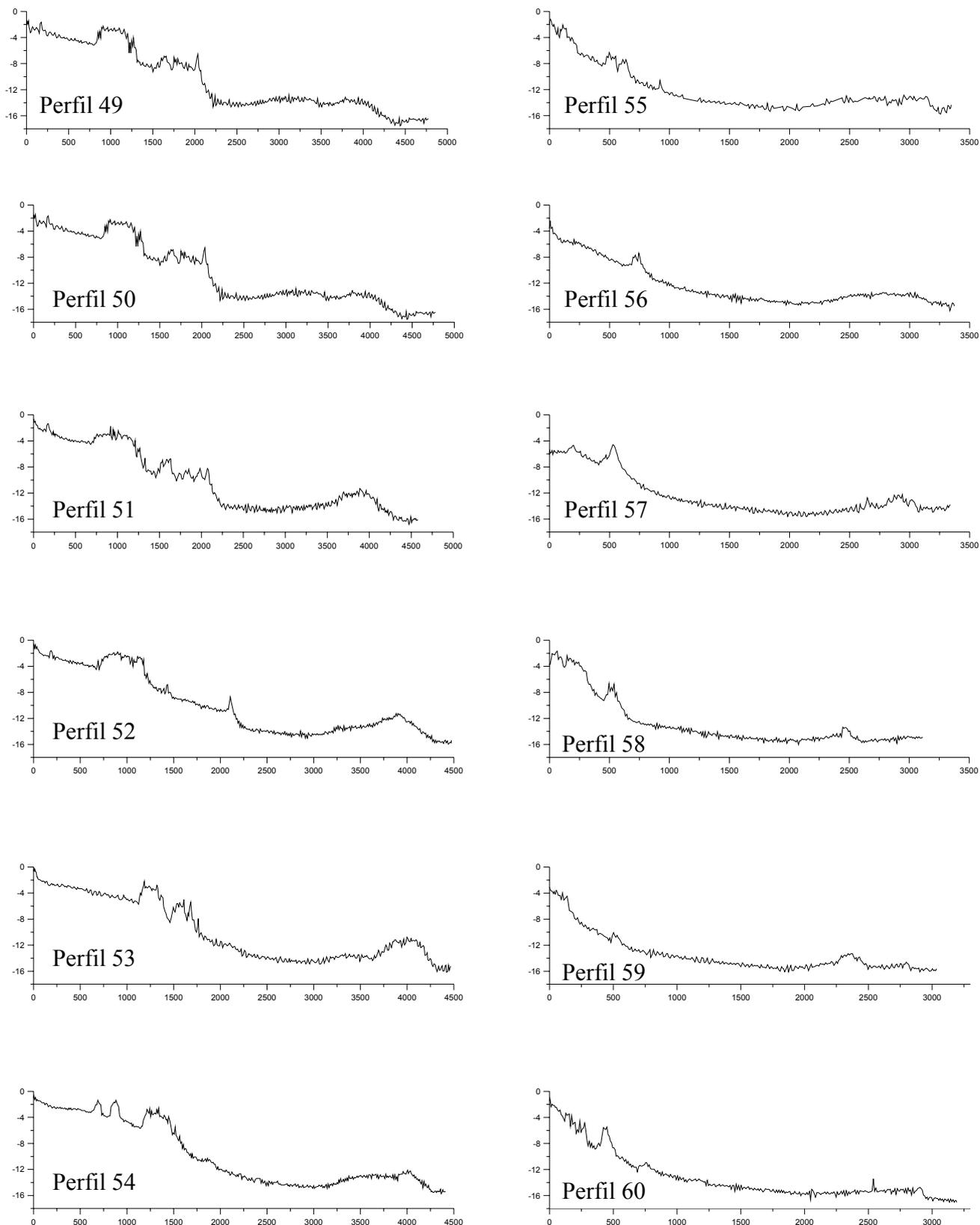
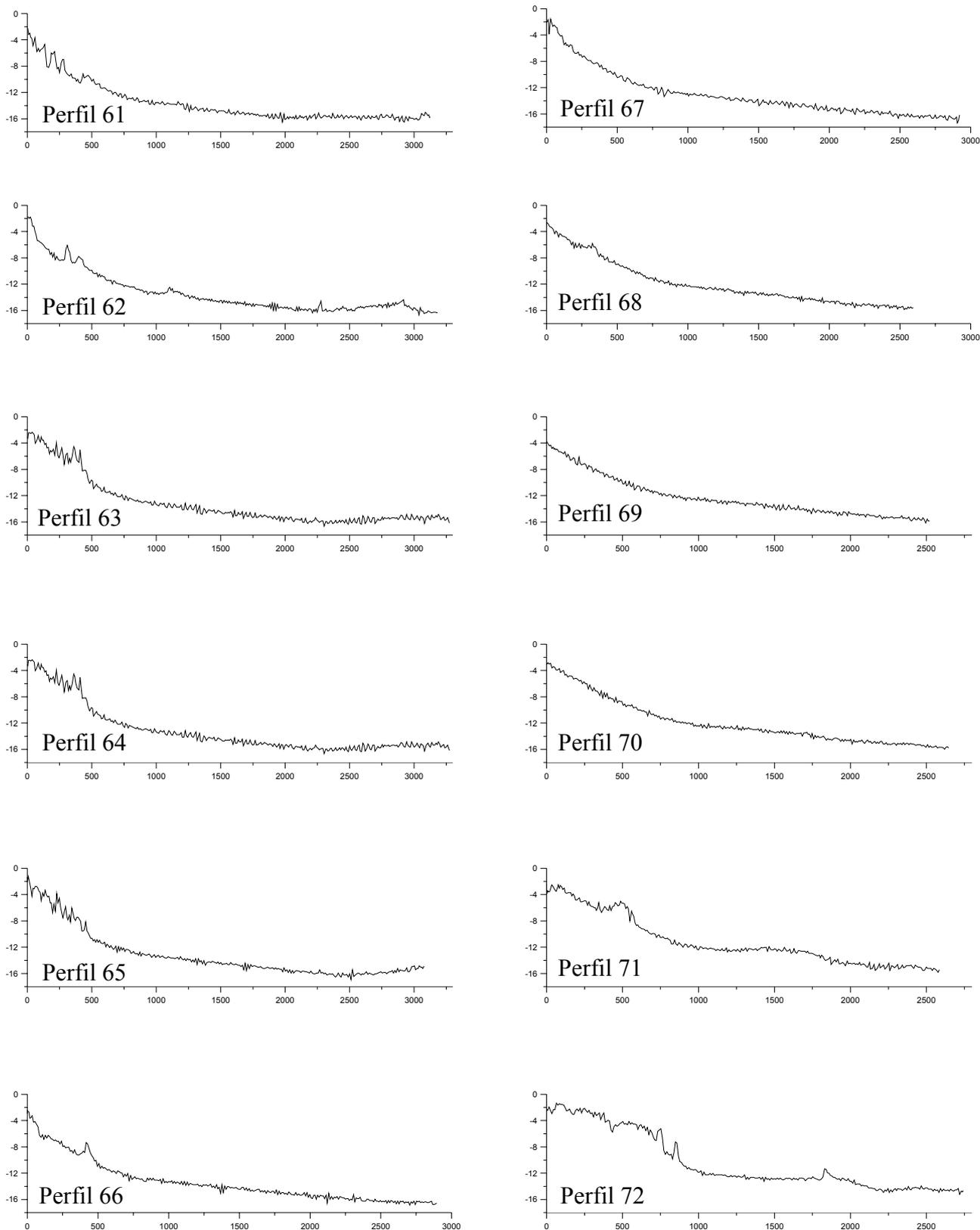


Figura 34. Detalhe dos perfis batimétricos 49 a 60. Praias de Piedade e Candeias



**Figura 35.** Detalhe dos perfis batimétricos 61 a 72. Praia de Candeias próximo ao estuário de Barra das Jangadas.

### 6.3 Perfil Teórico de Equilíbrio

O conceito de perfil de equilíbrio de uma praia tem sido largamente empregado tanto na engenharia costeira teórica quanto prática. Ele pressupõe que o perfil assume uma forma final sob condições constantes de ondas em determinados padrões granulométricos.

Análise comparativa dos perfis reais, obtidos durante os levantamentos batimétricos, com os perfis teóricos praias de equilíbrio são apresentados nas Figuras 36 e 37, juntamente com a indicação da composição da cobertura sedimentar para os pontos de coleta ao longo do perfil e a profundidade de fechamento do perfil.

Esses perfis foram computados segundo Dean (1977) considerando-se a granulometria predominante para os pontos amostrados ao longo do perfil. Inicialmente considerou-se um valor de  $m=0,67$ , valor típico utilizado em praias arenosas nas costas americana, australiana, etc. (Larson *et al.*, 1999); (Baquerizo *et al.*, 1998); (González *et al.* 1999); (Bernabeu *et.al.*, 2002) (Bernabeu *etal.*, 2003).

No entanto, o ajuste do modelo pareceu não ser o mais adequado para as praias em estudo. Uma série de testes foi então realizada visando otimizar esse parâmetro na busca de um melhor ajuste.

De forma geral, o valor de  $m=0,87$  foi aquele que resultou em um menor resíduo e conseqüentemente melhor aproximou o relevo local, tendo em vista seu declive mais acentuado. Exceção se fazendo para o perfil 3, com topografia suave, onde a utilização de um valor de  $m=0,67$ , mostrou-se mais adequada.

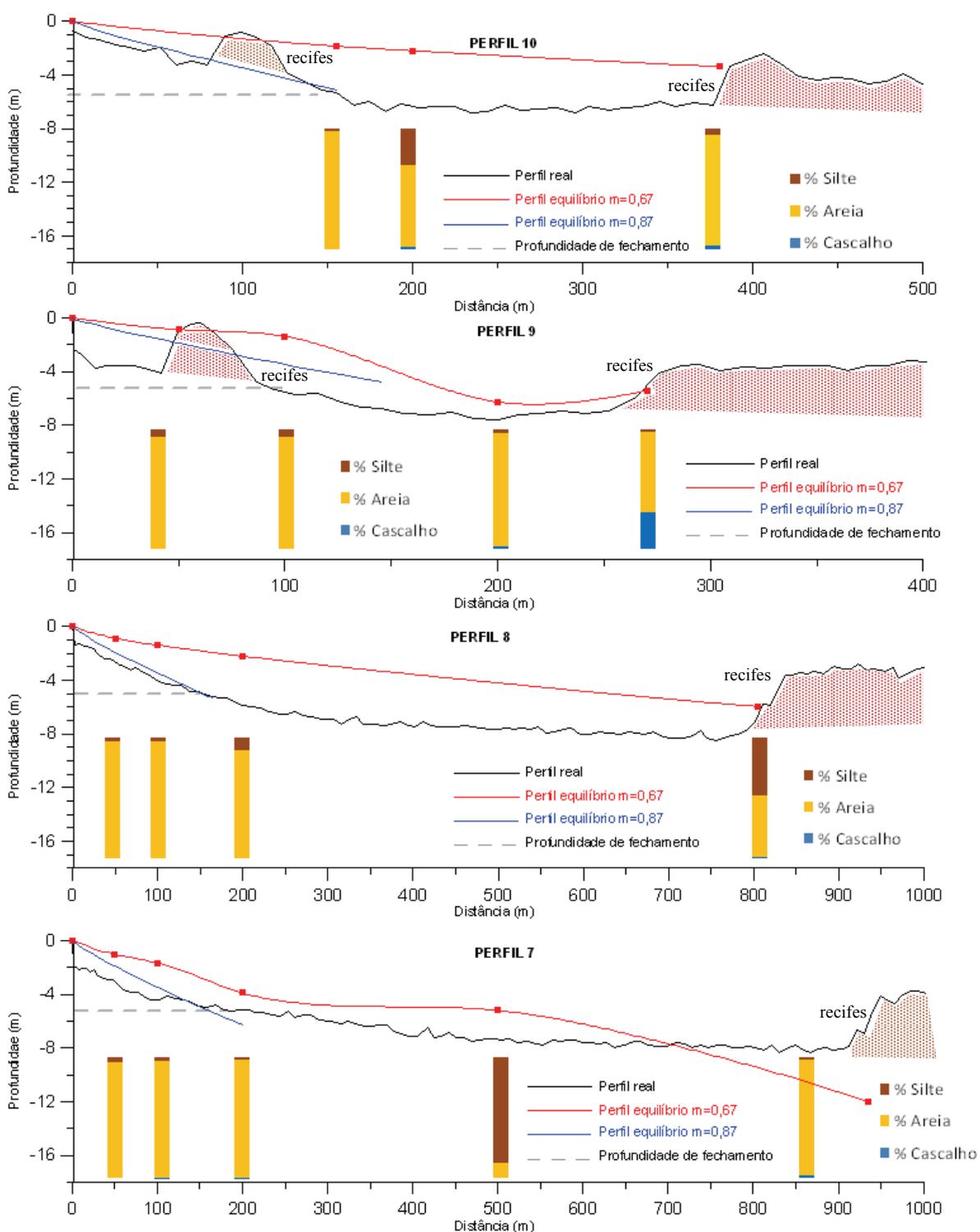
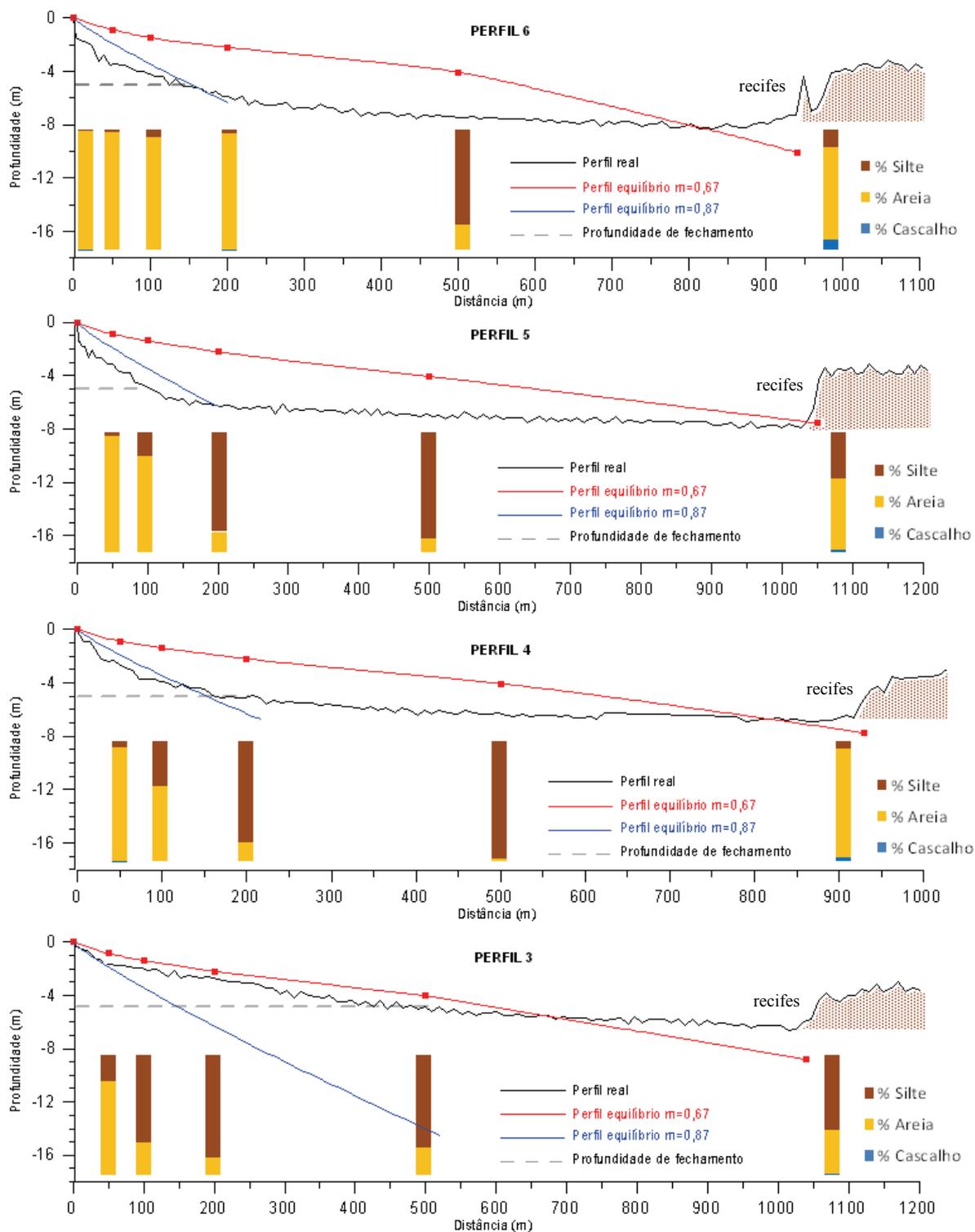


Figura 36. Perfis batimétrico e de equilíbrio ao longo das praias do Pina e da Boa Viagem. Perfis 10-7.



**Figura 37.** Perfis batimétrico e de equilíbrio ao longo das praias da Boa Viagem e Piedade. Perfis 6-3.

O perfil de coleta 10 (Fig. 36), que representa o perfil batimétrico 9, localizado na praia do Pina, possui uma linha de recifes submersos a aproximadamente a 100m da praia. Neste perfil foram realizadas três coletas de sedimentos. A cobertura sedimentar a longo do mesmo foi predominante de areia muito fina, sendo que no canal (200m) ocorreu a maior porcentagem de silte. A profundidade de fechamento ocorreu a aproximadamente 150m de praia, logo na base externa do recife. Para este perfil com presença de recifes, o valor do parâmetro  $m$  de 0,67 propostos por Dean (*op Cit.*) não foi satisfatório. O Valor para  $m$  de 0,87 apresentou, até o limite da profundidade de fechamento, um bom resultado.

O perfil de coleta 9 (Fig. 36), que corresponde ao perfil batimétrico 12, também possui uma primeira linha de recife submerso, estando esta a cerca de 50 m da praia. Neste perfil a pós-praia é bem preservada com presença de dunas. Foram realizadas quatro coletas de sedimentos, identificando predominância de areia muito fina, com exceção da estação mais afastada (base interna do segundo recife) onde ocorreu areia grossa com cascalho. A profundidade de fechamento também ocorreu na base externa do recife, a aproximadamente 100m. Este perfil também não teve um ajuste teórico satisfatório com o valor 0,67 para  $m$ , sendo melhor representado com o valor 0,87.

No perfil de coleta 8 (Fig. 36), que corresponde ao perfil batimétrico 20, a pós praia é bem preservada, ocorrendo recifes esparsos na linha de baixa-mar. As amostras coletadas em quatro pontos, mostraram a predominância de areia muito fina. Na base interna do recife localizado a 800m da praia, ocorreu uma porcentagem alta de silte. A profundidade de fechamento foi a 150m da praia. Neste perfil, o valor para  $m$  de 0,87 teve um bom ajuste.

No perfil de coleta 7 (Fig. 36), que corresponde ao perfil batimétrico 24, a pós praia é bem preservada. Ocorre uma linha de recife que aflora na baixa-mar. Nas amostras mais próximas a praia (50, 100 e 200m) predominou areia muito fina. No meio do canal (500m), predominou silte grosso, enquanto que na base interna do recife (950m) a areia fina. A profundidade de fechamento ocorreu aproximadamente 150m. O perfil de equilíbrio foi melhor representado com o  $m$  igual a 0,87.

O perfil de coleta 6 (Fig. 37), que corresponde ao 26 batimétrico, encontra-se em uma praia aberta, localizada entre dois trechos com recifes que afloram na baixa-mar. Ao longo deste perfil predominou a fração areia muito fina. No meio do canal ocorreu a maior quantidade de silte. A profundidade de fechamento do perfil de equilíbrio seguiu o padrão dos perfis anteriores, ficando a cerca de 150m da praia. O perfil de equilíbrio com  $m$  igual a 0,87 ajustou melhor com o perfil real.

O perfil de coleta 5 (Fig. 37), que corresponde ao perfil 30 batimétrico, ocorre num trecho de praia onde existe uma obra de enrocamento. O perfil se caracteriza por apesar de ter recifes naturais, ter problemas com a estabilidade da costa, estando no trecho mais crítico da praia da Boa Viagem. Observou-se quanto a sedimentologia, areia muito fina próximo a costa e próximo à base interna do recife e silte grosso no canal. A profundidade de fechamento ficou à 100m da praia. O melhor ajuste para o perfil teórico de equilíbrio considerou o valor de  $m$  0,87.

O perfil 4 (Fig. 37), que corresponde ao 39 batimétrico, encontra-se a sul da obra de enrocamento, num trecho de praia aberta. Próximo a costa observou-se areia muito fina, no canal silte grosso e na base interna do recife areia fina. A distância da profundidade de fechamento em relação a costa foi de 150m. Como nos demais perfis, o  $m = 0,87$  representou melhor o perfil de equilíbrio.

O perfil de coleta 3 (Fig. 37), que corresponde ao 46 batimétrico, localizado numa praia aberta em Piedade, segue o mesmo padrão granulométrico do perfil 4. Neste perfil a declividade é menor, estando a profundidade de fechamento a aproximadamente 450m da costa. Esta diferenciação aos demais perfis analisados, mostra o tipo de praia em que se adotaria melhor o valor sugerido por Dean e outros autores. Neste perfil o valor proposto para  $m$  de 0,87 não mostrou uma boa representatividade.

Os resultados encontrados com a determinação do perfil de equilíbrio mostram que a maior parte da área de estudo possui características distintas às estudadas por outros autores.

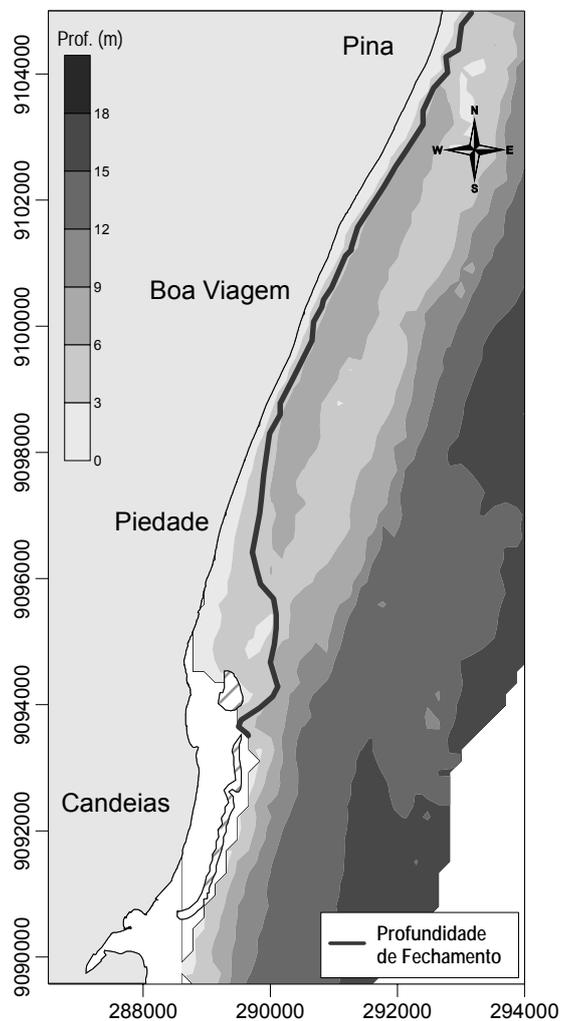
A presença de linhas de recifes, e a declividade acentuada formando um canal, demandaram um ajuste peculiar para a área. A determinação deste perfil de equilíbrio é fundamental no planejamento de obras de alimentação de praia, na estimativa do volume e características do sedimento a ser utilizado bem como para monitoração da área e acompanhamento do balanço sedimentar.

#### **6.4 Profundidade de Fechamento**

A profundidade de fechamento do perfil de equilíbrio corresponde ao ponto limite em direção ao mar aberto a partir do qual o trabalho das ondas significantes de superfície não mais consegue moldar a topografia de fundo. O valor determinado para profundidade de fechamento foi de 5,25m. Sua posição ao longo da área de estudo (Fig. 38) está localizada a cerca de 150m da costa ao longo da praia do Pina e da praia da Boa Viagem.

A posição da profundidade de fechamento ao longo da praia de Piedade varia de norte a sul, distando cerca de 150m no trecho norte, e 450m

na sua porção mais sul, onde ocorrem bancos arenosos e recifes próximos a costa.



**Figura 38.** Posição da profundidade de fechamento do perfil de equilíbrio ao longo da área de estudo.

## 7.5 Hidrologia e Pluma Estuarina

A distribuição vertical da salinidade e do sinal de retroespalhamento ótico (OBS) nas estações A-D ao longo dos perfis 1-10 para os períodos chuvoso e de estiagem são apresentadas, respectivamente nas figuras 39 a 48 e figuras 49 a 58.

No perfil 1, localizado na foz do estuário do Jaboatão, observou-se na camada superficial um gradiente na salinidade durante a baixa-mar nas estações 1C e 1D, indicando uma tendência da pluma desembocar para Norte. Este padrão foi observado tanto no período chuvoso como seco. A pluma pode ser confirmada com o aumento do valor do OBS na mesma camada superficial. Durante o período chuvoso a salinidade indicativa da pluma apresentou valores mais baixos do que no período seco, indicando um maior aporte fluvial. Nas camadas próximas ao fundo observou-se um aumento no OBS, principalmente no período chuvoso, devido ressuspensão de fundo causada por ondas e correntes.

No perfil 2, localizado no limite de Candeias e Piedade, as estações P2A e P2B estão na parte externa do recife, enquanto a estação P2C encontra-se na parte interna do mesmo, no alinhamento com a barra de Piedade. No período chuvoso, observou-se na camada superficial, que nas estações externas a salinidade esteve um pouco inferior do que na estação interna ao recife, principalmente na vazante e baixa-mar, indicando que a pluma estuarina fez um caminho por fora dos recifes e não ao longo da praia de Candeias. O OBS apresentou maiores valores próximo ao fundo e nas estações externas. Durante o período seco, não se observou variação da salinidade ao longo do perfil vertical em nenhuma das estações em todos os estágios de maré.

perfil 1 período chuvoso

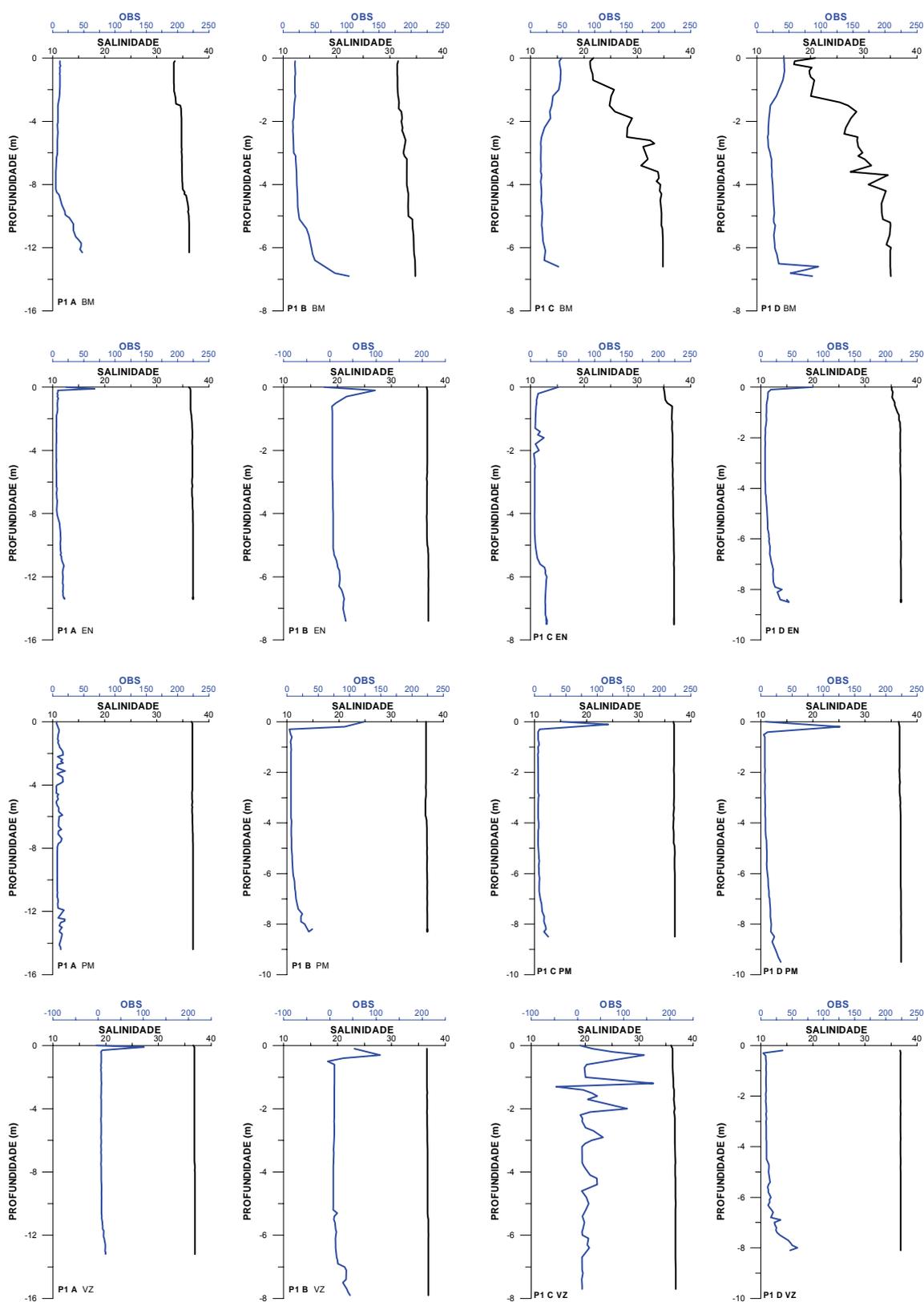


Figura 39. Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 1, estações A–D, período chuvoso.

Perfil 2 período chuvoso

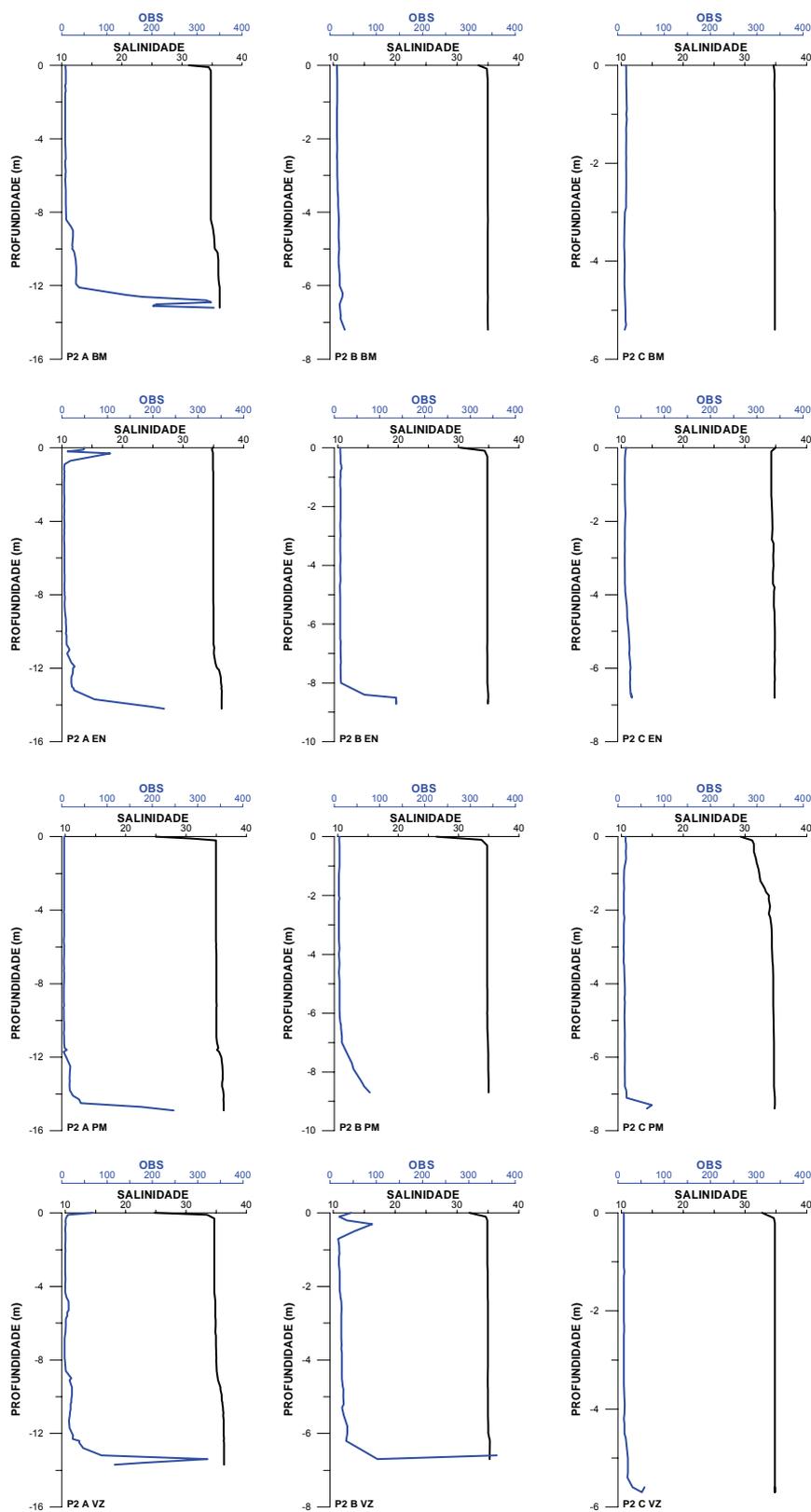


Figura 40. Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 2, estações A–C, período chuvoso.

Perfil 3 período chuvoso

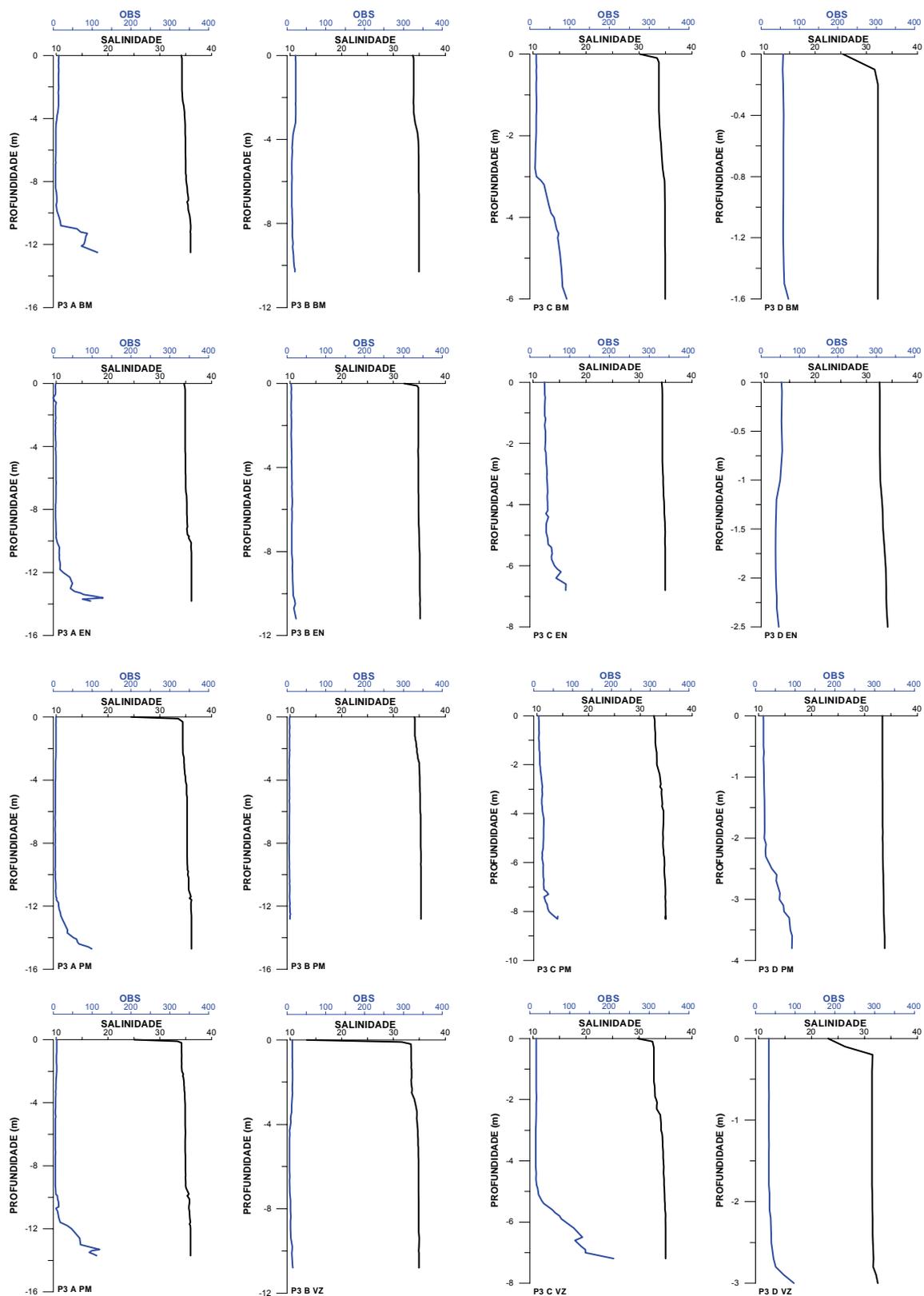


Figura 41. Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 3, estações A–D, período chuvoso.

Perfil 4 período chuvoso

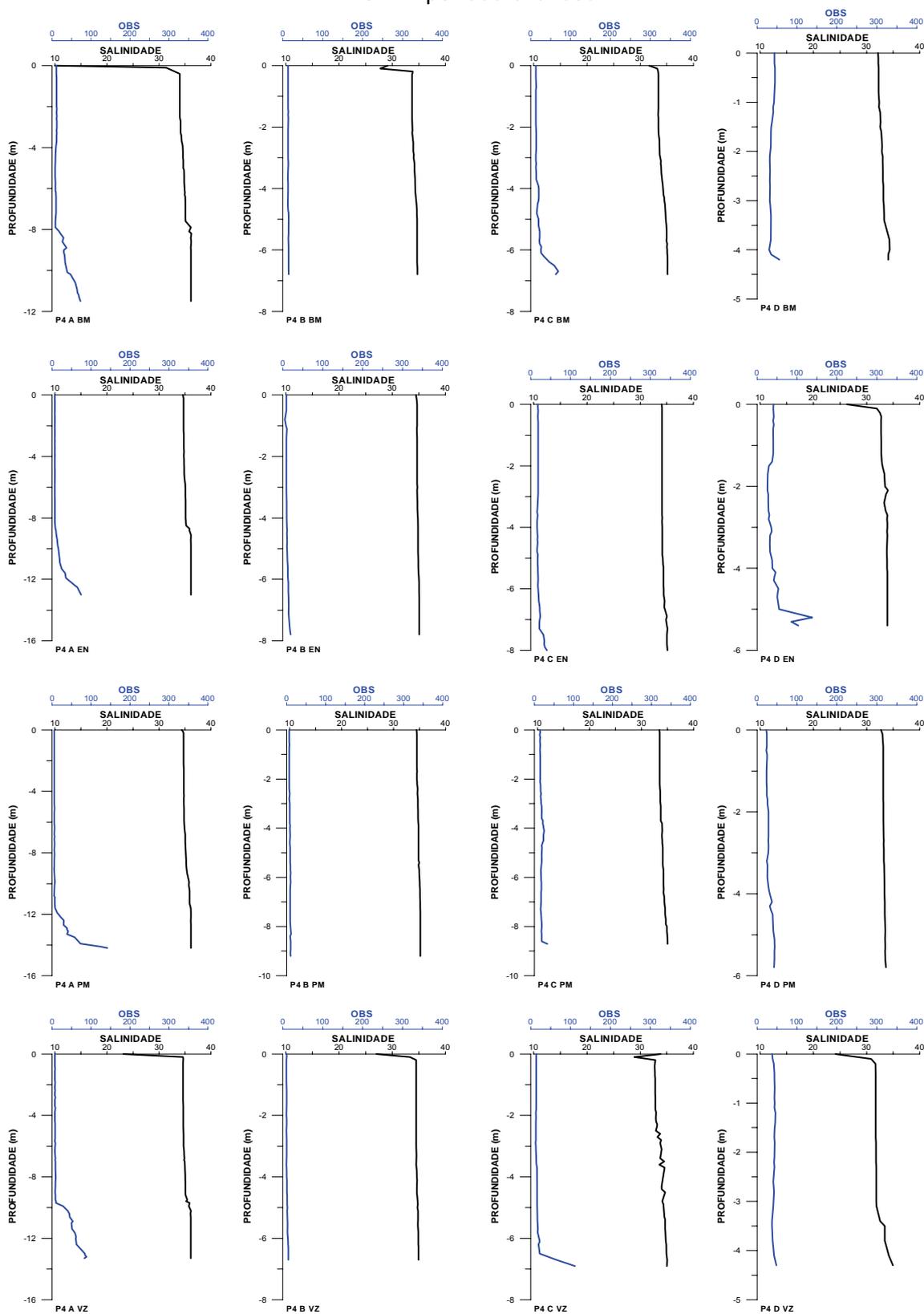
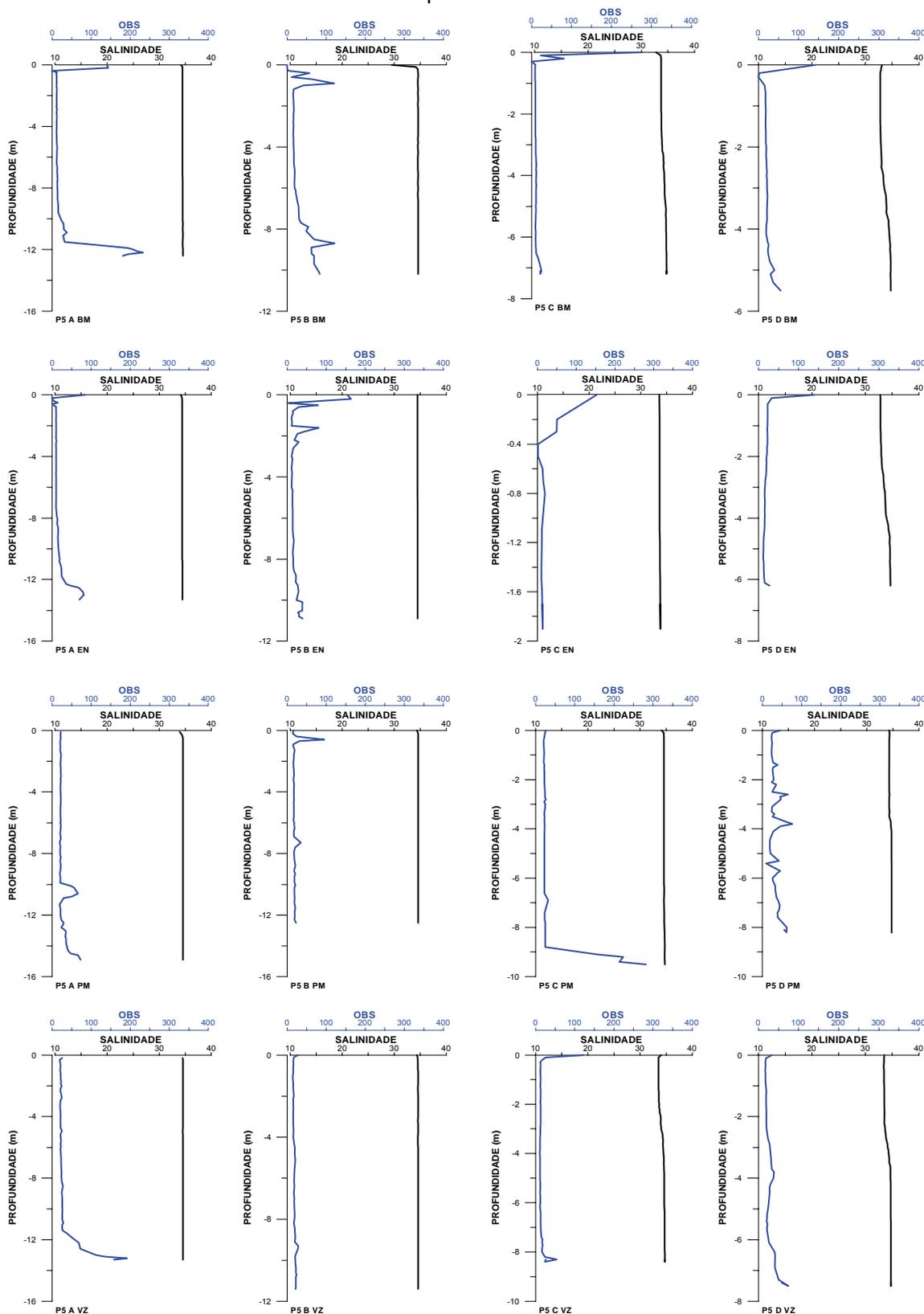


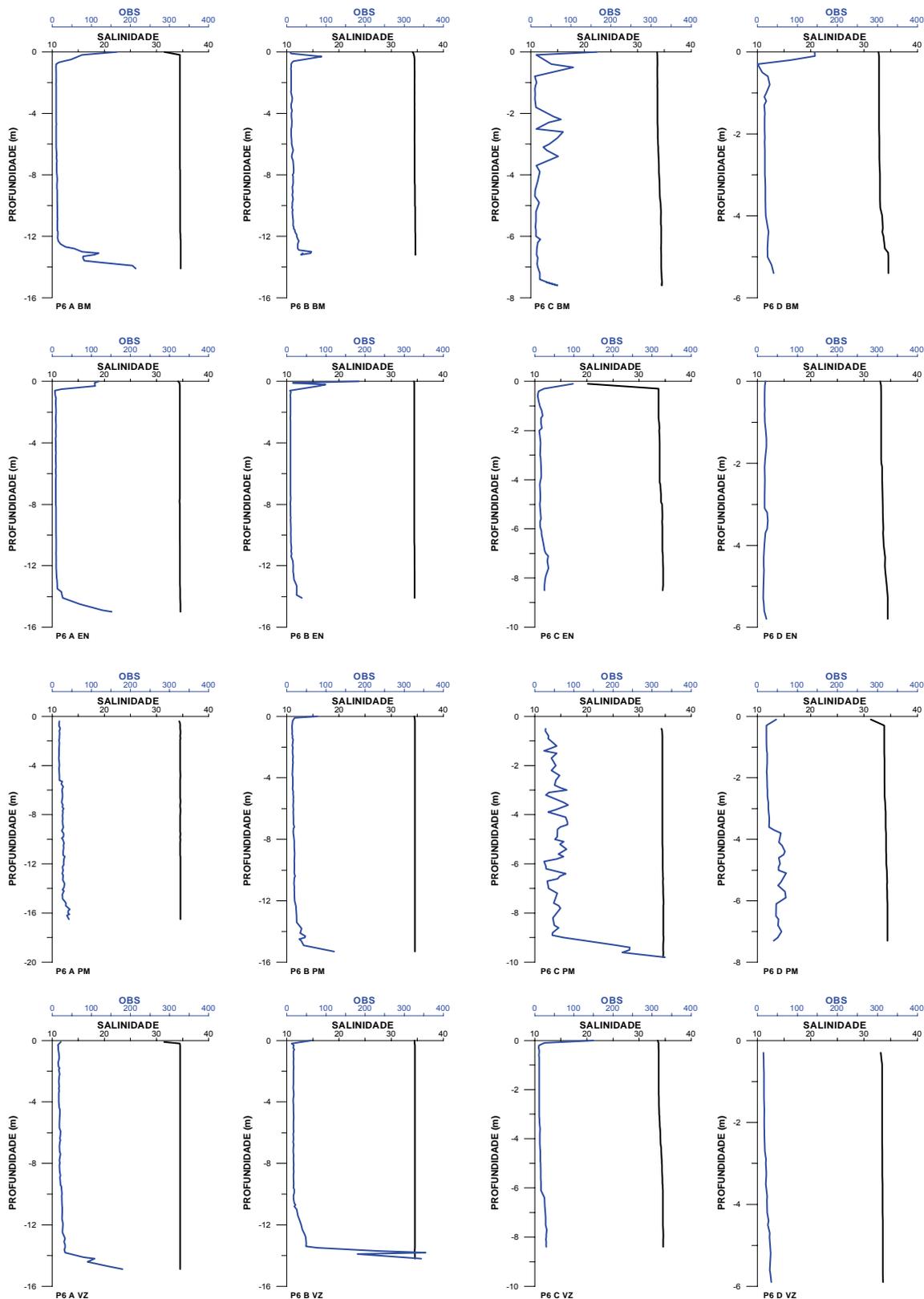
Figura 42. Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 4, estações A–D, período chuvoso.

Perfil 5 período chuvoso



**Figura 43.** Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 5, estações A–D, período chuvoso.

Perfil 6 período chuvoso



**Figura 44.** Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 6, estações A–D, período chuvoso.

Perfil 7 período chuvoso

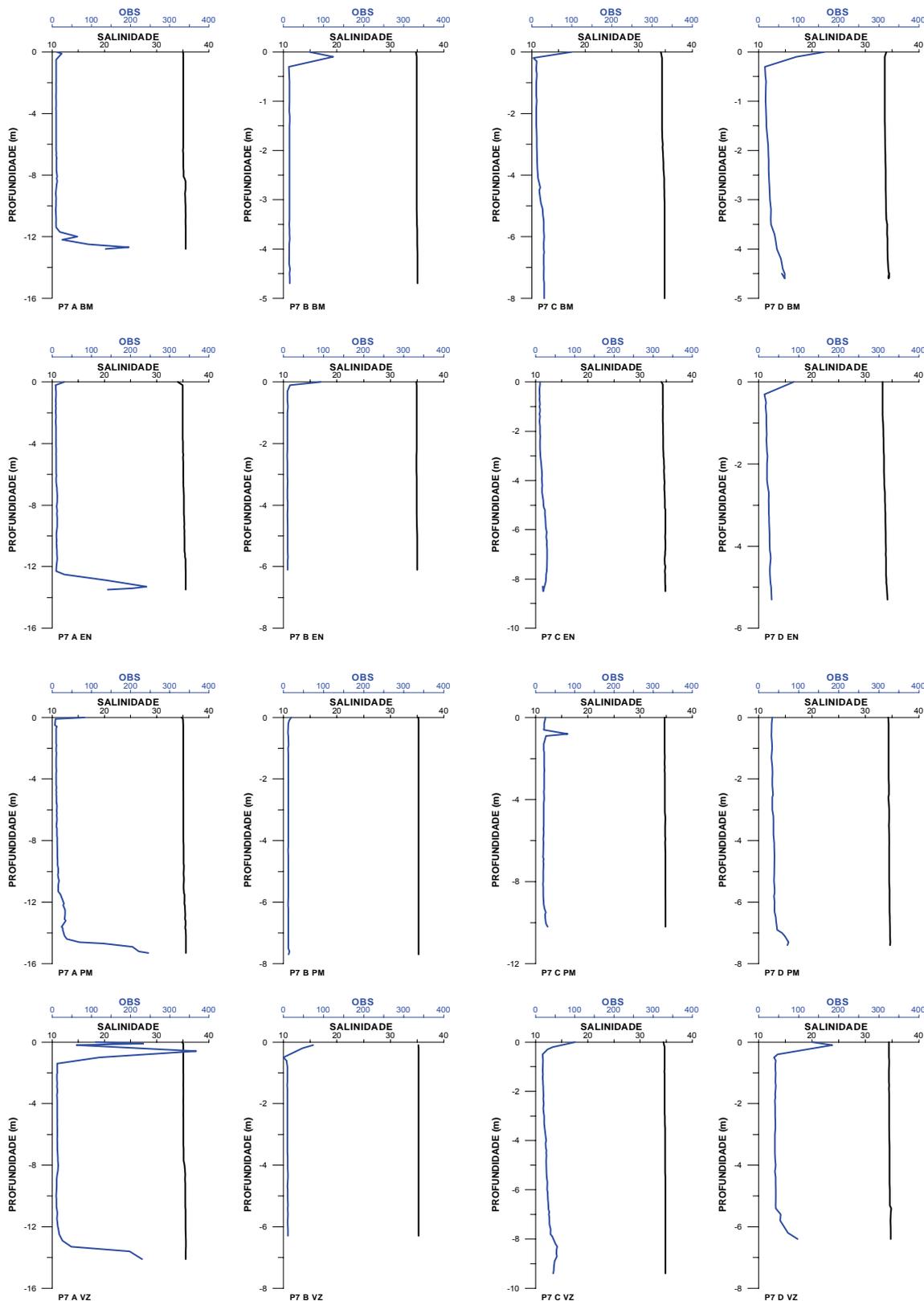
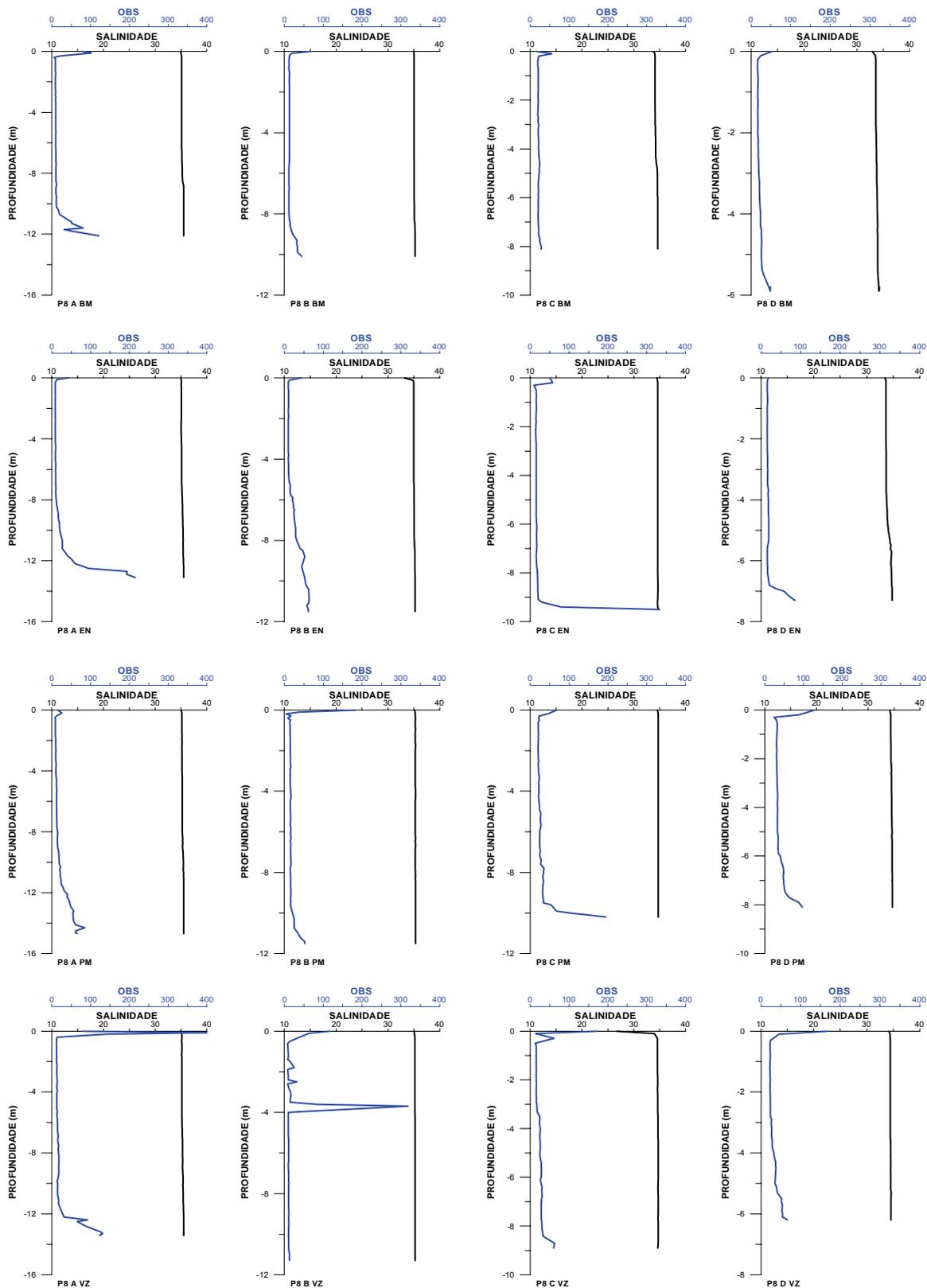


Figura 45. Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 7, estações A–D, período chuvoso.

Perfil 8 período chuvoso



**Figura 46.** Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 8, estações A–D, período chuvoso.

Perfil 9 período chuvoso

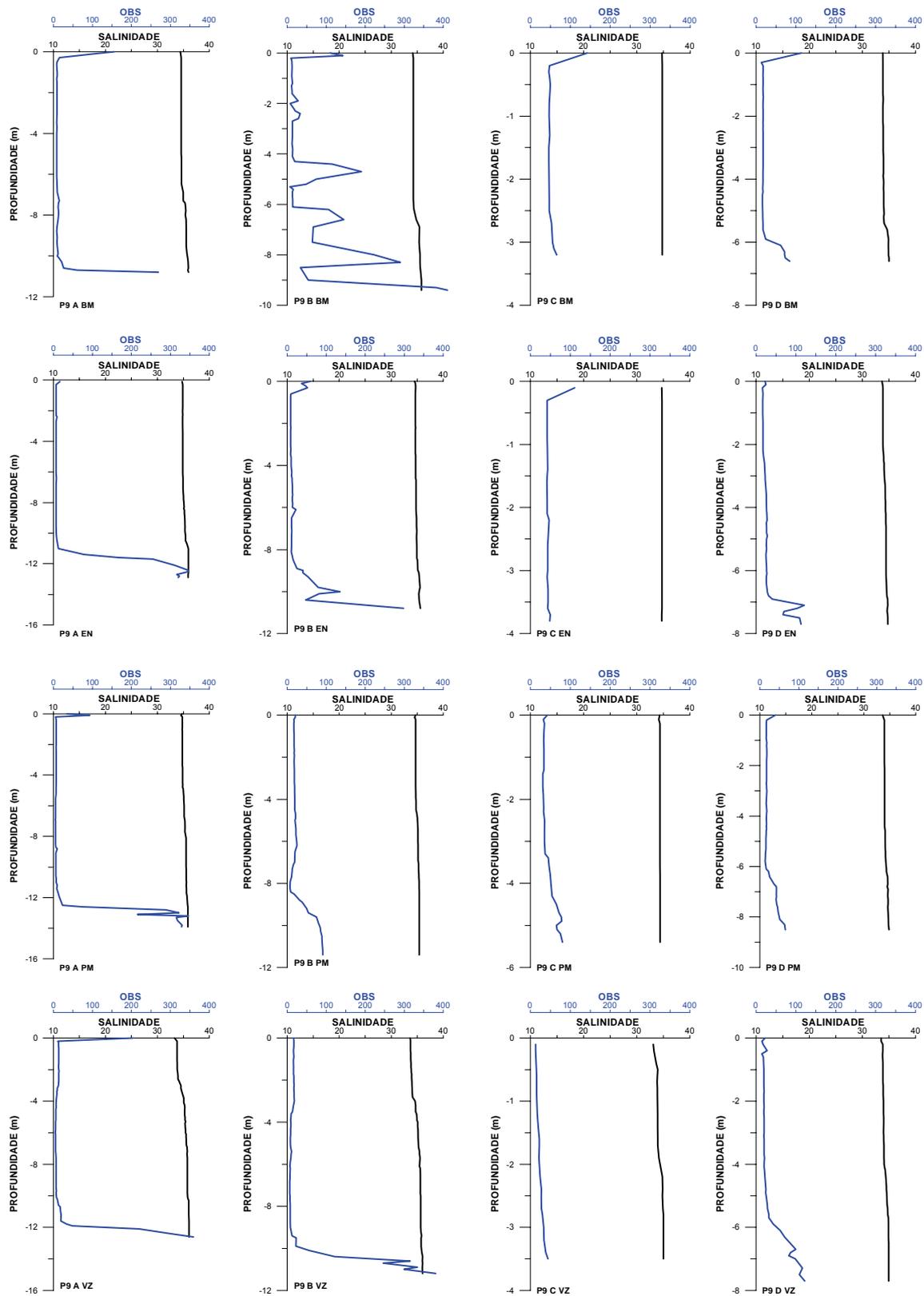
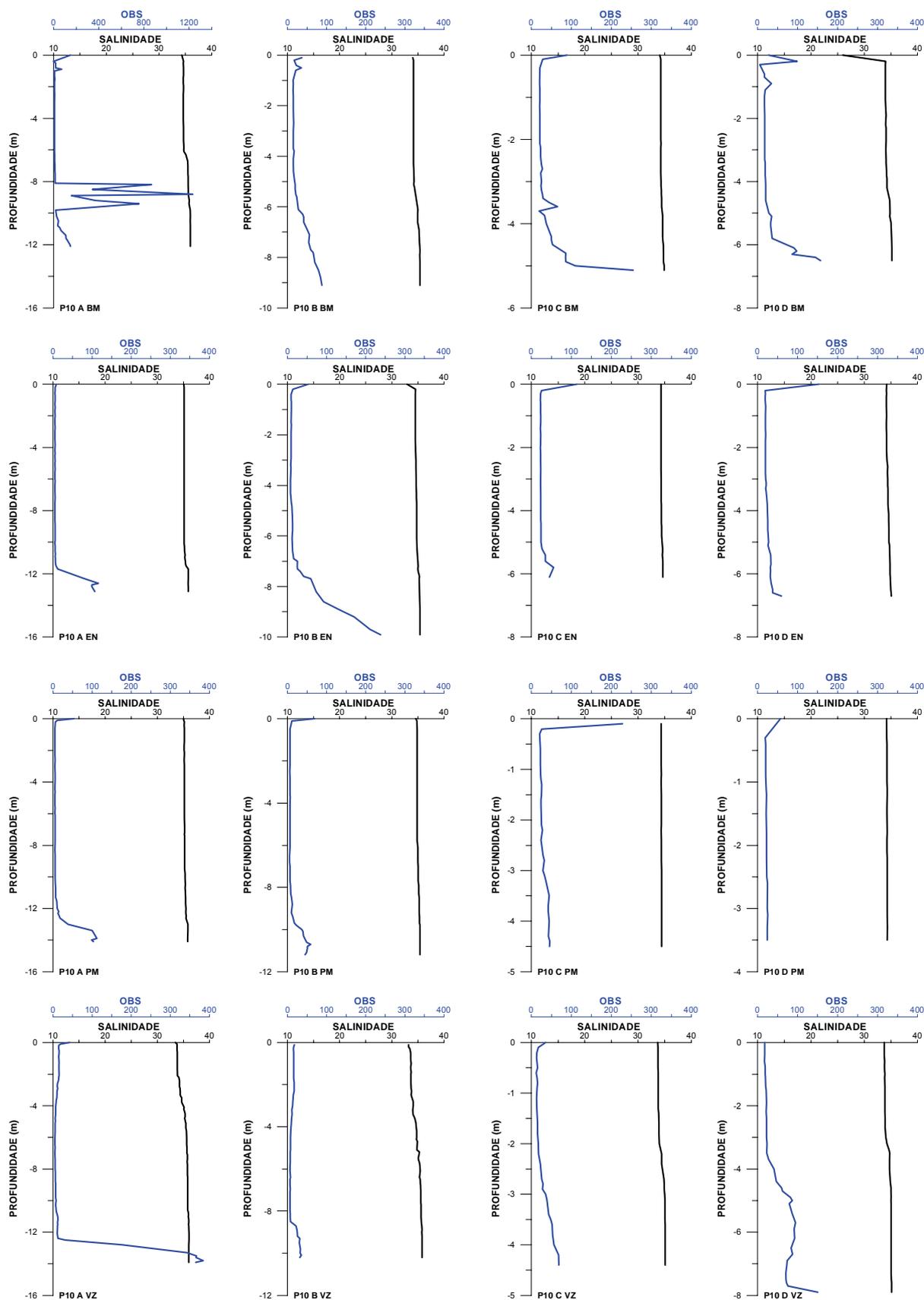


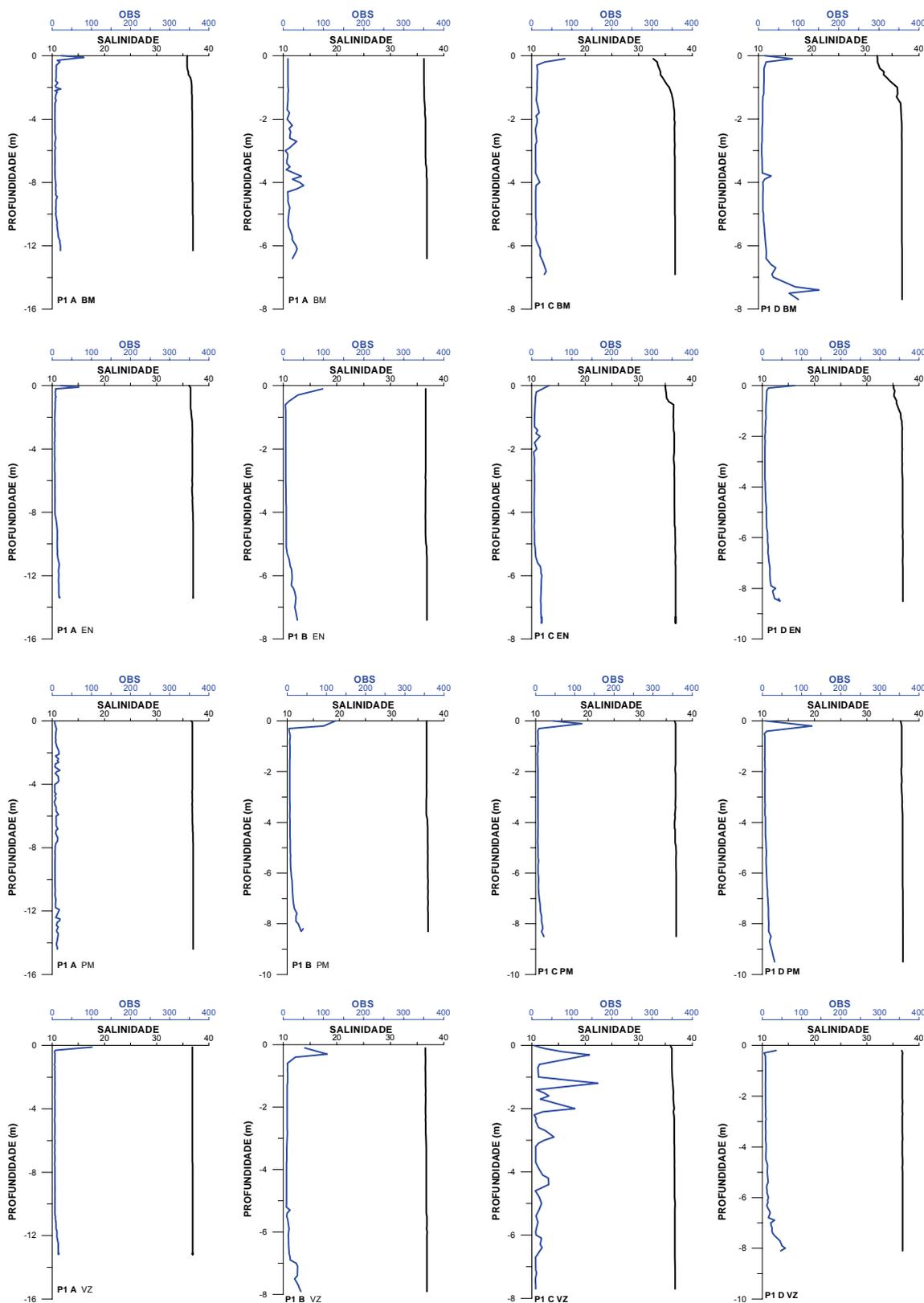
Figura 47. Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 9, estações A–D, período chuvoso.

Perfil 10 período chuvoso



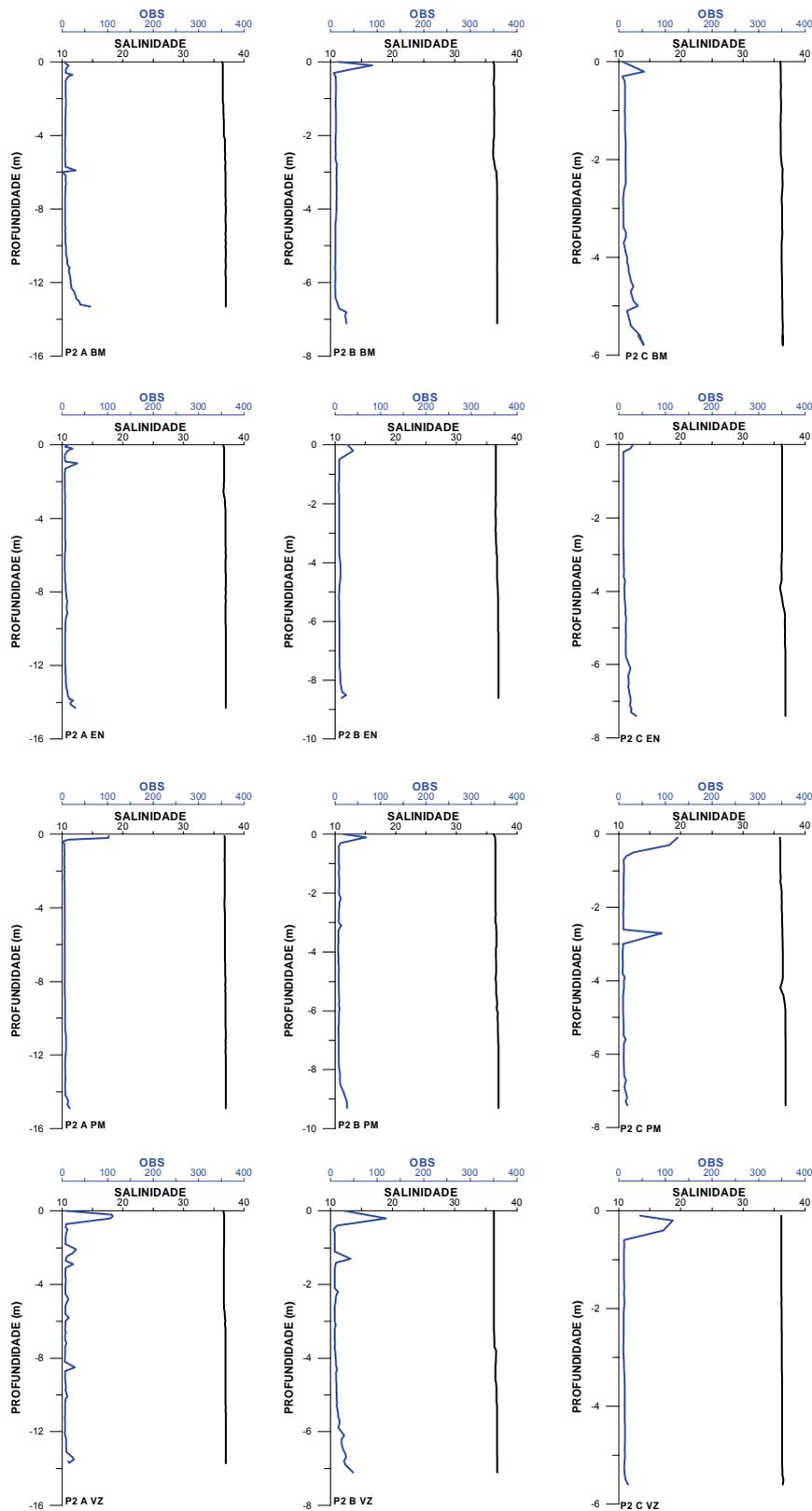
**Figura 48.** Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 10, estações A–D, período chuvoso.

perfil 1 período seco



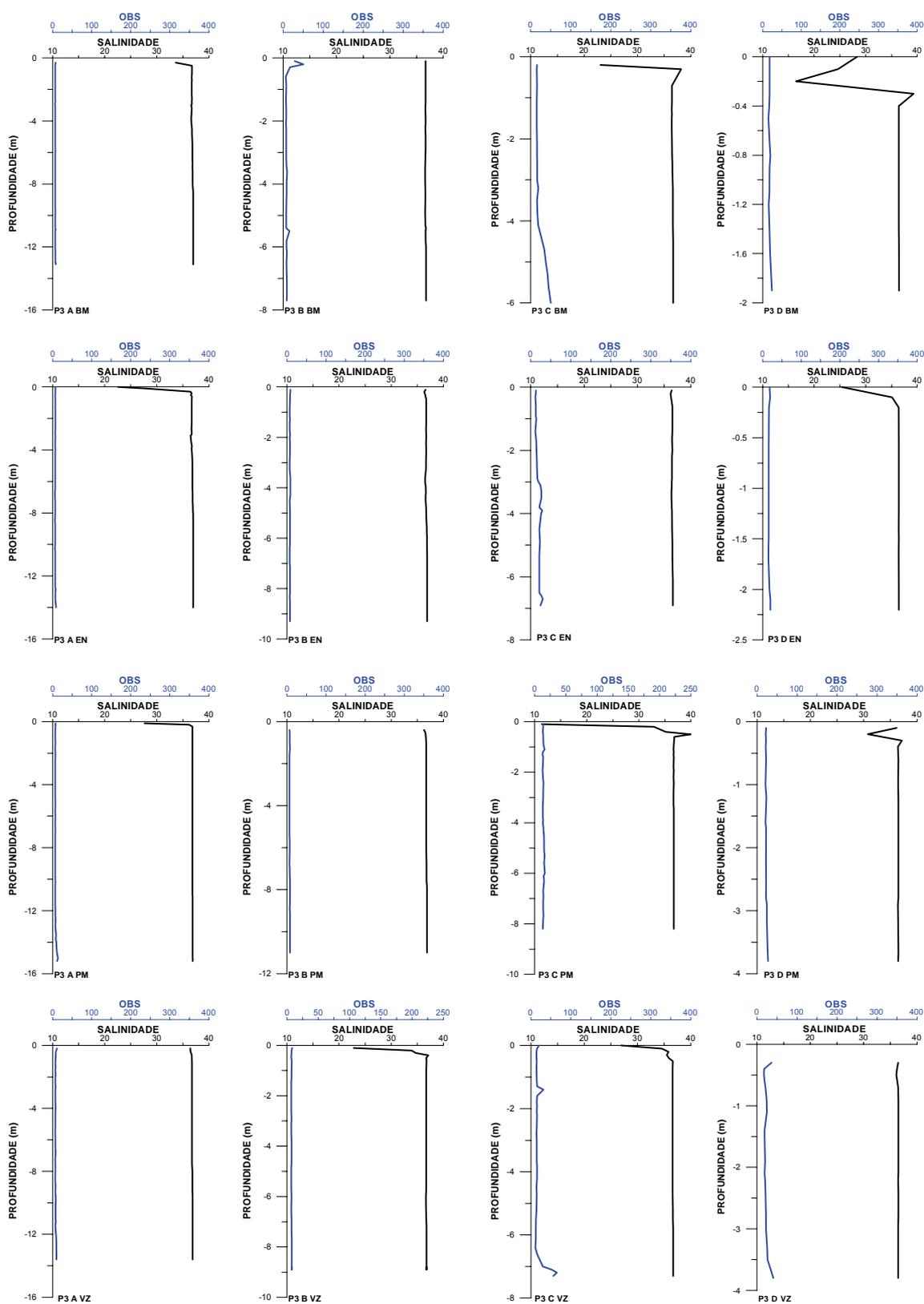
**Figura 49.** Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 1, estações A–D, período de estiagem.

perfil 2 período seco



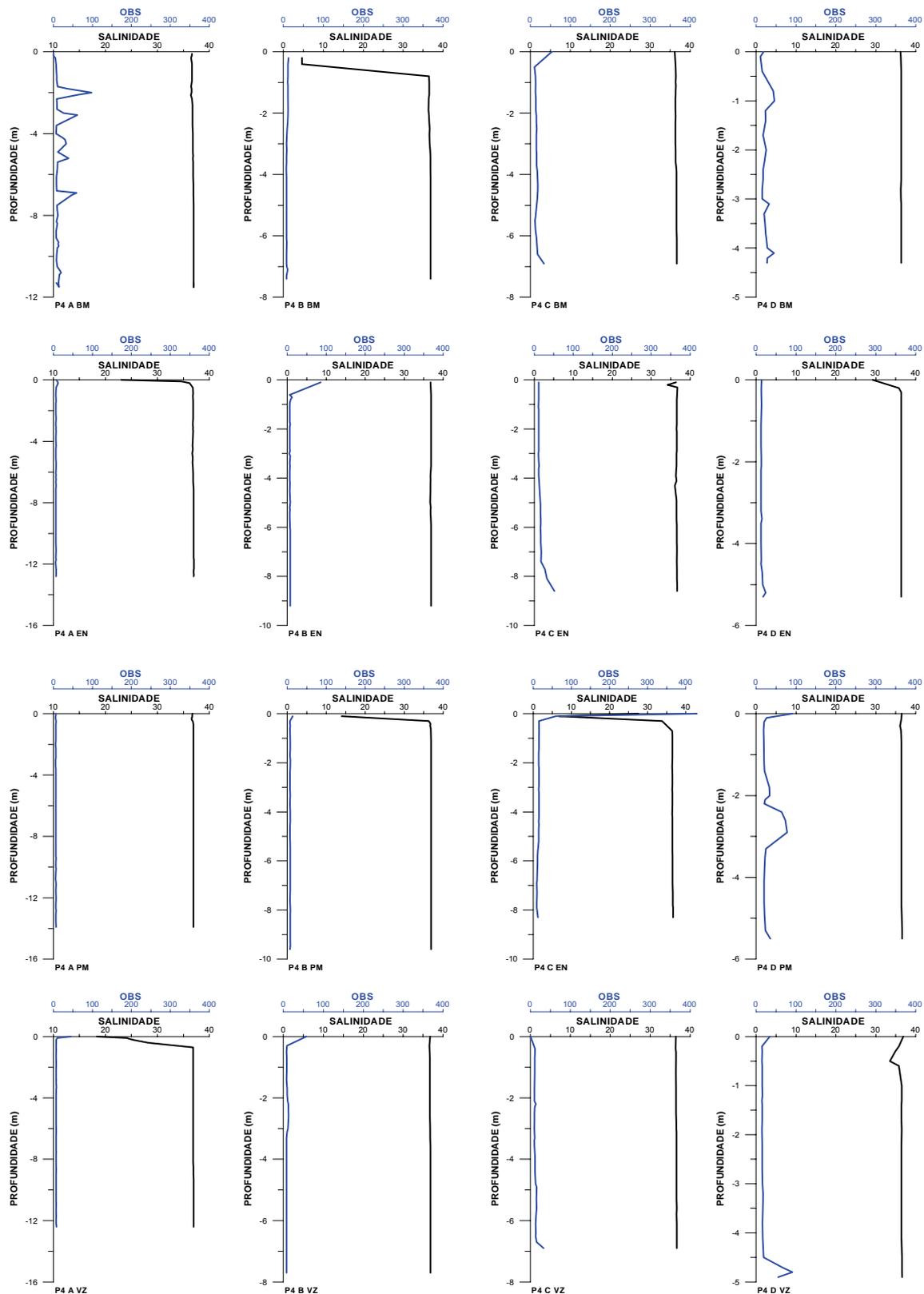
**Figura 50** Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 2, estações A–C, período de estiagem.

perfil 3 período seco



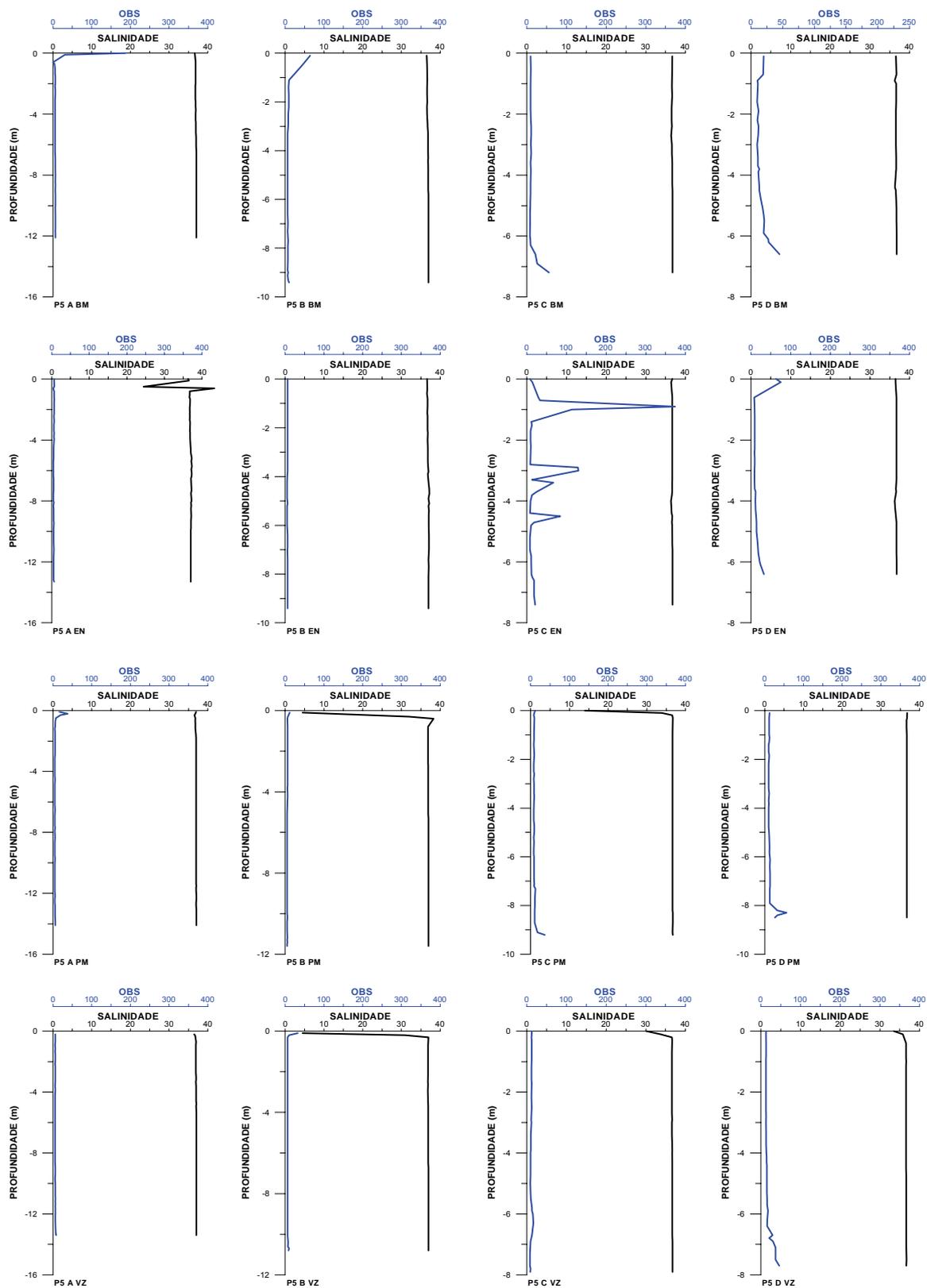
**Figura 51.** Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 3, estações A–D, período de estiagem.

perfil 4 período seco



**Figura 52.** Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 4, estações A–D, período de estiagem.

perfil 5 período seco



**Figura 53.** Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 5, estações A–D, período de estiagem.

perfil 6 período seco

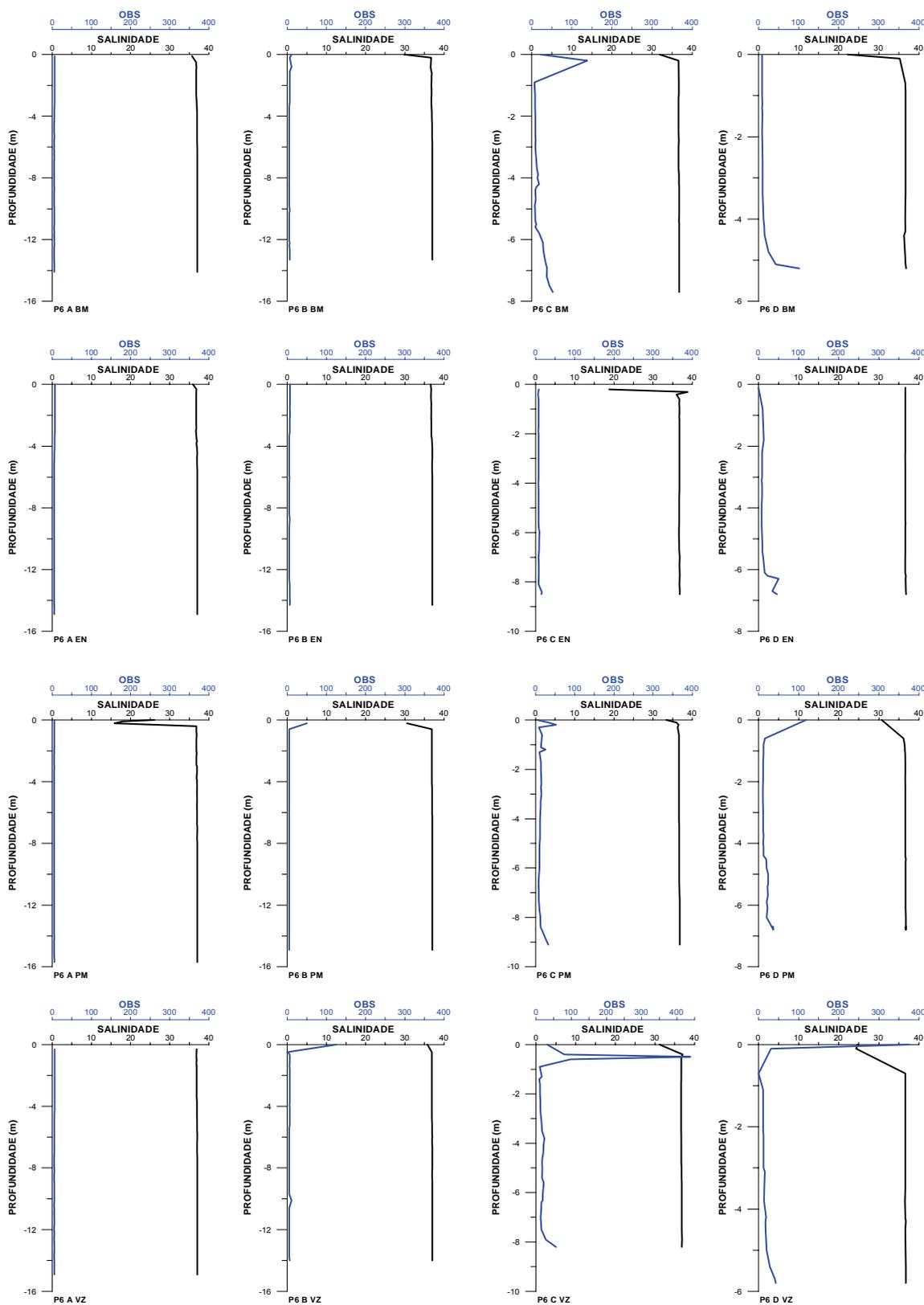


Figura 54. Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 6, estações A-D, período de estiagem.

perfil 7 período seco

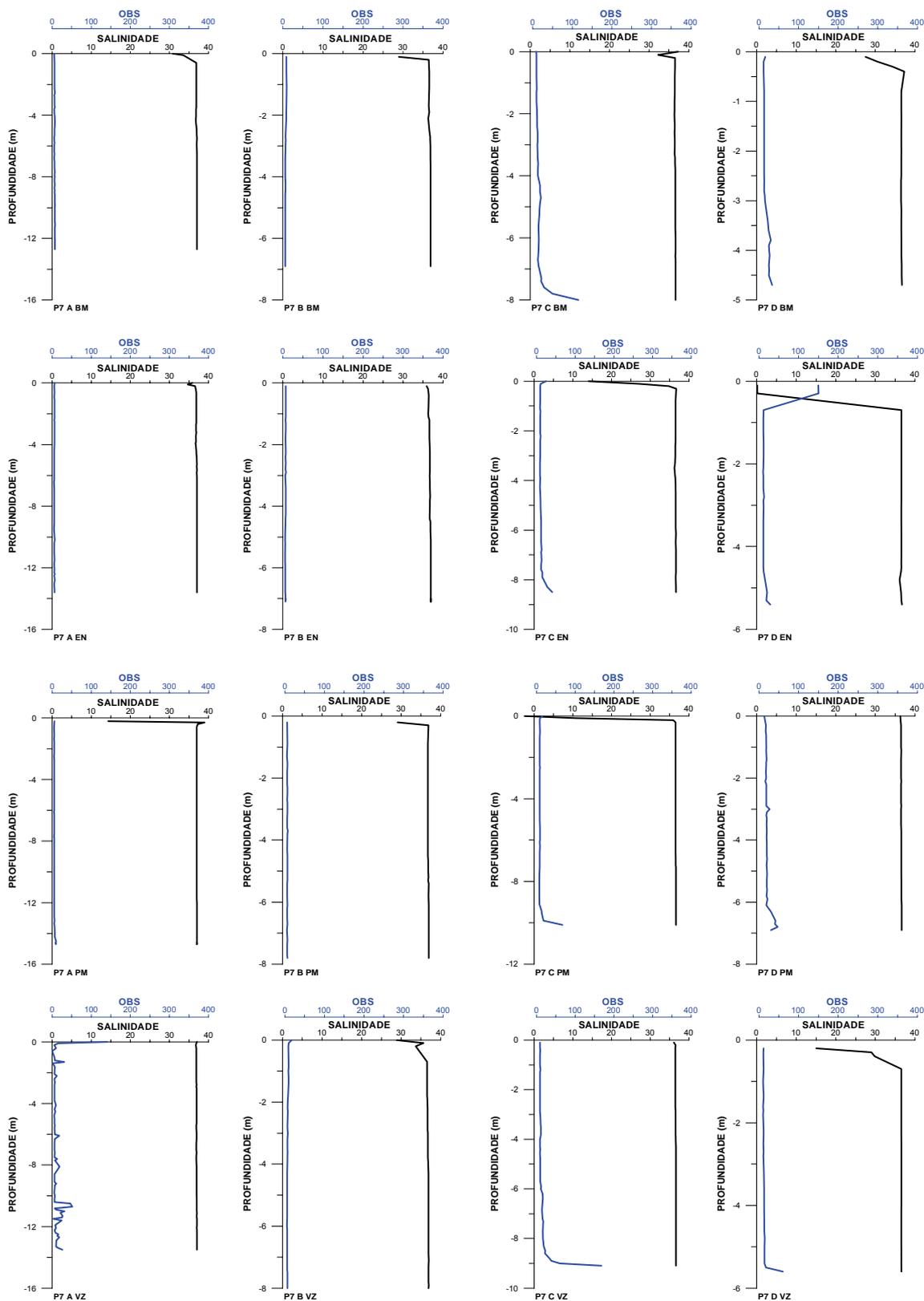
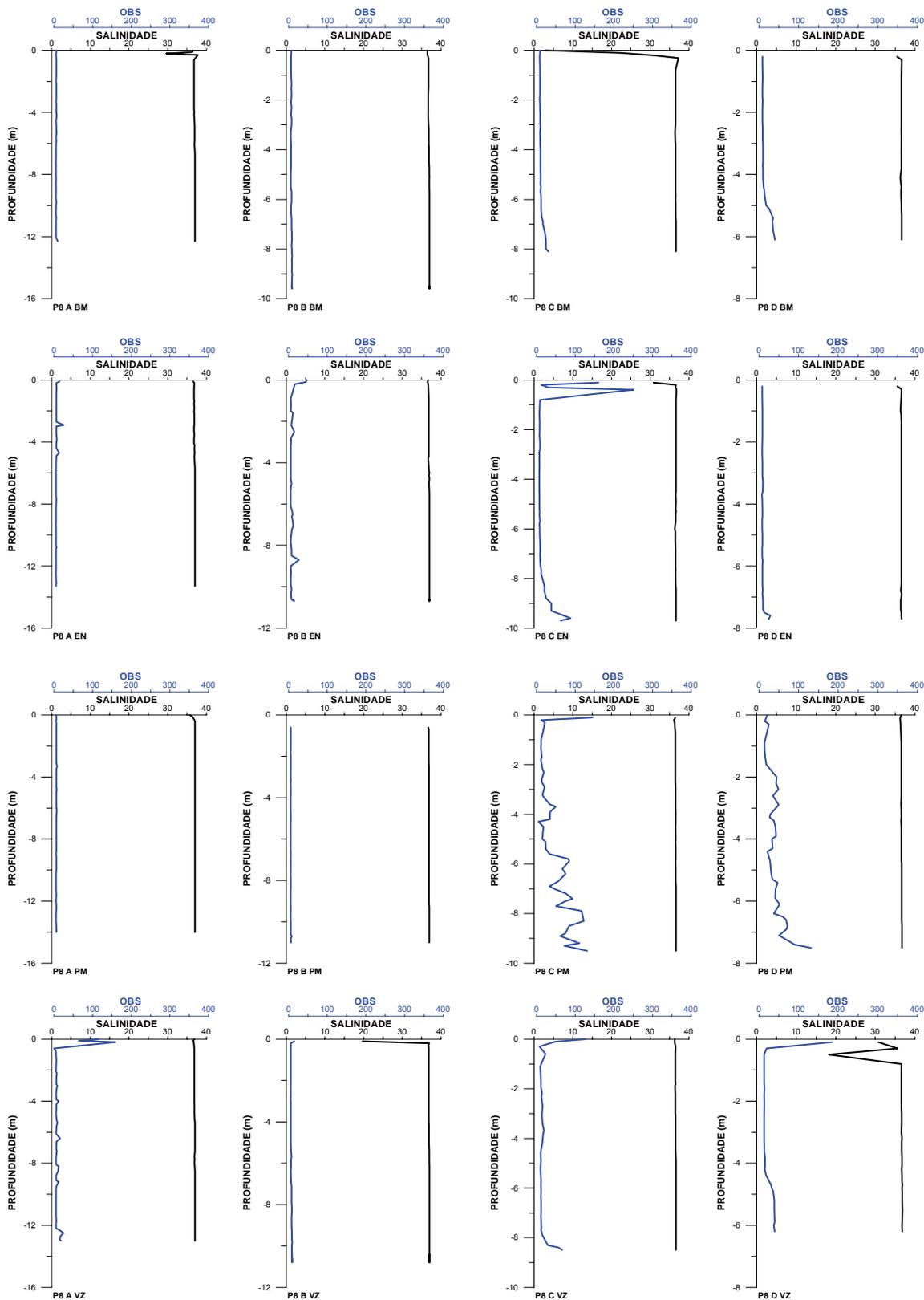


Figura 55. Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 7, estações A–D, período de estiagem.

perfil 8 período seco



**Figura 56.** Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 8, estações A–D, período de estiagem.

perfil 9 período seco

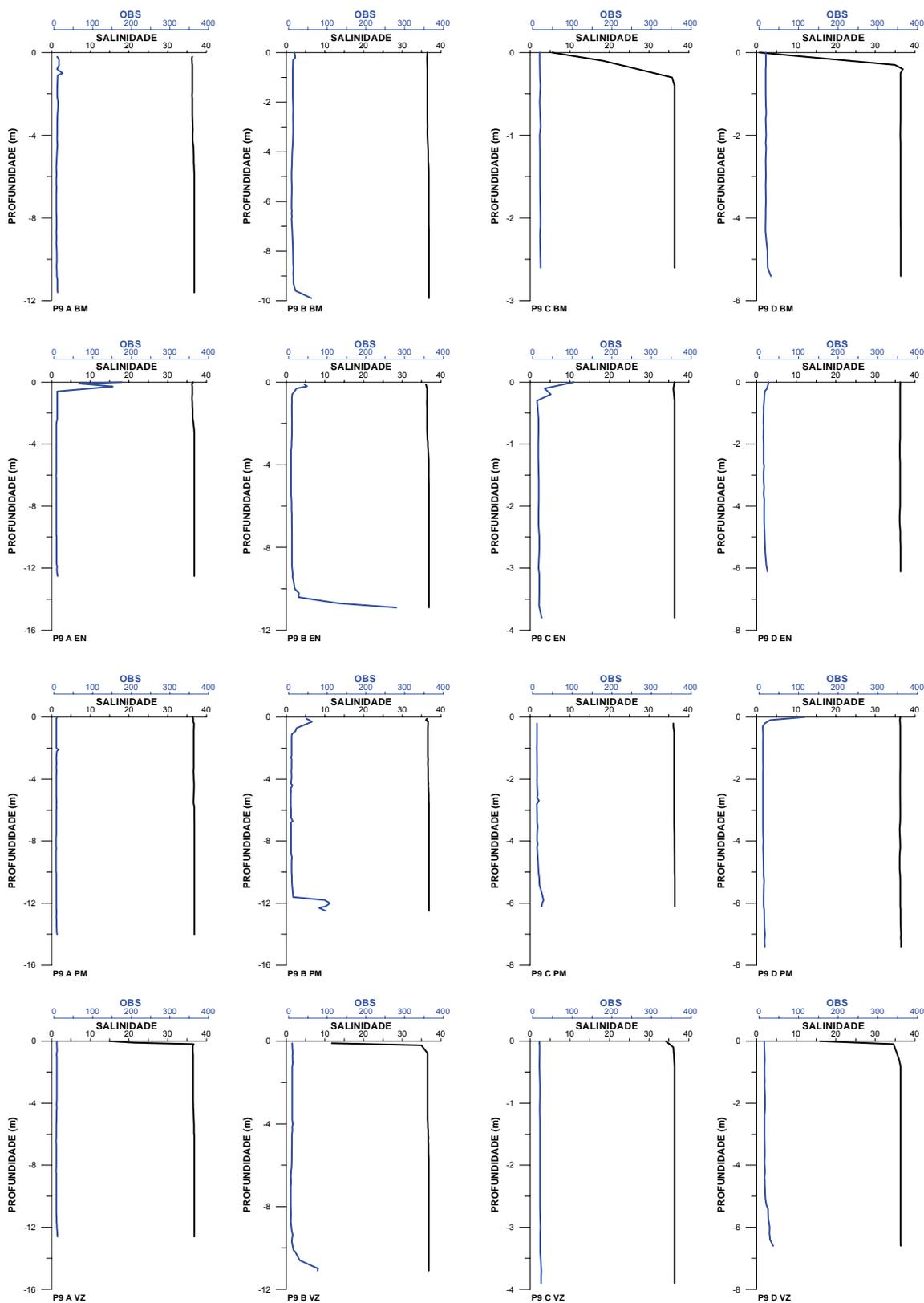
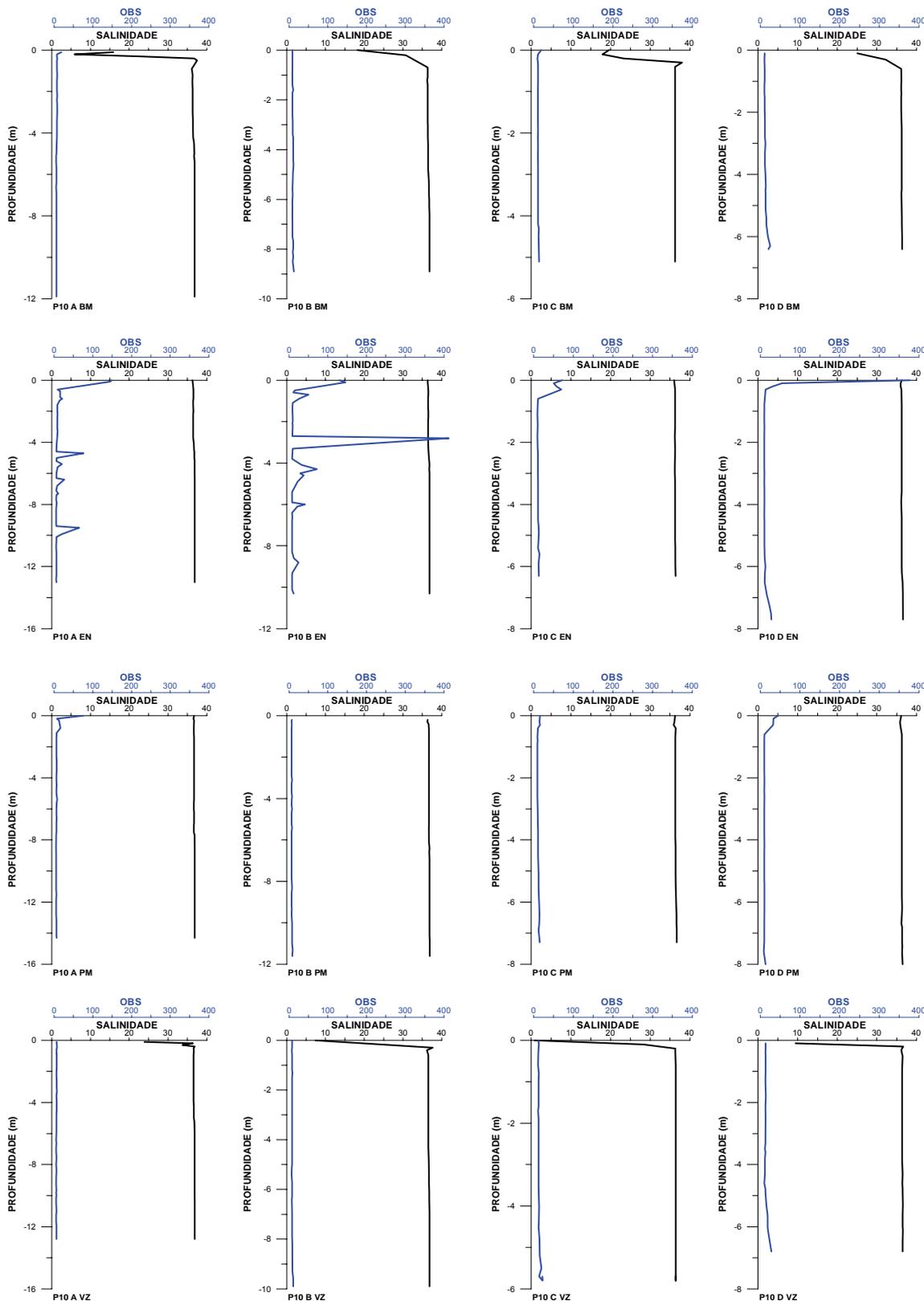


Figura 57. Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 9, estações A–D, período de estiagem.

perfil 10 período seco



**Figura 58.** Distribuição vertical da salinidade e OBS. Baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ). Perfil 10, estações A–D, período de estiagem.

No Perfil 3, localizado na praia de Piedade, observou-se no período chuvoso, uma salinidade mais baixa à superfície durante o estágio de preamar, indicando que a pluma estuarina atinge este perfil após um certo intervalo de tempo em relação à vazante. No período de estiagem, ao longo do ciclo de maré, a salinidade superficial mostrou-se inferior, principalmente nas estações próximas à costa. De modo geral os valores de OBS foram baixos para ambos os períodos, porém pode se determinar um padrão de aumento do OBS na estação P3C, próximo ao fundo. Esta estação encontra-se na face interna do recife, indicando que o mesmo pode estar interferindo na circulação e causando a suspensão dos sedimentos no local.

Durante o período chuvoso, não foram observadas grandes flutuações da salinidade ao longo da coluna d'água para a região representada pelo perfil 4. Apenas durante o estágio de maré vazante detectou-se uma camada superficial pouco espessa, menos salina. Durante o período de estiagem a variação na salinidade ao longo da região foi mais evidente, com uma camada superficial menos salina que variou para as diferentes estações do perfil em função dos estágios de maré. O sinal de retroespalhamento ótico (OBS) não apresentou os maiores valores na estação P4D, uniforme na coluna d'água, e nas estações P4A e P4C próximo ao fundo. Observou-se ainda, o mesmo padrão do perfil 3, onde na estação na base interna do recife (P4C), há um aumento do valor de OBS próximo ao fundo.

Ao longo da coluna d'água das estações amostrais do perfil 5, não foi observada variação da salinidade para o período chuvoso. No período de estiagem, esta variação ocorreu na camada superficial das estações mais centrais (P5B e P5C), nos estágios de preamar e vazante, indicando uma faixa de pluma estuarina. Os valores do sinal de OBS foram mais baixos no período de estiagem quando comparados aos valores obtidos durante o período chuvoso como um todo, tendo em ambos os casos, uma tendência a aumentar com a proximidade do fundo.

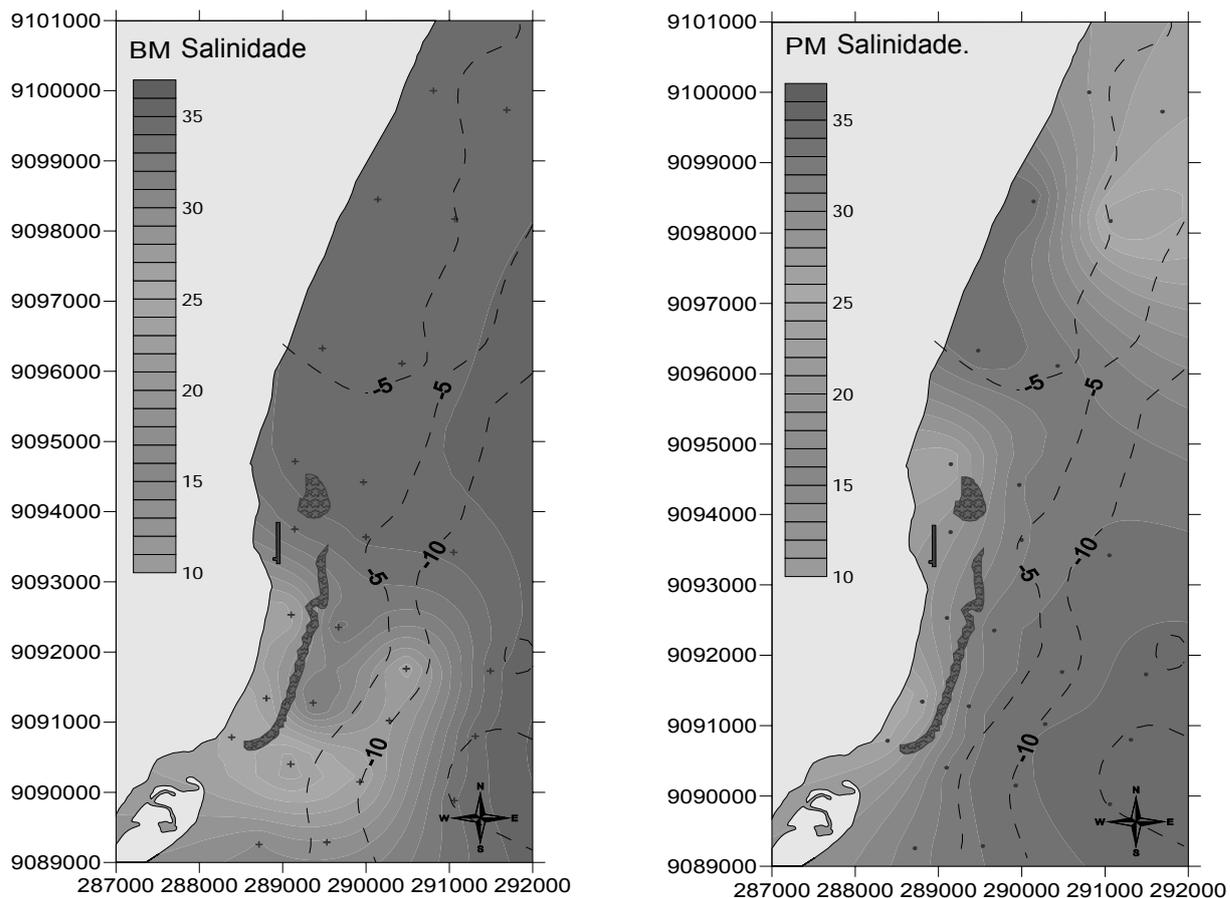
No perfil 6, apenas foi observada variação na salinidade na estiagem. Ao longo dos quatro estágios de maré pode se observar na camada superficial este gradiente. O OBS seguiu o padrão dos outros perfis, com os valores mais altos durante o período chuvoso, e nas camadas próximas ao fundo.

No perfil 7 observou-se o mesmo padrão de distribuição da salinidade do perfil 6. O aparecimento de um gradiente de salinidade nos perfis 6 e 7 apenas no período de estiagem, mostra que no período chuvoso a pluma do Rio Jaboatão não alcança estes perfis. Já na estiagem os mesmos podem estar recebendo aporte da Bacia do Pina. O sinal de OBS no período chuvoso foi mais elevado na estação P7A próximo ao fundo. Durante o período de estiagem, o mesmo ocorreu na estação P7C.

As estações amostrais ao longo dos perfis 8, 9 e 10 apresentaram padrões semelhantes entre si. No período chuvoso não houve variação na salinidade, enquanto que na estiagem a camada superficial mostrou valores de salinidade 10 que indicam uma pluma, provavelmente oriunda da bacia do Pina. O sinal de OBS esteve sempre mais elevado durante o período chuvoso, ocorrendo no perfil 9, próximo ao fundo, os maiores valores de toda a área .

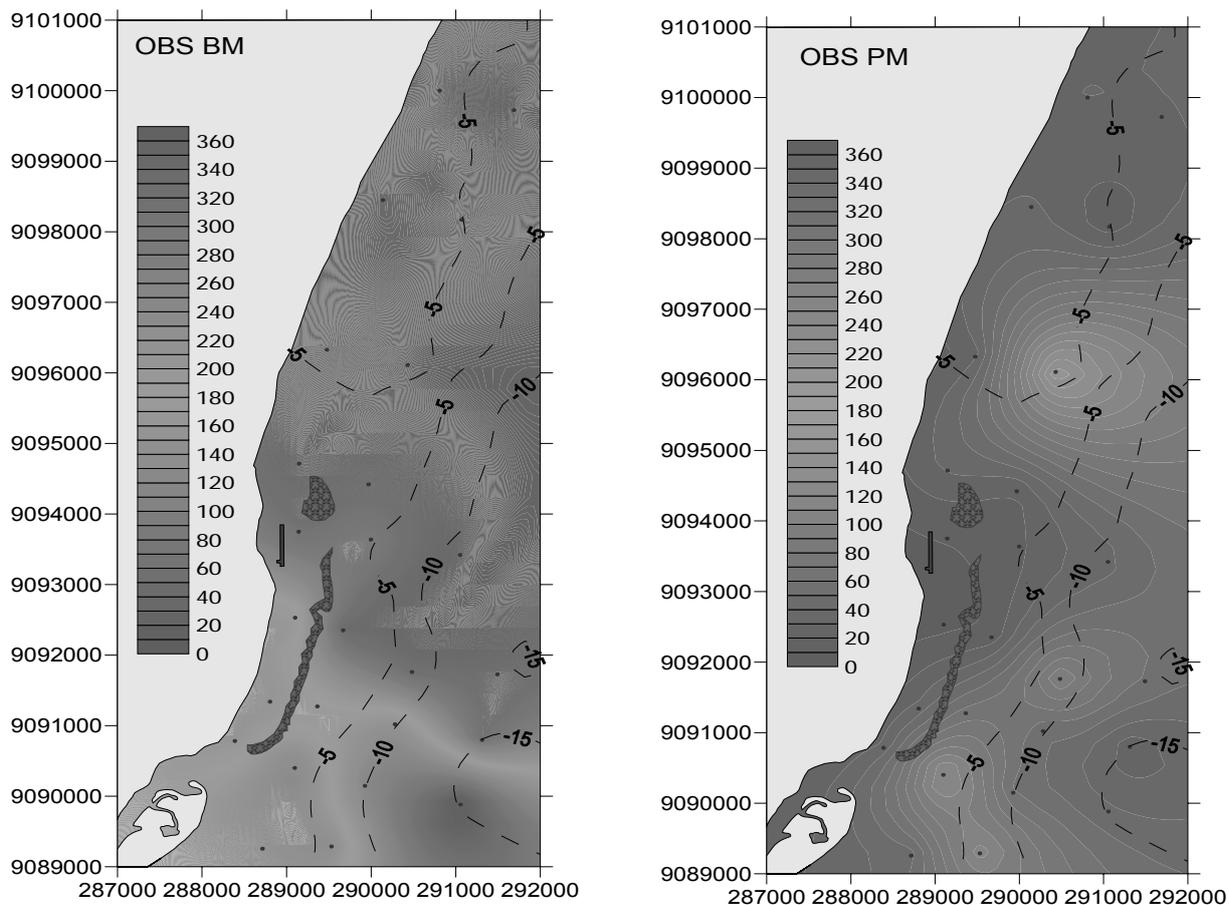
A área costeira sob influência da pluma estuarina, delimitada utilizando a distribuição da salinidade como traçador, para estágios de preamar e baixa-mar é apresentada na figura 59 e utilizando a distribuição do sinal de retroespalhamento ótico na figura 60.

A pluma estuarina restringiu-se aos primeiros 0,5-2m de profundidade. No período chuvoso, a drenagem do sistema Pirapama/Jaboatão escoar tanto pela barra principal do estuário quanto ao longo da praia de Candeias e se desloca até as praias de Piedade e Boa Viagem devido a predominância dos ventos SE.



**Figura 59.** Região sob influencia da pluma estuarina do sistema Pirapama/Jaboatão na preamar (PM) e baixa-mar (BM).

No período de estiagem, o estuário escoia principalmente entre a praia e recifes atingindo até a praia de Piedade. Na área de estudo, a salinidade variou entre 18 e 36, com os menores valores ocorrendo à superfície e próximo à costa. O sinal de OBS foi mais elevado próximo ao fundo nas estações com sedimentos mais finos.



**Figura 60.** Distribuição do sinal de retroespalhamento óptico ao longo da região sob influência da pluma estuarina do sistema Pirapama/Jaboatão na preamar (PM) e baixa-mar (BM).

A presença de um recife próximo à costa e a norte da desembocadura parece atuar como guia corrente natural, direcionando a pluma, e fazendo com que durante a baixa-mar, parte da descarga fluvial flua próximo à costa influenciando diretamente a qualidade de suas águas e o aporte de sedimentos para a mesma, enquanto que outra parte siga para áreas mais profundas, acompanhando as isóbatas de 5 a 10m. Durante a preamar, a pluma estuarina fica restrita à área entre a linha de costa e o recife costeiro, ao passo que as águas de menor salinidade inicialmente encontradas próximo à desembocadura, são deslocadas para norte. O ambiente mais abrigado favorecido pela presença do recife propicia a sedimentação nas áreas mais costeiras, evidenciado pela progradação deste trecho da costa e redução do sinal de OBS na camada superficial.

## 6.6 Correntometria

### 6.6.1 - Transporte líquido

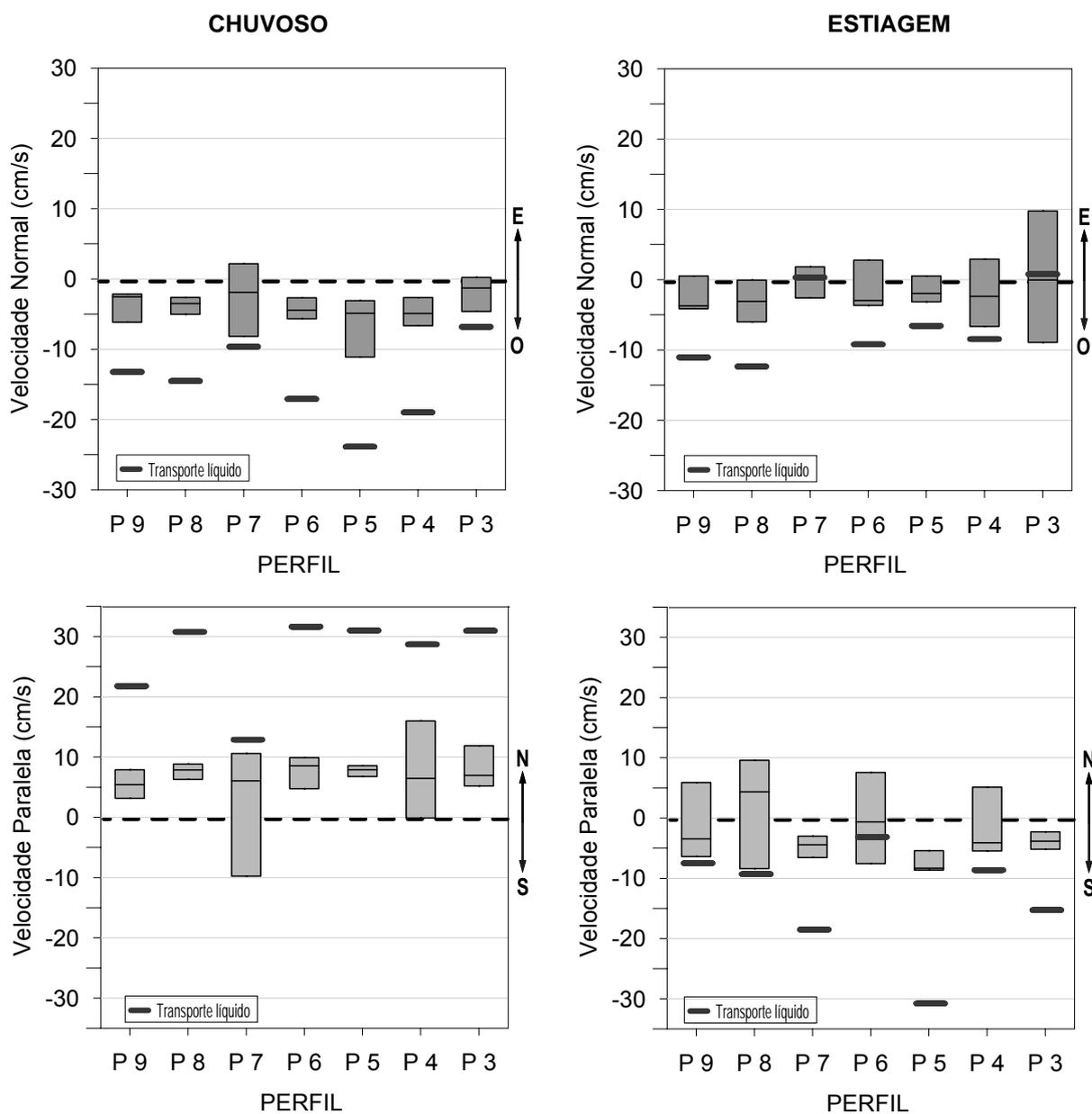
O transporte líquido normal e paralelo a costa à superfície e próximo ao fundo para a área de estudo foi computado para um ciclo completo de maré de sizígia (12,42h), para os períodos chuvoso e de estiagem e apresentado, respectivamente, nas Figuras 61 e 62,

O transporte à superfície durante o período chuvoso se dá predominantemente para norte e contra a costa, ao longo da região representada pelos perfis P9 a P3 (Fig. 61). As componentes paralelas à costa e normal à costa das correntes instantâneas medidas *in situ* nos vários estágios de marés apresentaram igualmente direção norte e oeste, única exceção se fazendo para a área do P7, onde ao longo do ciclo da mares, apresentou instantaneamente componente paralela a costa direcionada para sul e contra a costa. O módulo das correntes normais à costa variou entre 6 e 25  $\text{cm.s}^{-1}$  enquanto o módulo das correntes paralelas à costa, variou entre 12 e 31  $\text{cm.s}^{-1}$ .

Durante o período de estiagem os valores líquidos das componentes normal, à costa ao fim de um ciclo de maré, aproximam zero nos perfis P7 e P3, e tem direção a costa nos demais perfis com valores modulares de 7 a 12  $\text{cm.s}^{-1}$  (Fig. 61). Nesta estação sazonal a direção da componente da velocidade paralela à costa oscila entre norte e sul, resultando em um transporte líquido para sul ao fim do ciclo de maré. Seu módulo oscilando entre 3 e 30  $\text{cm.s}^{-1}$  ao longo da costa, com os maiores valores registrados no perfil P5 (Fig. 61)

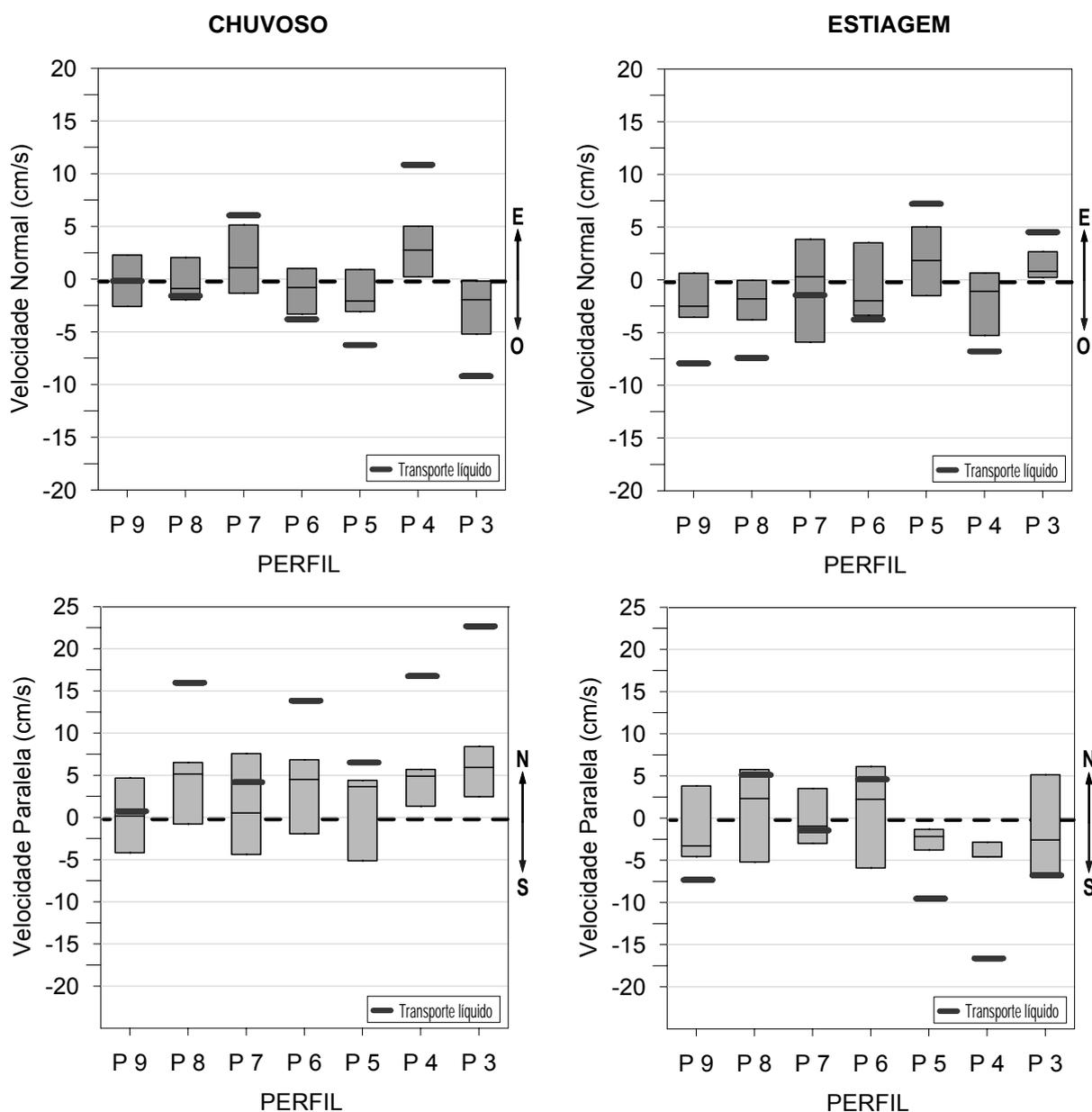
Próximo ao fundo, o transporte líquido durante o período chuvoso se dá predominantemente para norte, sendo mínimo na região do perfil P9 (Fig. 62). O módulo das correntes líquidas paralela à costa varia entre 0 e 22  $\text{cm.s}^{-1}$  ao longo da área com os maiores valores registrados para o perfil P3.

O transporte líquido normal à costa para oeste (contra a costa) nos perfis P3, P5, P6 e P8 e tem direção Este (costa-a-fora) nos perfis P4 e P7, sendo nulo na região do perfil P1.



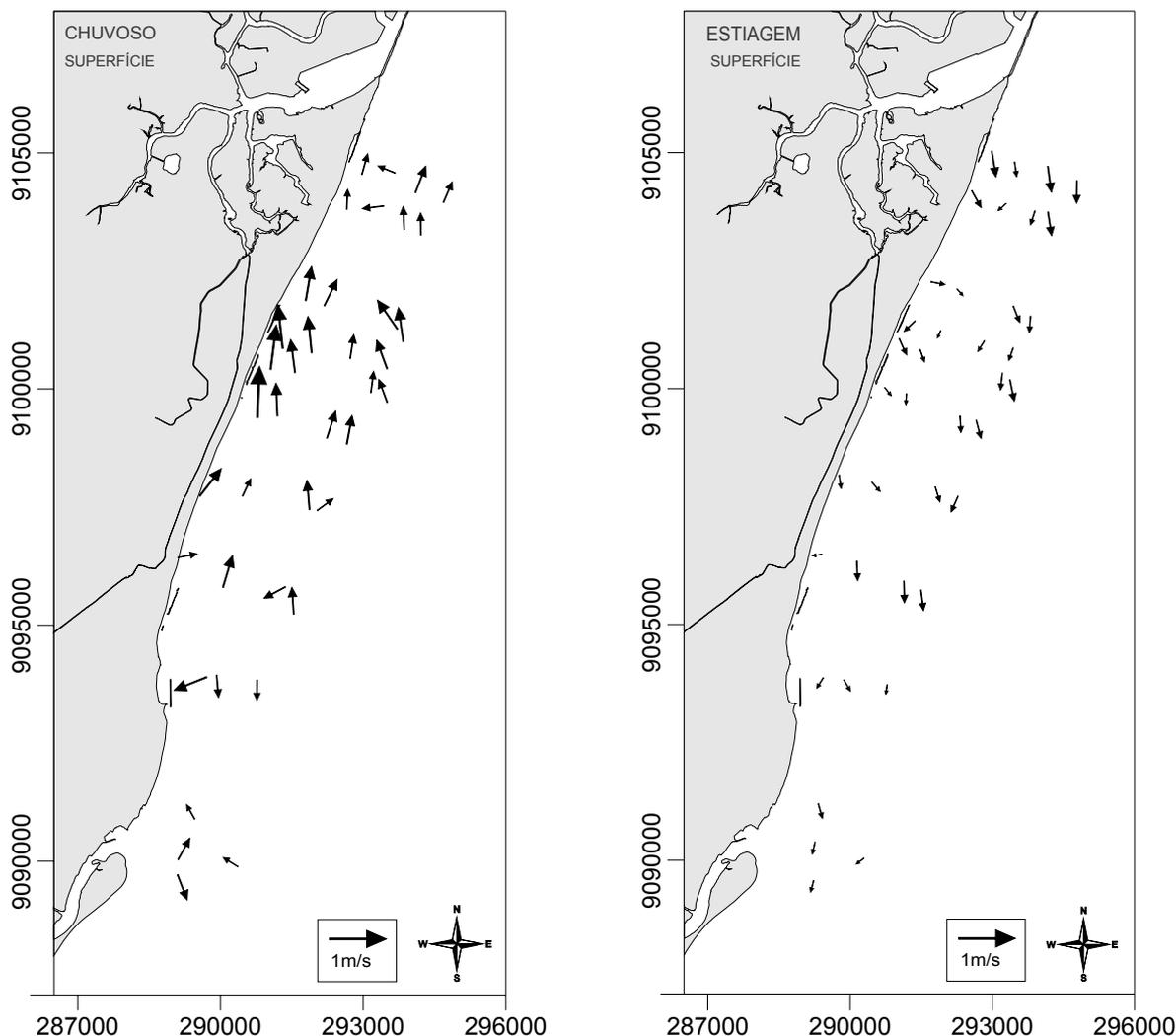
**Figura 61.** Transporte líquido à superfície nos períodos chuvoso e de estiagem ao longo das 7 estações paralelas à costa

No período de estiagem, ainda próximo ao fundo, o transporte líquido ao longo da costa se dá para sul nas imediações dos perfis P3, P4, P5 P7 e P9 e para norte nos perfis P6 e P8, com valores modulares de 2 a 16 cm.s<sup>-1</sup> (Fig. 62). O transporte normal à costa é contra a costa, exceto nos perfis P5 e P3, em que está direcionado costa-a-fora, com as correntes líquidas apresentando valores modulares de 2 a 7 cm.s<sup>-1</sup>.



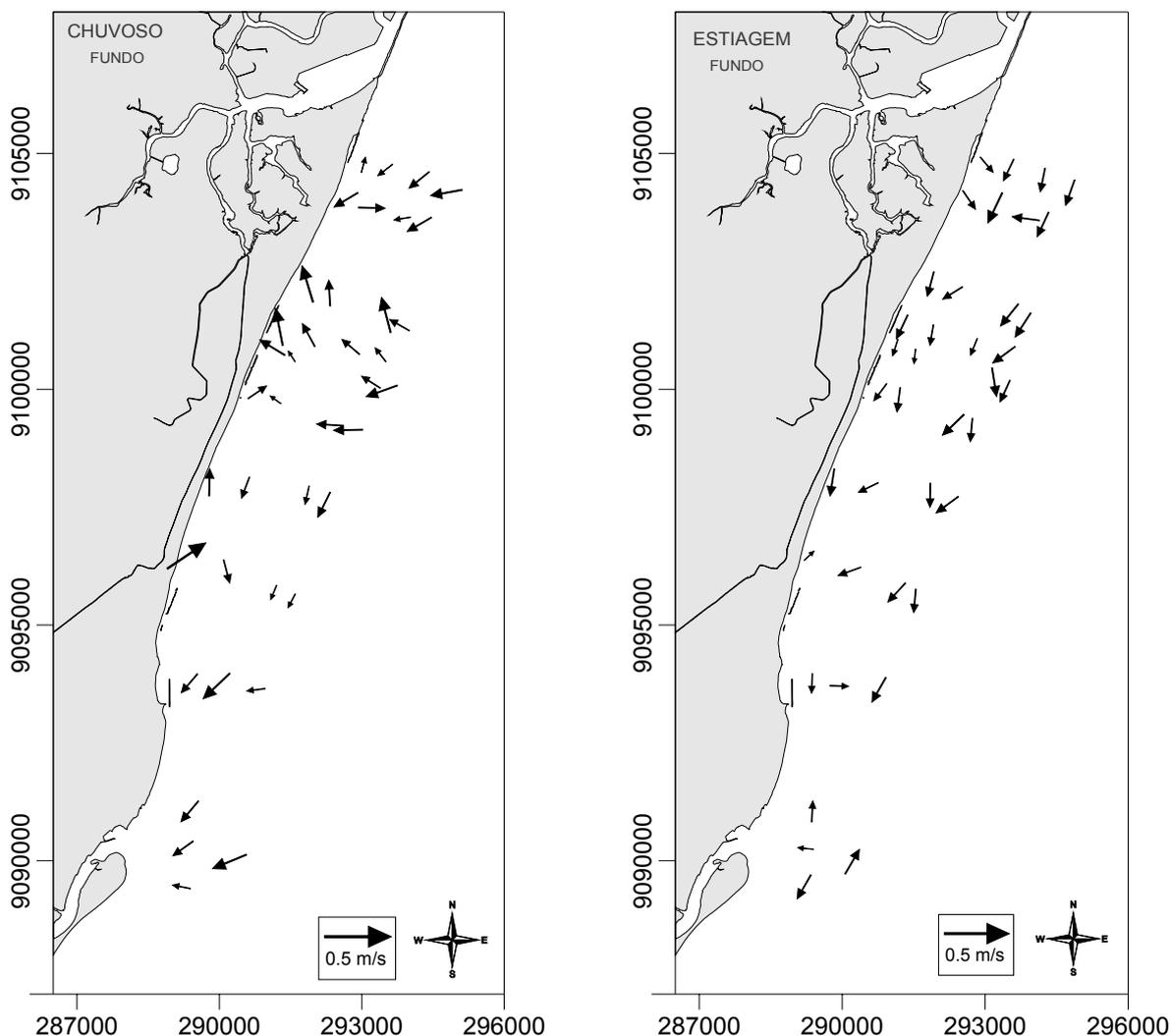
**Figura 62.** Transporte líquido no fundo nos períodos chuvoso e de estiagem ao longo das 7 estações paralelas à costa

Nas figuras 63 e 64, são representados os vetores transporte líquido ao longo da região de estudo, respectivamente para os períodos chuvoso e de estiagem nas camadas superficiais e profundas.



**Figura 63.** Plote vetorial do transporte líquido durante os períodos chuvoso e de estiagem na camada superficial.

As correntes superficiais e profundas são mais intensas e contra à costa na área de Boa Viagem. Próximo à superfície o transporte líquido apresenta uma modulação sazonal, se dando predominantemente para norte e contra a costa durante o período chuvoso e para sul e costa fora durante o período de estiagem, neste último caso, sendo de menor escala.

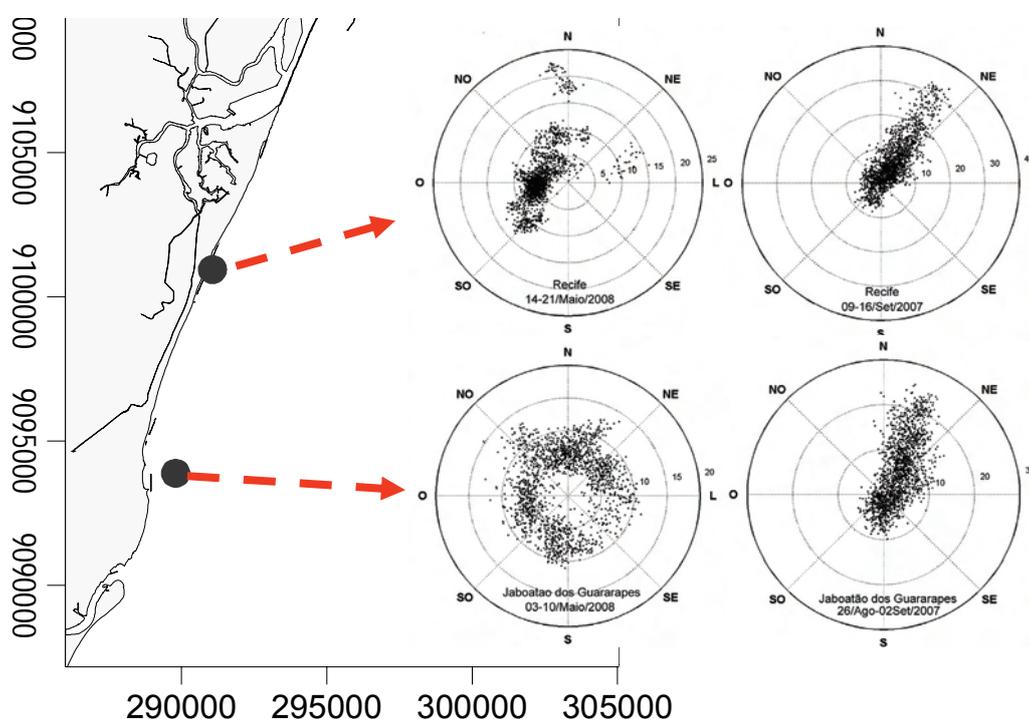


**Figura 64.** Plote vetorial do transporte líquido durante os períodos chuvoso e de estiagem na camada próxima ao fundo.

O padrão do transporte líquido próximo ao fundo se dá principalmente de norte para sul no período de estiagem com um padrão mais complexo durante o período chuvoso. Aqui, o transporte líquido tem sentido preferencial sul na região a sotamar do recife principal, enquanto que junto a costa tem sentido sul nos extremos norte e sul da área de estudos, sendo preferencialmente para norte no trecho central da área.

### 6.6.2 Series Temporais

Séries temporais obtidas a 1m acima do fundo com correntôgrafo/ondógrafo S4DWi durante fundeios de 8-dias de duração, indicam uma marcada sazonalidade no regime das correntes. Os registros obtidos são apresentados na forma de plotes polares (Fig. 65) e Diagramas Stick (Fig. 66).

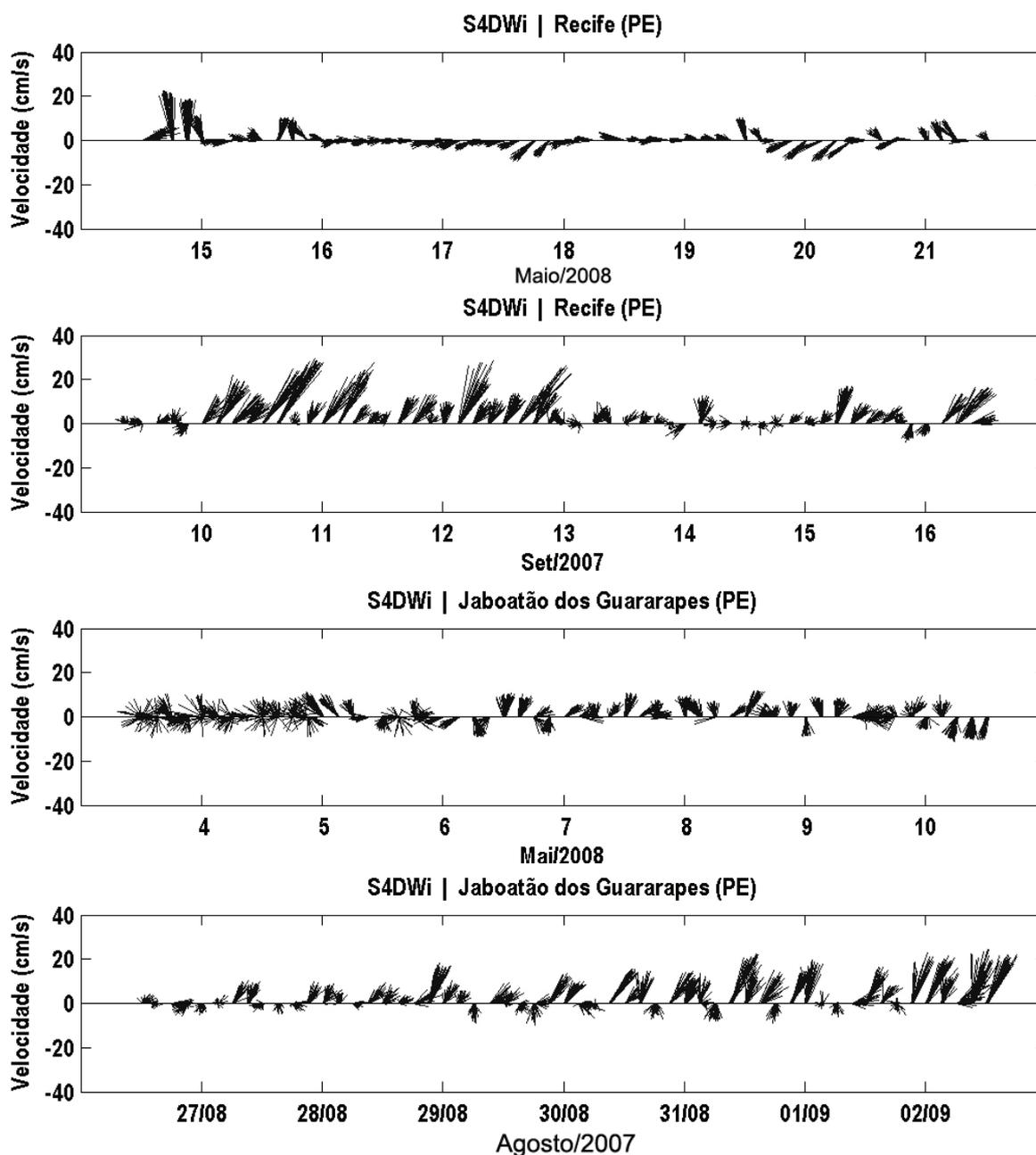


**Figura 65.** Representação polar dos registros de corrente obtidos com correntôgrafo/ondógrafo S4DWi em maio-junho/2008 e ago-set/2007.

Durante o período de ventos mais intenso (ago-set) as correntes têm direção preferencial 30° Az atingido valores de 30 cm.s<sup>-1</sup> próximo à costa em Boa Viagem (Recife) e valores de 20 cm.s<sup>-1</sup> próximo a costa em frente ao Edf. Ancoradouro (Jaboatão dos Guararapes).

Durante o período chuvoso (maio-junho) as correntes em Recife são menos intensas, com valores mais freqüentes de 5 a 10 cm.s<sup>-1</sup> e oscilam entre os setores N-

NE e S-SO. Em menor frequência, ocorrem também correntes com intensidade de cerca de  $20 \text{ cm.s}^{-1}$  para norte e correntes de  $10$  a  $15 \text{ cm.s}^{-1}$  de intensidade para Este. O momento de ocorrências desses eventos (15/ago/2008) pode ser melhor visualizado com os diagramas stickc(Fig. 66)



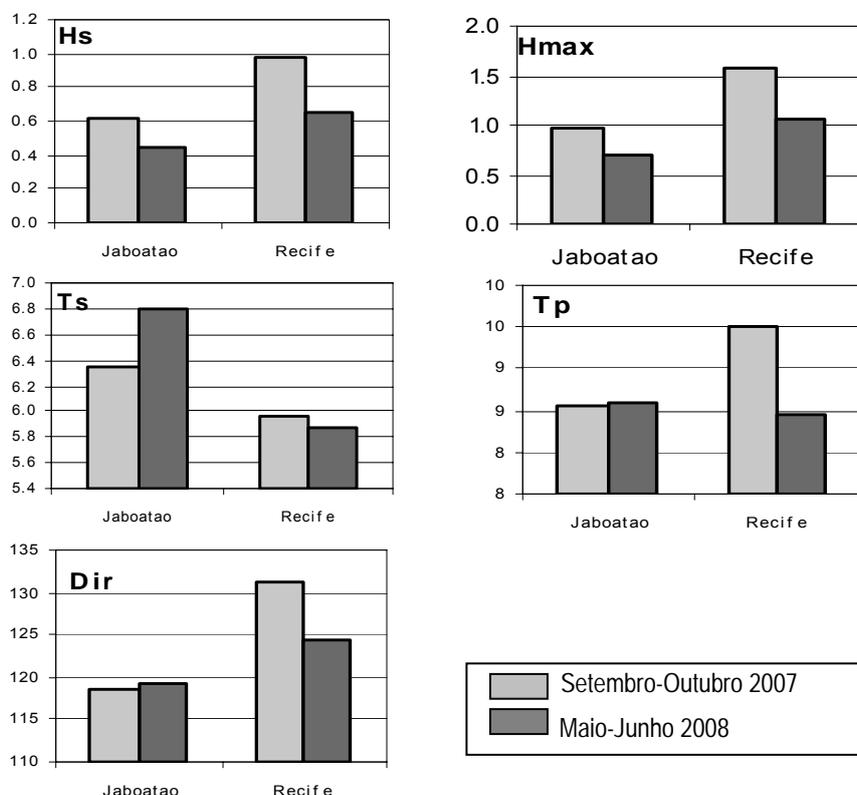
**Figura 66.** Diagrama stick das correntes de fundo registradas com correntografo/ondografo S4DWi em maio-junho/2008 e ago-set/2007

### 6.7 Clima de Ondas

A localização dos pontos de fundeio do ondógrafo S4 no litoral dos Municípios de Jaboatão dos Guararapes e Recife é indicada na figura 65. Os parâmetros característicos das ondas derivados a partir dos registros obtidos com S4 para nas duas regiões foram sumarizados na Tabela 4 e são ilustrados na figura 67.

**Tabela 4.** Altura significativa ( $H_s$ ), altura máxima ( $H_{max}$ ), período significativo ( $T_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção das ondulações de superfície ao longo da área de estudo respectivamente para o período de ago-set /maio-junho.

LOCAL	$H_s$ (m)	$H_{max}$ (m)	$T_s$ (s)	$T_p$ (s)	Direção (°Az)
Jaboatão	0,61 / 0,44	0,98 / 0,71	6,34 / 6,81	8,57 / 8,58	119 (097–140) / 119 (079-148)
Recife	0,97 / 0,66	1,57 / 1,07	5,97 / 5,88	9,50 / 8,45	131 (116–152) / 124 (052-157)



**Figura 67.** Parâmetros característicos das ondulações de superfície no litoral dos municípios de Jaboatão dos Guararapes (Edf. Ancoradouro) e Recife (P5, Hotel Atlantico Plaza) nos períodos de setembro-outubro e maio-junho.

Análises das series temporais obtidas para a área de estudo apontam para ondas de gravidade com alturas significativas médias de 0,60 a 0,97 m em agosto/setembro e 0,44 e 0,66 m em maio/junho nas áreas costeiras de Jaboatão dos Guararapes e Recife.

Os períodos significativos das ondulações nessas estações variou entre 5,97 e 6,34 segundos em ago-set e entre 5,88 e 6,81 segundos em maio-junho. As maiores ondulações ocorreram na região do Recife, com Hs de 1,57 m no período de ventos mais intensos.

No litoral de Jaboatão dos Guararapes, a direção preferencial das ondas foi de 119 Az, independentemente da estação sazonal. Já na região do Recife, a direção preferencial foi de 131 Az em ago-set, e um pouco mais voltada para este (124 Az) em maio-junho. Os maiores períodos de pico (9,50 s) ocorreram na estação de ventos mais intensos no litoral do Recife.

O clima de ondas na região costeira de Pernambuco é principalmente governado pelos ventos ao largo e locais (Neumann *et al.*, 1996). Dados pretéritos para a área de Boa Viagem, Piedade e Candeias, apontam para ondas de gravidade com alturas médias de 0,7 a 1,2 m e períodos médios entre 5 e 7 segundos e alturas e períodos significativos entre 0,9 e 1,4 m e entre 6 e 8 segundos, respectivamente, com as maiores ondulações ocorrendo durante os meses de setembro e janeiro, e as menores, durante os meses de março e julho (Rollnic, 2002). Esses resultados são compatíveis com os valores encontrados no presente estudo.

## 6.8 Modelagem Matemática e Simulações Numéricas.

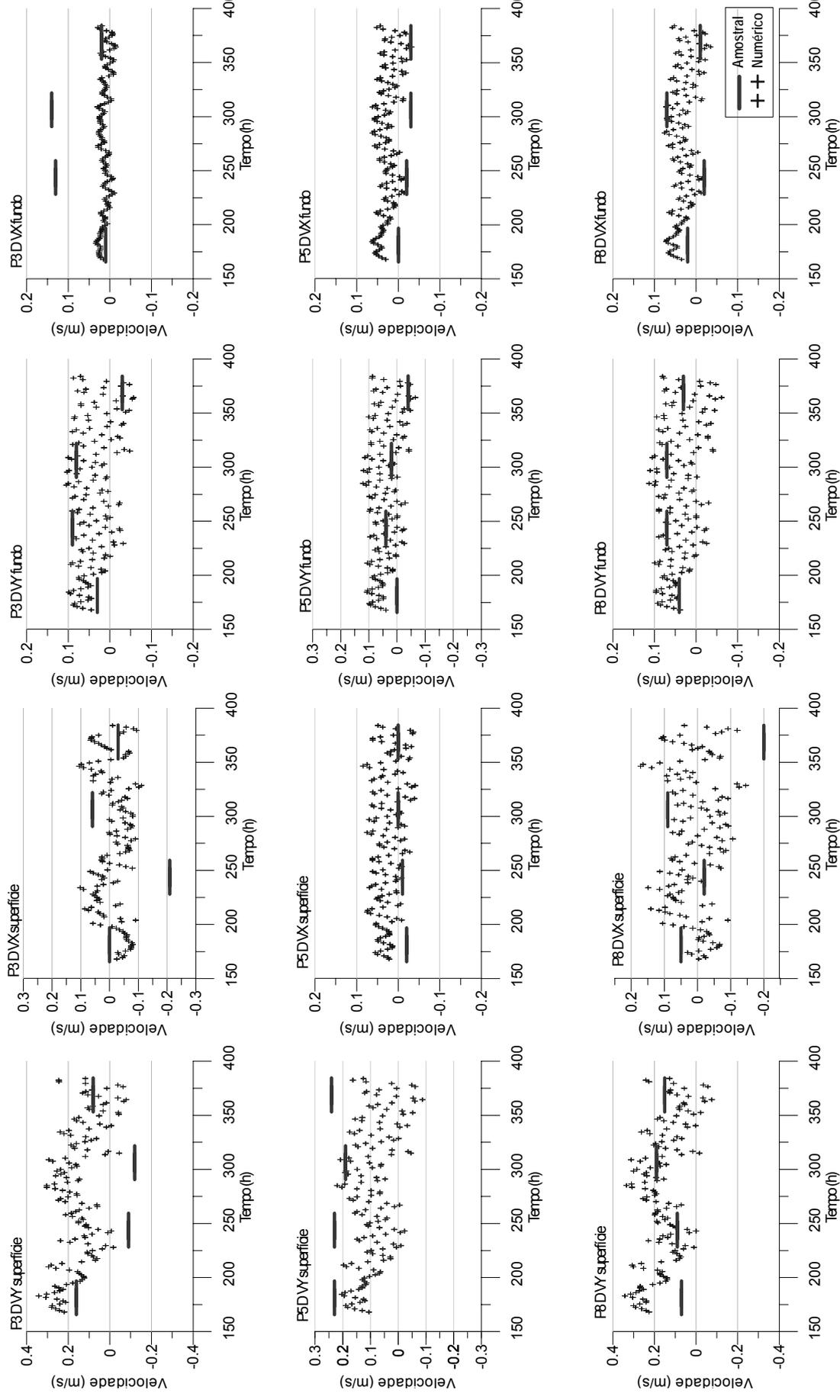
O modelo SisBaHiA foi utilizado nas simulações dos campos das correntes superficiais e próximas ao fundo na área de estudo considerando o Cenário 1 de ventos mais fortes e predominantemente SE, durante o período chuvoso, e o Cenário 2, com ventos mais fracos e predominantemente do setor NE, que ocorrem durante o período de estiagem, principalmente nos meses de dezembro e janeiro.

Antecedendo as simulações dos cenários de interesse, e visando avaliar quão bem o mesmo reproduzia as condições reais observadas *in situ*, valores das intensidades das correntes normais (VX) e paralelas (VY) à costa durante 10 dias de simulação foram contrastadas com os valores líquidos das correntes normais e paralelas obtidas a partir das medições instantâneas nos diferentes estágios de marés..

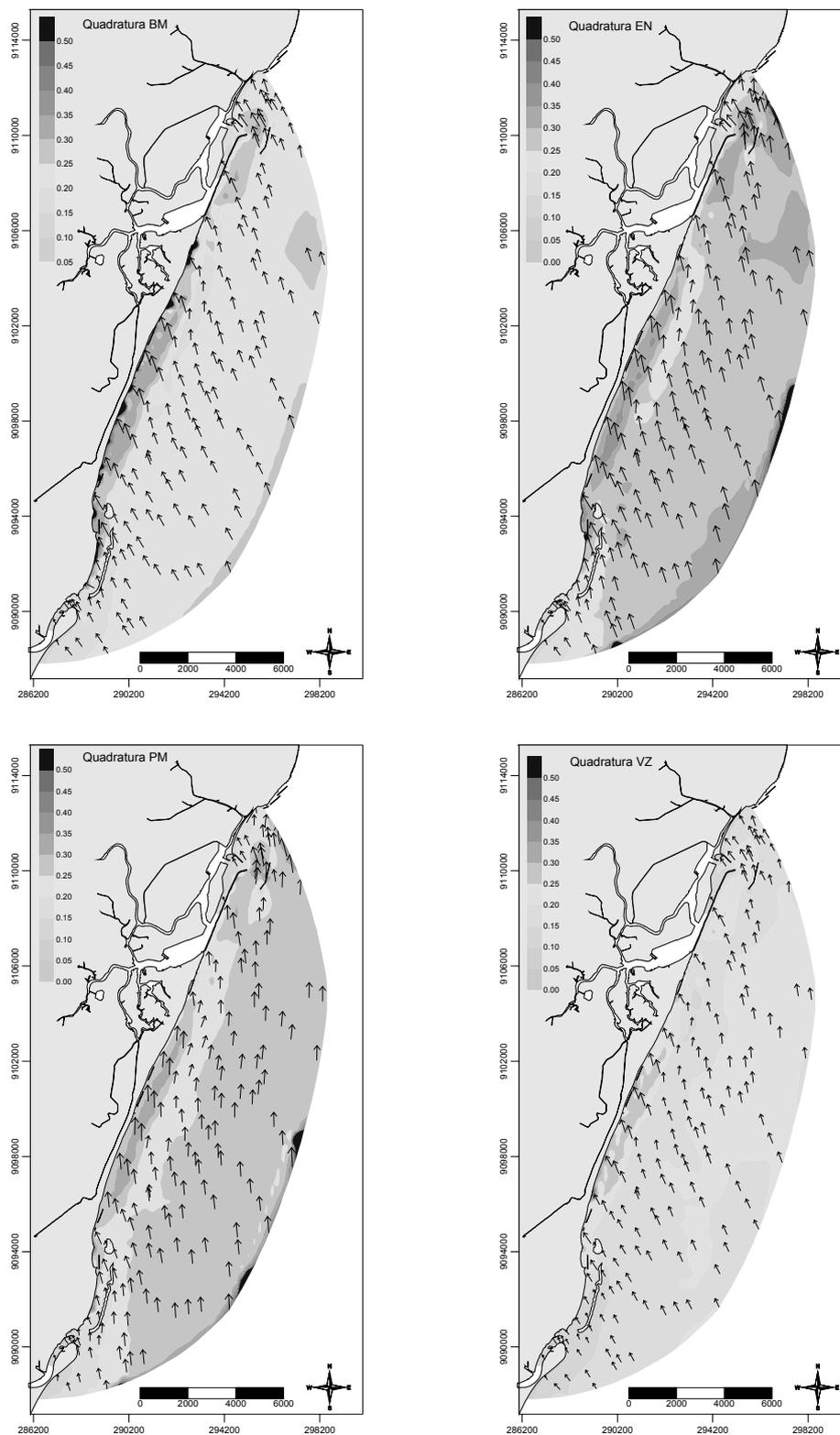
A título de exemplo essas comparações são apresentadas para a estação mais costeira (estação D), onde se espera uma maior flutuação, para os trechos sul (P3), mediano (P5) e norte (P8) da área de estudo (Fig. 68).

Verifica-se um bom ajuste entre valores simulados e obtidos *in situ* com correntômetro, com os valores simulados envelopando os dados experimentais, tanto em termos de valor absoluto quanto de faixa de variação, sobretudo para os valores das correntes paralelas a costa e para a camada de fundo.

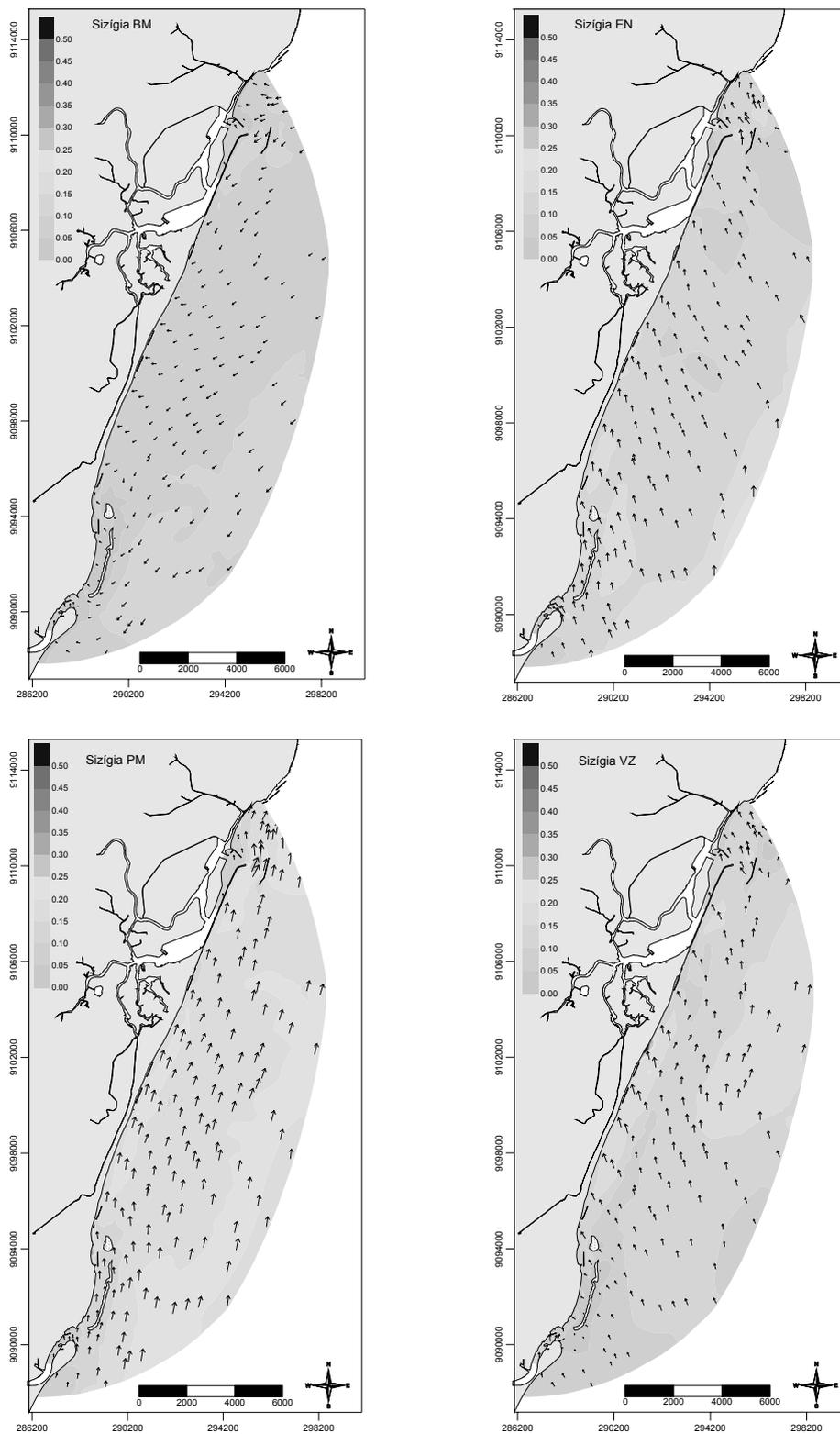
O campo simulado das correntes superficiais ao longo da área de estudo para os momentos de baixa-mar, enchente, preamar e vazante durante marés de quadratura e sizígia no período chuvoso é apresentado respectivamente nas figuras 69 e 70.



**Figura 68.** Intensidade das correntes medidas *in situ* (amostrado) e geradas pelo SisBaHIA (numérico) para as camadas superficial e de fundo. Perfis 3, 5 e 8.



**Figura 69.** Simulação da circulação superficial durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma quadratura no Período chuvoso.



**Figura 70.** Simulação da circulação superficial durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma sizígia no Período chuvoso.

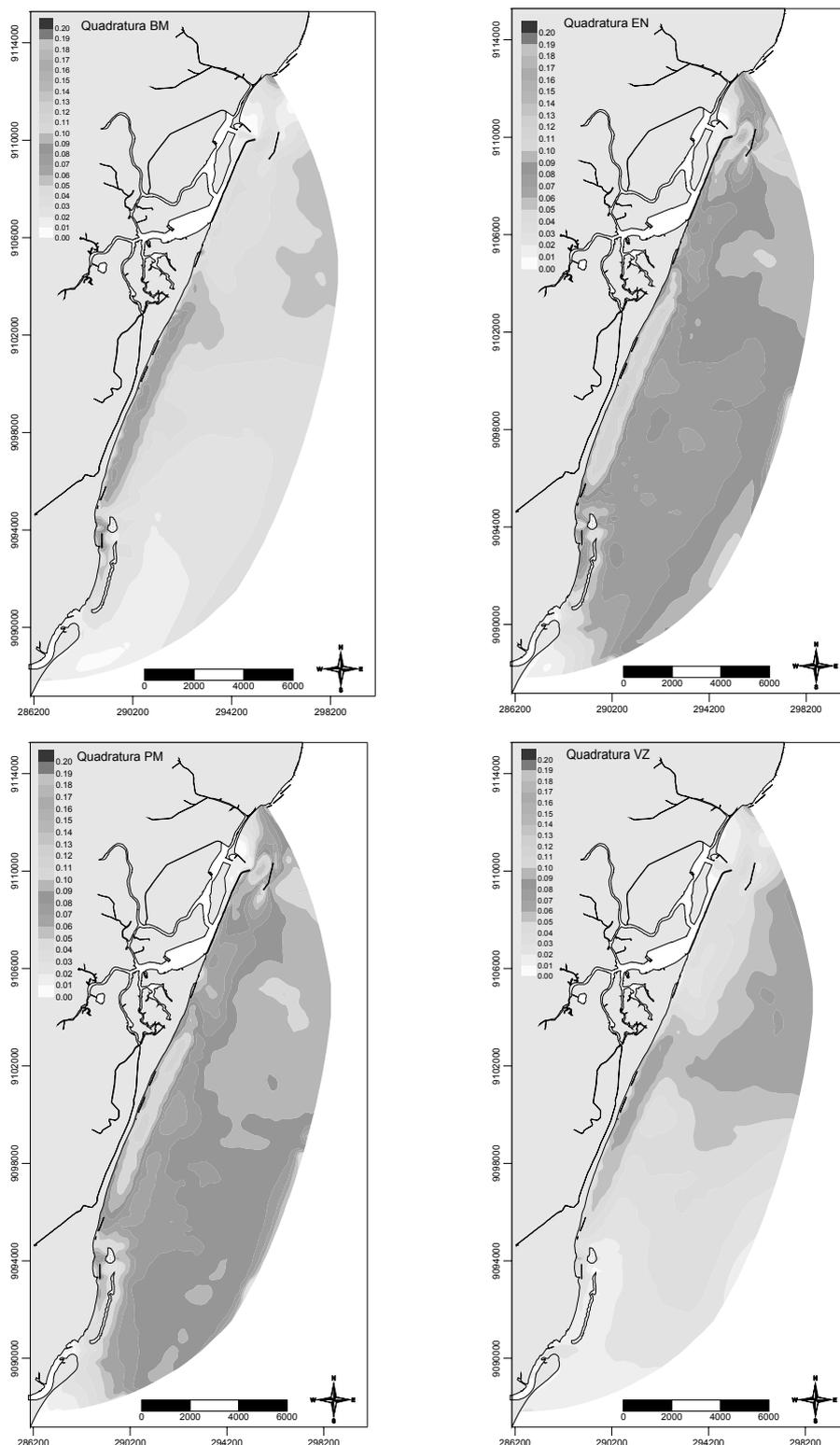
Durante as quadraturas do período chuvoso, verifica-se uma tendência geral de escoamento para norte na camada superficial (Fig. 69). A intensidade das correntes varia entre  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$  e  $0,45 \text{ m.s}^{-1}$ , com os maiores valores ocorrendo durante os estágios de enchente e preamar. Ao longo de todo ciclo de maré, observa-se uma intensificação das correntes próximo à costa nas praias de Piedade e no setor sul da praia de Boa Viagem.

Durante as sizígias do período chuvoso (Fig. 70) predominam correntes direcionadas para norte, exceto durante o estágio de baixa-mar durante o qual se observa uma inversão do sentido das mesmas, embora estas apresentem baixa intensidade (aproximadamente  $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ ). A intensidade das correntes foi menor durante a sizígia do que na quadratura, indicando que a forçante eólica prevalece sobre a forçante astronômica. Também nas sizígias, as maiores intensidades de correntes ocorreram ao longo da região costeira de Boa viagem e Piedade.

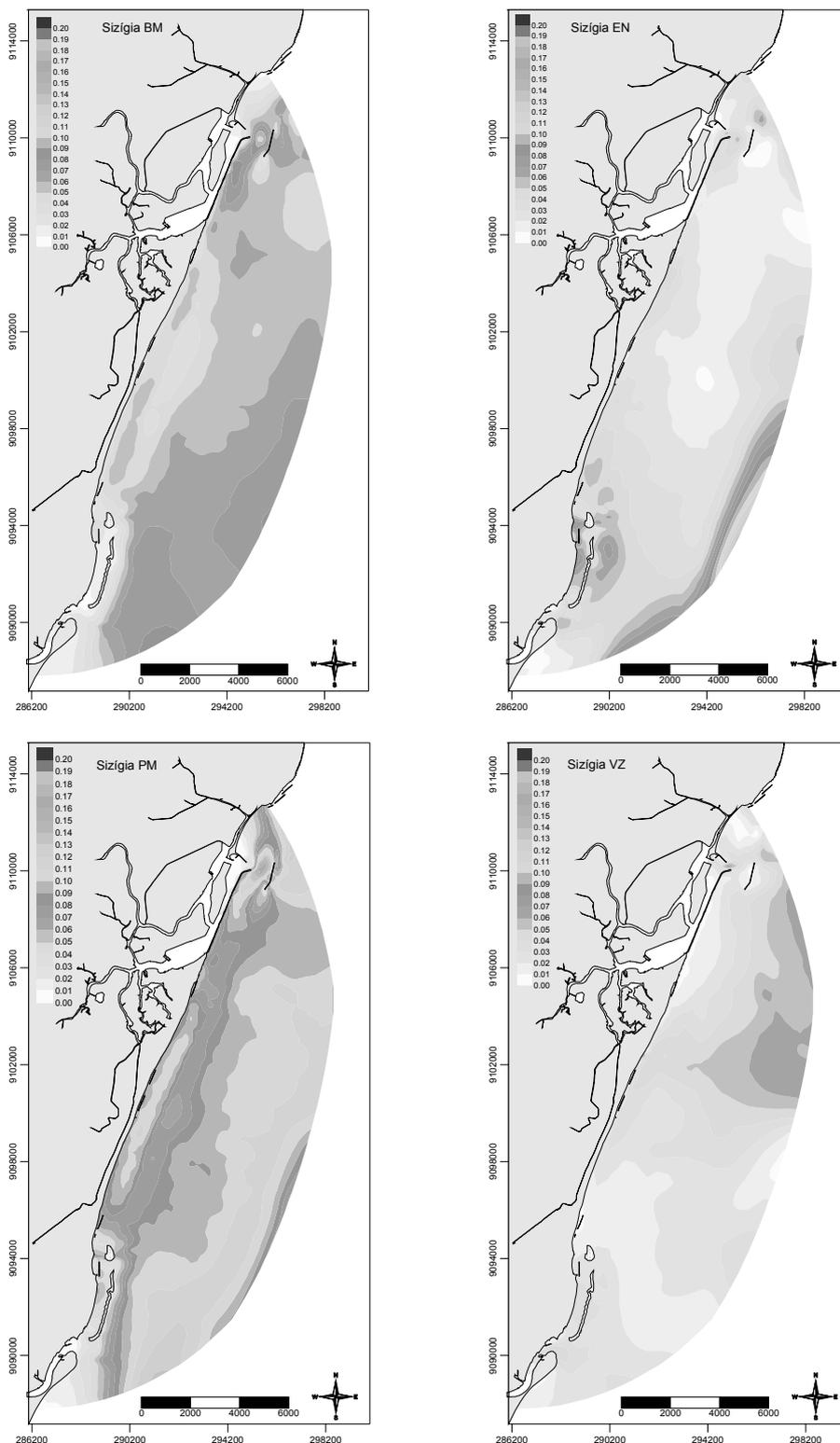
Os campos das correntes próximos ao fundo são de particular interesse no transporte e ressuspensão dos sedimentos de fundo e como agente moduladores do relevo submarino.

Nas Figuras 71 e 72, são apresentados os campos das correntes de fundo simulados para os estágios de maré de baixa-mar, enchente, preamar e vazante de para o período chuvoso, e de predomínio de ventos SE, respectivamente para ciclos de marés de quadratura e de sizígia. Esses campos foram representados de forma a destacar a variabilidade e a distribuição da intensidade de corrente ao longo da área de estudo e assim permitindo identificar as áreas mais suscetíveis ao transporte de sedimentos.

Durante a quadratura observou-se que na camada próxima ao fundo as intensidades de correntes foram maiores na região costeira de Piedade e setor sul de Boa Viagem chegando a  $0,11 \text{ m.s}^{-1}$ . Durante os estágios de enchente e preamar as correntes se apresentaram mais intensas. No estágio de vazante observou-se na saída do estuário a maior intensidade no eixo leste – oeste, indicando que o fluxo principal de sedimento pode não estar acontecendo ao longo da praia de candeias.



**Figura 71.** Simulação da circulação de fundo durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma quadratura no Período chuvoso.



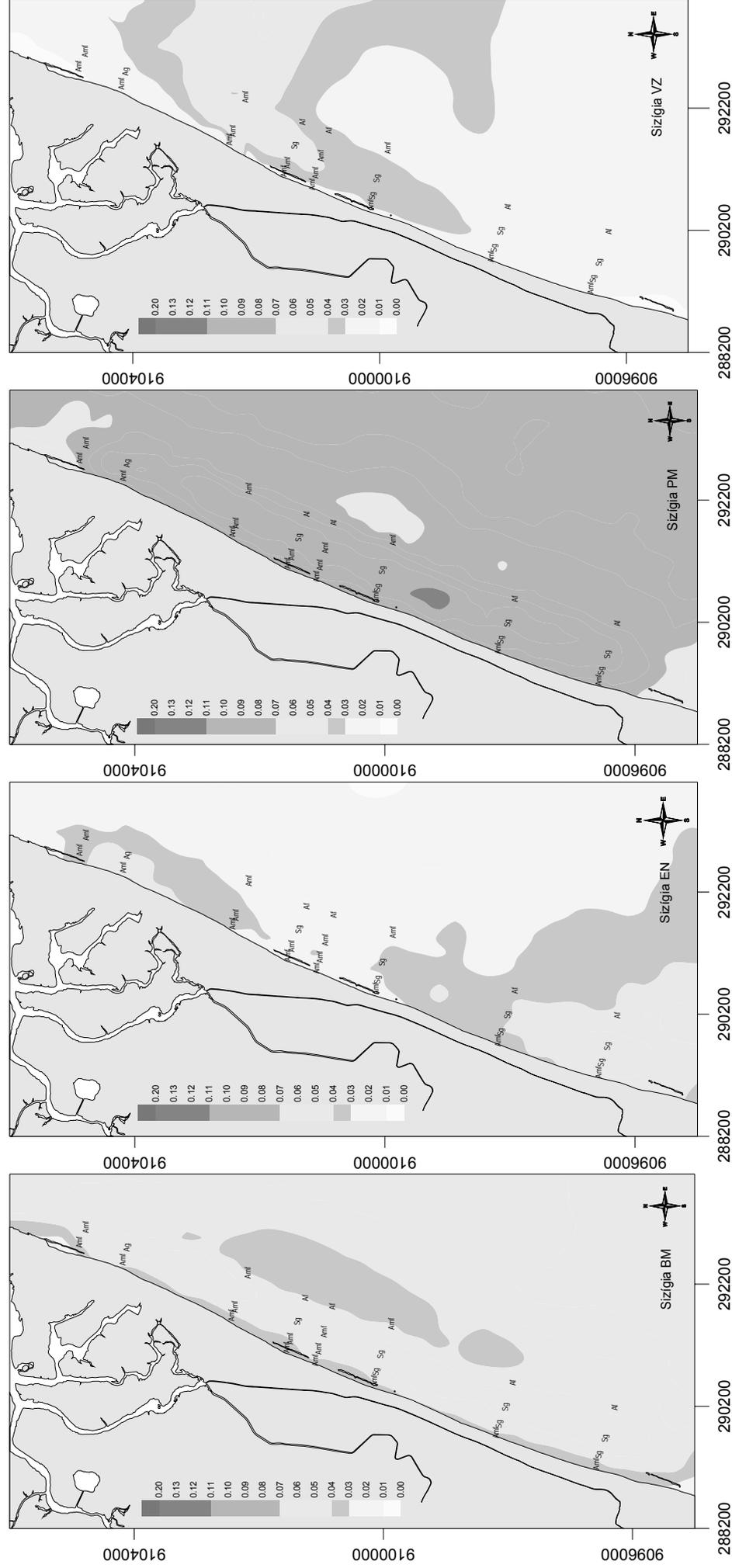
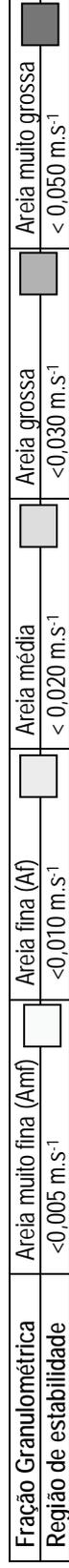
**Figura 72.** Simulação da circulação de fundo durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma sizigia no Período chuvoso.

Na maré de sizígia as maiores intensidades de correntes aconteceram durante a preamar chegando  $0,16 \text{ m.s}^{-1}$  na saída do porto do Recife. Observou-se na preamar e baixa-mar os maiores valores na região costeira de Piedade e setor Norte de Boa Viagem. Durante a enchente a Praia de Candeias apresentou os valores mais elevados chegando a  $0,08 \text{ m.s}^{-1}$ . No estágio de vazante, o padrão de circulação da saída do estuário do Jaboatão seguiu o mesmo padrão da quadratura, mostrando um eixo leste – oeste.

Visando avaliar em maior detalhe o potencial de transporte de fundo e a estabilidade dos sedimentos em função do ciclo das marés no trecho das praias de Boa Viagem e Piedade delimitada pelos perfis P3 e P10 a mesma foi dividida em subárea em função dos níveis das velocidades críticas necessárias para mover as diferentes frações granulométricas segundo a curva de Hjulström e aqueles verificados na área de estudo. Este zoneamento é indicado na figura 73, onde as várias cores indicam a região onde cada fração estaria estável para o regime de correntes prevalecente. Nestas mesmas figuras são ainda indicadas as frações granulométricas de maior expressão, conforme identificadas nas amostras analisadas.

No estágio de baixa-mar observa-se ao longo da costa que a fração areia média não seria transportada, com exceção de um pequeno trecho na praia de Boa Viagem, onde existe o enrocamento. Neste trecho, a fração que seria estável no regime seria a areia grossa, como na maior parte da área.

Durante os estágios de maré enchente o potencial do regime de correntes de fundo para transportar sedimento é maior ao sul da área de estudo, ao longo da praia de Piedade, tendendo a diminuir em direção a praia da Boa Viagem. Ao longo da praia do Pina, novamente o potencial para transporte de fundo dos sedimentos volta a crescer. Nesta região, apenas as frações com diâmetros superiores ao da areia grossa, não seriam transportados.



**Figura 73.** Indicação das áreas onde as correntes de fundo durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) poderiam transportar as diferentes frações granulométricas.

O maior potencial de transporte de fundo dos sedimentos foi observado para o estágio de preamar, quando em toda a área de estudo, excetuando-se apenas o trecho sul, na praia de Piedade, as frações com diâmetros inferiores ao da areia média seriam passíveis de serem transportadas.

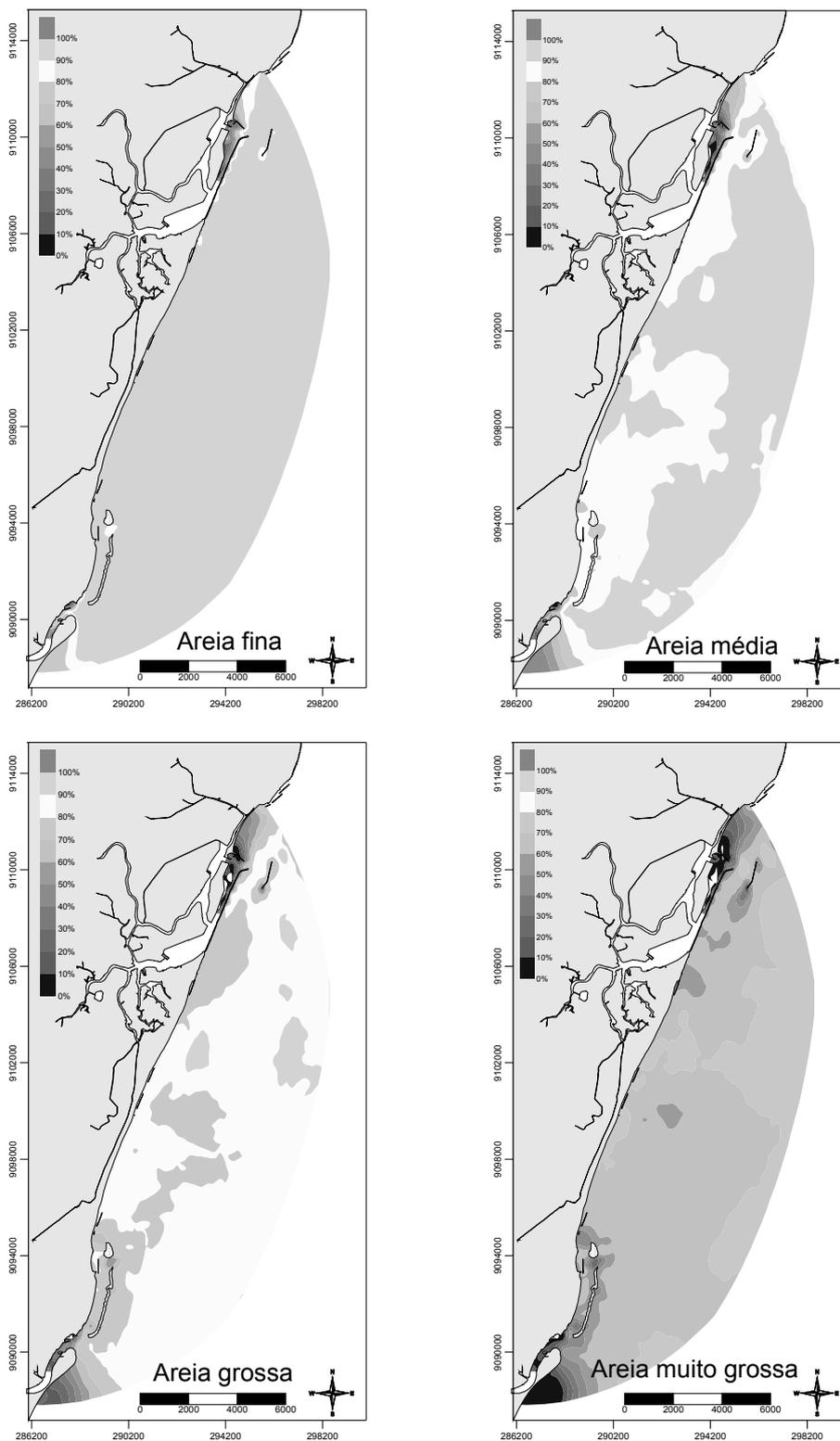
Durante a vazante, boa parte do setor sul da área não teria transporte de areia fina, enquanto que no setor norte em alguns pontos a areia fina e média seria transportada.

Estes resultados ao longo dos quatro estágios de uma maré de sizígia no período chuvoso mostram que as frações inferiores a areia grossa estão sujeitas a serem transportadas em quase toda a área em um determinado instante.

Complementando a análise do potencial de transporte de fundo dos sedimentos na área, considerou-se o período total da simulação (10 dias) buscando se mapear ao longo da área de estudo a probabilidade de ocorrência de diferentes níveis de intensidade das correntes próximo ao fundo capazes de mover as várias frações de sedimentos. A distribuição dessas probabilidades é apresentada na figura 74 para as frações Areia fina (Af), areia média (Am), areia grossa (Ag) e areia muito grossa (Amg).

Ao longo de toda área de estudo a fração areia fina teria 90% de chance de ser transportada. A areia média também teria uma grande probabilidade de ser transportada variando de 80 a 90%. A areia grossa apresentou um percentual maior de transporte na praia de Boa Viagem (80%), bem como a areia muito grossa (60%).

Os resultados obtidos indicam que a área está sujeita a um alto potencial de transporte, sendo a área mais propícia ao mesmo o setor sul-central de Boa Viagem, exatamente onde ocorre problema de erosão.



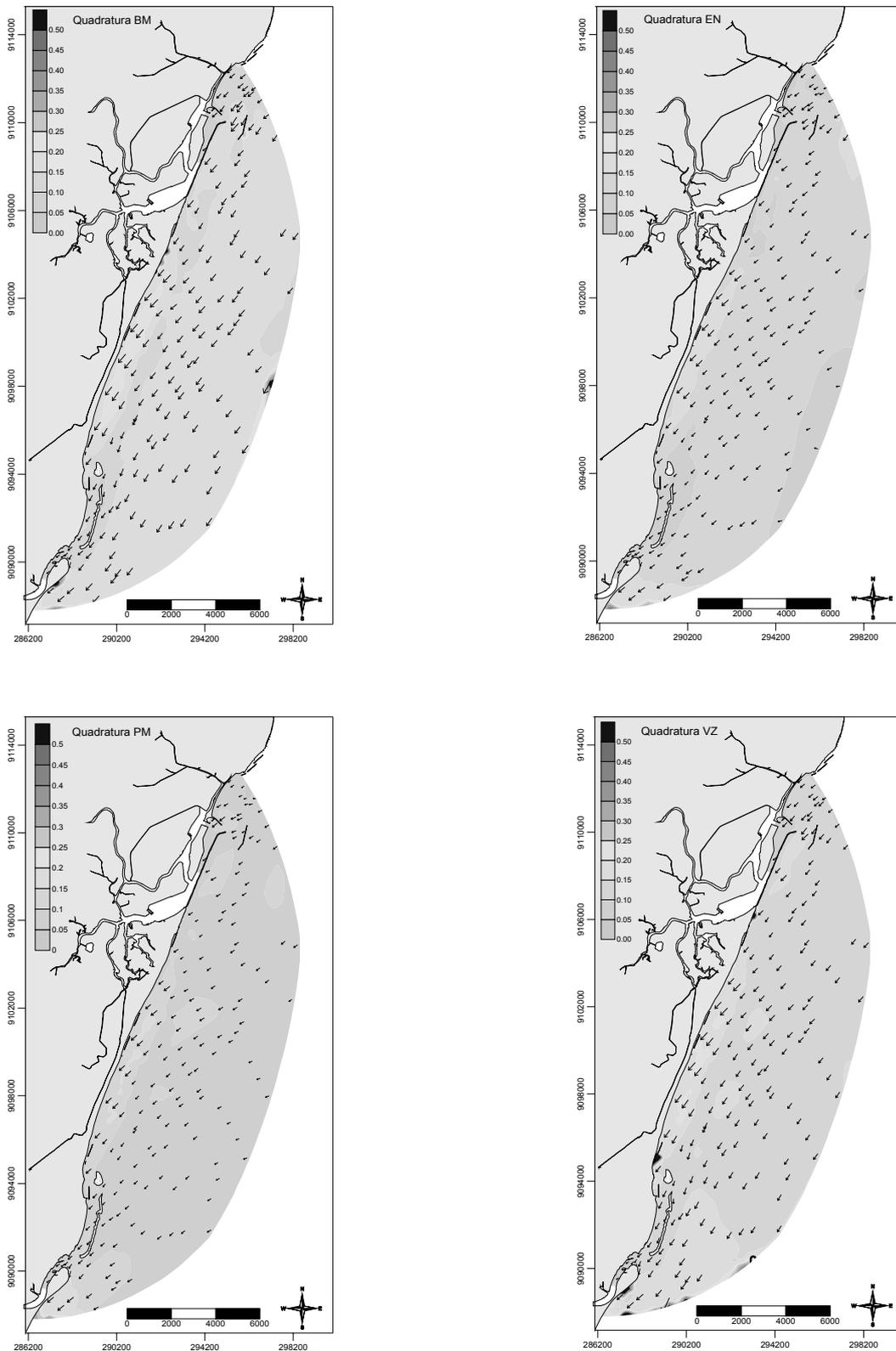
**Figura 74.** Distribuição da probabilidade de transporte das diferentes frações granulométricas de sedimentos. Período chuvoso.

O modelo SisBaHiA foi também utilizado na simulação de um cenário de vento NE (60 graus) com intensidade de  $4,11 \text{ m.s}^{-1}$ . Embora a região experimente predominantemente ventos alísios de SE, durante o período de estiagem eventos de ventos NE e NEE, são comuns. Ainda que de curta duração 3-12 dias esses eventos devem ser considerados na concepção dos projetos de defesa de costa, uma vez que tendem a reverter a circulação e conseqüentemente o transporte de material na área.

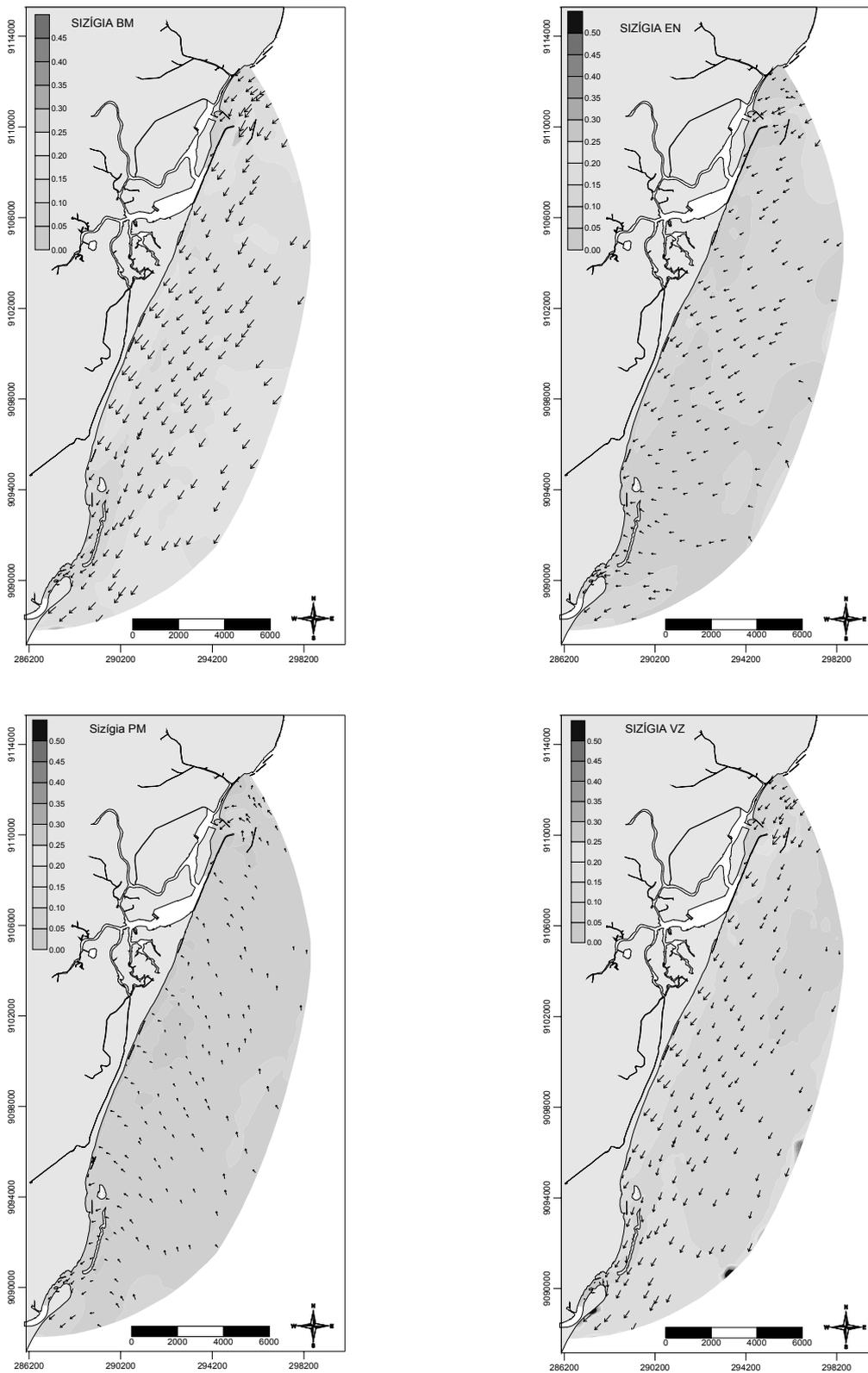
Os resultados das simulações indicam que sob ventos NE, as correntes superficiais são predominantemente para sul, sul com intensidade variando de 0,05 a  $0,45 \text{ m.s}^{-1}$ . Um padrão de circulação predominantemente para sul foi igualmente verificado a partir de medições *in situ* durante os períodos de estiagem por Rollnic (2002) e Rollnic & Medeiros (2006).

Sob regime de ventos NE, não se verifica grandes variações no padrão de circulação superficial entre os diferentes estágios do ciclo das marés nem entre os regimes de marés de quadratura (Fig. 75) e de sizígia (Fig. 76).

Por outro lado, nesse regime de ventos, o que fica mais evidente é a intensificação das correntes na região costeira de Boa Viagem, área que hoje apresenta problemas de erosão, similarmente ao verificado no cenário para o período chuvoso e ventos SE. Ou seja, a área de Boa Viagem, experimenta um regime de correntes mais intensas, tanto sob ventos prevalecente de SE quanto de NE.



**Figura 75.** Simulação da circulação superficial durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma quadratura sob regime de vento NE.



**Figura 76.** Simulação da circulação superficial durante os estágios de baixa-mar (BM), enchente (EN), preamar (PM) e vazante (VZ) de uma sizígia sob regime de vento NE.

## 7. CONCLUSÕES

- O levantamento batimétrico permitiu detectar feições importantes para os processos costeiros na área, como a presença de um recife submerso distando aproximadamente 1000 metros da costa, e a formação de um canal entre este recife e a linha de praia;
- No setor Norte (Pina), onde a praia é mais estável, o recife se aproxima da costa e uma segunda linha de recifes está presente;
- No cálculo do perfil de equilíbrio o valor de  $m=0,87$  foi aquele que resultou em um menor resíduo e conseqüentemente melhor aproximou o relevo local, tendo em vista seu declive mais acentuado. Exceção se fazendo para o perfil 3, com topografia suave, onde a utilização de um valor de  $m=0,67$ , mostrou-se mais adequada;
- O valor determinado para profundidade de fechamento do perfil de equilíbrio foi de 5,25m. Sua posição ao longo da área de estudo está localizada a cerca de 150m da costa nas praias do Pina e da Boa Viagem e no trecho norte da praia de Piedade, mas a 450 m no trecho sul desta última praia;
- A pluma estuarina restringiu-se aos primeiros 0,5-2m de profundidade. No período chuvoso, a drenagem do sistema Pirapama/Jaboatão escoava tanto pela barra principal do estuário quanto ao longo da praia de Candeias e se desloca até as praias de Piedade e Boa Viagem devido à predominância dos ventos SE;
- No período de estiagem a pluma da bacia do Pina atinge as praias do Pina e da Boa Viagem;
- O transporte líquido se dá predominantemente para norte e contra a costa no período chuvoso, e para Sul e contra a costa no período de estiagem;
- As ondas de gravidade tiveram alturas significativas médias de 0,60 a 0,97 m em agosto/setembro e 0,44 e 0,66 m em maio/junho nas áreas costeiras de Jaboação dos Guararapes e Recife;
- Os períodos significativos das ondulações variou entre 5,97 e 6,34 segundos em ago-set e entre 5,88 e 6,81 segundos em maio-junho;
- No litoral de Jaboação dos Guararapes, a direção preferencial das ondas foi de 119° Az, independentemente da estação sazonal. Já na região do Recife, a direção preferencial foi de 131 Az em ago-set, e um pouco mais voltada para este (124° Az) em maio-junho;
- Verificou-se um bom ajuste entre valores simulados com o modelo SisBAHIA e aqueles obtidos *in situ* com correntômetro;

- A simulação numérica mostrou que ao longo de todo ciclo de maré há uma intensificação das correntes próximo à costa nas praias de Piedade e no setor sul da praia de Boa Viagem, tanto na quadratura como na sizígia, para os períodos chuvoso e de estiagem,
- Para uma maré de sizígia no período chuvoso as frações inferiores a areia grossa estão sujeitas a serem transportadas em quase toda a área em um determinado instante,
- Ao longo de toda área a probabilidade de se transportar os sedimentos encontrados, com exceção dos sedimentos finos consolidados, variou de 80 a 90%,
- Os resultados obtidos indicam que a área está sujeita a um alto potencial de transporte, sendo a área mais propícia ao mesmo o setor sul-central de Boa Viagem, exatamente onde ocorre problemas de erosão mais intensos.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral, K. J. 2003. Estuário do Rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia Civil) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: RJ, 150p.
- Araújo, M. C. B. 2008. Praia da Boa Viagem, Recife-PE: análise sócio-ambiental e propostas de ordenamento. Tese de Doutorado. UFPE. 279p.
- Baquerizo, A., Losada, M. A., Smith, J. M. 1998. Wave reflection from beaches: a predictive model. *Journal of Coastal Research*. 14: 291-298.
- Barthel, S. G. A. 1989. Sociedade de classes, espaço urbano diversificado—a faixa de praia do Recife. *Dissertação* (Mestrado em Economia e Sociologia) PIMES/UFPE. 214p.
- Bernabeu, A. M., Medina, R., Vidal, C. 2002. Wave reflection on natural beaches: an equilibrium beach profile model. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 57: 577-585.
- Bernabeu, A. M., Medina, R., Vidal, C. 2003. A morphological model of the beach profile integrating wave and tidal influences. *Marine Geology*. 197: 95-116.
- Borba, A. L. S. 2000 Caracterização Sedimentológica e Morfodinâmica entre as praias de Piedade e Candeias, Jaboatão dos Guararapes-PE. *Dissertação* (Mestrado em Geociências) UFPE, Recife PE. 130p.
- Bryon, M. E. Q. 1994. Desenvolvimento urbano x meio ambiente a relação da ocupação do espaço urbano com os recursos naturais remanescentes o caso das áreas estuarinas da RMR. Tese (Mestrado em MDU) UFPE. 166p.
- Carneiro, O. & Coelho, P. A. 1960. Estudo ecológico da Barra das Jangadas (nota prévia). *Trabalhos do Instituto de Biologia Marítima e Oceanografia*. II(1): 237-248.
- Cavalcanti, L. B. & Kempf M. 1970. Estudo da plataforma continental na área do Recife (Brasil). *Trabalhos Oceanográficos*. 9(11): 49-158.
- Coelho, P. A. 1963/64. Distribuição dos crustáceos decápodos na área de Barra das Jangadas. *Trabalhos do Instituto Oceanográfico da UFPE*. 5/6:159-173.
- COPPE - Coordenação de Programas de Pós Graduação em Engenharia. 2004. Guia do Usuário do SisBaHiA—Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. [online] Disponível em: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/ManualSisBaHiA.htm>.

Coutinho, P. N., Manso, V. A. V., Lima Filho, M. F., Lima, A. T. O., Medeiros, A. B., Pedrosa, F. J. A., Martins, M. H. A., Chaves, N. S., Sampaio, A. S., Lira, A. R. A., Menezes, M. O. B., Brito, M. F. L. - 1994 - Coastal Quaternary of Pernambuco - Brazil. 14th International Sedimentological Congress, Recife-PE. D-31.

Couto, L. M. M. R. 1988. Ciclo reprodutivo e influência da salinidade sobre a gametogênese de *Iphigenia brasiliana* (Lamarck, 1818) (MOLLUSCA Bivalvia: Donacidae), no estuário da Barra das Jangadas, Jaboatão, Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) UFPE. 198p

CPRH, 1998. **Estudo da Erosão Marinha na Região de Maracaípe-Ipojuca**. CPRH. Recife, 99p.

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.

Dean, R. G. 1977. Equilibrium beach profile: U. S. Atlantic and gulf coast. University of Delaware, Newark, Ocean Engineering Technical Report No 12.

Dean, R. G. 1997. Models for Barrier Island Restoration. *Journal of Coastal Research*, 13(3): 694-703.

DHN, 1997 Carta Náutica nº 930. Escala 1: 100.000.

Diegues, A. C. 1988. Planejamento e Gerenciamento Costeiro Alguns Aspectos Metodológicos. Programa de Pesquisa e Conservação de Áreas Úmidas no Brasil. IOUSP/F. FORD/UICN. Série: Trabalhos e Estudos. São Paulo. 45p

Dominguez, J. M. L.; Bittencourt, A. C. S. P.; Leão, Z. M. A. N. & Azevedo, A. E. G. 1990. Geologia do Quaternário Costeiro do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geociências* 20(1-4): 208-215

Dominguez, J. M. L.; Bittencourt, A. C. S. P. & Martin, L. 1992. Controls on quaternary coastal evolution of the east-northeastern coast of Brazil: roles of Sea-level history trade winds and climate. *Sedimentary Geology* 80: 231-232.

Dominguez, J. M. L. 1995. A erosão da linha de costa na Região Nordeste do Brasil: uma abordagem do problema a partir da compreensão da evolução costeira. In: Simpósio sobre Processos Sedimentares e Problemas Ambientais na Zona Costeira Nordeste do Brasil. Centro de Tecnologia e Geociências/UFPE, Recife. P. 71-73.

- Eskinazi, E.; Satô, S 1963/64. Contribuição ao estudo das diatomáceas da praia de Piedade. *Trabalhos do Instituto Oceanográfico da UFPE*. 5/6:73-114.
- Eskinazi, E. 1965/66. Estudo das Barras de Jangadas – Parte VI – Distribuição das diatomáceas. *Trabalhos do Instituto Oceanográfico da UFPE*. 7/8:17-32.
- Façanha, P. 2007. Circulação hidrodinâmica na região costeira dos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes durante o verão austral. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) UFPE. 109p.
- Feitosa, R. C. 2003. Modelagem da pluma do emissário submarino da Barra da Tijuca - RJ com T90 variável. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia Oceânica) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: RJ, 151p.
- FEMAR-Fundação de Estudos do Mar. 2006. [online] Disponível em: <http://www.femar.com.br>.
- Gabioux, M. 2002. Influência da lama em suspensão na propagação da maré na plataforma Amazônica. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia Civil) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: RJ, 99p.
- 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.
- González M., Medina, R., Losada, M. A. 1999. Equilibrium beach profile model for perched beaches. *Costal Engineering*. 36, 343-357.
- Gregório, M. N., Araújo, T. C. M., Valença, L. M. M. 2003. Características sedimentológicas das praias do Pina e da Boa Viagem (PE)-Brasil. IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, II Congresso do Quaternário de Países de Línguas Ibéricas, II Congresso sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de expressão de língua Portuguesa. Recife.
- Gregório, M. N. & Araújo, T. C. M. 2003. Características volumétricas das praias do Pina e da Boa Viagem (PE)-Brasil. IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, II Congresso do Quaternário de Países de Línguas Ibéricas, II Congresso sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de expressão de língua Portuguesa. Recife.
- Harari, J., Camargo, R. 1994. Tides and mean sea level in Recife (PE)–8°3,3'S 34°51,9'W – 1946 to 1988. *Boletim do Instituto Oceanográfico*. Universidade de São Paulo.

- Honsi, A. 1978. Wave climate in some zones of the Brazilian coast. In: Sixteenth coastal engineering conference, cap. 5. Hamburg, Germany, 114-133.
- Larson, M., Kraus, N. C., Wise, R. A., 1999. Equilibrium beach profiles under breaking e non-breaking waves. *Costal Engineering*. 36: 59-85.
- LGGM - 1995. Estudo da Erosão Costeira da Praia da Boa Viagem. Convênio EMLURB/LGGM-UFPE. Relatório Técnico. 100p.
- LGGM. 1997. Estudo da erosão marinha nas praias de piedade e de Candeias e no Estuário de Barra de Jangadas. Município de Jaboatão dos Guararapes-PE. Relatório técnico. Convênio com Prefeitura de Jaboatão dos Guararapes. 154p.
- Lira, A. R. A. 1997. Caracterização Morfológica e Vulnerabilidade do Litoral entre as Praias de Enseadilha e Maria Farinha, Paulista-PE. Recife. Dissertação (Mestrado em Geociências) UFPE. 96p.
- Luz, B. R. A. 1991. Fauna dos recifes de Boa Viagem (PE) com ênfase aos MOLLUSCA. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) UFPE 148p.
- Madruza Filho, J. D. 1999. Estudos Sedimentológicos, Morfodinâmicos e Hidrodinâmicos na Praia do Paiva Município do Cabo de Santo Agostinho-PE. Recife. Dissertação (Mestrado em Geociências) UFPE. 148 p
- Malta, F. S. 2005. Estudo de correntes de maré do complexo estuarino da Baía de Guanabara–RJ. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia Oceânica) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: RJ, 132 p.
- Manso, V. A. V.; Toldo, E. E. ; Medeiros, C.; Almeida, L. E. S. B. Perfil Praial de Equilíbrio da Praia de Sirinhaém, Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia*, 2(1): 45-49, 2001.
- 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.
- Muehe, D., Neves, C. F. 1995. Potential impacts of sea level rise on the metropolitan region of Recife, Brazil. *Journal of Coastal Research*. Special issue 14:116-131.
- Muehe, D. **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. Brasília: MMA, 2006. 476p.

- Neumann, V. H.; Leitão, S. N.; Queiroz, C. M. & Maia, L. P. 1996. Estudos sedimentológicos geomorfológicos e impactos ambientais causados pela implantação do porto na laguna de Suape–PE. *Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia* 4: 496-499.
- Ottmann, F.; Nóbrega, R.; Coutinho, P. N.; Oliveira, S. P. B. 1959. Estudo topográfico e sedimentológico de um perfil da praia de Piedade. *Trabalhos do Instituto de Biologia Marítima e Oceanografia*. I(1): 19-37.
- Ottmann, F.; Okuda, T.; Cavalcanti, L. Silva, O. C.; Araújo, J. V. A.; Coelho, P. A.; Paranaguá, M. N.; Eskinazi, E. 1965/66. Estudo da Barra das Jangadas – Parte V– Efeito da Poluição sobre a ecologia do estuário. *Trabalhos do Instituto Oceanográfico da UFPE*. 7/8:7-16.
- Okuda, T. & Nóbrega, R. 1960. Estudo da Barra das Jangadas- parte I- Distribuição e movimento da clorinidade- quantidade de correntes. *Trabalhos do Instituto de Biologia Marítima e Oceanografia*. II(1): 175-191.
- Rollnic, M. 2002. Hidrologia, Clima de Onda e Transporte advectivo na zona costeira de Boa Viagem, Piedade e Candeias-PE. *Dissertação* (Mestrado em Oceanografia) UFPE. 111p.
- Rollnic, M. & Medeiros, C. 2003. Perfil de equilíbrio em praias da Região Metropolitana Sul do Recife. In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, II Congresso do Quaternário de Países de Línguas Ibéricas, II Congresso sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de expressão de língua Portuguesa. Recife.
- Rollnic, M. & Medeiros, C. 2006. Circulation of the Coastal Waters off Boa Viagem, Piedade and Candeias Beaches Pernambuco, Brazil. *Journal of Coastal Research*, **39**: 648-650.
- Romanczyk, W., Boczar-karakiewicz, B., Bona, J. L. 2005. Extended equilibrium beach profiles. *Costal Engineering* 52: 727-744
- 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-PEnO/UFRJ), Rio de Janeiro, 188 p.

Rosso, T. C. A. 1996. Modelo hidrodinâmico para o transporte de manchas de óleo em regiões costeiras. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: RJ, 104 p.

Santos, J. P. 1994. Crustacea Amphipoda Gammaridae do litoral de Jaboatão dos Guararapes (Pernambuco – Brasil). Dissertação de Mestrado em Oceanografia Biológica, UFPE. 88 p.

Santos, M. A. C. & Coelho, P. A. 1994. Diogenidae e Paguridae (Crustacea, decapoda, anomura) do litoral de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco-Brasil. *Trabalhos Oceanográficos* 23: 163-176.

Santos, M. A. C. & Coelho, P. A. 1998. Camarões (Crustacea Decapoda) do litoral de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco-Brasil. *Trabalhos Oceanográficos* 26(1) 63-83

Santos, M. S. 1998. Descrição de corpos arenosos de grande escala na zona costeira e na Plataforma Continental norte do Rio Grande do Norte por imagens TM/Landsat. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE, São José dos Campos: SP, 123p.

Souza, S. T. & Costa, M. F. A. 2003. Saúde das praias da Boa Viagem e do Pina, Recife (PE) In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, II Congresso do Quaternário de Países de Línguas Ibéricas, II Congresso sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de expressão de língua Portuguesa. Recife.

Silva, J. S.; Barbosa, S. C. T.; Costa, M. F. 2008. Flag Items as a Tool for Monitoring Solid Wastes from Users on Urban Beaches. *Journal of Coastal Research*. 24(4): 890-898

Silva, J. S.; Leal, M. M. V.; Araújo, M.C.B.; Barbosa, S. C. T.; Costa, M. F. 2008. Spatial and Temporal Patterns of Use of Boa Viagem Beach, Northeast Brazil. *Journal of Coastal Research*. 24(1A): 79-86.

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 em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) UFPR, Curitiba: PR, 166p.

SUDENE, 1974. Folha SC.25-v-aIII-1-SO. Escala 1:25.000.

Torres, U. S. 2008. Avaliação Geoambiental das Praias do Município de Jaboatão dos Guararapes, Região Metropolitana do Recife. *Dissertação* (Mestrado em Oceanografia) UFPE, Recife: Pe, 111p

Trento, A. E. 2005. Dinâmica da flocculação no transporte de sedimentos finos. *Tese* (Doutorado em Engenharia Civil) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: RJ, 170 p.

UNESCO.1993. **Coasts: Managing Complex Systems. Environment and development briefs.** United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Paris. 16p.

Wu, J. 1982. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *Journal of Geophysical Research*, 87(C12): 9704-9706.