



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Oceanografia

Carolina Lyra da Silva Gomes

**Investigação das características sedimentológicas, morfológicas e dinâmicas  
de bancos transversais (tipo “finger bars”) na margem norte da restinga da  
Marambaia (baía de Sepetiba, RJ)**

Rio de Janeiro

2020

Carolina Lyra da Silva Gomes

**Investigação das características sedimentológicas, morfológicas e dinâmicas de bancos transversais (tipo “finger bars”) na margem norte da restinga da Marambaia (baía de Sepetiba, RJ)**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Processos oceanográficos na interface continente-oceano.

Orientador (a): Prof.<sup>a</sup> Dra. Josefa Varela Guerra

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Nicolás Gallo

Rio de Janeiro

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

G633 Gomes, Carolina Lyra da Silva.  
Investigação das características sedimentológicas, morfológicas e dinâmicas de bancos transversais (tipo “finger bars”) na margem norte da restinga da Marambaia (baía de Sepetiba, RJ) / Carolina Lyra da Silva Gomes. – 2020.  
170 f.: il.

Orientadora: Josefa Varela Guerra.  
Coorientador: Marcos Nicolás Gallo  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia.

1. Geologia submarina – Teses. 2. Transporte de sedimentos – Sepetiba, Baía de (RJ) – Teses. 3. Sedimentação e depósitos – Sepetiba, Baía de (RJ) – Teses. 4. Hidrodinâmica – Teses. I. Guerra, Josefa Varela. II. Gallo, Marcos Nicolás. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Oceanografia. IV. Título.

CDU 551.46(815.3)

Bibliotecária responsável: Taciane Ferreira da Silva / CRB-7: 6337

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

Data

Carolina Lyra da Silva Gomes

**Investigação das características sedimentológicas, morfológicas e dinâmicas de bancos transversais (tipo “finger bars”) na margem norte da restinga da Marambaia (baía de Sepetiba, RJ)**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Processos oceanográficos na interface continente-oceano.

Aprovada em 25 de novembro de 2020.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Josefa Varela Guerra

Faculdade de Oceanografia - UERJ

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Nicolás Gallo

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Eduardo Negri de Oliveira

Faculdade de Oceanografia – UERJ

---

Prof. Dr. Alexandre Macedo Fernandes

Faculdade de Oceanografia – UERJ

---

Dr<sup>a</sup> Breylla Campos Carvalho

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

---

Prof. Dr. Alberto Garcia de Figueiredo Jr.

Universidade Federal Fluminense

Rio de Janeiro

2020

## AGRADECIMENTOS

A toda a minha família, pelo apoio incondicional sempre.

A minha mãe, sempre me acalmando nos momentos de nervosismo.

A minha orientadora Josefa Varela Guerra, que me deu todo apoio necessário para o desenvolvimento do projeto. Muuuuuuuuuuito obrigado pela dedicação e ensinamentos transmitidos.

Aos professores Alexandre Macedo Fernandes, Eduardo Negri e meu coorientador Marcos Gallo, que me auxiliaram no desenvolvimento do projeto, sempre com opiniões super produtivas.

A Luís Sérgio e Dan por todo auxílio com o MATLAB.

A Breylla Campos, que me cedeu dados da sua dissertação. Sempre disponível e disposta a ajudar. Muito Obrigado mesmo!

A Luana Riscado, Suelen Gouvêa, Geraldo Rios, Mariana Pardal, Marcela Coronel e Jonatan que participaram dos trabalhos de campo envolvidos no projeto.

A toda a equipe do laboratório de Oceanografia Geológica da UERJ, Felipe de Castro, Moisés Almeida e Pedro Wailant, que me deram todo o auxílio necessário para o tratamento das amostras. Vocês são ótimos!

Ao Programa de Pós Graduação em Oceanografia, pelo suporte oferecido.

À Capes, por permitir o custeio da bolsa de estudos.

Um agradecimento especial a Marcia Carolina, que participou dos trabalhos de campo e me ajuda até hoje com o MATLAB. Muito obrigada, você é uma excelente oceanógrafa e colega de trabalho!

## RESUMO

GOMES, Carolina Lyra da Silva. **Investigação das características sedimentológicas, morfológicas e dinâmicas de bancos transversais (tipo *finger bars*) na margem norte da restinga da Marambaia (baía de Sepetiba, RJ)**. 2020. 170 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

As ondas e correntes dominam os processos de remobilização e transporte de sedimentos nas zonas costeiras, e podem originar uma variedade de feições nestas regiões. Neste contexto, os bancos transversais do tipo *finger bars* são acumulações de areia com orientação oblíqua ou perpendicular à costa e paralelos entre si. Eles são encontrados em ambientes de diferentes características, seja em praias abertas ou costas protegidas. Este estudo contribui para o entendimento das características destas feições em um ambiente abrigado, mais especificamente na margem interna da restinga da Marambaia, baía de Sepetiba, Rio de Janeiro. Para tal, foi realizada a análise temporal de um conjunto de imagens de satélite e coleta de 32 amostras de sedimentos superficiais de fundo das cristas e cavas de 15 bancos de orientação NE-SO para a caracterização geométrica e granulométrica das feições. Também foram conduzidos dois fundeios simultâneos na região ao longo de dois ciclos de maré (25 horas - profundidade média de 3 e 5 metros), a fim de conhecer suas características hidrodinâmicas e determinar as velocidades críticas que levam a remobilização dos sedimentos de fundo. Além da coleta de amostras de água para determinação das concentrações do material particulado em suspensão. Dois grupos de bancos transversais ocorrem ao longo da margem interna da restinga. O primeiro grupo, formado por bancos de orientação NE-SO, foi estudado a partir de uma série de 12 imagens (resolução < 1m) obtidas no programa *Google Earth Pro*. O segundo grupo, formado por bancos de orientação NO-SE, foi estudado com base em 36 imagens do satélite Sentinel 2A/B (resolução 10 metros). Em geral, são observados uma média de 8 bancos/km de orientação NE-SO por aproximadamente 23 km de extensão, com comprimento de onda médio ( $\lambda$ ) de 72 m, desvio padrão médio de 33 m e distância transversal à costa de até 680 metros, compostos por sedimentos classificados como areia média nas suas cristas e cavas. Os bancos de orientação NO-SE, estendem-se de 6 a 9 km, no setor oeste da restinga, onde é observada uma média de 18 bancos, com comprimento de onda médio ( $\lambda$ ) de 537 m, desvio padrão de 177 m e distância transversal à costa de até 875 metros. Os dois grupos de bancos transversais migram para oeste em taxas que variam de 3,6 a 18,2 m/ano. As correntes registradas apresentaram intensidades de até 0,26 m/s. As estimativas da velocidade cisalhante indicam que as correntes são capazes de remobilizar areia média em determinados momentos durante o fundeio. Dadas às características da região do presente estudo, sugere-se que os mecanismos envolvidos na formação e manutenção dos bancos transversais sofrem grande influência das correntes de maré que adentram a baía.

Palavras chave: Padrões rítmicos. Transporte de sedimentos. Imagens de satélite. Hidrodinâmica.

## ABSTRACT

GOMES, Carolina Lyra da Silva. **Investigation of sedimentological, morphological and dynamic characteristics of transverse bars (type finger bars) on the Marambaia barrier island bayside shoreline (Sepetiba bay, RJ)**. 2020. 170 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Waves and currents dominate the processes of sediment remobilization and transport in coastal areas, and can originate a variety of features in these regions. In this context, the transverse bars of the type of finger bars are accumulations of sand with an oblique or perpendicular orientation to the coast and parallel to each other. They are found in environments with different characteristics, either on open beaches or protected coasts. This study contributes to the understanding of the characteristics of these features in a restricted environment, specifically on the Marambaia barrier island bayside shoreline (Sepetiba bay, Rio de Janeiro). For this purpose, a temporal analysis of a set of satellite images and collecting 32 samples of superficial sediments from the bottom of the crests and to the troughs of 15 NE-SO oriented bars for the geometric and granulometric characterization of the features. Two simultaneous anchorages were conducted in the region over two tidal cycles (25 hours - average depth of 3 and 5 meters) in order to know its hydrodynamic characteristics and determine the critical speeds that lead to the remobilization of bottom sediments. In addition to collecting water samples to determine the concentrations of suspended particulate material. Two groups of transverse bars occur along the Marambaia barrier island bayside shoreline. The first group, formed by NE-SO oriented bars, was studied from a series of 12 images (resolution < 1m) obtained in the Google Earth Pro program. The second group, formed by NO-SE oriented bars, was studied based on 36 images from the Sentinel 2A/B satellite (resolution 10 meters). In general, an average of 8 bars/km of NE-SO oriented is observed for approximately 23 km in length, with an average spacing ( $\lambda$ ) of 72 m, an average standard deviation of 33 m and cross-shore extension 680 meters, composed of sediments classified as medium sand on their crests and to the troughs. The NO-SE orientated bars extend from 6 to 9 km, in the western sector of the barrier island, where an average of 18 bars is observed, with an average spacing ( $\lambda$ ) of 537 m, standard deviation of 177 m and cross-shore extension 875 meters. The two groups of transverse bars migrate western at rates ranging from 3.6 to 18.2 m/year The recorded currents showed intensities of up to 0.26 m/s. Shear velocity estimates indicate that the currents are capable of remobilize medium sand at certain times during the anchoring. Given the characteristics of the region of the present study, it is suggested that the mechanisms involved in the formation and maintenance of transverse bars are strongly influenced by the tidal currents that enter the bay.

Keywords: Rhythmic patterns. Sediment transport. Satellite images. Hydrodynamics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Localização da restinga da Marambaia.....	20
Figura 2 –	Mapa Geológico da área da baía de Sepetiba.....	22
Figura 3 –	Mapa batimétrico da baía de Sepetiba.....	23
Figura 4 –	Fluxo sedimentar estimado na baía de Sepetiba.....	24
Figura 5 –	Tamanho médio e grau de seleção dos sedimentos na baía de Sepetiba.....	25
Figura 6 –	Principais rios que deságuam na baía de Sepetiba.....	27
Figura 7 –	Circulação das correntes na baía de Sepetiba, segundo Roncarati e Barrocas (1978).....	28
Figura 8 –	Perfil médio das velocidades medidas nas estações 2 e 3 ao longo de 25h(Carvalho,2014).....	30
Figura 9 –	Vista planar do modelo da evolução geológica da restinga da Marambaia de acordo com Dadalto (2017).....	33
Figura 10 –	Relação entre granulometria e transporte de sedimentos.....	35
Figura 11 –	Mecanismo do <i>forcing template</i> para cúspides de praia, impulsionado por <i>edge waves</i> .....	37
Figura 12 –	Mecanismo de auto-organização.....	38
Figura 13 –	Bancos transversais com diferentes orientações.....	43
Figura 14 –	Evolução temporal da linha de costa afetada por ondas de alto ângulo.....	45
Figura 15 –	Bancos transversais encontrados na área de estudo.....	47
Figura 16 –	Setores delimitados de acordo com a orientação da linha de costa e as características dos bancos transversais de direção NE-SO.....	48
Figura 17 –	Margem interna da extremidade distal da Ponta da Pombeba, restinga da Marambaia, não incluída neste estudo.....	49
Figura 18 –	Convenção adotada para a determinação da distância transversal à costa e do comprimento de onda dos bancos de orientação NE-SO.....	50
Figura 19 –	Área de ocorrência dos bancos de orientação NO-SE.....	52
Figura 20 –	Convenção adotada para determinação da distância transversal à costa e do comprimento dos bancos de orientação NO-SE.....	53

Figura 21 – Determinação da migração dos bancos de orientação NE-SO a partir do método 1.....	54
Figura 22 – Determinação da migração dos bancos de orientação NE-SO a partir do método 2.....	55
Figura 23 – Localização dos pontos de amostragem.....	56
Figura 24 – Fluxograma das etapas dos procedimentos realizados em laboratório.....	58
Figura 25 – Localização dos pontos de fundeio.....	62
Figura 26 – Perfilador acústico de corrente por efeito Doppler.....	63
Figura 27 – Campanha de coleta de dados correntométricos e amostras de água.....	64
Figura 28 – Relação entre as concentrações de MPS obtidas através da filtração de amostras de água (método direto) e os valores de amplitude do eco corrigidos.....	68
Figura 29 – Bancos de direção NE-SO na margem interna da restinga da Marambaia.....	73
Figura 30 – Disponibilidade das imagens na plataforma Google Earth Pro.....	74
Figura 31 – Representação das cristas dos bancos transversais de orientação NE-SO no setor 4.....	75
Figura 32 – Representação das cristas dos bancos transversais (tipo “ <i>fingers bars</i> ”) de orientação NE-SO nos meses de março e abril de 2016, no setor 1.....	76
Figura 33 – Representação das cristas dos bancos transversais de orientação NE-SO nos meses de março e abril de 2016, no setor 2.....	77
Figura 34 – Bancos de orientação NO-SE totalmente submersos.....	79
Figura 35 – Bancos de orientação NO-SE presentes no setor oeste da margem interna da restinga da Marambaia, RJ.....	80
Figura 36 – Determinação da taxa de migração dos bancos transversais de orientação NO-SE a partir do método 1.....	81
Figura 37 – Concentração média de material orgânico nos sedimentos presentes na área de estudo.....	82
Figura 38 – Porcentagem de finos ( $>4 \phi$ ) e grossos ( $<4 \phi$ ) nos setores 1, 2 e 3.....	83
Figura 39 – Grau de seleção das amostras coletadas na área de estudo.....	84
Figura 40 – Comparação entre tamanho médio do grão <i>versus</i> desvio-padrão.....	84
Figura 41 – Comparação entre tamanho médio do grão <i>versus</i> assimetria.....	85
Figura 42 – Curvas de frequência em peso das amostras coletadas.....	86

Figura 43 –	Previsão de maré e variação do nível residual nas estações A e C.....	88
Figura 44 –	Velocidade e direção dos ventos durante o período do fundeio.....	89
Figura 45 –	Temperatura da água nas estações do fundeio ao longo de dois ciclos completos de maré.....	91
Figura 46 –	Previsão de maré variação do nível residual obtido a partir do perfilador acústico posicionado na estação A.....	93
Figura 47 –	Intensidade das correntes na estação A.....	94
Figura 48 –	Direção das correntes na estação A.....	94
Figura 49 –	Componentes L-O e N-S das correntes na estação A.....	96
Figura 50 –	Direção e intensidade das correntes em três posições ao longo da coluna d'água na estação A.....	97
Figura 51 –	Concentração de material particulado em suspensão nos dois pontos de coleta de água (localização na Figura 23).....	99
Figura 52 –	Amplitude do eco não corrigida (A) e corrigida (B) quanto às perdas por absorção e atenuação da energia acústica, na estação A.....	100
Figura 53 –	Relação entre a concentração de sedimentos obtida por método direto, sinal acústico corrigido e concentração estimada a partir da amplitude do sinal acústico, na estação A.....	101
Figura 54 –	Previsão de maré variação do nível residual obtido a partir do perfilador acústico posicionado na estação C.....	103
Figura 55 –	Intensidade das correntes na estação C.....	104
Figura 56 –	Direção das correntes na estação C (localização na Figura 23).....	104
Figura 57 –	Componentes L-O e N-S das correntes na estação C.....	106
Figura 58 –	Direção e intensidade das correntes em três posições ao longo da coluna d'água na estação C.....	107
Figura 59 –	Amplitude do eco corrigida e não corrigida quanto às perdas por absorção e atenuação da energia acústica, na estação C.....	109
Figura 60 –	Relação entre a concentração de sedimentos obtida por método direto, sinal acústico corrigido e concentração estimada a partir da amplitude do sinal acústico, na estação C.....	110
Figura 61 –	Intensidades das correntes medidas e velocidades de cisalhamento calculadas pelo modelo SedTrans na estação A.....	112
Figura 62 –	Intensidades das correntes medidas e velocidades de cisalhamento	

	calculadas pelo modelo SedTrans na estação C.....	113
Figura 63 –	Regiões de interrupções nos bancos transversais de orientação NO-SE.....	115
Figura 64 –	Desembocadura de canais intermitentes e indícios de transposição na margem interna da restinga da Marambaia.....	116
Figura 65 –	Esquema das tendências direcionais de transporte de sedimentos, incluindo áreas de acumulação (A) e remoção (R) de sedimentos, proposto por Carvalho e Guerra (2020).....	118
Figura 66 –	Padrões de circulação associados à presença dos bancos transversais.....	121
Figura 67 –	Rosa de correntes (1 m acima do fundo).....	123
Figura 68 –	Rosa de correntes (71 cm acima do fundo).....	124
Figura 69 –	Ondulações na margem interna da restinga da Marambaia, baía de Sepetiba.....	126
Figura 70 –	Relação entre intensidade das correntes, amplitude do eco corrigida e velocidade de cisalhamento próximo ao fundo na Estação A.....	130
Figura 71 –	Relação entre intensidade das correntes, amplitude do eco corrigida e velocidade de cisalhamento próximo ao fundo na Estação C.....	131
Figura 72 –	Sedimentos em suspensão na margem interna da restinga da Marambaia...	133
Figura 73 –	Método 2 para determinação de taxas de migração de bancos no setor 1.....	160
Figura 74 –	Método 1 para determinação de taxas de migração de bancos no setor 2.....	161
Figura 75 –	Método 1 para determinação de taxas de migração de bancos no setor 3.....	162
Figura 76 –	Método 2 para determinação de taxas de migração de bancos no setor 3.....	162
Figura 77 –	Gráfico da frequência em peso por classe granulométrica.....	163
Figura 78 –	Gráfico da porcentagem de sedimentos finos e grossos.....	164
Figura 79 –	Tamanho médio e desvio padrão das amostras coletadas.....	165
Figura 80 –	Distribuição granulométrica média das amostras coletadas no setor 1.....	166
Figura 81 –	Distribuição granulométrica média das amostras coletadas no setor 2.....	167
Figura 82 –	Distribuição granulométrica média das amostras coletadas no setor 3.....	168
Figura 83 –	Gráfico representando o grau de selecionamento das amostras.....	169
Figura 84 –	Gráfico representando o grau de assimetria das amostras.....	170

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Evolução da largura da parte central da restinga da Marambaia (INPH, 2011).....	23
Tabela 2 –	Exemplos de padrões rítmicos observados ao longo da costa.....	36
Tabela 3 –	Exemplos de estudos sobre bancos transversais.....	39
Tabela 4 –	Classificação de bancos transversais segundo Pellón, Garnier e Medina, 2014.....	41
Tabela 5 –	Classificação dos bancos transversais segundo Ribas et al., 2015.....	42
Tabela 6 –	Combinação de bandas e resolução do <i>Multi Spectral Instrument</i> (MSI)...	51
Tabela 7 –	Classificação dos tamanhos de partículas sedimentares.....	59
Tabela 8 –	Classificação do grau de seleção das partículas sedimentares.....	60
Tabela 9 –	Classificação da assimetria das partículas sedimentares.....	60
Tabela 10 –	Classificação da curtose das partículas sedimentares.....	61
Tabela 11 –	Imagens com a presença dos bancos de orientação NE-SO, obtidas na plataforma <i>Google Earth Pro</i> , e utilizadas na determinação dos parâmetros estatísticos dos mesmos.....	72
Tabela 12 –	Comparação dos resultados obtidos pelos métodos utilizados para determinação das taxas de migração.....	78
Tabela 13 –	Total de imagens do satélite Sentinel 2 A/B.....	79
Tabela 14 –	Variação da maré durante o período do fundeio.....	87
Tabela 15 –	Parâmetros estatísticos médios dos bancos transversais analisados no presente estudo. Localização dos setores na Figura 16.....	114
Tabela 16 –	Concentração média de MPS nos períodos de enchente e vazante (Figura 23).....	128
Tabela 17 –	Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NE-SO no ano de 2012.....	145
Tabela 18 –	Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NE-SO no ano de 2013.....	146
Tabela 19 –	Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NE-SO no ano de 2014.....	147
Tabela 20 –	Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais	

	de orientação NE-SO no ano de 2015.....	148
Tabela 21 –	Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NE-SO no ano de 2016.....	149
Tabela 22 –	Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NE-SO no ano de 2017.....	150
Tabela 23 –	Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NO-SE no ano de 2016.....	151
Tabela 24 –	Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NO-SE no ano de 2017.....	152
Tabela 25 –	Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NO-SE no ano de 2018.....	153
Tabela 26 –	Condição de maré das imagens associadas à presença dos bancos de orientação NO-SE no ano de 2016.....	154
Tabela 27 –	Condição de maré das imagens associadas à presença dos bancos de orientação NO-SE no ano de 2017.....	154
Tabela 28 –	Condição de maré das imagens associadas à presença dos bancos de orientação NO-SE no ano de 2018.....	155
Tabela 29 –	Médias anuais dos parâmetros estatísticos dos bancos de orientação NE-SO entre os anos de 2012 e 2017. $\lambda$ = distância entre as cristas dos bancos; $\Delta x$ = distância transversal à costa.....	156
Tabela 30 –	Médias mensais dos parâmetros estatísticos dos bancos de orientação NE-SO entre os anos de 2012 e 2017. $\lambda$ = distância entre as cristas dos bancos; $\Delta x$ = distância transversal à costa.....	156
Tabela 31 –	Parâmetros estatísticos médios dos bancos de orientação NO-SE em diferentes níveis de maré. $\lambda$ = distância entre as cristas dos bancos; $\Delta x$ = distância transversal à costa.....	157
Tabela 32 –	Dados referentes ao setor 1. $\lambda$ = distância entre as cristas dos bancos; $\Delta x$ = distância transversal à costa.....	158
Tabela 33 –	Dados referentes ao setor 2. $\lambda$ = distância entre as cristas dos bancos; $\Delta x$ = distância transversal à costa.....	158
Tabela 34 –	Dados referentes ao setor 3. $\lambda$ = distância entre as cristas dos bancos; $\Delta x$ = distância transversal à costa.....	159
Tabela 35 –	Dados referentes ao setor 4. $\lambda$ = distância entre as cristas dos bancos; $\Delta x$	

= distância transversal à costa..... 159

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
1	<b>OBJETIVOS</b> .....	19
1.1	<b>Geral</b> .....	19
1.2	<b>Específicos</b> .....	19
2	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	20
2.1	<b>Localização Geográfica e Descrição</b> .....	20
2.2	<b>Geologia Regional</b> .....	21
2.3	<b>Caracterização/Fisiografia</b> .....	22
2.3.1	<u>Características dos sedimentos</u> .....	24
2.3.2	<u>Características Hidrológicas</u> .....	26
2.3.3	<u>Fatores Hidrodinâmicos e Meteorológicos</u> .....	27
2.4	<b>Modelos Evolutivos para a restinga da Marambaia</b> .....	31
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	34
3.1	<b>Transporte de sedimentos</b> .....	34
3.2	<b>Padrões costeiros</b> .....	35
3.2.1	<u>Bancos transversais do tipo “finger bars”</u> .....	38
4	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	47
4.1	<b>Análise de imagens de satélite</b> .....	47
4.1.1	<u>Bancos de orientação NE-SO</u> .....	48
4.1.2	<u>Bancos de orientação NO-SE</u> .....	52
4.1.3	<u>Determinação das taxas de migração</u> .....	54
4.2	<b>Coleta e tratamento dos dados sedimentológicos</b> .....	56
4.2.1	<u>Campanha amostral para coleta de sedimentos</u> .....	56
4.2.2	<u>Pré tratamento e determinação da distribuição granulométrica</u> .....	58
4.2.3	<u>Pós processamento</u> .....	59
4.3	<b>Coleta e tratamento dos dados hidrográficos e correntométricos</b> .....	61
4.3.1	<u>Trabalho de campo</u> .....	61
4.3.2	<u>Processamento dos dados</u> .....	65
4.3.2.1	<u>Cálculo das concentrações de sedimentos em suspensão através da amplitude do sinal acústico</u> .....	65

4.3.2.2	Amostras de água.....	68
4.4	<b>Determinação do Limiar para remobilização de sedimentos.....</b>	69
5	<b>RESULTADOS.....</b>	72
5.1	<b>Imagens de satélite.....</b>	72
5.1.1	<u>Bancos transversais de orientação NE-SO.....</u>	72
5.1.1.1	Taxas de migração.....	77
5.1.2	<u>Bancos transversais de orientação NO-SE.....</u>	78
5.1.2.1	Taxas de migração.....	80
5.2	<b>Caracterização sedimentológica.....</b>	81
5.2.1	<u>Matéria Orgânica.....</u>	81
5.2.2	<u>Parâmetros Texturais.....</u>	82
5.3	<b>Caracterização hidrodinâmica – fundeios de 25 horas.....</b>	87
5.3.1	<u>Propriedades físicas da água.....</u>	90
5.3.2	<u>Estação A.....</u>	92
5.3.3	<u>Estação C.....</u>	102
5.4	<b>Limiar para remobilização de sedimentos.....</b>	111
6	<b>DISCUSSÃO.....</b>	114
6.1	<b>Caracterização dos bancos transversais.....</b>	114
6.1.1	<u>Geometria dos bancos.....</u>	114
6.1.2	<u>Taxas de migração.....</u>	117
6.2	<b>Parâmetros texturais dos sedimentos dos bancos transversais.....</b>	119
6.3	<b>Características hidrodinâmicas na região dos bancos.....</b>	121
6.4	<b>Concentrações e remobilização de sedimentos.....</b>	127
	<b>CONCLUSÃO.....</b>	134
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	136
	<b>APÊNDICE A</b> – Classificação, quando possível, das imagens do <i>Google Earth</i> ... .....	145
	<b>APÊNDICE B</b> – Classificação, quando possível, das imagens do satélite Sentinel 2.....	151
	<b>APÊNDICE C</b> – Condição de maré no momento da aquisição das imagens obtidas.....	154
	<b>APÊNDICE D</b> – Parâmetros estatísticos médios dos bancos transversais encontrados na margem interna da restinga.....	156

<b>APÊNDICE E</b> – Parâmetros estatísticos anuais dos bancos NE-SO para cada setor delimitado.....	158
<b>APÊNDICE F</b> – Mapas representando as taxas de migração dos bancos de orientação NE-SO.....	160
<b>APÊNDICE G</b> – Gráficos da Análise Granulométrica.....	163

## INTRODUÇÃO

As zonas costeiras constituem sistemas dinâmicos complexos cuja evolução morfológica resulta da ação combinada de impactos antrópicos e de vários agentes naturais (como as correntes de maré, as ondas, o aporte fluvial e as variações do nível do mar). A complexidade dos processos atuantes e os efeitos de retroalimentação entre os mesmos (*feedback*), envolvendo diversas escalas temporais e espaciais, aumenta o desafio a respeito da compreensão da morfodinâmica em tais ambientes (DIAS et al., 2011).

A morfodinâmica costeira aborda as formas deposicionais, sua estrutura e evolução temporal e espacial, associadas aos processos de redistribuição de sedimentos impulsionados pelos processos hidrodinâmicos atuantes (WRIGHT; SHORT, 1984). Uma grande variedade de feições é observada nas zonas costeiras e estuarinas, tais como, ondulações e megaondulações no fundo (ex: WIBERG; HARRIS, 1994; GALLAGHER; ELGAR; THORNTON, 1998; TRAYKOVSKI et al., 1999); ondulações da linha de costa variando de alguns (cúspides de praia, COCO; O'HARE; HUNTLEY, 1999) a centenas (megacúspides, SHORT, 1999) ou milhares de metros (características regionais do litoral, ASHTON; MURRAY; ARNAULT, 2001) (COCO; MURRAY, 2007).

A presença e a regularidade dessas formas intrigaram os cientistas por décadas. O primeiro artigo discutindo a geração de padrões rítmicos em praias arenosas tem mais de um século (LANE, 1888), porém apenas a partir da década de 1970 os pesquisadores intensificaram seus esforços para compreender essa variedade de padrões (COCO; MURRAY, 2007).

Uma maneira de analisar estas feições é investigar os condicionantes que levam à movimentação de sedimentos, que ocorre de acordo com um balanço de forças instantâneas atuantes, relacionadas às forças hidrodinâmicas, versus as de resistência, relacionadas às características físicas da partícula (VAN RIJN, 1993). O limiar de transporte de sedimentos é definido como o início do movimento dos sedimentos e é identificado usando algum tipo de critério, como por exemplo, o “movimento crítico ou incipiente” de Shields (1965). O excesso desse limiar, e conseqüentemente, a alteração das feições, pode ser verificado através de medições *in situ* ou modelagem numérica dos padrões do escoamento.

Outra técnica que tem sido cada vez mais utilizada no monitoramento dos padrões rítmicos é o sensoriamento remoto. O uso desta ferramenta, como mostrado, por exemplo, nos trabalhos de Falqués (1989); Medellín et al. (2008); Garnier et al. (2012) e Levoy et al. (2013),

oferece inúmeras possibilidades para aplicações em estudos costeiros, pois além de reduzir custos, permite uma análise espacial e temporal ampla.

A relevância desses padrões rítmicos ao longo da costa para a engenharia costeira está sendo cada vez mais reconhecida, pois o estudo de sua dinâmica permite a identificação de importantes mecanismos físicos que controlam a evolução costeira (SOULSBY, 1997). Além disso, esses padrões rítmicos ao longo da costa criam áreas de erosão e deposição, tendo assim um impacto direto na mesma (RIBAS et al., 2015). A crescente necessidade de capacidade e frequência do monitoramento dos processos atuantes nas praias, muitas vezes desafiam as classificações tradicionais dos padrões rítmicos (GUILLÉN et al., 2017).

Os bancos transversais do tipo *finger bars* são um dos tipos de padrões rítmicos. Eles têm diferentes características e origens, geralmente ocorrem em trechos de até algumas dezenas de metros, são separados por cavas e, em geral, conectados à costa. O espaçamento ao longo da costa é definido como a distância entre cristas de bancos sucessivos (MUJAL-COLLILLES; GRIFOLL; FALQUÉS, 2019). Eles são relatados em vários locais, seja em praias de baixa energia (NIEDERODA; TANNER, 1970) ou ambientes de energia moderada (PEDREROS; HOWA; MICHEL, 1996; LAFON, et al., 2002).

Pellón, Garnier e Medina (2014) preconizam que uma classificação dos sistemas de bancos transversais é necessária, mas não é simples, pois diferentes critérios podem ser utilizados (geometria, dinâmica e ambiente hidrogeomorfológico). A classificação também pode ser feita com base nos processos físicos relacionados à formação dos bancos e sua dinâmica. Neste contexto, o presente estudo consiste em caracterizar e investigar os bancos transversais do tipo *finger bars*, expostos na margem interna da restinga da Marambaia, baía de Sepetiba, RJ. Para tal, foram reunidas diferentes técnicas de estudo como a análise de imagens de satélite para a caracterização das feições, a análise sedimentológica do material presente nos bancos e a verificação do padrão hidrodinâmico dominante na área, através de medições correntométricas *in situ*.

A evolução da restinga da Marambaia é objeto de discussão desde a década de 1940, diversos autores propuseram uma série de modelos evolutivos para a região, baseados em diferentes critérios (LAMEGO, 1945; PONÇANO, 1979; DADALTO, 2014, entre outros). Desta forma, o presente estudo visa contribuir para o entendimento dos processos atuais que contribuem para a evolução da restinga, e conseqüentemente levam a formação dos bancos transversais do tipo *finger bars*, além de contribuir para a compreensão das características de tais feições associadas a ambientes abrigados. O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: seção 1: objetivos gerais e específicos; seção 2: área de estudo; seção 3: revisão

bibliográfica; seção 4: materiais e métodos; seção 5: resultados; seção 6: discussão; e por fim a conclusão.

## 1 OBJETIVOS

### 1.1 Geral

Caracterização física, morfológica e granulométrica dos bancos transversais do tipo *finger bars*, presentes na margem interna da restinga da Marambaia, baía de Sepetiba, RJ.

### 1.2 Específico

Para atender este objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar, a partir de um conjunto de imagens de satélite, as características geométricas dos bancos transversais, como o comprimento de onda, distância transversal em relação à costa, densidade e, sempre que possível, determinar suas taxas de migração;
- b) Determinar as características granulométricas dos sedimentos superficiais das cristas e cavas dos bancos transversais;
- c) Descrever as características da circulação no setor ocupado pelos bancos transversais, ao longo de dois ciclos completos de maré;
- d) Inferir os padrões de mobilização dos sedimentos de fundo devidos à circulação hidrodinâmica (ao longo de dois ciclos completos de maré) e a possível influência das formas de fundo neste processo.

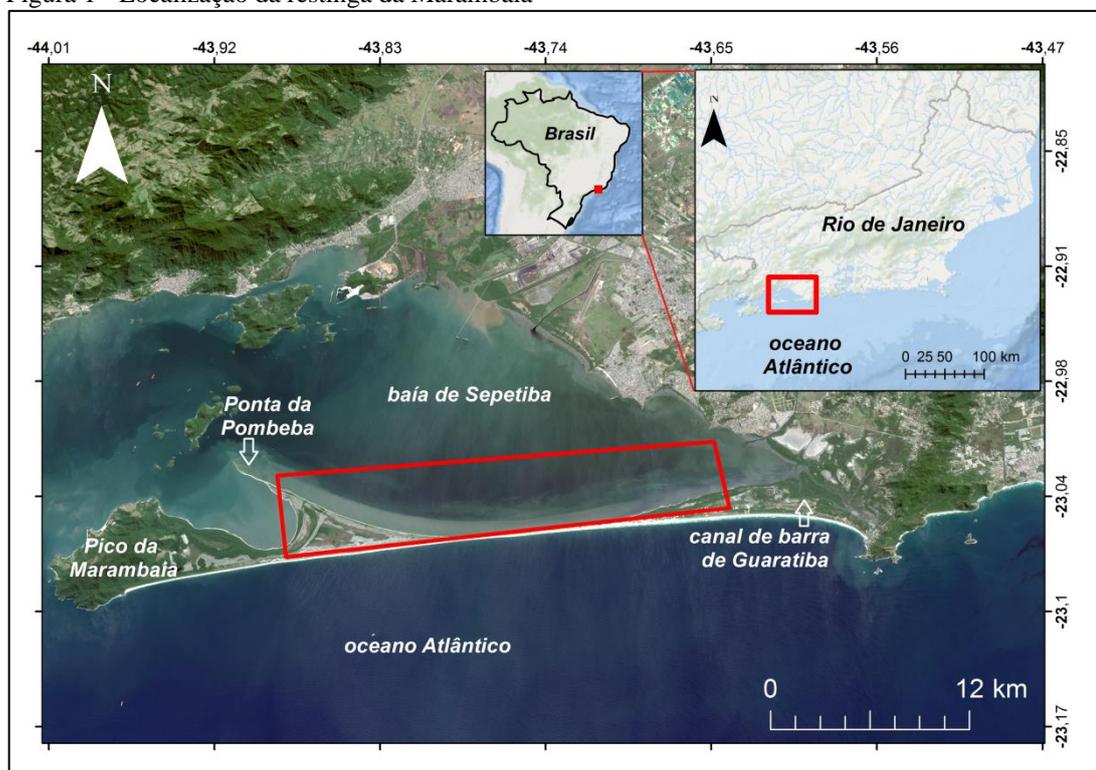
## 2 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Localização Geográfica e Descrição

A área de estudo fica localizada na margem interna da restinga da Marambaia, (Figura 1), uma ilha-barreira, na concepção de Pilkey et al. (2009), Stutz e Pilkey (2011) e Otvos (2012), com aproximadamente 40 km de extensão localizada no litoral do estado do Rio de Janeiro, sudeste do Brasil.

A restinga da Marambaia separa o oceano Atlântico e a baía de Sepetiba, que possui uma área total de aproximadamente 305 km<sup>2</sup> (FONSECA, 2013). A baía de Sepetiba tem duas ligações com o oceano Atlântico, a primeira a oeste, entre Ilha Grande e o Morro da Marambaia, e a segunda a leste, através do canal de Barra de Guaratiba.

Figura 1 - Localização da restinga da Marambaia



Legenda: Imagem do satélite Sentinel 2. Destaque em vermelho para a área de estudo.  
Fonte: EARTH EXPLORER, 2020.

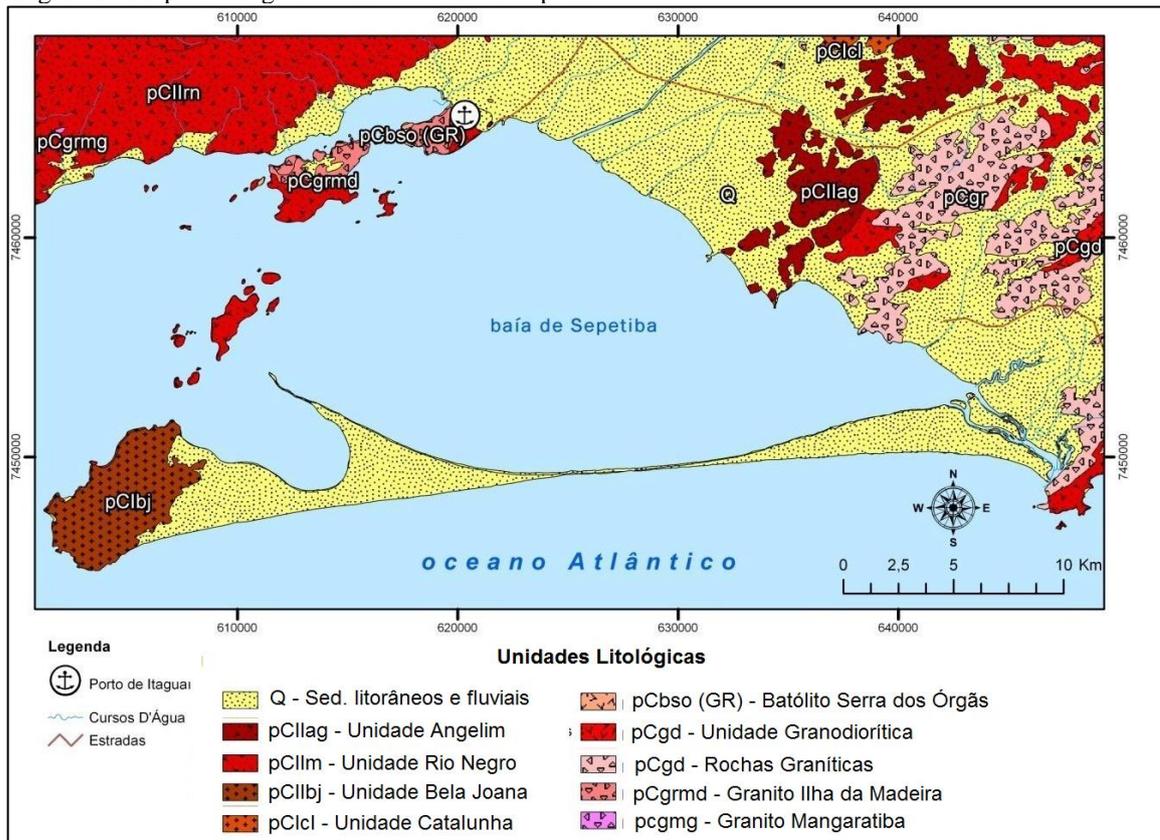
## 2.2 Geologia Regional

A área de interesse situa-se no Escudo Atlântico da Plataforma Sul Americana (PONÇANO; FULFARO; GIMENEZ, 1979). De acordo com Almeida, Hasui e Brito Neves (1976), esta área localiza-se nos limites do Graben da Guanabara, o qual é parte integrante do Rifte da Guanabara.

As unidades litológicas da bacia da baía de Sepetiba ocorrem disseminadas entre si, com litologias de idade Proterozóica apresentando direção estrutural NE-SO. Outras unidades ocorrem isoladamente, principalmente unidades de idade Cenozóicas e até algumas Proterozóicas. Os sedimentos fluvio-marinhos de idade Neógena formam a baixada de Sepetiba e a restinga da Marambaia, e encontram-se nas áreas baixas e ao redor das elevações compostas pelas rochas Proterozóicas, (ZEE/RJ, 1996 apud CARELLI et al., 2011).

De acordo com Ponçano, Fulfaro e Gimenez (1979), a baía de Sepetiba é dividida nas seguintes unidades geológicas principais: sedimentos quaternários nas planícies costeiras, abrangendo sedimentos fluviais, de canais de maré e de mangue, que formam a restinga da Marambaia; diques de rochas intrusivas básicas e alcalinas, e lamprófiros de idade Mesozóicas-Terciárias, com orientação principal NE e, subordinadamente NO; e por fim, as rochas ígneas e metamórficas mais antigas da região, que incluem principalmente gnaisses e migmatitos de idade pré-cambrianas e de orientação geral NE. Na Figura 2, é apresentado o mapa geológico da área da baía de Sepetiba.

Figura 2 - Mapa Geológico da área da baía de Sepetiba



Legenda: Base cartográfica IBGE: 2011; INEA 2010. Escala 1:25.000.

Fonte: modificado de RIO DE JANEIRO (Estado), 1990 por CARVALHO, 2014.

### 2.3 Caracterização/ Fisiografia

Na sua porção leste, mais próxima ao continente, a largura da restinga da Marambaia é de ~1,8 km. Enquanto no centro estreita-se para 120 m, e na sua porção oeste, mais distante do continente, possui uma largura máxima de 5 km. A restinga não é uniforme e apresenta diversas feições naturais como praias, campos de dunas e cordões litorâneos (BAHIENSE et al, 2014).

Bahiense et al. (2014), a partir da análise temporal de fotografias aéreas em um intervalo de 54 anos, atribuíram a margem interna da restinga, em sua parte central, caráter erosivo, com taxas de até 0,37 m/ano. Carvalho, Dalbosco e Guerra (2020), a partir da análise integrada de imagens Landsat (entre 1986 e 2018) e da série temporal extraída do modelo WaveWach III (NOAA), verificaram um padrão espacial alternado de erosão e acreção na margem oceânica da restinga, com predomínio erosivo nos setores oeste e extremo leste e avanço da linha de costa no setor leste. Além disso, as autoras observaram no setor central taxas de erosão entre

0,1 e 0,5 m/ano, onde durante eventos de tempestade a linha de costa chega a recuar até 20 metros.

A área da restinga vem sofrendo um intenso processo de erosão, principalmente em sua porção central, devido à ação de correntes, ventos e ondas (BAHIENSE et al, 2014). Na Tabela 1 pode ser observada a largura da porção central da restinga por um período de aproximadamente 50 anos.

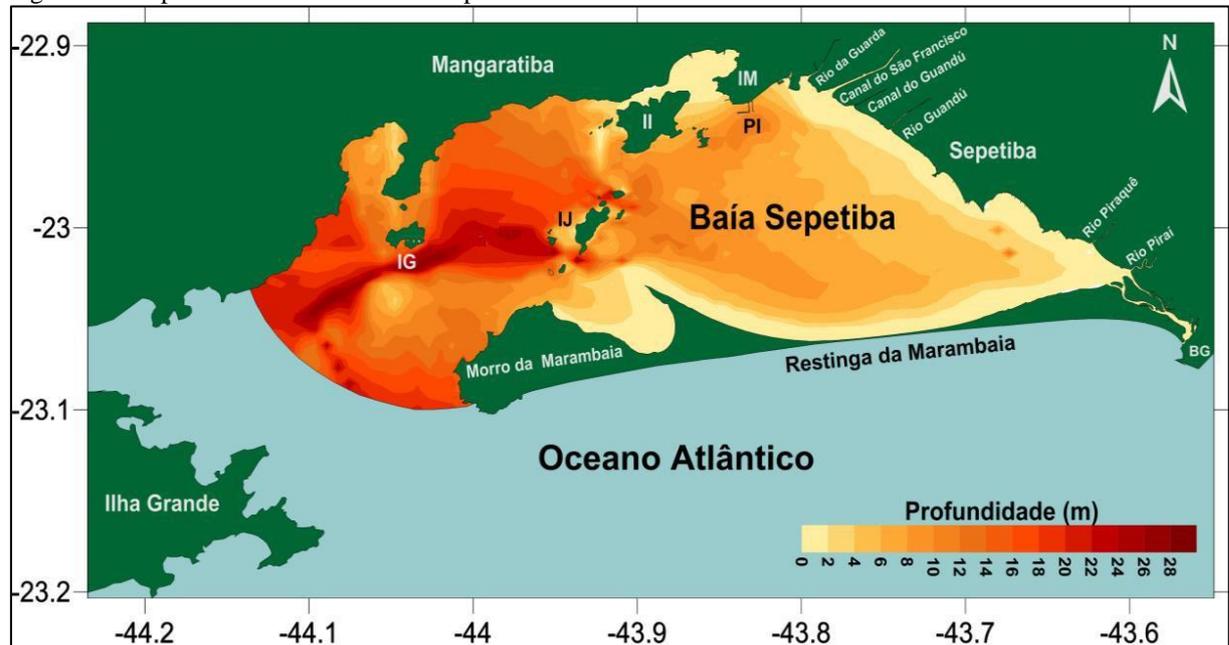
Tabela 1 - Evolução da largura da parte central da restinga da Marambaia (INPH, 2011).

Ano	1868	1975	1978	1981	1984	1990	1994	1996	2003	2004
Largura (m)	360	158	158	120	100	120	90	100	90	100

Fonte: BAHIENSE et al., 2014.

As maiores profundidades ocorrem na porção oeste, próximo ao canal de comunicação entre a baía de Sepetiba e o oceano. Na porção central da baía as profundidades atingem até 8,5 metros enquanto as menores profundidades ocorrem no setor leste e próximo à margem interna da restinga da Marambaia (Figura 3).

Figura 3 – Mapa batimétrico da baía de Sepetiba



Legenda: Dados de batimetria extraídos de folhas de bordo da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DNH) números 1607 (escala 1:80.000) e 1622 (escala 1:40.122). IM, II, IJ, IG, designam, respectivamente, as ilhas da Madeira, Itacuruçá, Jaguanum, Guaíba; PI e BG referem-se ao Porto de Itaguaí e Barra de Guaratiba.

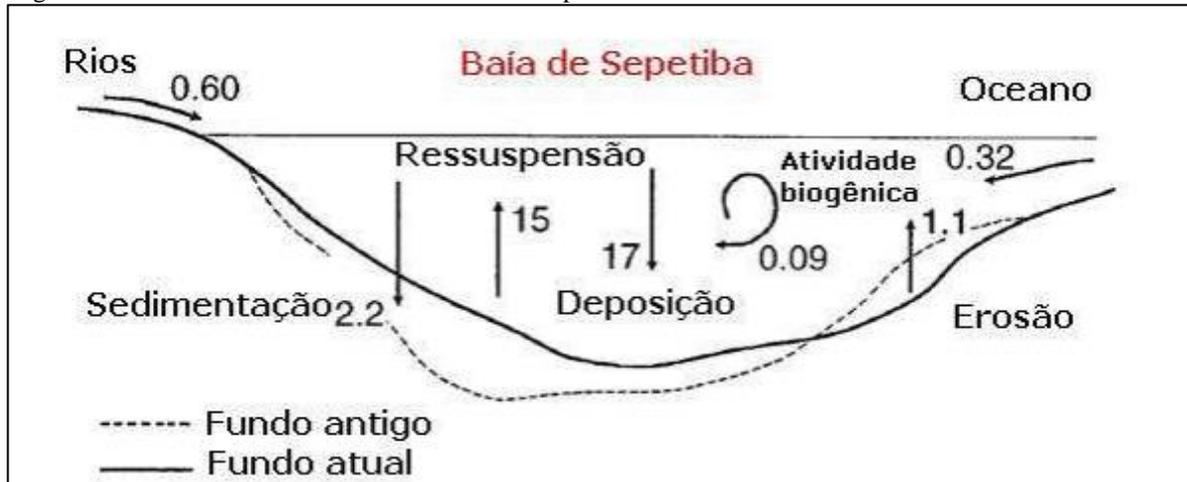
Fonte: modificado de FONSECA, 2013 pela autora, 2020.

### 2.3.1 Características dos sedimentos

Ponçano (1976) e Borges (1990) mostraram que na baía de Sepetiba existe uma grande diversidade de sedimentos, os quais refletem a história geológica recente da região. São encontrados tanto sedimentos de origem marinha, como sedimentos de origem fluvial, trazidos pelos cursos de água que deságuam no setor nordeste da baía.

Segundo Barcellos, Lacerda e Ceradini (1997) a baía de Sepetiba pode ser classificada como um estuário altamente ativo. O balanço entre sedimentação, erosão, ressuspensão e deposição resultaria em um saldo positivo de  $1 \times 10^6 \text{ t ano}^{-1}$  (Figura 4).

Figura 4 - Fluxo sedimentar estimado na baía de Sepetiba.



Fonte: adaptado de BARCELLOS; LACERDA; CERADINI, 1997 por CORTEZ, 2012.

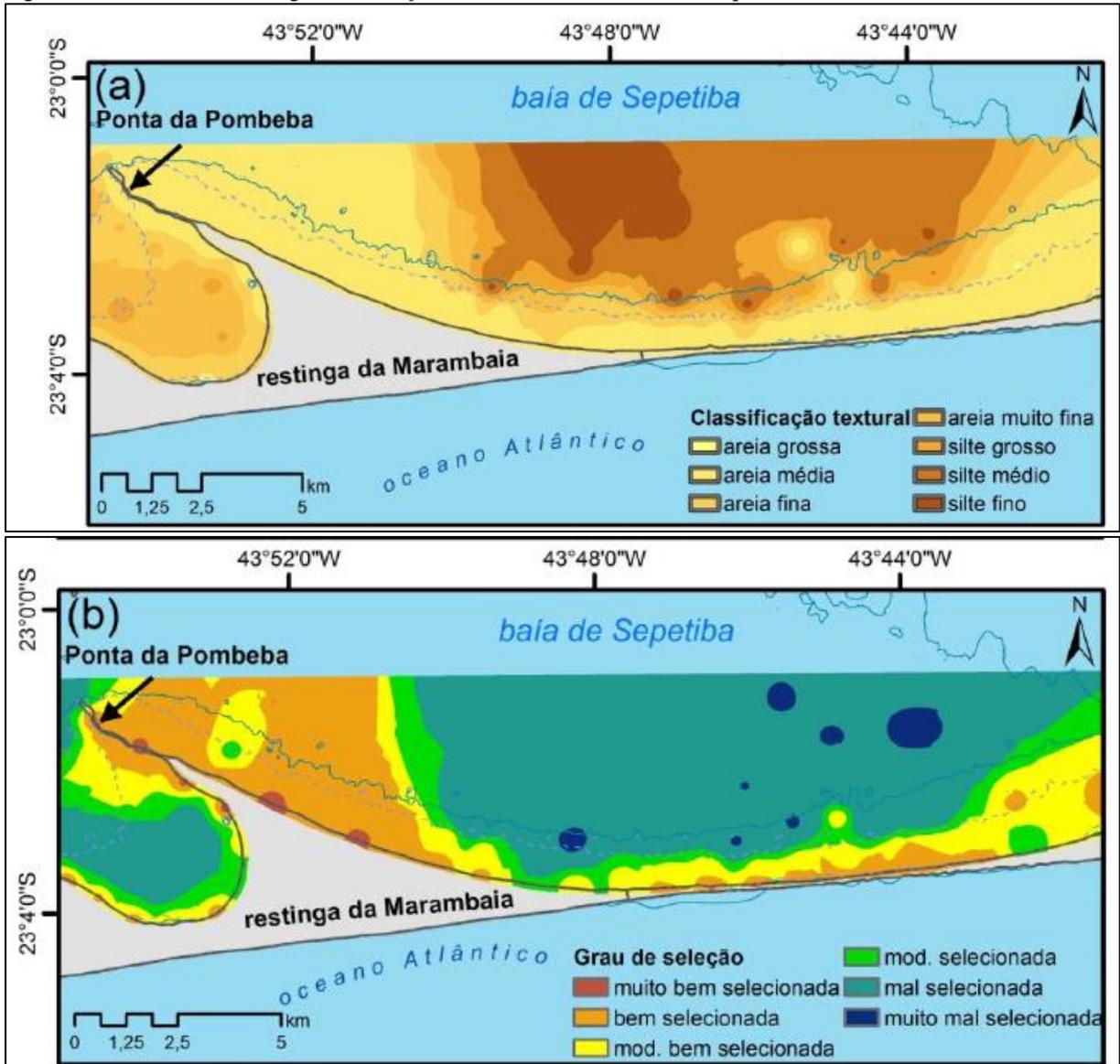
Com base na distribuição de sedimentos marinhos e continentais na região, Barcellos, Lacerda e Ceradini (1997) caracterizaram a baía de Sepetiba como um estuário inverso, em relação ao balanço sedimentar. Os autores definiram que o estuário retém grande parte do sedimento de origem fluvial e uma porção de sedimentos marinhos, exportando pouco sedimento para o oceano adjacente (CORTEZ, 2012).

Ponçano (1976) apresentou em seu trabalho a distribuição dos sedimentos superficiais da baía de Sepetiba, dados que foram reanalisados por Carvalho (2014). Observa-se a predominância de sedimentos finos ( $< 0,063\text{mm}$ ), mal selecionados e muito mal selecionados na região central da baía de Sepetiba (Figura 5). Próximo ao canal de comunicação entre a baía e o oceano predominam areias grossas, que variam de bem selecionadas até moderadamente selecionadas. Na margem lagunar da restinga da Marambaia predominam areias médias, bem

selecionadas, com alguns pontos onde são classificadas como moderadamente bem selecionadas.

Quanto à assimetria, as amostras coletadas na região são classificadas como positivas ou muito positivas. Sendo que as amostras de menor tamanho ( $< 0,125\mu\text{m}$ ) se mostram quase simétricas a muito positivas (CARVALHO, 2014).

Figura 5 - Tamanho médio e grau de seleção dos sedimentos na baía de Sepetiba



Legenda: (a) Tamanho médio granulométrico; (b) Grau de seleção.

Fonte: CARVALHO, 2014.

### 2.3.2 Características Hidrológicas

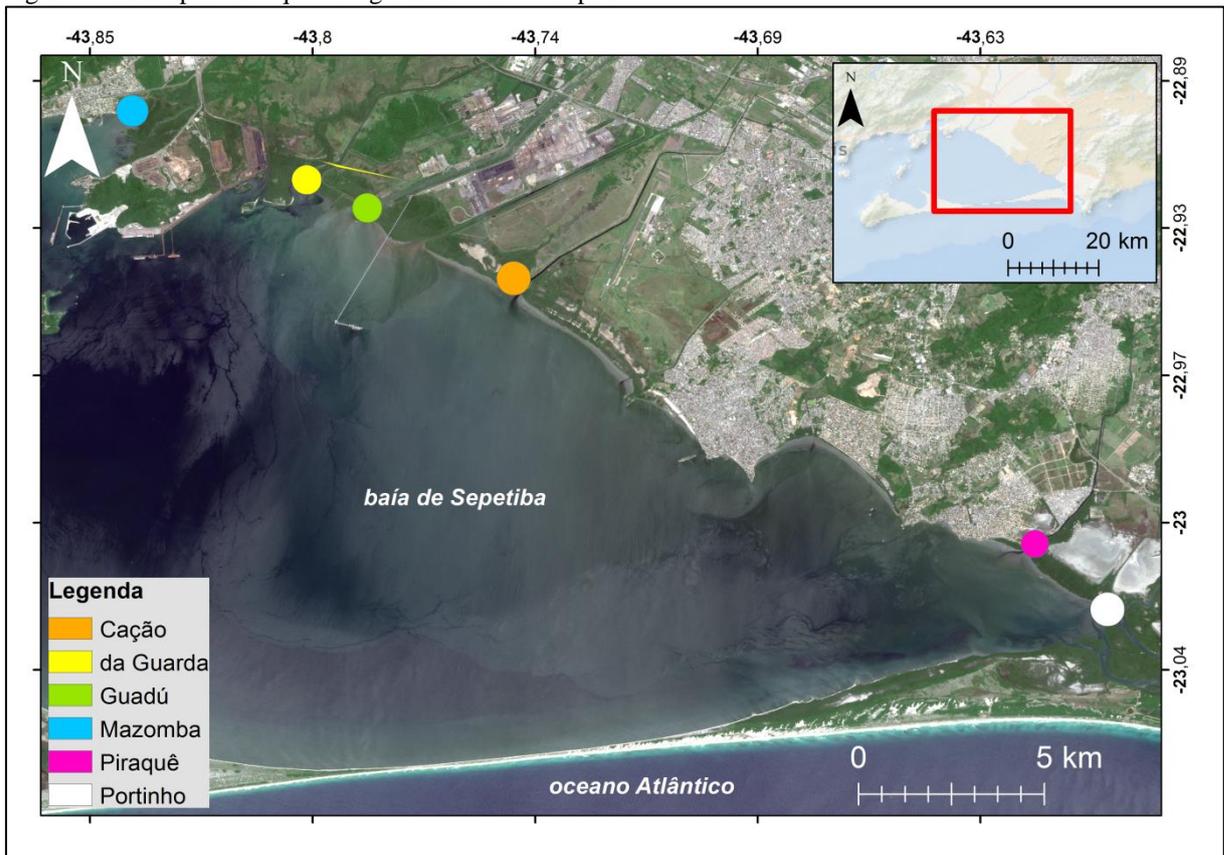
A baía de Sepetiba sofre influência da descarga de água doce proveniente de canais e rios adjacentes, localizados principalmente a NE da região, e das trocas com o oceano adjacente, que por sua vez é dificultada pela restinga da Marambaia (FRAGOSO, 1999).

A bacia hidrográfica da baía de Sepetiba abrange o território de 12 municípios, são eles: Itaguaí, Mangaratiba, Seropédica, Queimados, Paracambi e Japeri, totalmente inseridos na bacia, e, Nova Iguaçu, Paulo de Frontin, Miguel Pereira, Rio de Janeiro, Rio Claro e Piraí, com apenas parte de seus territórios nela englobada (RIO DE JANEIRO, 2001).

A bacia hidrográfica contribuinte à baía de Sepetiba tem duas origens: a vertente da serra do Mar e uma extensa área de baixada, recortada por inúmeros rios. Os principais rios da região hidrográfica da Baía de Sepetiba são os rios da Guarda, canal do Itá (interligado com o rio Guandu-Mirim), Piraquê, Mazomba, Portinho, Cação e Guandu (Figura 6). Os demais rios são cursos d'água com bacias bem menores, com baixíssimas vazões. O rio Guandu é o mais importante, ele é responsável pelo abastecimento de água para várias cidades e forma o principal manancial da cidade do Rio de Janeiro (FERREIRA; HORTA; CUNHA, 2010).

O aporte total de sólidos em suspensão para a baía é de origem fluvial. A concentração nos rios varia de 1,7 a 261 mg/L gerando fluxos de sedimentos em suspensão variando de 20 a 851 x 10<sup>3</sup> t/ano. O canal de São Francisco é responsável por 73% do aporte total para a baía (LACERDA et al, 2007).

Figura 6 - Principais rios que deságuam na baía de Sepetiba



Legenda: Imagem do satélite Sentinel 2 de 15 de dezembro de 2018.

Fonte: EARTH EXPLORER, 2020.

### 2.3.3 Fatores Hidrodinâmicos e meteorológicos

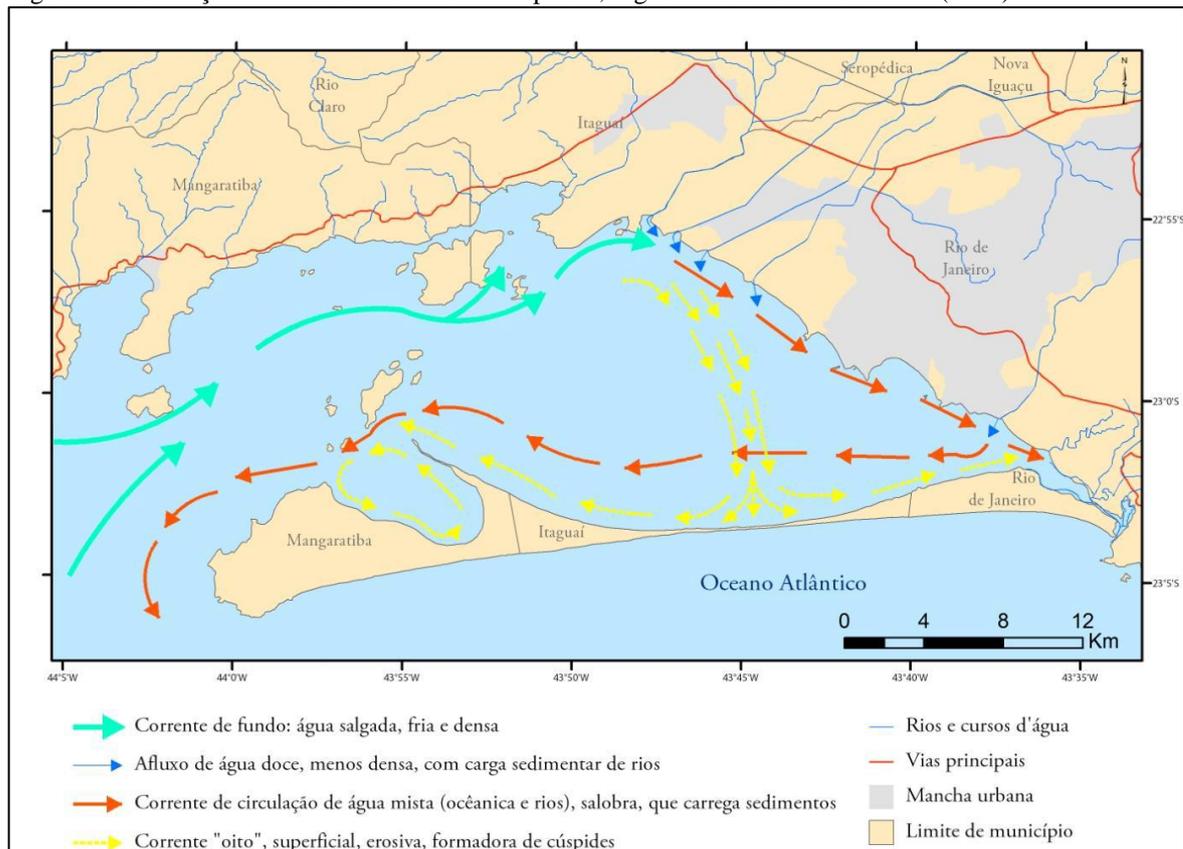
No interior da baía de Sepetiba, as correntes predominantes relacionam-se ao fenômeno de maré (DHN, 1986 apud VILLENA et al., 2012), que é classificada como semi-diurna mista. Estudos da DHN (1986) definem a amplitude de maré da baía entre 1,1m (sizígia) e 0,3m (quadratura). Segundo dados obtidos pela FEEMA /GTZ (Fundação Estadual de Engenharia Ambiental e Cooperação técnica Brasil – Alemanha, Projeto PLANAGUA/GTZ), as correntes de maré na baía são mais fortes próximas à Ilha Guaíba, com velocidades de até 0,6 m/s no período de vazante e 0,40m/s na enchente. Já no interior da baía, as correntes variam com máximas de 0,20 a 0,40 m/s. (CUNHA et al., 2006).

Roncarati e Barrocas (1978), Signorini (1980a, 1980b), Bronnimann, Moura e Dias Brito (1981), Moura, Dias Brito e Bronnimann (1982) e Fragoso (1999) investigaram a circulação na baía de Sepetiba. Com base nestes estudos, considera-se que a circulação na baía

ocorre no sentido horário e que as águas oceânicas mais frias penetram na baía por meio de sua conexão principal, e quando aquecidas retornam ao oceano.

Além disso, Roncarati e Barrocas (1978) assumem que o fechamento da baía possibilitou a formação de um novo sistema de correntes, tornando-a um corpo d'água restrito, com predominância da ação dos ventos e protegido da ação das ondas, o que ocasionou a formação de correntes de circulação interna (correntes em oito) (Figura 7).

Figura 7 - Circulação das correntes na baía de Sepetiba, segundo Roncarati e Barrocas (1978)



Fonte: modificado de RONCARATI; BARROCAS, 1978 por CARVALHO, 2014.

Carvalho (2014) realizou medições de direção e intensidade de correntes durante dois ciclos completos de maré (sizígia), na região próxima à margem interna da restinga, numa área com cerca de 6 m de profundidade (Figura 8c). No geral, as correntes mais intensas foram registradas na porção leste e central da restinga (estações 2 e 3), onde alcançam até 0,59 m/s, e as menores intensidades foram registradas na estação 1 (0,3m/s).

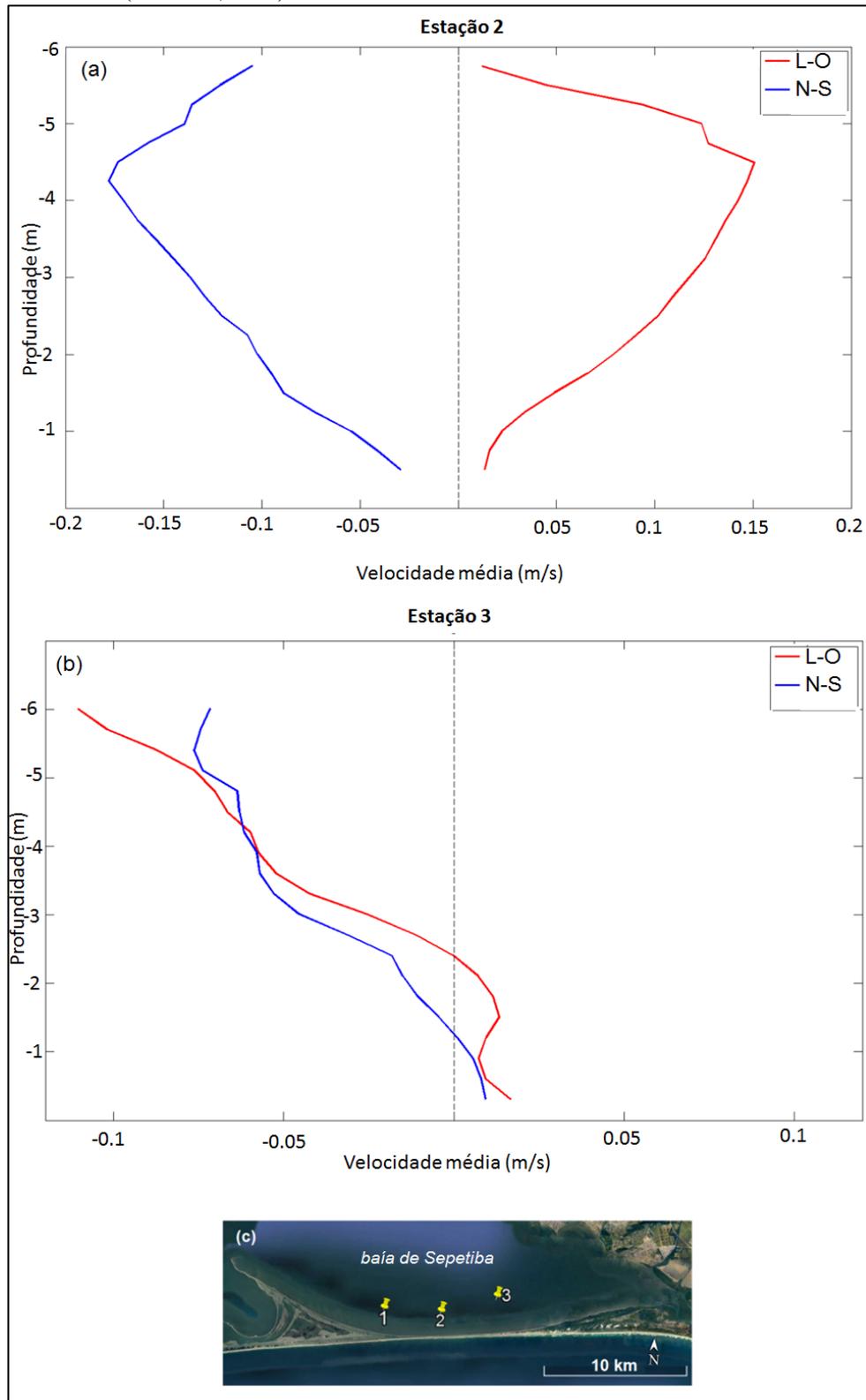
Segundo a autora, o perfil médio das velocidades das correntes na estação leste (estação 3) permite observar que, a partir de 2,5 m acima do fundo a direção predominante das correntes é para SO, enquanto próximo ao fundo os fluxos dirigem-se para NE, com menores intensidades (Figura 8b). Na porção central da restinga (estação 2) as correntes mais intensas se encontram

a cerca de 1,5 m abaixo da superfície, e a direção dos fluxos ao longo de toda a coluna d'água para SE (Figura 8b).

O regime de ondas no interior da baía é dominado por ondas geradas pelo vento, basicamente os ventos de leste, sudeste e nordeste (VILLENNA et al., 2012). Cortez (2012) a partir da análise de séries temporais da velocidade e direção dos ventos no período 2008-2010, disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) – Estação Marambaia, mostrou que nessa região são mais frequentes os ventos do quadrante N. Já os ventos de S/SO são menos frequentes, porém mais intensos.

Gutierrez (2012) definiu que as águas da baía apresentam as maiores temperaturas durante o verão e menores no inverno, além disso, a partir de medições de temperatura e condutividade da água, a autora comprovou a influência da ACAS no canal de entrada oeste até a altura da Ilha de Jaguanum em alguns períodos do ano. A baía apresenta salinidade média em torno de 32 psu, com variações apenas próximo à embocadura dos principais estuários (CUNHA et al., 2006).

Figura 8 - Perfil médio das velocidades medidas nas estações 2 e 3 ao longo de 25 h (Carvalho, 2014)



Legenda: (a) Estação 2, profundidade local de 6 metros; (b) Estação 3, profundidade local de 7 metros. Os valores positivos indicam correntes para L e para N.

Fonte: modificado de CARVALHO, 2014 pela autora, 2020.

## 2.4 Modelos evolutivos para a restinga da Marambaia

Diversos autores como Lamego (1945), Ponçano (1976), Roncarati e Barrocas (1978), Ponçano, Fulfaro e Gimenez (1979), Borges (1998), Friederichs et al. (2013), Reis et al. (2013), Dadalto (2017), entre outros, abordaram a gênese e evolução da restinga da Marambaia.

O primeiro a apresentar um modelo para a formação da restinga foi Lamego (1945), que propôs que o crescimento do cordão arenoso ocorreu de oeste para leste. Formada a restinga, o autor assume que a forte influência das correntes do oceano diminuiu, e os ventos periódicos agindo sobre a água motivaram o desdobramento da circulação interna, gerando circuitos menores, que resultaram na formação da Ponta da Pombeba.

Roncarati e Barrocas (1978), influenciados pelo trabalho de Lamego (1945), e baseados em evidências sedimentológicas e aerofotogramétricas, apontaram a existência inicial de dois cordões arenosos na restinga, que se sucederiam paralelamente a partir da ilha de Marambaia. Segundo esses autores, a restinga se originou de oeste para leste, e após sua formação se estabeleceram as correntes de circulação interna, ou “correntes em oito” (Figura 7).

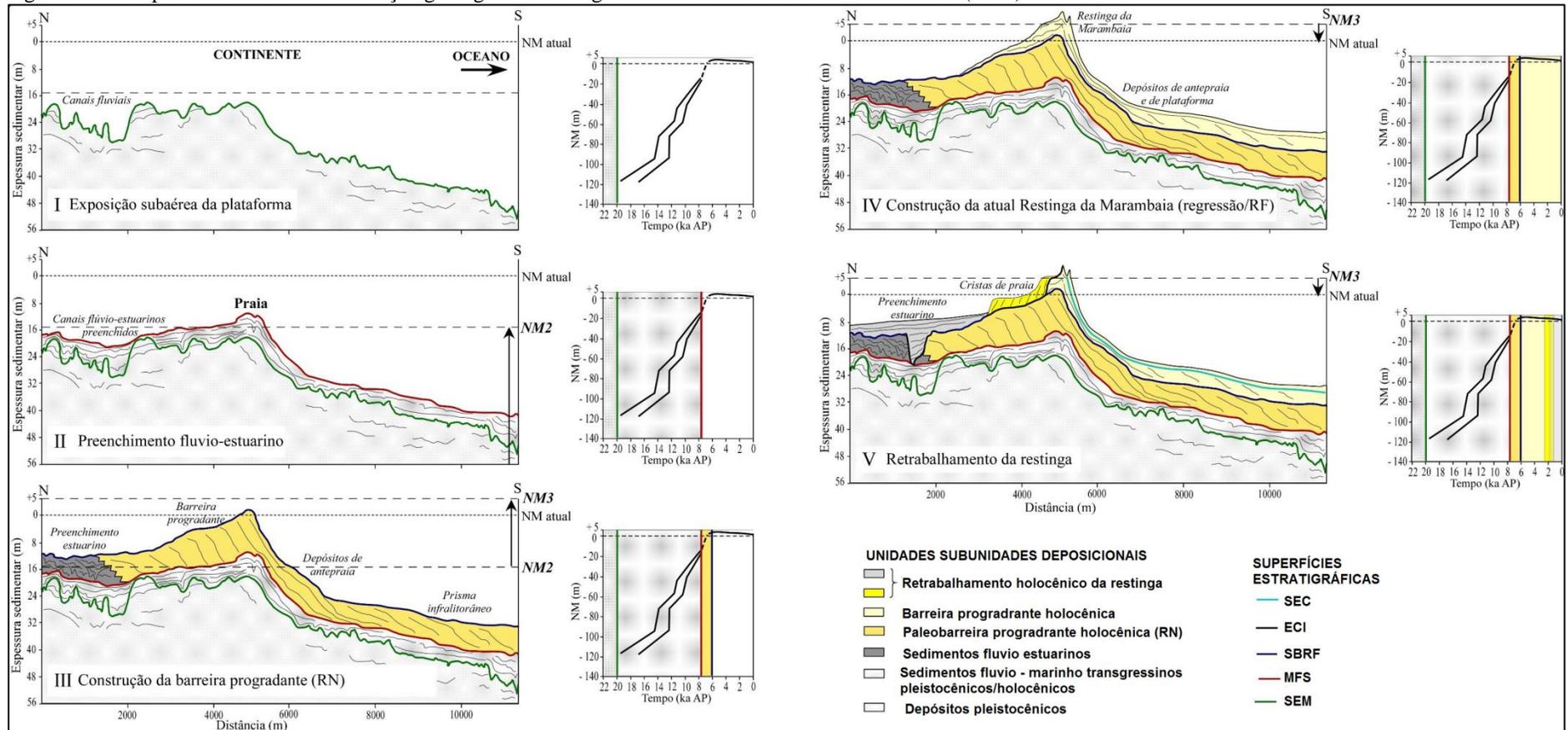
No modelo proposto por Ponçano, Fulfaro e Gimenez (1979) considera-se que a restinga tenha se formado a partir de leste e de oeste em direção ao centro. Segundo os autores, a diferença entre as características do setor leste e oeste da restinga e o desenvolvimento de planícies de maré internas à baía (que daria suporte à ideia de fechamento recente da restinga), são evidências que corroboram o modelo proposto.

Em oposição, em sua tese Borges (1998), baseando-se em dados geológicos coletados na região (levantamento sísmico e sondagens) assume que a restinga da Marambaia teria se desenvolvido a partir de um esporão com crescimento de leste para oeste sobre um alto topográfico, o que poderia explicar a diferença do ambiente de sedimentação nas porções leste e oeste da ilha-barreira.

Friederichs et al. (2013) e Reis et al. (2013a), a partir da análise de dados sísmicos coletados na plataforma interna adjacente à restinga da Marambaia, consideraram que a evolução da restinga da Marambaia ocorreu através de uma sucessão de fases de construção e destruição de ilhas-barreira isoladas. A ocorrência de várias gerações de canais rasos preservados (com até ~5 m de profundidade) com feições de intensa migração lateral, que foram interpretados como canais de maré, são evidências da construção de ilhas-barreira descontínuas na desembocadura dos paleoestuários (DADALTO, 2017).

Em estudo mais recente Dadalto (2017) também avaliou a evolução arquitetural e os processos sedimentares atuantes na evolução morfogenética da restinga da Marambaia. Com base em dados de diferentes níveis de resolução, adquiridos através de métodos diretos e indiretos (amostragem e/ou de imageamento), a autora propõe um novo modelo de evolução estratigráfica e geomorfológica para a restinga, dividido em 5 fases: exposição subaérea da área; aumento do nível do mar e preenchimento sedimentar fluvio-estuarino; período mais tardio da subida do nível do mar, entre cerca de 8-7,5 a 5,8 ka A.P., quando predominaram processos progradantes de deposição; construção da atual restinga da Marambaia e dos depósitos marinhos de recobrimento da antepraia e plataforma continental a partir de 5,8 ka A.P e por fim, processos de retrabalhamento da barreira regressiva e dos demais depósitos no interior da baía (Figura 9).

Figura 9 - Vista planar do modelo da evolução geológica da restinga da Marambaia de acordo com Dadalto (2017)



Legenda: A curva do nível do mar utilizada é uma interpolação entre as curvas de Duncan et al. (2000) e Angulo et al. (2006). Sec: superfície entrecordões; Eci: superfície de erosão pela circulação interna; SBRF: superfície basal de regressão forçada; MFS: superfície de inundação máxima; SEM: superfície de exposição máxima.

Fonte: DADALTO, 2017.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

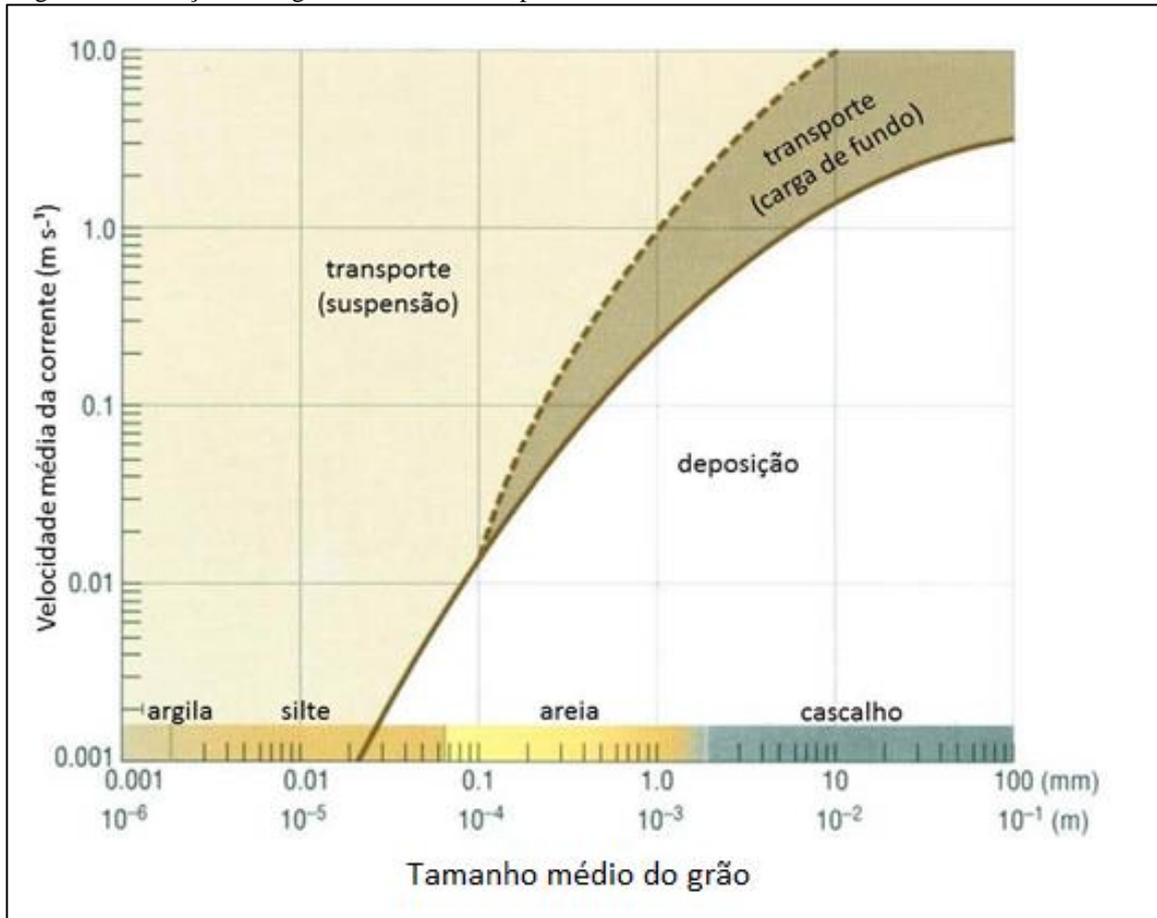
#### 3.1 Transporte de sedimentos

Nas regiões costeiras ocorrem fluxos paralelos e perpendiculares à linha de costa. A deposição do material transportado nestes ambientes costeiros pode gerar como resultado diversas feições de tamanhos e características morfológicas distintas.

Um dos parâmetros mais importantes que controla o transporte e a deposição de sedimentos é o tamanho dos grãos, além da densidade da água e das partículas, velocidade das correntes, viscosidade da água e características do fluxo (laminar ou turbulento). Já as características como: grau de turbulência, taxa de variação de velocidade das correntes com a profundidade e composição e rugosidade do leito, vão influenciar na extensão em que o movimento do sedimento ocorre. Estes fatores vão determinar o que conhecemos como tensão de cisalhamento (*shear stress*, em inglês) que é a força (por unidade de área) que o escoamento exerce tangencialmente sobre o fundo (OPEN UNIVERSITY, 1999). A tensão de cisalhamento exercida por qualquer fluido em movimento é proporcional ao quadrado da velocidade do fluxo.

Como mostrado na Figura 10, existe um limiar para o início do movimento, que depende basicamente do tamanho das partículas (para o caso de sedimentos não coesivos). Em função da diferença entre a tensão (ou velocidade) de cisalhamento e o limiar crítico, podem ser desenvolvidos diferentes modos de transporte, como arrasto e suspensão. Abaixo desse limiar, não existe movimento de fundo ou acontece deposição.

Figura 10 - Relação entre granulometria e transporte de sedimentos



Legenda: Faixa de velocidades de corrente média na qual as partículas de sedimento de diferentes tamanhos são transportadas, em suspensão ou como carga de fundo, e abaixo do qual elas são depositadas. A linha tracejada indica a transição entre o transporte de carga e suspensão.

Fonte: modificado de OPEN UNIVERSITY, 1999 pela autora, 2020.

### 3.2 Padrões costeiros

A interação do fluido com um material não coeso, como a areia, produz formas como ondulações, dunas e antidunas, entre outras (REINECK; SINGH, 1980). Estas feições são o resultado de ondas e correntes que interagem com o fundo e transportam sedimentos exercendo tensões de cisalhamento no fundo do mar. A convergência/divergência do transporte de sedimentos produz mudanças no nível do leito, gerando as formas que se tornam parte do sistema costeiro e são tratadas na literatura como padrões rítmicos, pois apresentam uma notável periodicidade espacial ao longo da costa.

Cada feição seja cúspides de praia, bancos transversais, bancos crescentes, entre outros, é associada a diferentes escalas temporais, e tem sua própria distribuição espacial típica da

concentração de sedimento (RIBAS et al, 2015). Na Tabela 2 são listados alguns tipos de padrões e suas características.

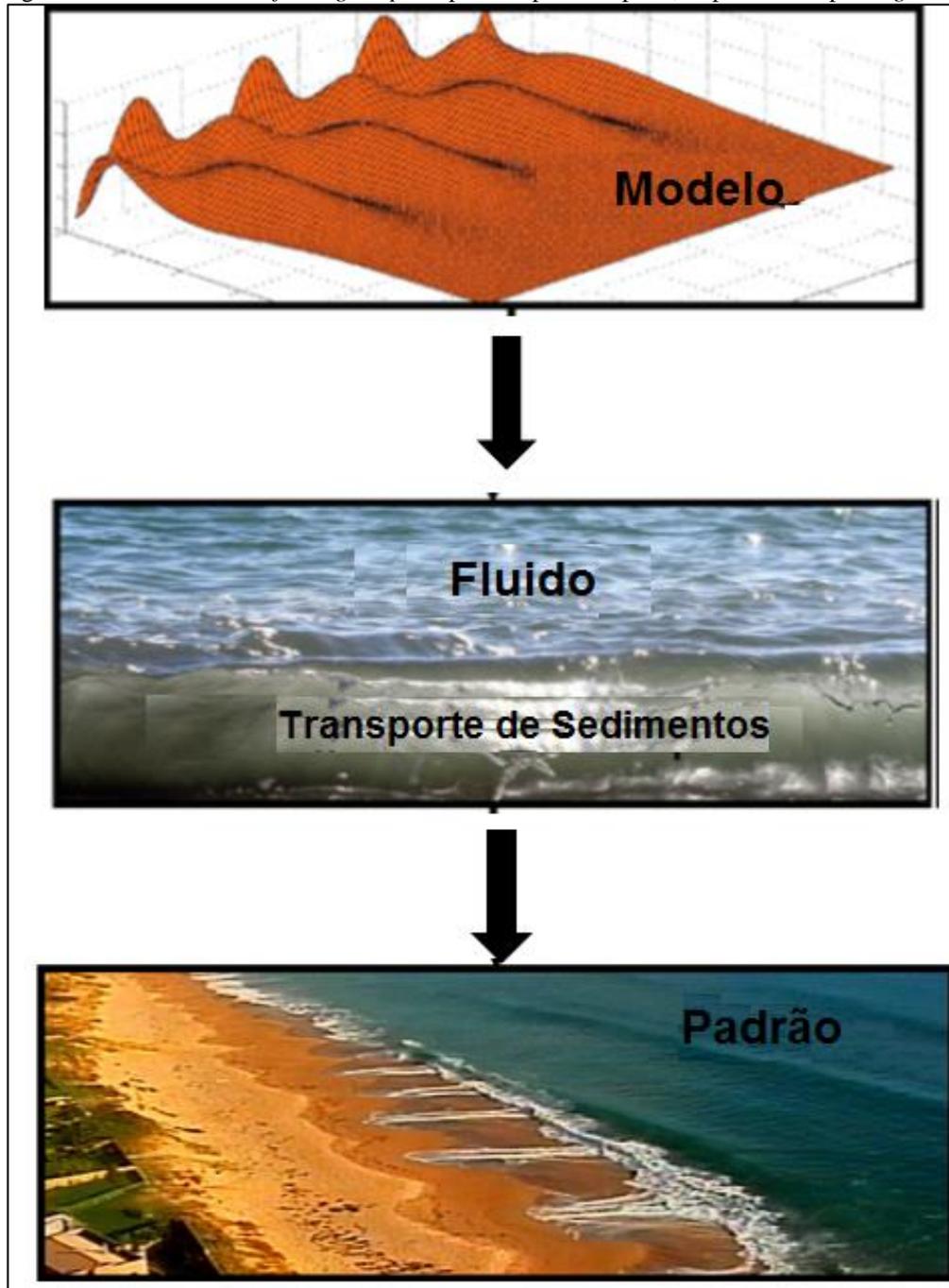
Tabela 2 - Exemplos de padrões rítmicos observados ao longo da costa

<b>Padrão</b>	<b>Localização</b>	<b>Escala espacial</b>	<b>Escala temporal</b>
<b>Bancos crescentes</b>	zona de surfe	0,1 a 3km	horas-dias
<b>Bancos Transversais</b>	zona de surfe	10-750m	horas-dias
<b><i>Shoreface- connected ridges</i></b>	plataforma interna	1-8km	séculos-milênios
<b>Cúspides de praia</b>	zona de espraiamento	1-50m	minutos-horas

Fonte: modificado de RIBAS et. al, 2015 pela autora, 2020.

Durante as décadas de 1980 e 1990, o desenvolvimento da morfologia rítmica costeira foi explicado inicialmente por modelos que assumem a existência de “*Forcing templates*” (Figura 11). Segundo estes modelos, as características do padrão morfológico, em particular as escalas espaciais, podem ser preditas com base apenas nas características da condição de contorno imposta (COCO; MURRAY, 2007). Esta abordagem parte do princípio que uma forçante hidrodinâmica, por exemplo, uma onda de borda ou contorno (*edge waves*), induzirá a formação e contribuirá para o desenvolvimento dos padrões rítmicos, que responderiam passivamente à forçante.

Figura 11 - Mecanismo do *forcing template* para cúspides de praia, impulsionado por *edge waves*



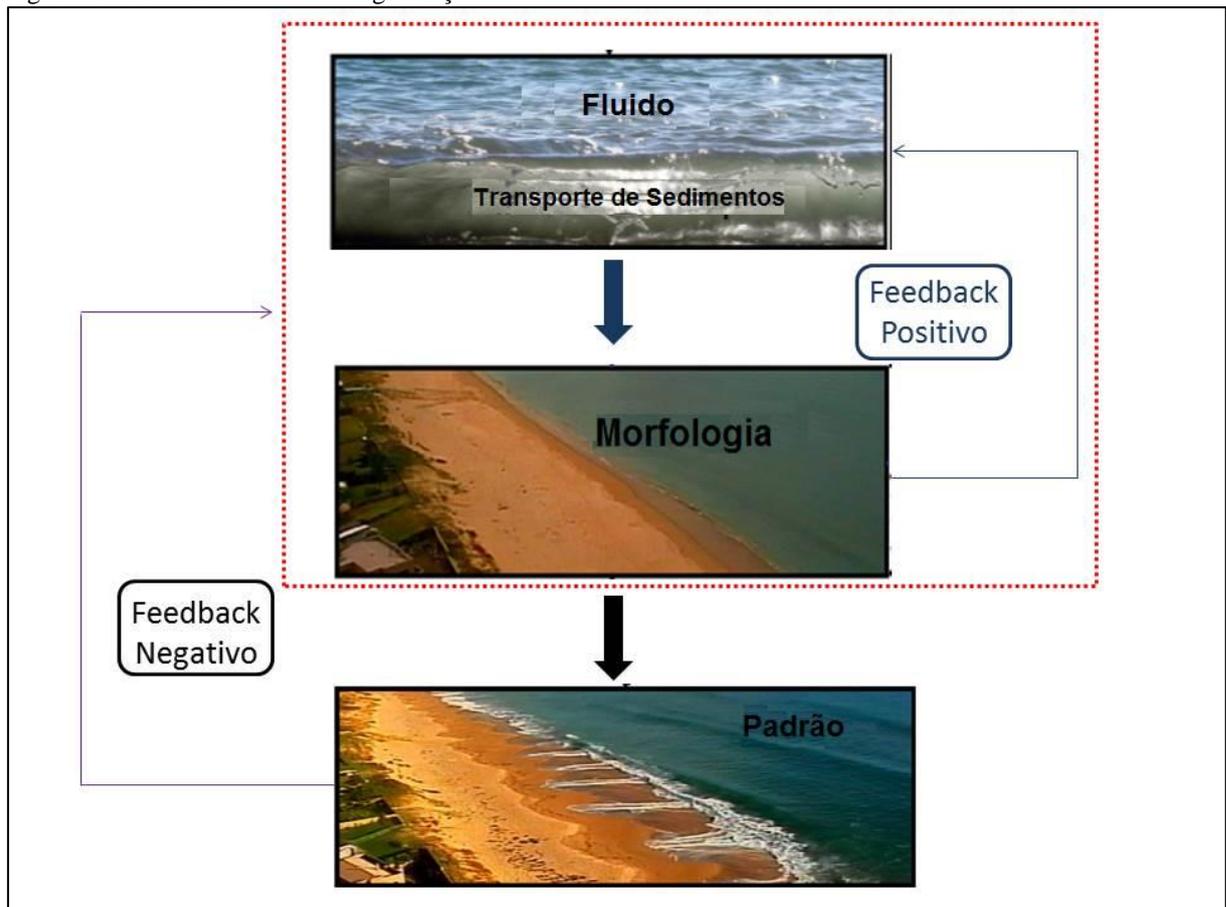
Fonte: modificado de COCO; MURRAY, 2007 pela autora, 2020.

O maior problema descrito na literatura, é que este modelo ignora a influência que o sedimento ou a forma de fundo têm sobre o fluxo. Ainda assim, vários estudos se baseiam no mencionado modelo para explicar o mecanismo propulsor da formação destes padrões na região costeira, por exemplo, Johnson (2005).

Alternativamente, surgem os "mecanismos de auto-organização" que se baseiam no conceito de instabilidade morfodinâmica (Figura 12). Esta teoria assume que o surgimento de padrões rítmicos na costa é causado por uma perturbação no meio, seja ela de qualquer

magnitude (por exemplo, uma pegada, uma concha ou até mesmo um bloco de rocha). A perturbação irá causar uma alteração no fluxo e a partir daí se inicia uma retroalimentação, ou seja, um *feedback* positivo, onde a feição modifica o fluxo e o fluxo influencia na feição. Modelagens numéricas mostram que esta hipótese é bem sucedida na explicação da formação de diversos padrões rítmicos (WARNER; FINK, 1993; CABALLERIA et al., 2002; CASTELLE et al., 2010).

Figura 12 - Mecanismo de auto-organização



Fonte: modificado de COCO; MURRAY, 2007 pela autora, 2020.

### 3.2.1 Bancos transversais do tipo “*finger bars*”

Segundo Shepard (1952), os bancos transversais são bancos orientados perpendicularmente ou com alto ângulo em relação à linha de costa, com uma escala de comprimento relativamente pequena. Ribas e Kroon (2007) definem os bancos como acumulações alongadas de areia, que se estendem no domínio inframaré de algumas praias até

poucos metros de profundidade. Estas feições são relatadas em várias regiões ao redor do mundo (Tabela 3), em ambientes com condições hidrodinâmicas variadas.

Tabela 3 - Exemplos de estudos sobre bancos transversais

<b>Região</b>	<b>Ambiente</b>	<b>Referência</b>
<b>Michigan, Estados Unidos</b>	lago	Evans (1938)
<b>Santa Catarina, Brasil</b>	laguna	Tanner (1970)
<b>Flórida, Estados Unidos</b>	baía	Niederoda et al. (1970)
<b>New South Wales, Austrália</b>	costa aberta	Wright et al. (1984)
<b>praia Trabucador, Espanha</b>	baía	Falqués (1989); Mujal-Colilles et al. (2017); Mujal-Colilles et al. (2019)
<b>Santander, Espanha</b>	baía	Medelín et al. (2008); Garnier et al. (2012); Pélon et al. (2014)
<b>Normandia, França</b>	canal de maré	Levoy et al. (2013)

Fonte: A autora, 2020.

Evans (1938) descreveu cúspides de praia presentes no lago Silver, Michigan (Estados Unidos). Segundo Niederoda e Tanner (1970), esta pode ter sido a primeira publicação que trata do transporte de sedimentos ao longo de bancos transversais. Mais tarde, uma série de autores como Shepard (1952); Bruun (1955); Hom-Ma e Sonu (1963); Moody (1964), Tanner (1967) e mais recentemente Mujal-Colilles, Grifoll e Falqués (2019), entre vários outros, reportaram a presença de bancos transversais em diferentes regiões costeiras.

Os bancos ocorrem frequentemente em costas protegidas, de micromaré sob condições de ondas de baixa energia ( $H_{rms} < 0,20$  m, onde  $H_{rms}$  é a raiz média quadrática da altura das ondas). Essas praias são largas, levemente inclinadas ( $b < 0,01$ , com  $b$  sendo a inclinação média da praia) e recebem um grande suprimento de sedimentos (RIBAS; KROON, 2007). São encontrados também em ambientes de mar aberto, como por exemplo relatado nos trabalhos de Konicki e Holman. (2000); Hunter, Clifton e Phillips (1979); Wright e Short (1984), entre outros.

Sonu (1973) se refere a ondulações regulares na costa com a denominação de “topografia rítmica”, e destaca como essenciais as seguintes características, no qual se enquadram os bancos transversais (FALQUÉS, 1989):

- a) Continuidade ao longo da praia, com uma linha de costa sinuosa;
- b) Presença de bancos de areia em forma de lua crescente. Nos pontos de contato dos bancos com a costa, a praia vai em direção ao mar, formando um pequeno cabo;
- c) Correlação sistemática entre as regiões submersas e emersas dos bancos;
- d) Praia com inclinação suave e abundância de sedimentos;
- e) Presença de corrente paralela à costa, que pode ser ocasionada por vários fatores, como ondas de incidência oblíqua, vento e maré.

Por outro lado, Barçilon e Lau (1973) sugerem o termo “família de bancos transversais”. Os autores assumem as seguintes características para uma determinada família:

- a) Bancos de areia regularmente espaçados, situados em praias protegidas das ondas;
- b) Podem ser oblíquas ou perpendiculares à costa. Nos dois casos, os bancos são sempre paralelos entre si;
- c) Sobre os bancos aparecem pequenas ondulações de 5 a 10 cm de altura, causadas pela incidência de ondas, que devido à batimetria, sofrem fenômenos de refração e interseção;
- d) Apresentam comprimento de onda ( $\lambda$ ) da ordem de 50 metros a quilômetros;
- e) Distância transversal à costa ( $\Delta x$ ) da ordem de 100 metros a quilômetros;
- f) Duas famílias com orientações diferentes podem existir no mesmo local.

Pellón, Garnier e Medina (2014) definiram quatro tipos de bancos transversais (Tabela 4). O tipo TBR, “*Transverse bars and rips*”, que não é considerado como do tipo *finger bar*, pois está associado à evolução de bancos anteriores presentes na região, além de apresentar maior largura e menor alcance transversal à costa do que os bancos do tipo *fingers*; Tipo 1: definidos como “*Large scale finger bars*” devido a sua elevada distância em relação à costa (~1 km), são encontrados em praias largas (~1 km) de baixa energia, e apresentam comprimento de onda médio ( $\lambda$ ) de ~100 metros (p. ex. GELFENBAUM; BROOKS, 2003); Tipo 2: bancos transversais observados em estados intermediários de praia, denominados “*Finger Bars of intermediate beaches*”, apresentam comprimento de onda menor (tipicamente de 50 a 100 m), e coexistem com outras morfologias rítmicas presentes na zona de arrebatamento (p. ex. KONICKI; HOLMAN, 2000); e, finalmente, o tipo 3 que engloba os bancos associados à energia de onda muito baixa, chamados “*Small scale low energy finger bars*”, localizados em

praias de área restrita (<10 km), com comprimentos de onda típicos de ~10m e uma distância transversal à costa de 10 a 100 m (p. ex. BRUNER; SMOSNA, 1989).

Tabela 4 - Classificação de bancos transversais segundo Pellón, Garnier e Medina, 2014

<b>Tipo</b>	<b>Tipo de praia</b>	<b>Altura média da onda (m)</b>	<b>Comprimento de onda (m)</b>	<b>Orientação</b>	<b>Migração (m/dia)</b>	<b>Distância da costa (m)</b>
<b>TBR</b> <i>(transverse bars and rips)</i>	Intermediárias Dominadas por ondas	>0,5	100-500	Normal ou Oblíqua	5	<150
<i>Large scale finger bars</i>	Baixa energia; Declive de 0,002; Largas (~1km)	<0,5	~100	Normal ou Levemente Oblíqua	1	~1000
<i>Finger bars</i> <i>(praias intermediárias)</i>	Intermediárias Dominadas por ondas	>0,5	50-100	Oblíqua/ Contrário ao sentido da corrente resultante <i>(Up-current)</i>	22	<100
<i>Small scale Low energy finger bars</i>	Limitadas <10km	<0,1	<50	Oblíqua/ No sentido da corrente resultante <i>(Down-current)</i>	-	<100

Fonte: modificado de PELLÓN; GARNIER; MEDINA, 2014 pela autora, 2020.

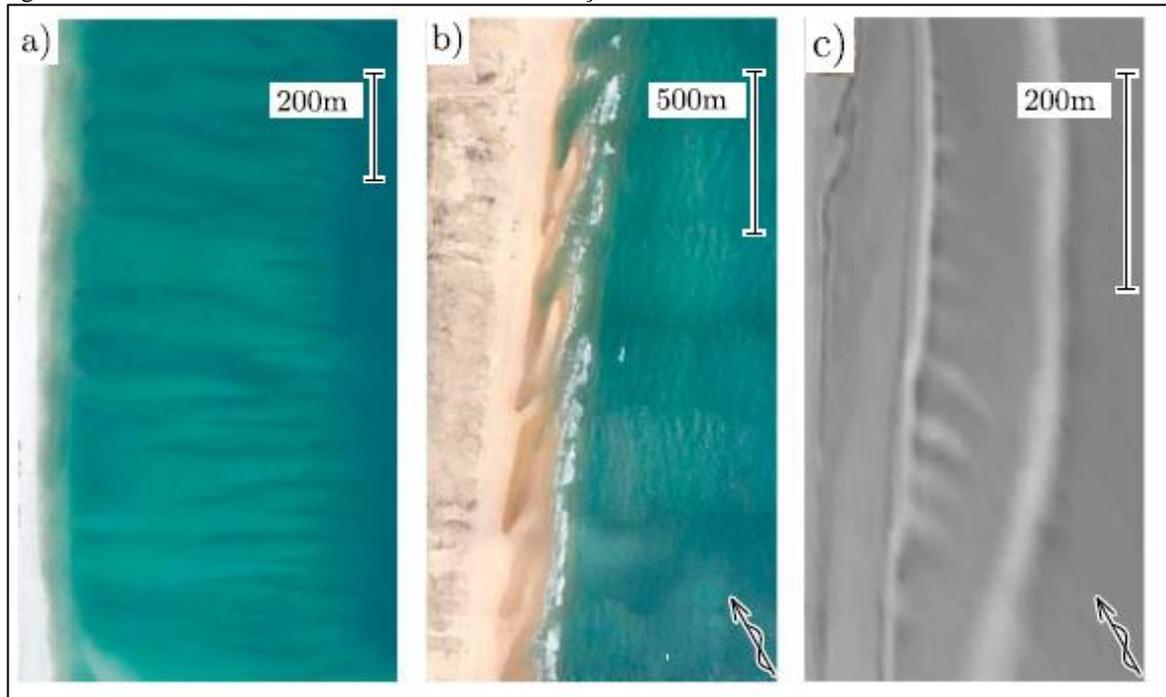
Ribas et al. (2015) propõem uma nova classificação para os bancos transversais, baseada na sua orientação em relação ao fluxo principal (Tabela 5). Se a crista for deslocada na direção da corrente, usa-se a denominação *down-current*; caso a crista seja orientada contra a corrente, é usada a denominação *upcurrent*; e, por fim, se for orientada perpendicularmente à costa, denomina-se de normal à costa (*shore-normal*) (Figura 13). Vale ressaltar que, neste caso, o banco só pode ser classificado se a forçante principal for identificada.

Tabela 5 - Classificação dos bancos transversais segundo Ribas et al., 2015

<b>Orientação</b>	<b>Inclinação da praia</b>	<b>Principais processos</b>	<b>Referência</b>
<b>Shore normal</b>	0,01	quebra das ondas	MacMahan et al. (2005)
	0,003	refração das ondas	Niederoda et al. (1970)
	0,01	quebra das ondas	Castelle et al. (2006)
<b>Down current</b>	0,015	Ondas geradas pelo vento de direção oblíqua à costa	Bruner et al. (1989)
<b>Up current</b>	0,02-0,04	quebra das ondas	Ribas et al. (2007)
		correntes geradas por ondas	Ribas et al. (2014)

Fonte: RIBAS et al., 2015.

Figura 13 - Bancos transversais com diferentes orientações



Legenda: (a) *large-scale finger bars shore-normal*, localizadas na ilha Anna Maria, EUA (*Google Earth, US Geological Survey and USDA Farm Service Agency*); (b) *TBR down-current*, localizadas na costa atlântica Francesa (detalhes em CASTELLE et al., 2006) (*Google Earth*); e (c) *medium-energy finger bars up-current*, em Noordwijk, Holanda (imagem de vídeo com média de tempo).

Fonte: modificado de RIBAS et al, 2015 pela autora, 2020.

Mais recentemente, Mujal-Colilles, GriFoll e Falqués (2019) definiram três tipos de bancos transversais: 1) *Transversal Bar and Rip* (TBR) que são tratadas em Wright e Short. (1984); 2) *Medium energy finger bars* (MEFB) associadas a praias de micromaré, sob condições de média energia, coexistem com bancos paralelos à costa ou bancos crescentes; e 3) *Long finger transverse bars* (LFTB) associados a praias de baixa a média energia, com declive suave e comprimento de onda da ordem de 10 a 500 m. As '*low-energy finger bars*' e '*large-scale finger bars*' da classificação de Pellón, Garnier e Medina (2014) são agrupadas nesta classe.

As características morfológicas dos bancos sugerem que sua formação pode estar associada à superposição de vários mecanismos, que possuem diferentes graus de importância, de acordo com a fase de desenvolvimento e as condições meteorológicas. Neste sentido podem ser destacados três aspectos fundamentais do fenômeno: início, periodicidade espacial e crescimento e evolução (FALQUÉS, 1989).

A instabilidade induzida pela incidência de ondas oblíquas na costa é a mais frequente explicação para a presença das feições na região costeira. Alguns exemplos dessas características são as dunas subaquáticas (*sand waves*) no litoral holandês (FALQUÉS, 2006), os cabos da costa da Carolina do Norte (Estados Unidos), e as características da costa em forma

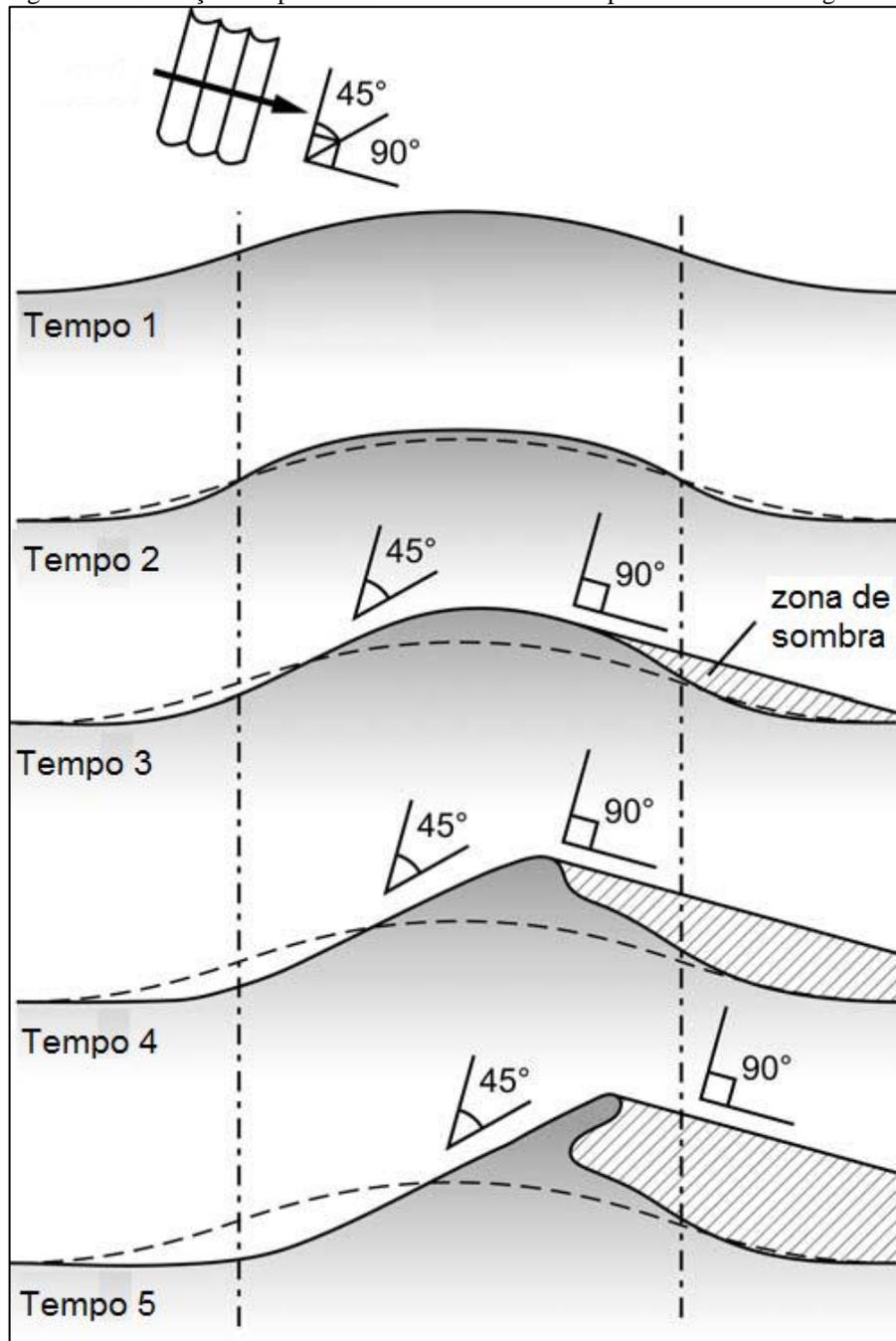
de cúspide na costa norte do Mar de Azov, Ucrânia (p. ex. ASHTON; MURRAY; ARNAULT, 2001) (MEDELLÍN et al., 2008).

Ashton e Murray (2006b), com base na aplicação de modelagem numérica, defendem que a instabilidade da linha costeira pode desempenhar um papel importante no comportamento dos bancos. Inicialmente os autores consideram que toda a costa é afetada por ondas de uma única direção de alto ângulo, ocorrendo acúmulo de sedimentos ao longo da crista de uma protuberância e remoção ao longo de seus flancos (Figura 14, tempo 1). O ângulo da linha de costa no ponto de inflexão aumentará, mas não pode exceder o ângulo que maximiza o transporte de sedimentos ao longo da costa (Figura 14, tempos 2 e 3). No entanto, a erosão continuada ao longo do flanco de montante (*updrift*) tenderá a aumentar o ângulo no ponto de inflexão, forçando eventualmente o ponto de inflexão a migrar em direção à crista da protuberância (Figura 14, tempo 4). O flanco de montante tenderá para uma linha de costa com taxa de erosão constante que se aproxima, mas não excede o ângulo que maximiza o transporte de sedimento (Figura 14- tempo 5).

As linhas de costa naturais são afetadas por um clima de ondas que se aproximam de diferentes ângulos ao longo do tempo e, eventualmente, as condições de contorno poderiam influenciar a região. Comportamentos mais complicados, como a resposta a ângulos de aproximação de ondas variáveis no tempo podem ser mais facilmente estudados usando um modelo numérico (ASHTON; MURRAY, 2006b).

Na literatura, uma série de trabalhos faz uso da modelagem numérica para explicar a influência das forçantes sobre os bancos, seja através de modelos numéricos lineares, como Ribas, Falqués e Montoto (2003) ou modelos não-lineares (CABALLERIA et al., 2002, GARNIER et al., 2006, GARNIER et al., 2012). Garnier et al. (2006) destaca que apesar da estabilidade linear ser capaz de sugerir, qualquer informação sobre a amplitude final dos bancos requer análise não linear.

Figura 14 - Evolução temporal da linha de costa afetada por ondas de alto ângulo



Legenda: Protuberância da linha costeira afetada por ondas que se aproximam de um alto ângulo constante. À medida que o ângulo da linha de costa no flanco de montante aumenta, o seu ângulo relativo se aproxima, mas não pode exceder o ângulo que maximiza o  $Q_s$  ( $43^\circ$ ), eventualmente levando à migração do ponto de inflexão. O estabelecimento de um ponto de fluxo zero ao longo do flanco de *jusante* resulta na extensão do banco e no estabelecimento de uma zona de sombra.

Fonte: modificado de ASHTON; MURRAY, 2006b pela autora, 2020.

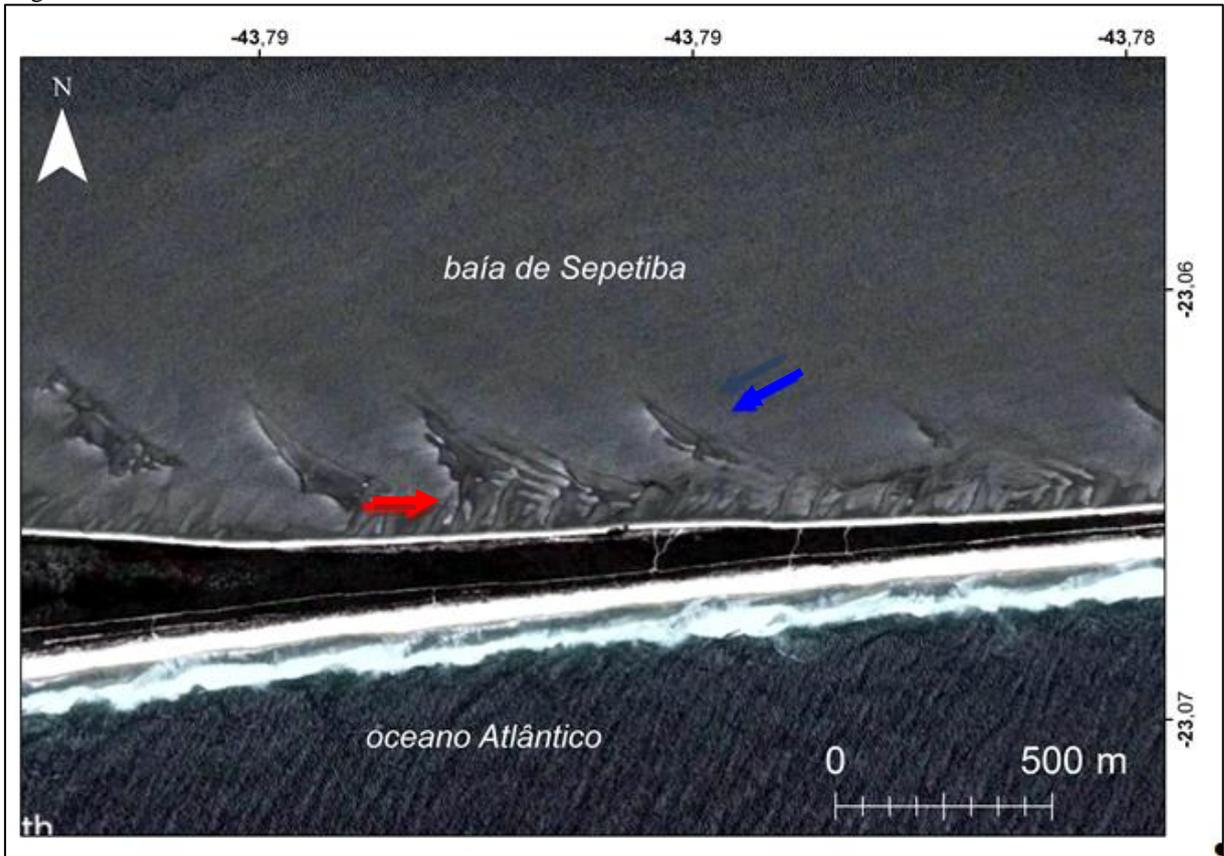
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos foram realizadas as seguintes etapas de trabalho: 1) compilação e análise de um conjunto de imagens de satélite da região; 2) Coleta de sedimentos superficiais nas cristas e cavas dos bancos, e posterior tratamento das amostras em laboratório; 3) Campanha oceanográfica para medições correntométricas e coleta de amostras de água ao longo de dois ciclos completos de maré; 4) Processamento dos dados oceanográficos e filtragem das amostras de água, e 5) Cálculo das velocidades críticas de cisalhamento associadas às condições hidrodinâmicas encontradas.

### 4.1 Análise de imagens de satélite

A análise preliminar das imagens de satélite permitiu a identificação de dois grupos principais de bancos transversais na região, um com orientação NE-SO e outro com orientação NO-SE (Figura 15). Como suas escalas espaciais são distintas, foram utilizados diferentes satélites (*World View 02*, *World View 03*, *GeoEye 01* e *Sentinel 2A/B*) para a obtenção das imagens, satisfazendo a resolução necessária para cada grupo.

Figura 15 - Bancos transversais encontrados na área de estudo



Legenda: A seta em vermelho indica os bancos de orientação NE-SO e a seta em azul os bancos de orientação NO-SE. Imagem do dia 31 de agosto de 2012.

Fonte: GOOGLE EARTH, DIGITAL GLOBE, 2020.

#### 4.1.1 Bancos de orientação NE-SO

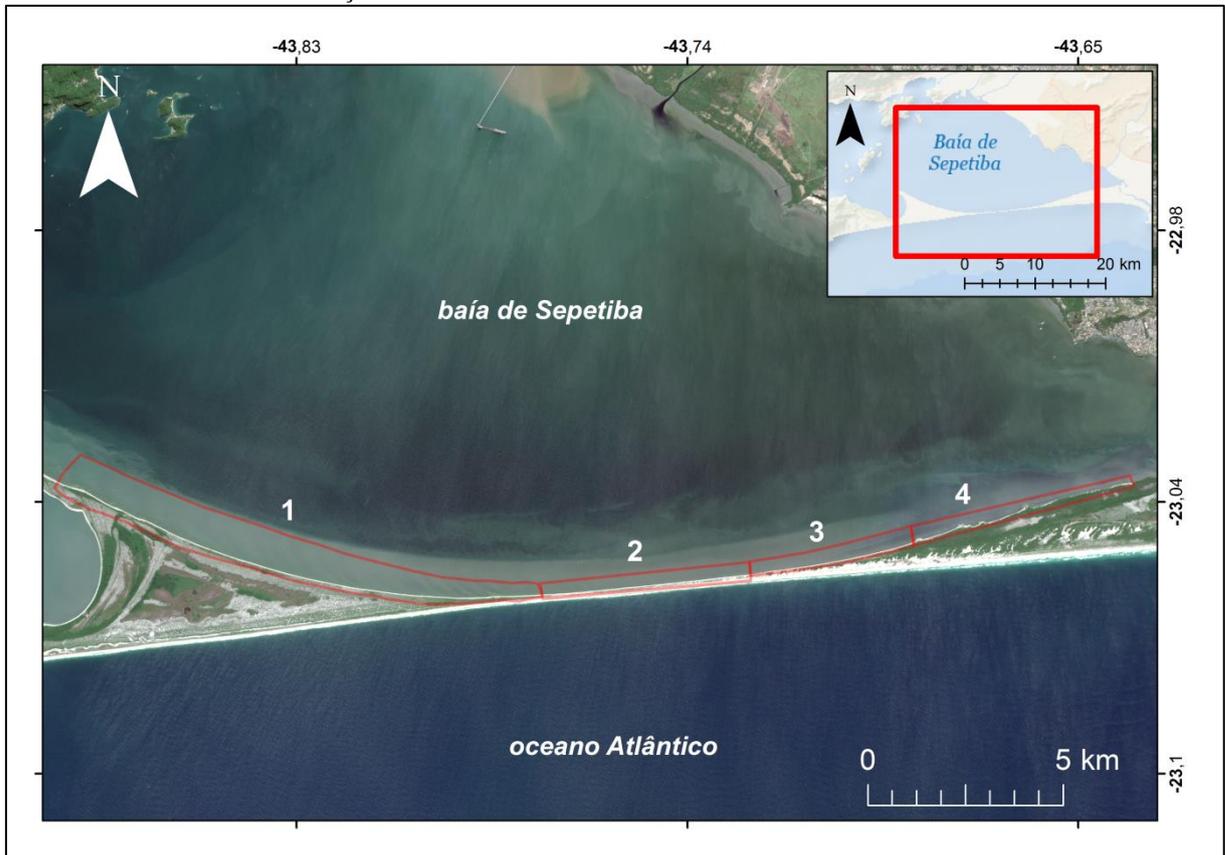
Para análise dos bancos de orientação NE-SO foram utilizadas as imagens do programa *Google Earth Pro*, todas fornecidas pela empresa *DigitalGlobe*. O banco de dados do *Google Earth Pro* é formado por uma mescla de imagens provenientes de sensores de diversas resoluções. No presente estudo foram utilizadas composições coloridas (cor verdadeira – sensor multiespectral) fusionadas com a banda pancromática com resolução entre 0,3 e 0,5 metros.

As imagens foram obtidas a partir da ferramenta “Imagens Históricas” do programa, no período compreendido entre 2012 e 2017. Os anos anteriores e posteriores ao intervalo supracitado não estão incluídos no presente estudo, pois a periodicidade das imagens disponíveis e adequadas a este estudo não possibilitou uma análise temporal consistente.

De acordo com a variação da orientação da linha de costa os bancos de orientação NE-SO apresentam-se com diferentes características, tais como: comprimento de onda ( $\lambda$ ),

densidade (número de bancos/km) e distância transversal à linha de costa ( $\Delta x$ ). Com isso, a região costeira foi dividida em quatro setores diferentes, nomeados 1, 2, 3 e 4 (Figura 16).

Figura 16 - Setores delimitados de acordo com a orientação da linha de costa e as características dos bancos transversais de direção NE-SO

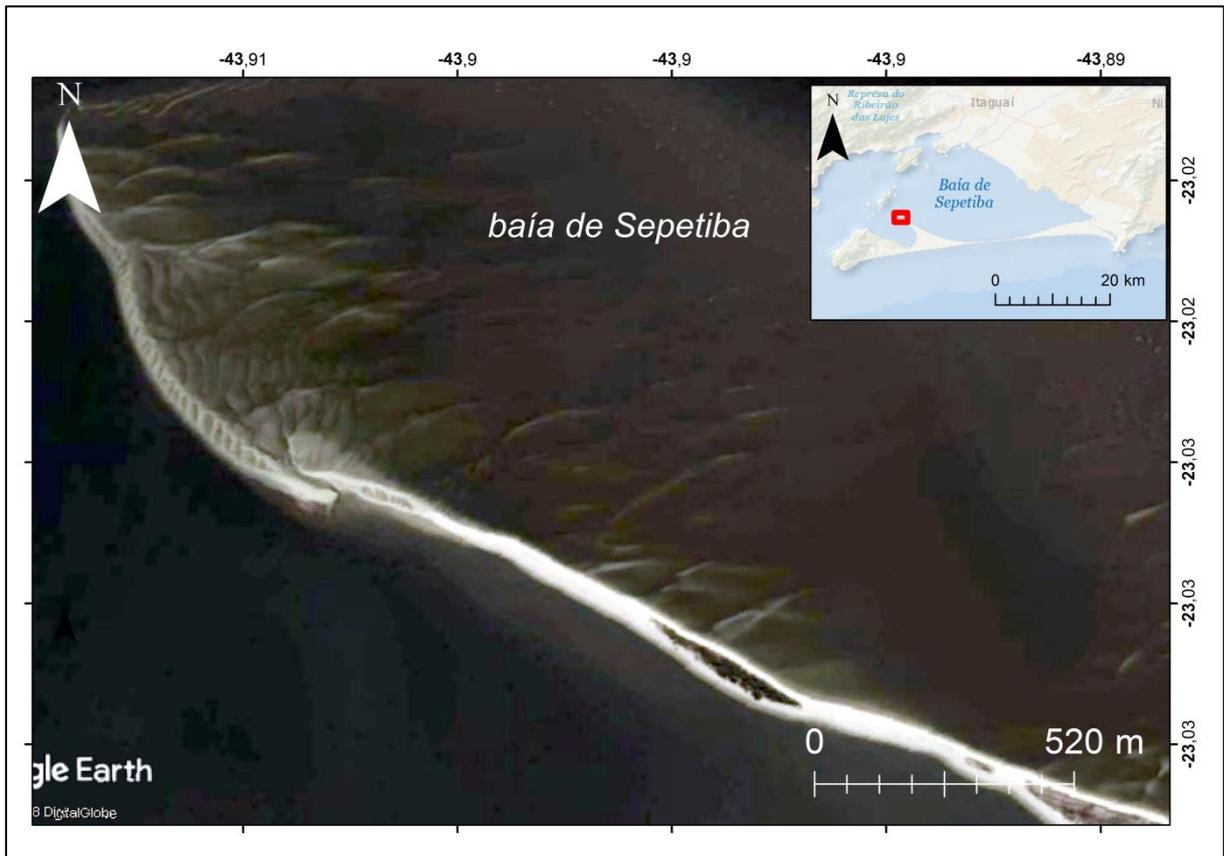


Legenda: Imagem do satélite Sentinel 2 de 24 de abril de 2016.

Fonte: EARTH EXPLORER, 2020.

Os setores foram delimitados com a criação de arquivos vetoriais (kml) no programa *Google Earth Pro* que depois foram carregados em uma interface GIS e convertidos em arquivos vetoriais. Vale ressaltar que a margem interna da região da Ponta da Pombeba, localizada na porção oeste da restinga (Figura 1), não foi analisada no presente estudo. Nesta região é possível observar o reflexo de uma intensa dinâmica que resulta em constantes variações na costa, refletindo-se no variado conjunto de formas de fundo ali presente. Na Figura 17, é possível observar a Ponta da Pombeba com uma ruptura; em algumas imagens também é possível observar a costa ora parcialmente submersa, ora emersa.

Figura 17 - Margem interna da extremidade distal da Ponta da Pombeba, restinga da Marambaia, não incluída neste estudo



Legenda: Imagem do dia 17 de abril de 2015.

Fonte: GOOGLE EARTH, MAXAR TECHNOLOGIES, 2020.

Após a delimitação dos setores, foi realizado um levantamento da disponibilidade das imagens e a visibilidade dos bancos nas mesmas. Foram elaboradas tabelas em que constam o ano, mês, dia e a classificação de cada imagem obtida no *Google Earth Pro*. As imagens foram classificadas em: “IMAGEM OK”, quando foi possível observar e realizar medições nos bancos, “MARÉ ALTA”, quando o nível da maré não permitiu a visualização dos bancos, e nos meses sem imagens disponíveis foi utilizada a classificação “SEM IMAGEM”. As tabelas de classificação elaboradas encontram-se no Apêndice A.

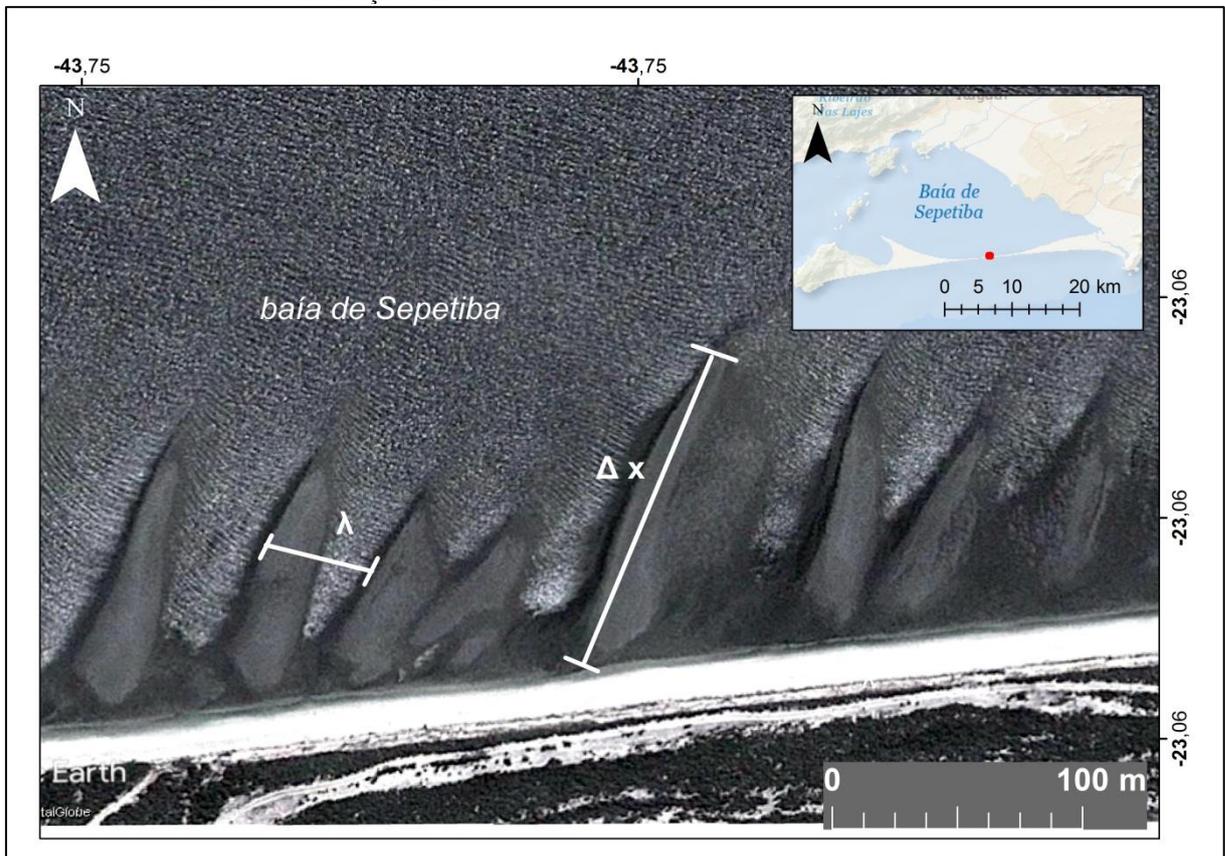
As imagens de satélite onde os bancos puderam ser observados foram georreferenciadas na projeção Universal Transverse Mercator (UTM) e Datum World Geodetic System (WGS) 84, com erro médio de 0,03 metros. O georreferenciamento foi realizado a partir de quatro pontos de controle, que foram posicionados em diferentes pontos das imagens, de acordo com feições marcantes na restinga.

Para validar o processo, após o georreferenciamento dos quatro setores (1, 2, 3 e 4), cada imagem foi comparada ao arquivo vetorial de limite de municípios do Instituto Estadual do

Ambiente (<http://www.inea.rj.gov.br/>), de forma que o posicionamento da linha de costa pudesse ser validado.

A partir daí foram determinados os parâmetros estatísticos dos bancos transversais: número de bancos, densidade (número de bancos/km), distância transversal em relação à costa ( $\Delta x$ ), comprimento de onda ( $\lambda$ ) e seu respectivo desvio padrão e, sempre que possível, a taxa de migração (Figura 18). Vale ressaltar que os valores encontrados para  $\Delta x$  são dependentes do nível do mar no momento da aquisição da imagem, não sendo necessariamente o limite final dos bancos.

Figura 18 – Convenção adotada para a determinação da distância transversal à costa e do comprimento de onda dos bancos de orientação NE-SO



Legenda:  $\lambda$  representa o comprimento de onda (distância entre duas cristas sucessivas) e  $\Delta x$  a distância transversal à costa. Imagem do dia 31 de agosto de 2012.

Fonte: GOOGL EARTH, DIGITAL GLOBE, 2020.

#### 4.1.2 Bancos de orientação NO-SE

Para análise dos bancos de orientação NO-SE foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2A e 2B adquiridas pelo sensor *Multi Spectral Instrument* (MSI). Estes produtos foram obtidos gratuitamente pelo endereço eletrônico <https://scihub.copernicus.eu/> e pela plataforma *Earth Explorer*. Os dados possuem nível 1C de processamento, que conta com a imagem geometricamente corrigida (ortorretificada) e valores de reflectância no topo da atmosfera (TOA).

O *Multi Spectral Instrument* (MSI) a bordo do satélite Sentinel é composto de 13 bandas espectrais (Tabela 6). No presente estudo foi utilizada a composição cor verdadeira com a combinação das bandas vermelha, azul e verde (RGB- *red*, *green* e *blue*) 04/03/02, com resolução espacial de 10 metros.

Tabela 6 - Combinação de bandas e resolução do *Multi Spectral Instrument* (MSI)

Resolução	Banda	Nome da Banda	Comprimento de Onda Central (nanômetro)	Combinação de bandas
10 m	B02	Azul	490	Cor verdadeira
	B03	Verde	560	<b>RGB 04/03/02</b>
	B04	Vermelho	665	Falsa Cor 1 e 2
	B08	Infravermelho Próximo	842	RGB 08/04/03 e 04/08/03
20 m	B05	Vermelho <i>edge</i> 1	705	SWIR 1
	B06	Vermelho <i>edge</i> 2	740	RGB 12/11/8A
	B07	Vermelho <i>edge</i> 3	783	
	B08A	Vermelho <i>edge</i> 4	865	
	B11	SWIR 1	1610	
	B12	SWIR 2	2190	
60 m	B01	Aerossol	443	-
	B09	Water vapor	940	
	B10	Cirrus	1375	

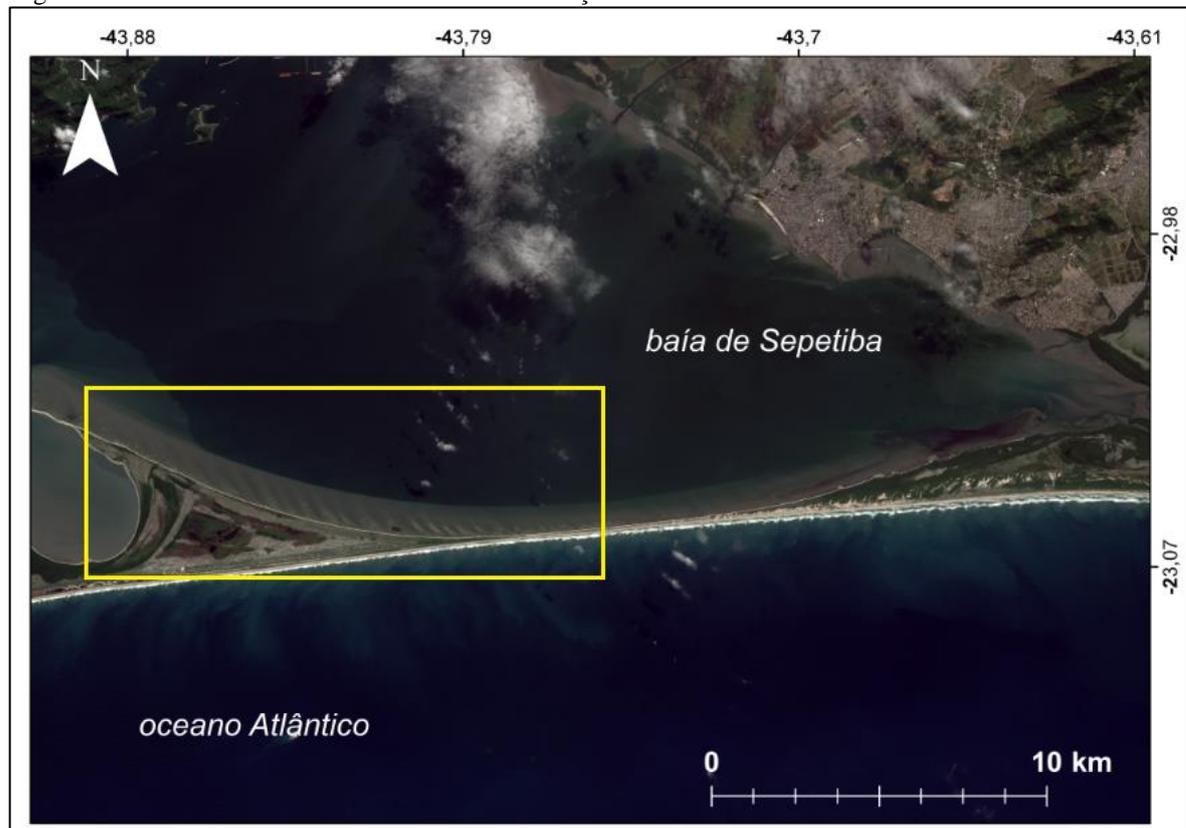
Legenda: Destaque em vermelho para a combinação de bandas utilizadas no presente estudo. RGB: *red*, *green* e *blue*.

Fonte: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/naming-convention>.

Tendo em vista a data do lançamento do satélite Sentinel-2 (23 de junho de 2015), e reconhecendo que o registro de imagens não cobre todo o ano de 2015, para o presente estudo foi analisada a série de imagens disponíveis entre os anos de 2016 e 2018. Vale ressaltar que, neste caso, são informadas a data e horário da aquisição das imagens pelo satélite, permitindo assim, a definição das condições de maré no momento do registro.

Os bancos de orientação NO-SE, tendem a se concentrar na porção oeste da restinga (Figura 19), no setor 1, por uma extensão de 6 a 9 km. Desta forma, a setorização (1, 2, 3 e 4) não foi utilizada para sua análise.

Figura 19 - Área de ocorrência dos bancos de orientação NO-SE



Legenda: Destaque em amarelo para o setor onde se concentram os bancos de orientação NO-SE. Imagem do satélite Sentinel-2A, resolução 10 metros. Imagem do dia 13 de julho de 2018.

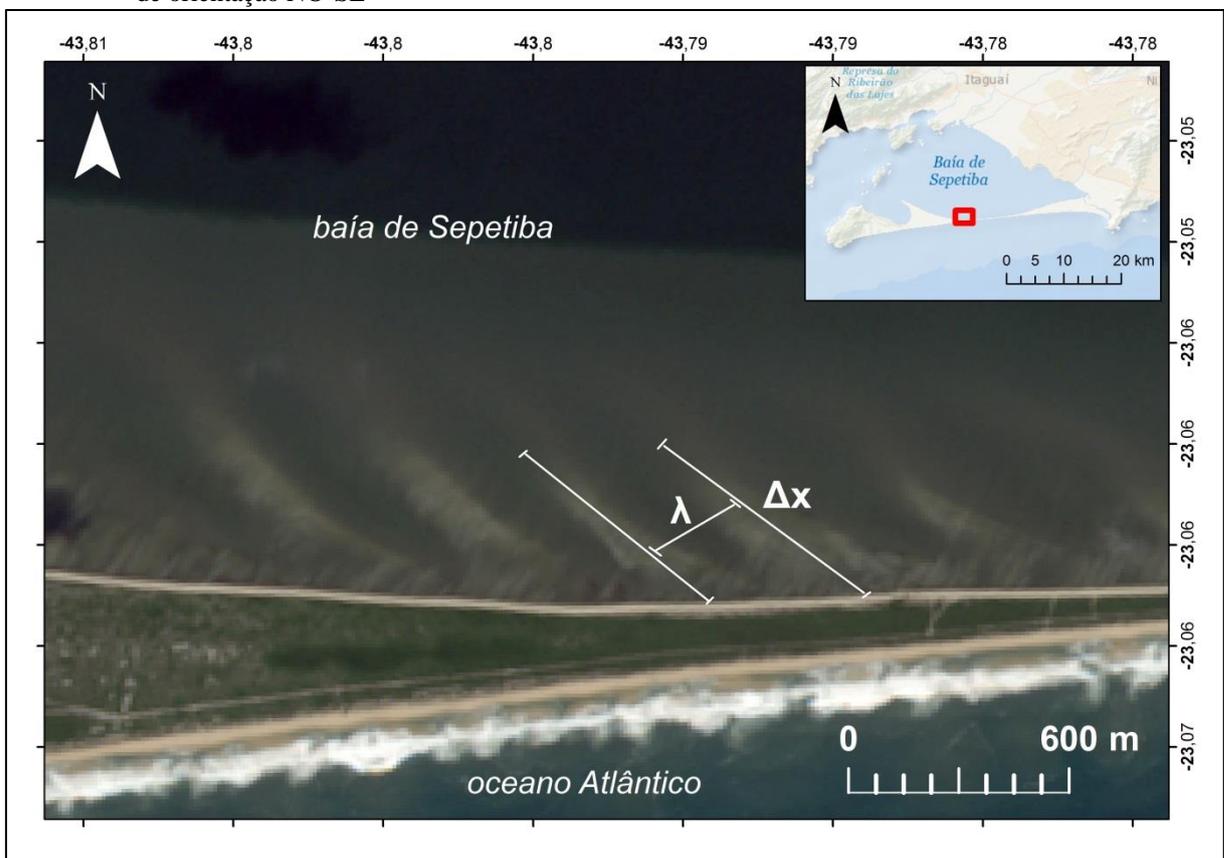
Fonte: EARTH EXPLORER, 2020.

As imagens foram classificadas em “IMAGEM OK”, “MARÉ ALTA”, e “NUVENS” e, para os meses em que não havia imagens disponíveis, “SEM IMAGEM” (APÊNDICE B). Como estas imagens de satélite já se encontravam georreferenciadas, sempre que possível foram criados arquivos vetoriais com o traçado das cristas dos bancos. A partir daí, foram determinados os parâmetros estatísticos dos bancos de orientação NO-SE (número de bancos,

densidade [número de bancos/km], distância transversal costa [ $\Delta x$ ], comprimento de onda médio [ $\lambda$ ] e seu respectivo desvio padrão e, sempre que possível, taxa de migração) (Figura 20).

Além disso, de acordo com a tábua de maré obtida no site da Marinha do Brasil (estação maregráfica Porto de Itaguaí - <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-dados-de-mare-kmz/kmz-maregrafica>) e a data e horário da aquisição das imagens disponibilizadas pela plataforma *Earth Explorer*, foram elaboradas tabelas em que constam a condição de maré nos períodos das aquisições (APÊNDICE C – Tabelas 26, 27 e 28).

Figura 20 – Convenção adotada para determinação da distância transversal à costa e do comprimento dos bancos de orientação NO-SE



Legenda:  $\lambda$  representa o comprimento de onda (distância entre duas cristas consecutivas) e  $\Delta x$  a distância transversal à costa. Imagem do satélite Sentinel 2 de 13 de julho de 2018.

Fonte: EARTH EXPLORER, 2020.

#### 4.1.3 Determinação das taxas de migração

Dois métodos foram utilizados para determinação da taxa de migração dos bancos de orientação NE-SO, ambos tendo como base as imagens compiladas. No primeiro método

(“*Método 1*”) a taxa de migração dos bancos foi determinada a partir da sobreposição de arquivos vetoriais contendo o traçado da crista dos bancos, definidos a partir das imagens georreferenciadas (Figura 21).

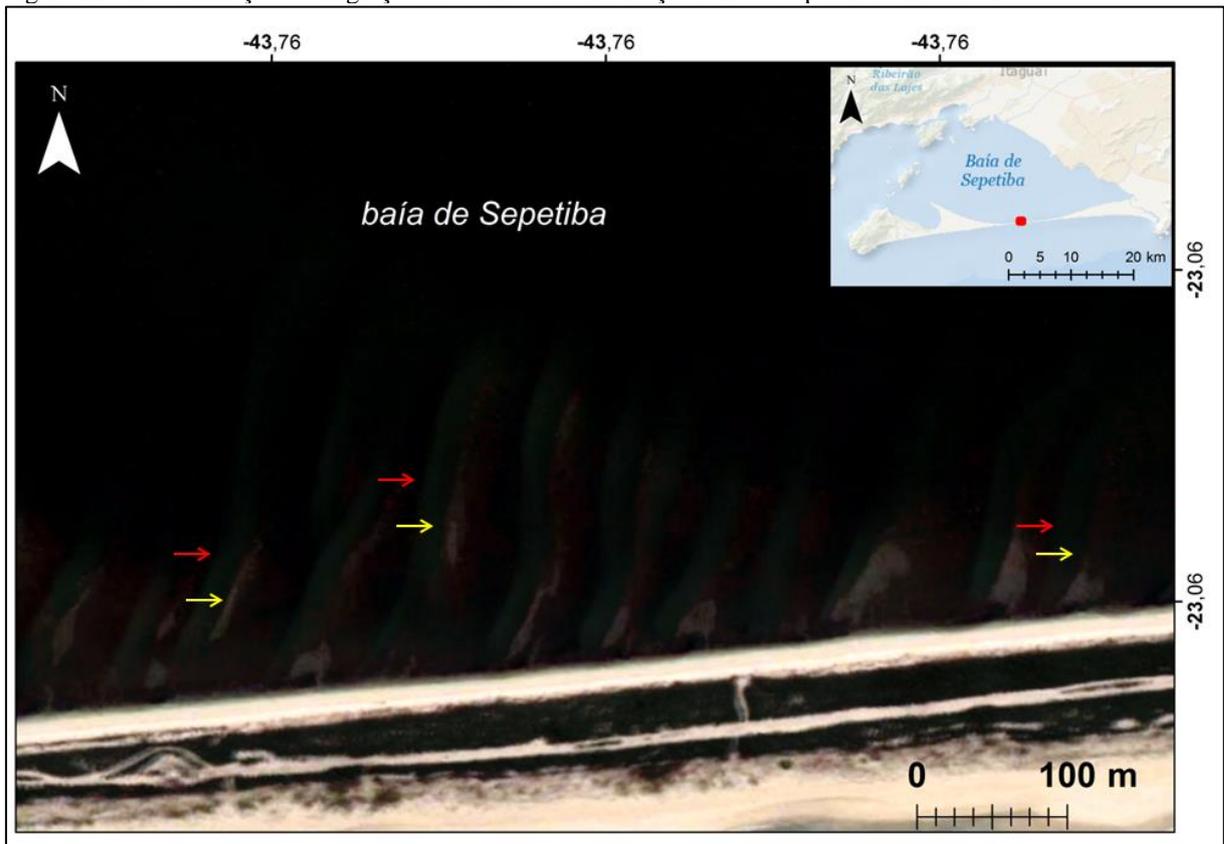
Figura 21 - Determinação da migração dos bancos de orientação NE-SO a partir do método 1



Legenda: Bancos NE-SO localizados no setor 1. Imagem do dia 29 de julho de 2015.  
Fonte: GOOGLE EARTH, DIGITAL GLOBE, 2020.

No segundo método (“*Método 2*”), imagens consecutivas foram sobrepostas e submetidas à variação de contraste e transparência, permitindo a comparação entre ambas (Figura 22). Os valores de contraste e transparência utilizados variaram de acordo com a tonalidade (cor e brilho) de cada imagem. Vale ressaltar que devido os diferentes níveis de correções nas imagens analisadas, apenas o método 1 foi aplicado para a determinação das taxas de migração dos bancos de orientação NO-SE, pois a tonalidade (cor e brilho) das imagens não permitiu uma visualização consistente quando as mesmas foram sobrepostas. No caso das imagens utilizadas para acompanhamentos dos bancos NE-SO, ambos os métodos foram aplicados.

Figura 22 - Determinação da migração dos bancos de orientação NE-SO a partir do método 2



Legenda: Imagem do dia 22 de abril de 2016 (contraste +14% e transparência +65%) sobreposta à imagem do dia 29 de julho de 2015 (contraste 38%). As setas amarelas indicam à posição dos bancos em 29 de julho de 2015 e as setas em vermelho a posição dos bancos em 22 de abril de 2016. Bancos localizados no setor 2.

Fonte: GOOGLE EARTH, DIGITAL GLOBE, 2020.

## 4.2 Coleta e tratamento dos dados sedimentológicos

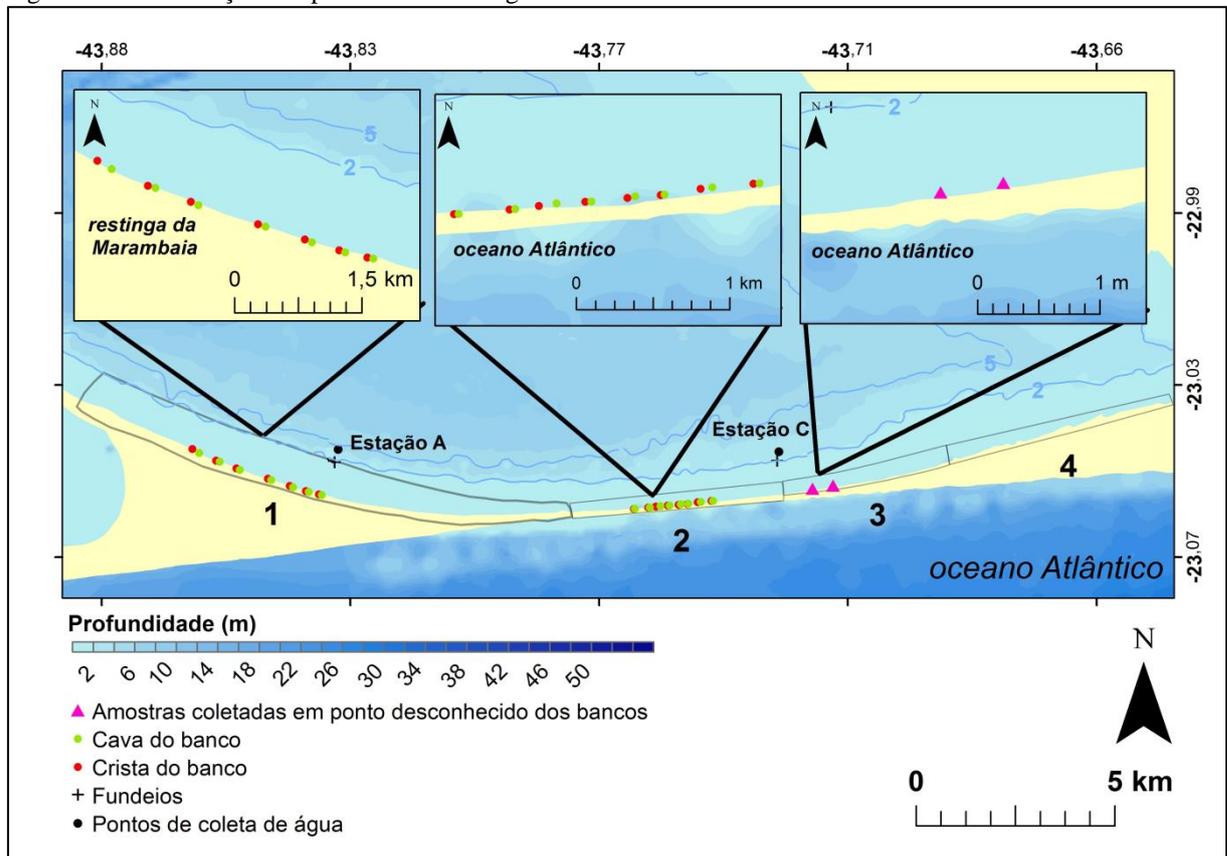
Nesta seção será descrita a metodologia adotada na campanha amostral para coleta de sedimentos, e sua posterior análise em laboratório.

### 4.2.1 Campanha amostral para coleta de sedimentos

A campanha amostral ocorreu nos dias 11 e 12 de dezembro de 2018 em condições de maré de sizígia. No dia 11 foram coletadas 30 amostras, com nível de maré entre 0,4 e 0,6 m, sendo 14 delas coletadas no setor 1, e 16 no setor 2. No dia 12 foram coletadas 2 amostras no

setor 3, com nível de maré entre 0,6 e 0,8 m. Do total, 30 amostras foram coletadas nas cristas e nas cavas dos bancos transversais de orientação NE-SO (Figura 23).

Figura 23 - Localização dos pontos de amostragem



Legenda: Os números 1,2,3 e 4 indicam os setores delimitados no presente estudo. Batimetria interpolada a partir dos pontos das folhas de bordo, compiladas pelo grupo de pesquisa Geomargem.

Fonte: A autora, 2020.

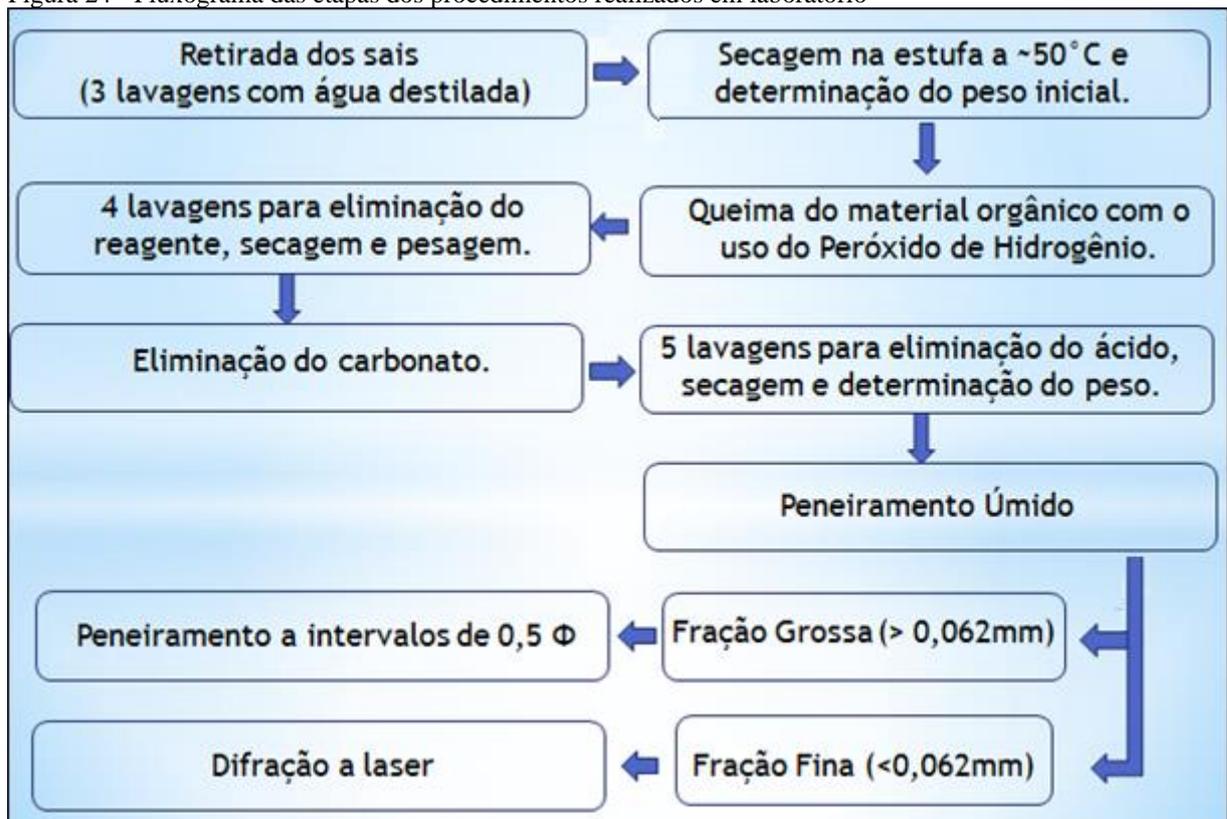
Em cada ponto coletou-se cerca de 400 gramas de sedimento com a utilização de uma pá. Para localização dos pontos e navegação foram utilizados os GPSs Garmin® Rino 610 e Garmim Etrex® 20. No entanto, devido à altura da maré, além dos riscos locais causados pela presença de raias, no setor 3 não foi possível distinguir os pontos de crista e cava dos bancos, sendo coletadas apenas duas amostras (Figura 23). Além disso, o setor 4 e os bancos de orientação NO-SE não puderam ser amostrados.

No setor 1, 7 bancos transversais foram amostrados (14 amostras no total) ao longo de aproximadamente 3,3 km. Neste setor, a amostragem aconteceu a cada quatro bancos. Já no setor 2, 8 bancos transversais foram amostrados (16 amostras no total) ao longo de aproximadamente 1,8 km, e a amostragem aconteceu a cada três bancos (Figura 23).

#### 4.2.2 Pré tratamento e determinação da distribuição granulométrica

As amostras foram analisadas no Laboratório de Oceanografia Geológica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Inicialmente, todas as 32 amostras foram processadas segundo as técnicas clássicas de análise de sedimentos (KRUMBEIN; PETTIJOHN, 1938), onde foram eliminados os sais solúveis, a matéria orgânica ( $H_2O_2$  a 10%) e os carbonatos (HCl a 30%) (Figura 24). Doze amostras foram submetidas ao peneiramento úmido para a separação das areias e lamas (este procedimento não foi adotado para amostras contendo apenas partículas de tamanho maior que 0,062 mm). Por fim, o peneiramento a seco foi realizado a intervalos de  $0,5 \phi$  para a fração arenosa e, quando presente, a análise por difração a laser para a fração fina.

Figura 24 - Fluxograma das etapas dos procedimentos realizados em laboratório



Fonte: A autora, 2020.

Os resultados das análises das amostras através dos três métodos (peneiramento úmido, peneiramento seco e difração a laser) foram reunidos e normalizados a 100%. Este procedimento foi realizado apenas para amostras com mais de 1% de partículas finas (<0,062mm).

#### 4.2.3 Pós processamento

Os dados foram processados no programa *Gradistat* versão 8.0 (BLOTT; PYE, 2001). A porcentagem de sedimentos presentes em um número de frações de tamanho, que pode ser o peso retido em peneiras ou a porcentagem de sedimento detectado em classes de tamanho derivados de um equipamento de difração a laser, foi utilizada como dado de entrada, que foram mantidos em unidades phi para facilitar a leitura dos resultados. A relação entre as unidades phi e mm é expressa na Equação 1.

$$\Phi = -\log_2 d \quad (1)$$

onde,

$\Phi$  é o tamanho em unidades phi e  $d$  é diâmetro do grão em milímetros.

No presente estudo, a média gráfica ( $Mz$  ou  $\mu$ ) foi calculada segundo Folk e Ward (1957) de acordo com a formulação abaixo:

$$Mz = \frac{(\Phi_{50} + \Phi_{84} + \Phi_{16})}{3} \quad (2)$$

onde,

$\Phi_N$  é o valor do diâmetro do grão em  $N\%$  na frequência acumulada.

Desta forma, a distribuição do tamanho médio dos grãos foi classificada de acordo com Udden-Wentworth (1922; Tabela 7):

Tabela 7 - Classificação dos tamanhos de partículas sedimentares

<b>Classificação</b>	<b>Tamanho em mm</b>	<b>Tamanho em phi</b>
Grânulo	>2	>-1
Areia muito grossa	2 a 1	-1 a 0
Areia grossa	1 a 0,5	0 a 1
Areia média	0,5 a 0,25	1 a 2
Areia fina	0,25 a 0,125	2 a 3
Areia muito fina	0,125 a 0,0625	3 a 4
Silte grosso	0,0625 a 0,0312	4 a 5
Silte médio	0,0312 a 0,0156	5 a 6
Silte fino	0,0156 a 0,0078	6 a 7
Silte muito fino	0,0078 a 0,0039	7 a 8
Argila	0,0039 a 0,00098	8 a 10

Fonte: modificado de LINDHOLM, 1987.

O desvio padrão ( $\sigma$ ) representa o quanto os valores variam em torno da média. No presente estudo, ele foi calculado segundo a Equação 3, proposta por Folk e Ward (1957). Sua classificação foi feita segundo a Tabela 8.

$$\sigma = \frac{(\Phi_{84} - \Phi_{16})}{4} + \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{6,6} \quad (3)$$

Tabela 8 - Classificação do grau de seleção das partículas sedimentares

Desvio Padrão ( $\phi$ )	Classificação
<0,35	Muito bem selecionada
0,35 – 0,50	Bem selecionada
0,50 – 0,71	Moderadamente bem selecionada
0,71 – 1,00	Moderadamente selecionada
1,00 – 2,00	Mal selecionada
2,00 – 4,00	Muito mal selecionada
>4,00	Extremamente mal selecionada

Fonte: GRADISTAT (BLOTT; PYE, 2001).

A assimetria gráfica ( $Sk$ ) representa o grau de desvio do pico da curva de distribuição de classes, ou seja, reflete a existência de um “excesso” de sedimentos mais finos ou mais grossos em relação ao tamanho médio da amostra. No presente estudo, ela foi calculada segundo a Equação 4, proposta por Folk e Ward (1957). Sua classificação é expressa na Tabela 9:

$$Sk = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} + (2\Phi_{50})}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - (2\Phi_{50})}{2(\Phi_{95} - \Phi_{16})} \quad (4)$$

Tabela 9 - Classificação da assimetria das partículas sedimentares

Coefficiente de assimetria	Classificação
1,0 a 0,3	Muito positiva
0,3 a 0,1	Positiva
0,1 a -0,1	Quase simétrica
-0,1 a -0,3	Negativa
-0,3 a -1,0	Muito negativa

Fonte: GRADISTAT (BLOTT; PYE, 2001).

A curtose representa o grau de achatamento da curva de distribuição de classes. De acordo com Folk e Ward (1957) é obtida pela Equação 5. Sua classificação é expressa na Tabela 10.

$$K = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (5)$$

Tabela 10 - Classificação da curtose das partículas sedimentares

Curtose	Classificação
< 0,67	Muito platicúrtica
0,67 – 0,90	Platicúrtica
0,90 – 1,11	Mesocúrtica
1,11 – 1,50	Leptocúrtica
1,50 – 3	Muito leptocúrtica
>3	Extremamente leptocúrtica

Fonte: GRADISTAT (BLOTT; PYE, 2001).

### 4.3 Coleta e tratamento dos dados hidrográficos e correntométricos.

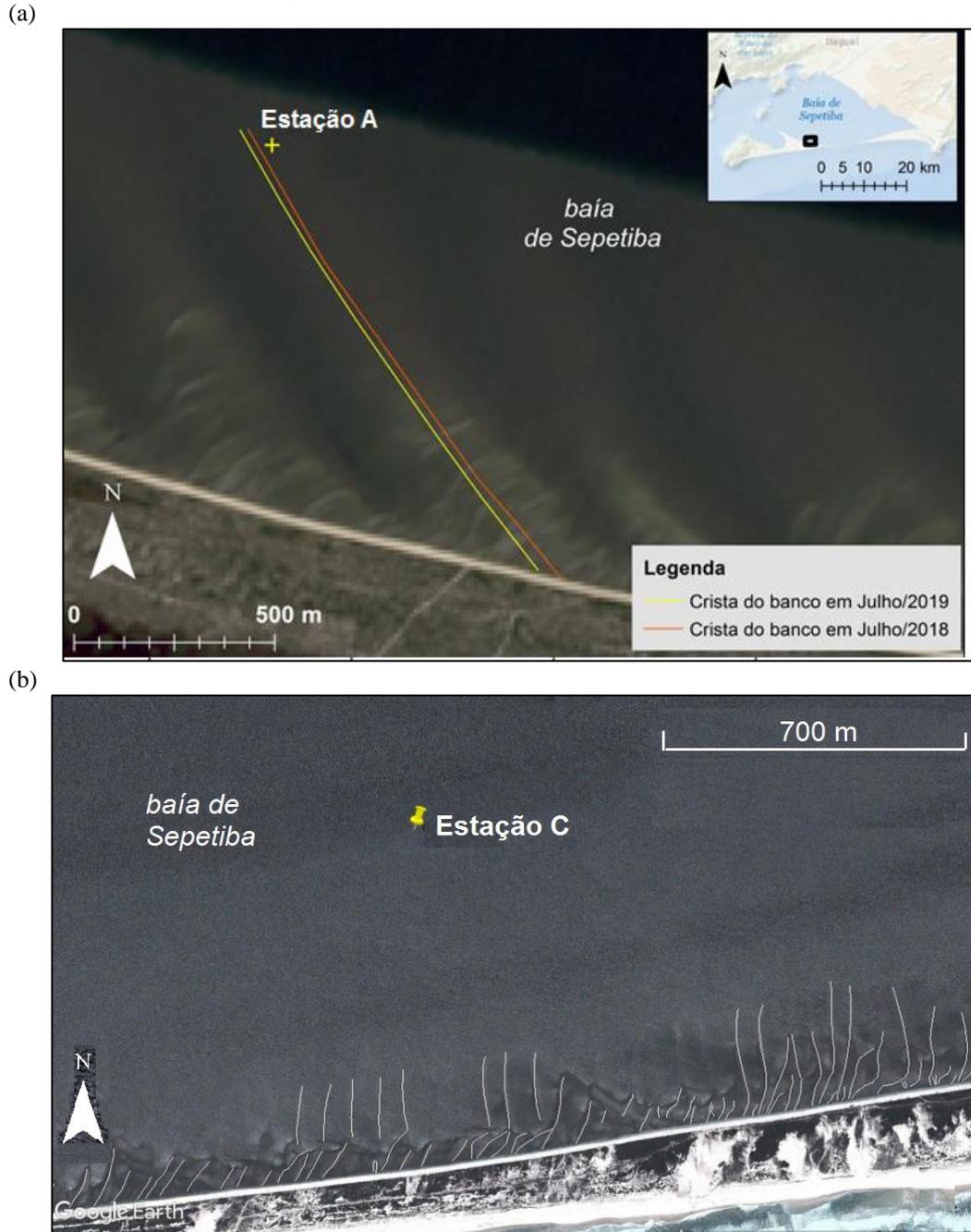
Nesta seção serão descritos os procedimentos de aquisição e processamento de dados hidrográficos (temperatura, condutividade e pressão) e correntométricos (velocidade e direção das correntes) obtidos durante fundeios simultâneos.

#### 4.3.1 Trabalho de campo

Durante o período de 24 a 25 de julho de 2019 foram realizados 2 fundeios simultâneos de 25 horas na baía de Sepetiba (Figura 23), sob condições de maré de quadratura, totalizando dois ciclos completos de maré. Os pontos de realização dos fundeios foram definidos previamente em gabinete com base nas imagens de satélite e na localização dos fundeios realizados por Carvalho (2014) na mesma região (Figura 8). Com base nas taxas de migração obtidas na primeira etapa do presente estudo, e supondo a posição dos bancos com o decorrer do tempo, pode-se considerar que a Estação A foi posicionada na direção da cava do banco transversal de orientação NO-SE (Figura 25a), e a Estação C foi posicionada entre o setor 2 e 3, a aproximadamente 800 metros de distância da costa. (Figura 25b).

As medições nos fundeios foram realizadas utilizando perfiladores acústicos de correntes. O perfilador acústico de corrente por efeito Doppler (Aquadopp *Profiler*) mede correntes e ondas na coluna d'água utilizando tecnologia de *Doppler* acústico. É projetado para uma larga gama de aplicações e pode ser instalado no fundo em uma estrutura fixa ou acoplado a estruturas móveis (Figura 26) (NORTEK, 2010).

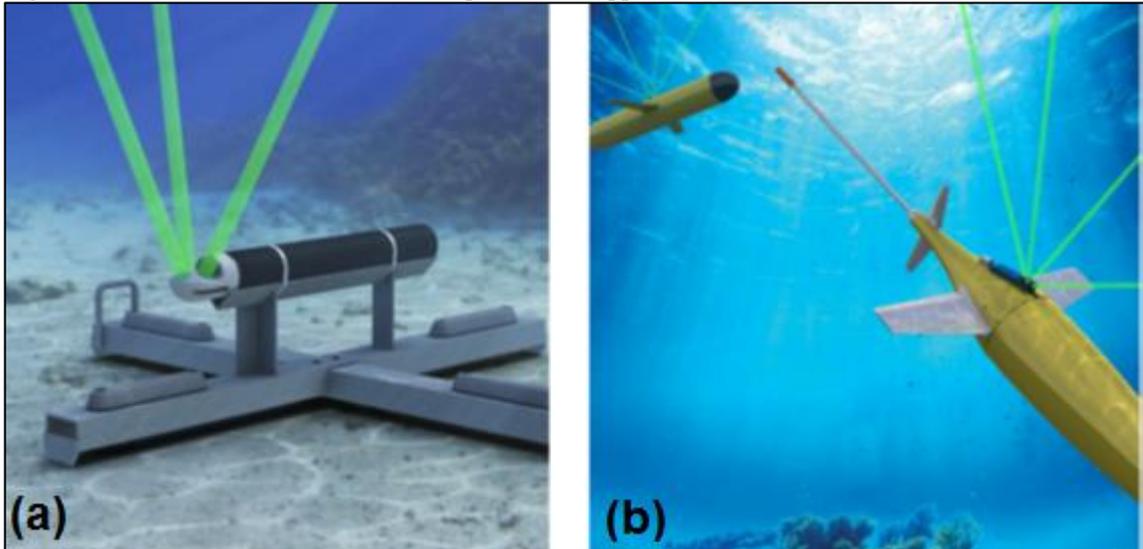
Figura 25 - Localização dos pontos de fundeio



Legenda: (a) Estação A, localizada na direção da cava do banco de orientação NO-SE. Imagem do satélite Sentinel obtida em condições de maré baixa de sizígia no dia 28 de julho de 2018; (b) Estação C, imagem obtida em condições de maré de sizígia. As linhas brancas acentuam as cristas dos bancos na imagem. Imagem do dia 31 de agosto de 2012.

Fonte: (a) EARTH EXPLORER, 2020; (b) GOOGLE EARTH, DIGITAL GLOBE, 2020.

Figura 26 - Perfilador acústico de corrente por efeito Doppler



Legenda: (a) equipamento fundeado, acoplado a uma estrutura fixa. (b) equipamento acoplado a estruturas móveis.

Fonte: NORTEK, 2010.

Os instrumentos acústicos por efeito Doppler transmitem um pequeno pulso de som ("ping") de frequência constante, "ouvem" seu eco e medem a mudança na frequência do eco. A diferença de frequência entre os pulsos transmitidos e recebidos é proporcional à velocidade da água. Com isso, o perfilador deve transmitir pelo menos dois pulsos para obter uma medida da velocidade real. Depois que o segundo pulso é emitido, a diferença de fase entre os sinais de retrospalhamento é calculada para cada célula (NORTEK, 2013). A diferença de fase é uma medida direta da velocidade, expressa como:

$$V = \frac{\Delta\varphi C}{4\pi F_{source}\Delta t} \quad (6)$$

onde,

$V$  = velocidade da corrente;

$\varphi$  = diferença de fase;

$F_{source}$  = frequência transmitida;

$\Delta t$  = diferença de tempo entre dois pulsos consecutivos;

$C$  = velocidade do som na água.

Na Estação A os dados correntométricos foram registrados por um perfilador acústico Aquadopp *High Resolution* 1 MHz (Nortek – AS), utilizado no modo *uplooking shallow water* (Figura 27b). A amostragem começou às 11h20min do dia 24/07/2019 e terminou às 12h26min

do dia 25/07/2019. A primeira célula de medição foi amostrada a partir de 0,71 maf (metros acima do fundo) e se estendeu até aproximadamente 1,16 maf, em 10 células de 5 cm.

Na Estação C os dados correntométricos foram registrados por um perfilador acústico Aquadopp *High Resolution 2 MHz* (Nortek AS), no modo *uplooking shallow water*. A amostragem começou às 10h54min do dia 24/07/2019 e terminou às 11h24min do dia 25/07/2019. A primeira célula de medição foi amostrada a partir de 0,37 maf e se estendeu até aproximadamente 1,12 maf, em 16 células de 5 cm. Além disso, também foi acoplada a estrutura fundeada um CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) *SBE 37 plus* (*Sea-Bird Electronics*) que armazenou a temperatura, condutividade e pressão a intervalos de 5 segundos.

Figura 27 - Campanha de coleta de dados correntométricos e amostras de água



Legenda: (a) Garrafa Van Dorn; (b) Estrutura posicionada na Estação A; (c) Medida da profundidade com o auxílio do ecobatímetro de mão e (d) Amostras de água coletadas e armazenadas em recipientes de 500 mL.

Fonte: A autora, 2020.

No decorrer das 25 horas de fundeio foram coletadas amostras de água para determinação da concentração do material particulado em suspensão (MPS) nas duas estações (Figura 23). Na estação A, a amostragem teve início às 11h26min do dia 24/05/2017 e terminou às 11h22min do dia 25/07/2019. Na estação C a amostragem teve início às 10h47min do dia 24/07/2019 e terminou às 10h50min do dia 25/07/2019. As amostras de 500 mL foram coletadas

de duas em duas horas, próximo ao fundo e na superfície da coluna d'água, com garrafa do tipo *Van Dorn* (Figura 27a), totalizando 26 amostras para cada ponto de amostragem.

#### 4.3.2 Processamento dos dados

Os dados armazenados pelos perfiladores acústicos foram inicialmente processados com *software* fornecido pelo fabricante, sendo convertidos do formato binário em unidades científicas. Em seguida, os resultados foram processados e analisados no *software* Matlab (*MathWorks*®).

Uma análise inicial permitiu a definição dos limites de medição a serem considerados e a eliminação de dados espúrios. Os dados de direção das correntes foram corrigidos quanto à declinação magnética local (22°W). Os dados de condutividade obtidos pelo CTD foram convertidos em salinidade através das rotinas do pacote “*seawater*” desenvolvido pela “*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation – CSIRO*”<sup>4</sup>.

##### 4.3.2.1 Cálculo das concentrações de sedimentos em suspensão através da Amplitude do sinal Acústico

Os dados de amplitude do sinal acústico obtidos pelo equipamento devem ser submetidos a correções devido a perdas causadas pelo espalhamento, absorção do som na água do mar e atenuação causada pelas partículas sedimentares (WALL; ELIZABETH; SIMON, 2005).

A primeira etapa para a correção, compreende a conversão dos dados armazenados em contagens (*counts*) para unidades dB (de acordo com a especificação do fabricante: 1 *count* = 0,425 dB) (LOHRMANN, 2001).

A Equação 7 demonstra a formulação para o cálculo da perda de energia acústica devido à propagação do feixe acústico:

$$BS = 20 \times \log_{10}(R \times \psi) \quad (7)$$

onde,

R é a inclinação do transdutor em relação às partículas segundo Deines (1999):

$$R = \left( \left[ \frac{B + \frac{L+D}{2} + ((N-1) \times D + \frac{D}{4})}{\cos \phi} \right] \left[ \frac{c1}{c2} \right] \right) \quad (8)$$

onde,

B= *blanking distance*;

L=comprimento do pulso;

D=tamanho da célula;

N=número de células;

Cos  $\phi$  = cosseno do ângulo do transdutor (*beam angle*);

c1 = velocidade média do som;

c2 = velocidade do som utilizada pelo equipamento;

e  $\psi$  é a correção de campo próximo do transdutor (DOWNING, THORNE; VICENT, 1995)

que é responsável pelo espalhamento não esférico de energia acústica, definido como:

$$\psi = \frac{1 + 1,35z + 2,5z^{3,2}}{1,35z + 2,5z^{3,2}} \quad (9)$$

onde,

$$z = \frac{RL}{\pi(a_t)^2} \quad (10)$$

onde,

a = raio do transdutor;

A perda da energia acústica causada pela absorção do som na água do mar é determinada pelo coeficiente de absorção do som, calculado pelo método proposto por Schulkin e Marsh (1962), expresso na Equação 11:

$$\alpha = \left( \frac{SAf_t f^2}{f_t^2 + f^2} + \frac{Gf^2}{f_t} \right) (1 - 6,54 \times 10^{-4} P) \quad (11)$$

onde,

S= salinidade;

$f_t$ = frequência dependente da temperatura (°C);

f = frequência acústica;

G= constante de valor aproximadamente igual a  $3,38 \times 10^{-6}$ ;

P=pressão em atm ou  $kg.cm^{-2}$ ;

A = constante igual a  $2,3 \times 10^{-6}$ .

Por fim, para calcular a amplitude corrigida é necessário fazer a soma da amplitude do eco sem correção (dB), da perda causada pela propagação do feixe acústico (BS) e do coeficiente de absorção do som ( $\alpha$ ). Vale ressaltar que, com base em estudos anteriores realizados na região (CARVALHO, 2014; FONSECA, 2013), a atenuação causada pela presença de material particulado em suspensão na água não foi considerada no presente estudo.

Diversas técnicas para estimar a concentração de sedimentos a partir da conversão do sinal acústico foram propostas na literatura. No presente estudo foi utilizada a formulação proposta por Gartner (2004) (Equação 12).

$$\text{MPS}_{\text{estimado}} = 10^{(M+N*E)} \quad (12)$$

onde,

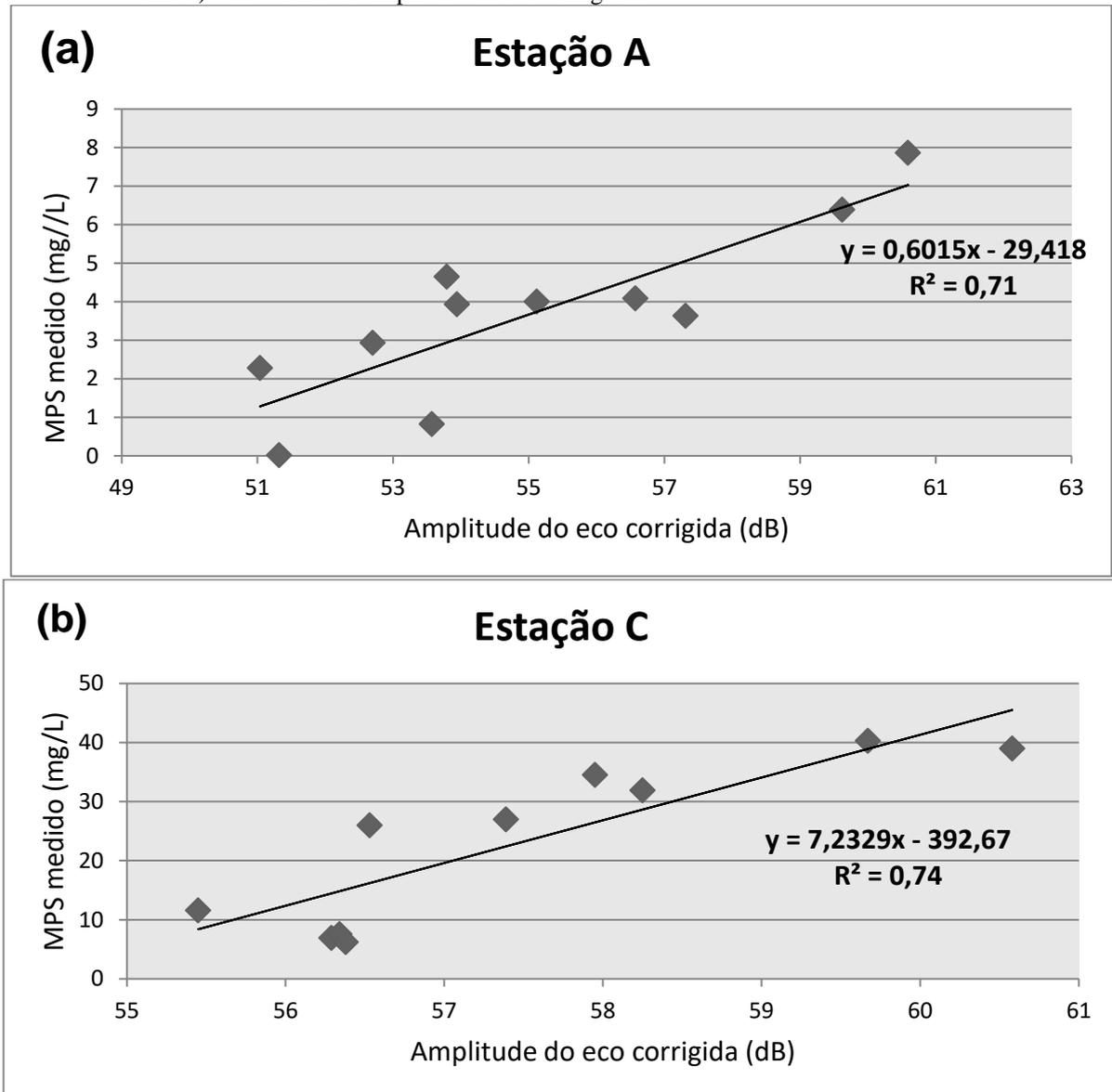
M = Interseção da reta de regressão entre MPS medido e amplitude do eco corrigida com o eixo y.

N = inclinação da reta de regressão entre MPS medido e amplitude do eco corrigida;

E = amplitude do sinal acústico corrigido (dB);

No presente estudo, os parâmetros M e N foram determinados a partir da correlação entre as concentrações de MPS medidas diretamente através da filtração de amostras de água e a amplitude do sinal corrigido (Figuras 28a e 28b). Este método é considerado aceitável desde que as amostras de água sejam coletadas simultaneamente ao armazenamento dos dados pelo instrumento acústico. Desta forma, inicialmente foi realizada a determinação das células amostrais (bins) equivalentes às profundidades de coleta de amostras de água. Em ambas as estações (A e C) foram consideradas a célula mais próxima ao fundo, sendo 71cmaf e 37 cmaf, respectivamente. Amostras que se afastavam da tendência geral observada foram desconsideradas na análise.

Figura 28 - Relação entre as concentrações de MPS obtidas através da filtração de amostras de água (método direto) e os valores de amplitude do eco corrigidos



Legenda: Amplitude do eco corrigida referente ao bin 1, localizado em (a) 71cmf e (b) 37cmf. Os dados de MPS são referentes às amostras de água coletadas próximo ao fundo.

Fonte: A autora, 2020.

#### 4.3.2.2 Amostras de água

As amostras de água foram homogeneizadas e filtradas com a utilização de filtros de acetato de celulose Millipore (poro de  $0,45\mu\text{m}$ ), utilizando-se bomba a vácuo. Antes da filtragem, os filtros foram preparados (levados a peso constante). Os mesmos foram mantidos na estufa a  $50^\circ\text{C}$  por 72 horas, e em seguida colocados no dessecador (com cristais de sílica

para evitar a retenção de umidade) por 2 horas, e pesados em uma balança de precisão (4 casas decimais). Este procedimento foi realizado 3 vezes consecutivas, porém nas duas etapas seguintes os filtros permaneceram na estufa por apenas 24 horas.

#### 4.4 Determinação do limiar para a remobilização dos sedimentos

Na determinação do limiar para remobilização de sedimentos foi utilizado o programa SEDTRANS05, que é um modelo unidimensional de transporte de sedimentos, no qual simula o comportamento da areia ou sedimentos coesivos sob ação de correntes constantes ou sob a influência combinada de ondas e correntes (LI; AMOS, 2001). O programa foi obtido gratuitamente no endereço eletrônico <http://labsedim.uqar.qc/sedtrans05> e está licenciado sob GNU (*General Public License*).

O modelo Sedtrans05 consiste na versão mais atual, fruto do aprimoramento e mudanças de fórmulas usadas nos modelos Sedtrans92 e Sedtrans96. O Sedtrans05 dispõe de cinco algoritmos diferentes, que são relacionados às equações para transporte como carga de fundo (EINSTEIN-BROWN, 1950, YALIN, 1963 e VAN RIJN, 1993) e para carga total, ou seja, carga de fundo + carga suspensa (BAGNOLD, 1963 e ENGELUND-HANSEN, 1967) (NEUMEIER; FERRARIN; AMOS, 2008), além de um algoritmo para sedimentos coesivos (não considerado no presente trabalho).

No presente estudo foi utilizado o método de Yalin (1963) na determinação dos limiares para a remobilização dos sedimentos de fundo, com o qual se obtém o parâmetro crítico de Shields ( $\theta_{cr}$ ).

$$\log \theta_{cr} = 0,041 (\log Y)^2 - 0,356 \log Y - 0,977 \quad \text{para } Y < 100 \quad (13)$$

$$\log \theta_{cr} = 0,132 \log Y - 1,804 \quad \text{para } 100 < Y < 3000 \quad (14)$$

$$\theta_{cr} = 0,045 \quad \text{para } Y > 3000 \quad (15)$$

onde Y é o parâmetro adimensional de Yalin, expresso na Equação 16.

$$Y = \left( \frac{(p_s - p)gd^3}{pv^2} \right)^{0,5} \quad (16)$$

onde

$p_s$  = densidade do sedimento ( $\text{kg/m}^3$ )

$p$  = densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ );

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido;

$d$  = diâmetro médio do sedimento (m);

$g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ).

O valor do parâmetro de Shields ( $\theta_{cr}$ ) pode então ser usado para calcular a tensão cisalhante crítica ( $t_{cr}$ ), a partir da equação 17:

$$t_{cr} = \theta_{cr} (p_s - p)gd \quad (17)$$

Por fim, a velocidade cisalhante crítica ( $u_{cr}$ ) é obtida através da tensão cisalhante (Equação 18).

$$t_{cr} = p(u_{cr})^2 \quad (18)$$

A partir da opção *Batch mode* do programa foram inseridos como dados de entrada a série temporal da velocidade e direção das correntes, temperatura, salinidade e profundidade medidas durante as 25 horas de fundeio no bin 1 (mais próximo ao fundo) das estações A e C, assim como a altura acima do fundo destes bins (71cmaf na estação A e 37cmaf na estação C). Além disso, foi inserido o tamanho médio do sedimento definido a partir dos resultados obtidos por Carvalho (2014), que coletou sedimentos próximo às estações de fundeio do presente estudo. Vale ressaltar que os equipamentos não coletaram dados relativos às ondas (altura, período e direção) e, assim, os valores obtidos só consideram o transporte devido às correntes. Os resultados que são obtidos como saída do modelo são o valor da velocidade cisalhante crítica (calculado só em função do tamanho do material do fundo) e a série temporal de velocidade cisalhante, que está associada à resistência do escoamento no fundo.

Segundo Li e Amos (1998), a presença das ondulações de fundo interfere na magnitude da velocidade de cisalhamento. Quando as ondulações estão presentes, o atrito sobre o leito aumentará da calha para a crista (WIBERG; NELSON, 1992; LI, 1994). Desta forma, o modelo também foi aplicado considerando a presença das formas de fundo, a fim de analisar sua influência sobre os limiares para remobilização de sedimentos. Para tal, os dados de altura e comprimento dos bancos transversais foram acrescentados aos parâmetros de entrada do modelo.

Na estação A, foram utilizados os dados de altura e comprimento dos bancos de orientação NO-SE, onde a altura (1m) foi definida a partir do ecobatímetro de mão utilizado

em campo e o comprimento dos bancos foi definido a partir das medições realizadas imagens de satélite. Na estação C, localizada entre o setor 2 e 3, foram incorporados ao modelo os dados de altura e comprimento dos bancos de orientação NE-SO, já que nestes setores não são observados bancos da magnitude dos bancos de orientação NO-SE. Neste caso, não foi realizada medição direta da altura dos bancos, que foi inferida a partir de observações feitas em campo, já o seu comprimento foi definido a partir das medições realizadas imagens de satélite.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Imagens de satélite

#### 5.1.1 Bancos transversais de orientação NE-SO

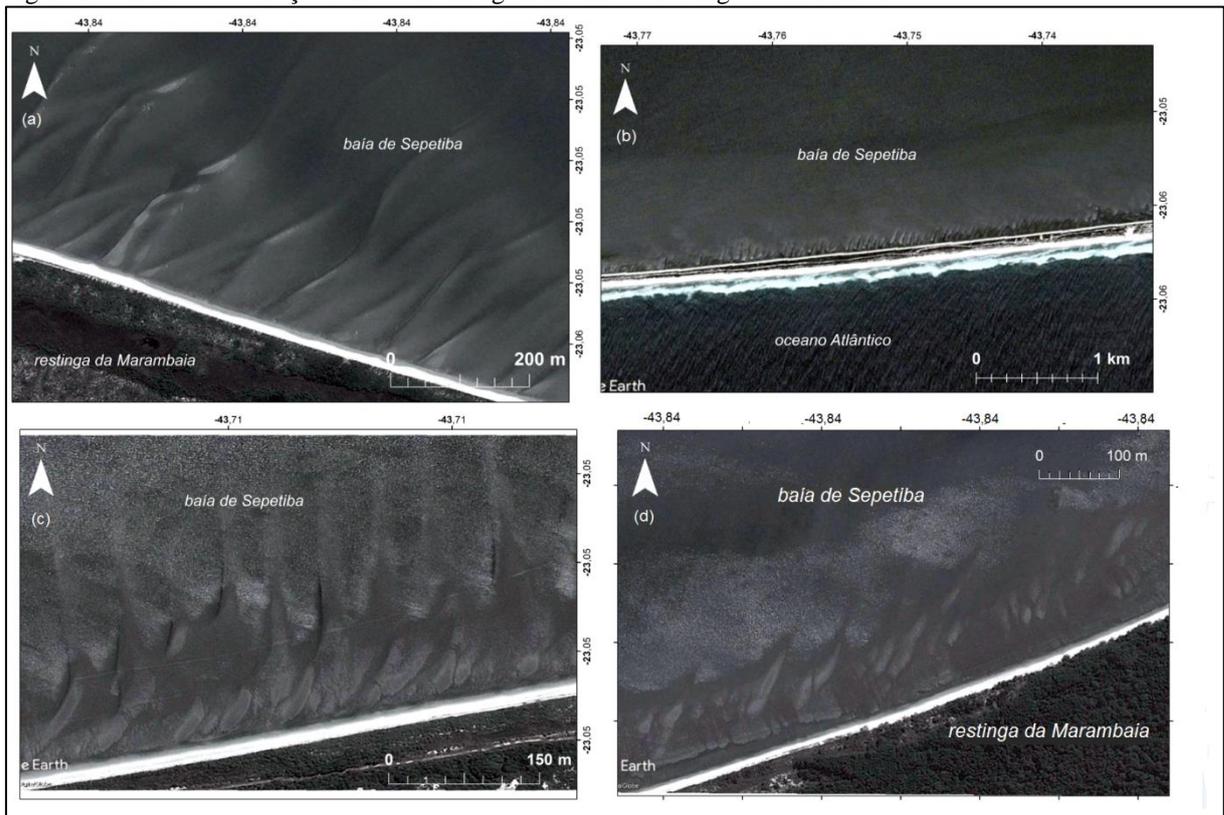
Ao longo dos anos de análise (2012 a 2017) foram obtidas 29 imagens na plataforma *Google Earth* em 12 das quais os bancos puderam ser observados (APÊNDICE A). No setor 1 foi obtido o maior número de imagens com a presença dos bancos enquanto o setor 4 apresentou o menor número de imagens (Tabela 11). Apenas no dia 31 de agosto de 2012 foram obtidas imagens com a presença de bancos em todos os setores (Figura 29).

Tabela 11 - Imagens com a presença dos bancos de orientação NE-SO, obtidas na plataforma *Google Earth Pro*, e utilizadas na determinação dos parâmetros estatísticos dos mesmos

Setor 1	Setor 2	Setor 3	Setor 4
04/04/2012	-	-	-
31/08/2012	31/08/2012	31/08/2012	31/08/2012
-	19/09/2013	19/09/2013	-
05/02/2014	-	-	-
09/04/2014	-	-	-
17/04/2015	17/04/2015	-	-
29/07/2015	29/07/2015	29/07/2015	-
06/03/2016	06/03/2016	06/03/2016	-
22/04/2016	22/04/2016	-	-
31/10/2016	-	-	-
09/05/2017	-	-	-
-	02/09/2017	02/09/2017	-

Fonte: A autora, 2020.

Figura 29 - Bancos de direção NE-SO na margem interna da restinga da Marambaia

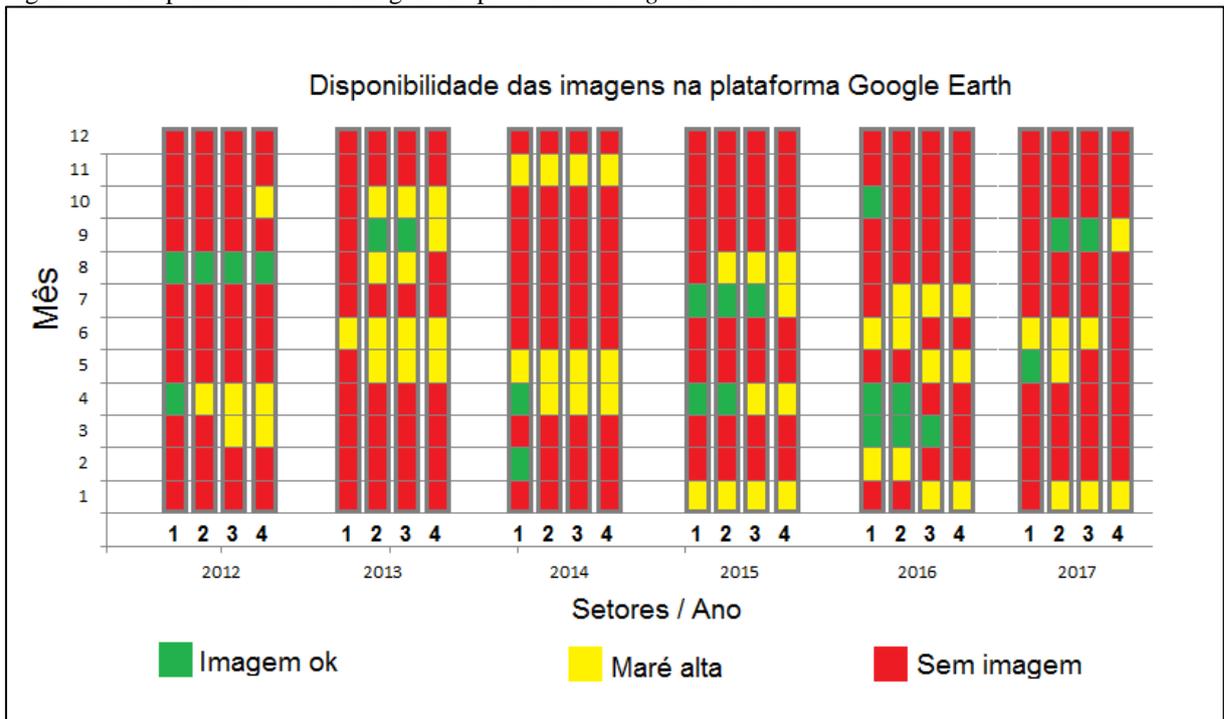


Legenda: (a) setor 1; (b) setor 2; (c) setor 3; e (d) setor 4. Imagem do dia 31 de agosto de 2012.

Fonte: GOOGLE EARTH, DIGITAL GLOBE, 2020.

Dentro do período analisado, no ano de 2012 constatou-se a maior densidade de bancos (10 por km) ao longo da margem interna da restinga. Neste mesmo ano, o comprimento de onda médio ( $\lambda$ ) foi de  $\sim 57$  metros e desvio padrão de  $\sim 22$  metros, alcançando 620 metros de distância transversal à costa ( $\Delta x$ ). Em contrapartida, no ano de 2014 constatou-se a menor densidade de bancos (3 bancos p/ km). Vale ressaltar, que nem todos os setores foram amostrados ao longo do ano; por exemplo, no ano de 2014 foram obtidas imagens apenas do setor 1. No Apêndice D (Tabela 29) são apresentados os parâmetros estatísticos médios anuais definidos no presente estudo.

Os bancos foram observados ao longo de oito diferentes meses: fevereiro, março, abril, maio, julho, agosto, setembro e outubro. É importante destacar que a plataforma não disponibiliza imagens mensais e, além disso, em determinadas imagens a maré alta inibe a visualização das feições. Desta forma, nem todos os meses foram amostrados (Figura 30).

Figura 30 - Disponibilidade das imagens na plataforma *Google Earth Pro*

Legenda: 'Imagem OK' simboliza as imagens no qual os bancos puderam ser observados.

Fonte: A autora, 2020.

No geral, no mês de agosto foi encontrada a maior densidade de bancos (11 bancos p/km). Em contrapartida, o mês de fevereiro apresentou o menor número de bancos por km (4). Neste período, foram encontrados 53 bancos concentrados no setor 1 da restinga, com comprimento de onda médio ( $\lambda$ ) de 82 metros, desvio padrão de 36 metros e distância transversal em relação à costa ( $\Delta x$ ) de até 342 metros (APÊNDICE D – Tabela 30).

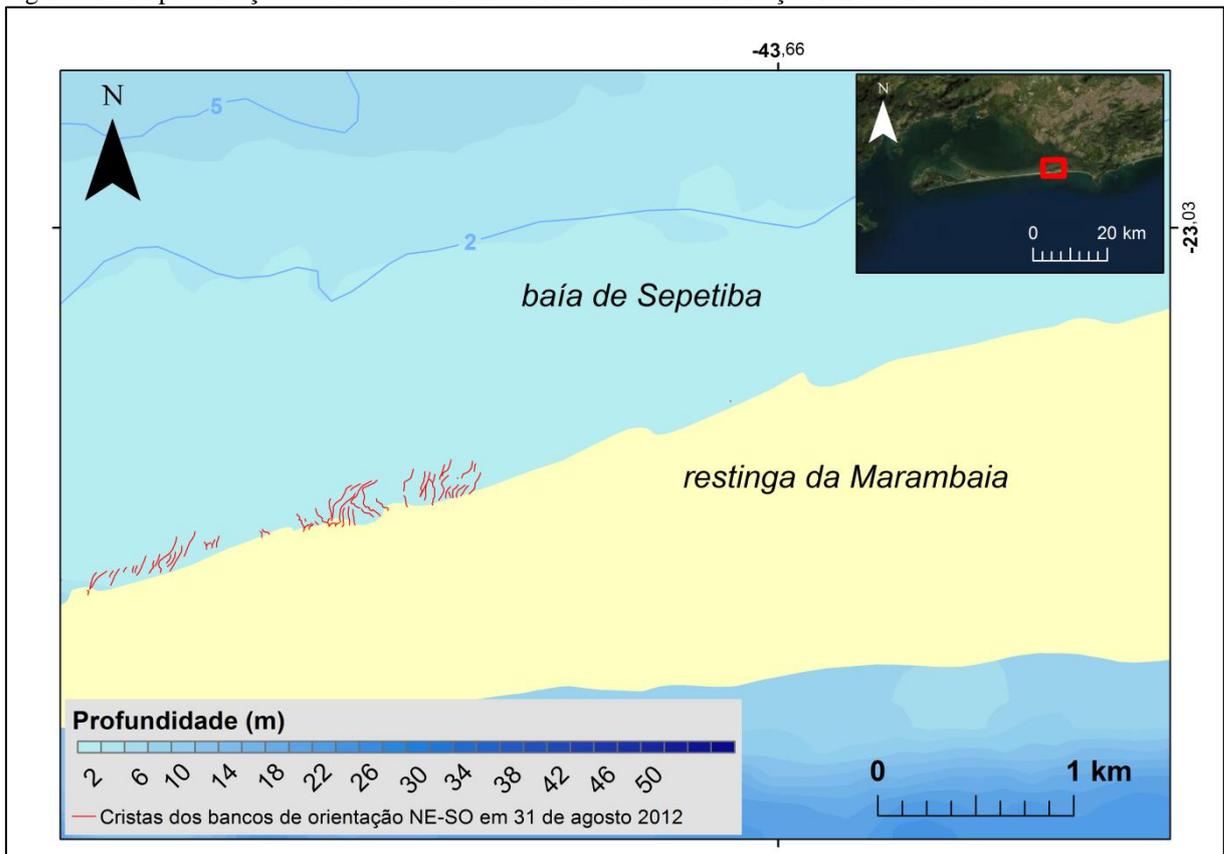
No setor 1, os bancos transversais de orientação NE-SO apresentam comprimento de onda médio ( $\lambda$ ) de 87 metros, com desvio padrão de 44 metros. A distância transversal à costa ( $\Delta x$ ) varia de 20 a 680 metros, e são encontrados uma média de 8 bancos p/ km na região (APÊNDICE E -Tabela 32).

No setor 2 os bancos transversais apresentam comprimento de onda médio ( $\lambda$ ) de 66 metros, com desvio padrão de 25 metros. A distância transversal à costa ( $\Delta x$ ) varia de 24 a 389 metros e são encontrados 13 bancos p/km na região (APÊNDICE E– Tabela 33). Já no setor 3, os bancos apresentam comprimento de onda médio ( $\lambda$ ) de 73 metros, com desvio padrão de 44 metros. A distância transversal à costa ( $\Delta x$ ) varia de 30 a 330 metros, com a presença de 9 bancos p/km na região (APÊNDICE E – Tabela 34).

No setor 4, os bancos transversais foram observados apenas no mês de agosto de 2012. No geral, em 72% dos casos este fato pode ser atribuído à ausência de imagens disponíveis para esta região, enquanto em 26% dos casos está associado à maré alta. Nesta data foram registrados

um total de 3 bancos p/km, com comprimento de onda médio ( $\lambda$ ) de 65 metros e desvio padrão de 24 metros. Já a distância transversal à costa ( $\Delta x$ ) chegou a alcançar 220 metros (APÊNDICE E – Tabela 35). Na Figura 31 é possível observar que os bancos foram registrados apenas na porção oeste deste setor.

Figura 31 - Representação das cristas dos bancos transversais de orientação NE-SO no setor 4



Legenda: Batimetria interpolada a partir dos pontos das folhas de bordo compiladas pelo grupo de pesquisa Geomargem.

Fonte: A autora, 2020.

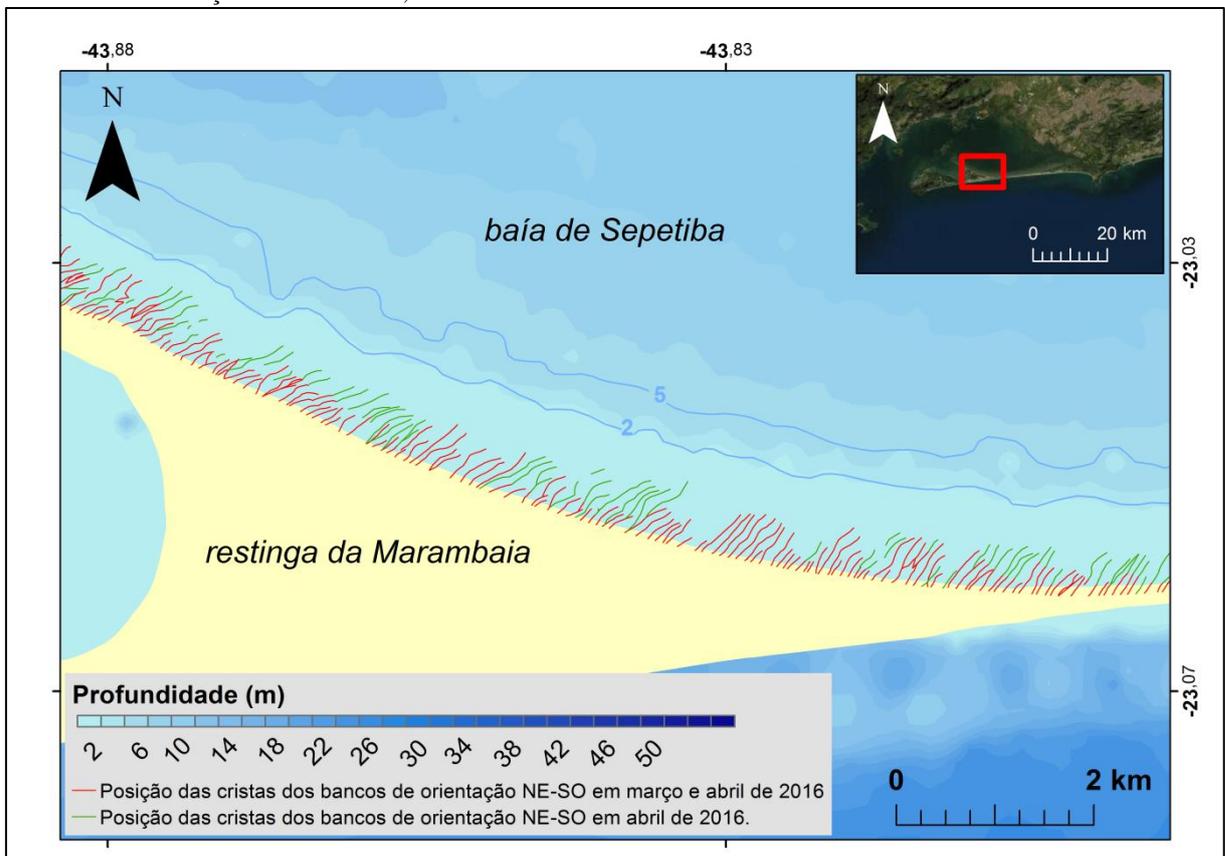
O pequeno número de imagens disponíveis na plataforma e a maré alta dificultaram a observação contínua dos bancos no decorrer dos meses. Desta forma, apenas em março e abril de 2016 (6 de março e 22 de abril) foi possível fazer uma comparação entre as características das feições (distância transversal à costa, comprimento de onda médio e densidade) por meses consecutivos (Figura 30).

No setor 1, no dia 6 de março de 2016 foram constatados 10 bancos p/km, com comprimento de onda médio ( $\lambda$ ) de 70 metros e desvio padrão de 28 metros. Na imagem do dia 22 de abril também foram encontrados 10 bancos p/km na região, e os parâmetros não apresentaram grandes variações ( $\lambda = 68$  m; desvio padrão = 23 m). A maior diferença entre os bancos neste período foi o aumento da distância transversal em relação à costa ( $\Delta x$ ) que passou

de 550 metros em março para 680 metros em abril (Figura 32). Este padrão se repete no setor 2, onde os bancos alcançam 273 metros de distância transversal à costa no mês de março e 340 metros em abril (Figura 33).

A comparação da posição das cristas dos bancos nas imagens de março e abril de 2016 permite afirmar que neste período (47 dias) os bancos de orientação NE-SO não sofreram migração lateral (Figuras 32 e 33). Nos setores 3 e 4 não foi possível a comparação entre as imagens neste período.

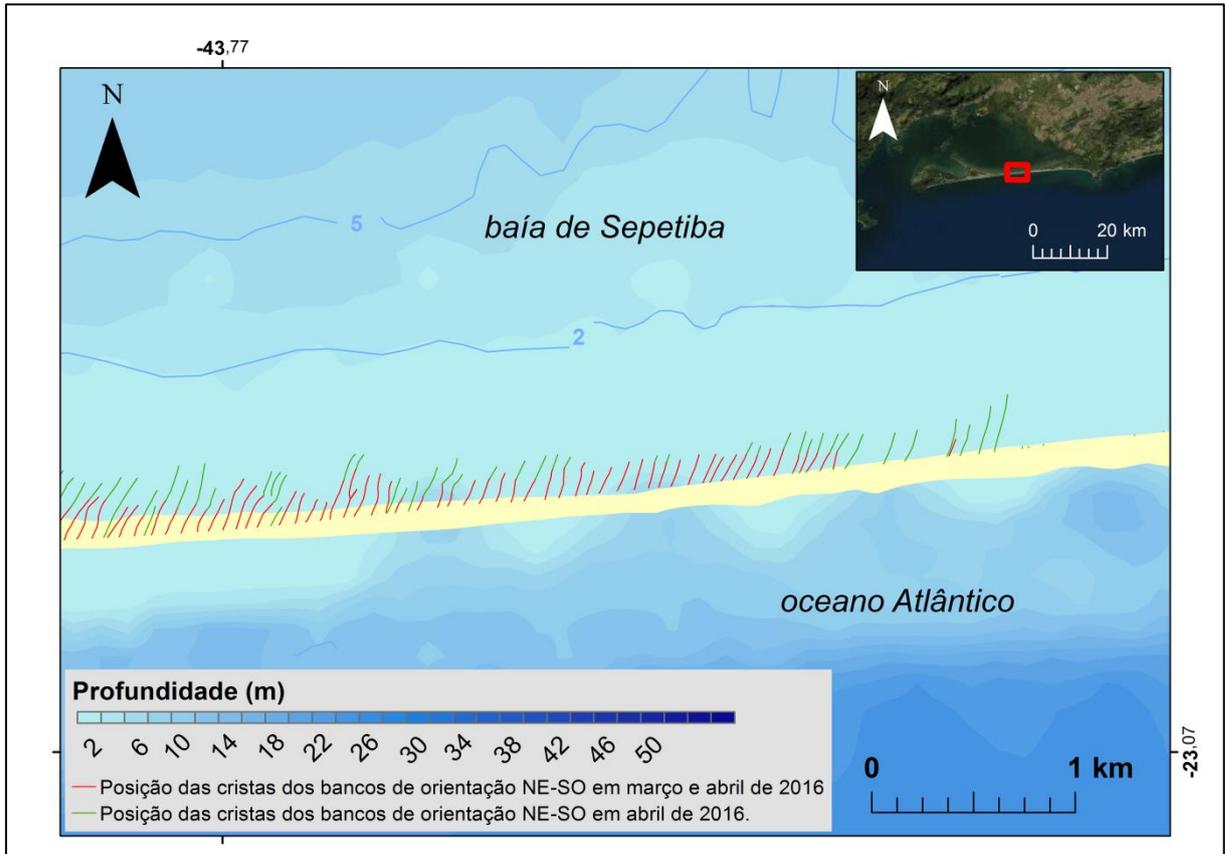
Figura 32 - Representação das cristas dos bancos transversais (tipo “*fingers bars*”) de orientação NE-SO nos meses de março e abril de 2016, no setor 1



Legenda: Batimetria interpolada a partir dos pontos das folhas de bordo compiladas pelo grupo de pesquisa Geomargem.

Fonte: A autora, 2020.

Figura 33 - Representação das cristas dos bancos transversais de orientação NE-SO nos meses de março) e abril de 2016, no setor 2



Legenda: Batimetria interpolada a partir dos pontos das folhas de bordo compiladas pelo grupo de pesquisa Geomargem

Fonte: A autora, 2020.

#### 5.1.1.1 Taxas de migração

Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos nos dois métodos aplicados para determinação das taxas de migração. Um banco marcante e continuamente presente nas imagens foi analisado e comparado entre os dias 29 de julho de 2015 (maré de quadratura) e 22 de abril de 2016 (maré de sizígia) (Figuras 21 e 22). Vale ressaltar que vários testes simulando diferentes períodos foram utilizados para estimar as taxas de migração das feições, a fim de se obter maior precisão dos resultados. Além disso, as datas utilizadas para comparação da posição dos bancos foram definidas de acordo com a possibilidade de sua observação nas imagens quando submetidas a variações de contraste e transparência. No Apêndice F, são apresentados mapas no qual foram realizadas medições.

Tabela 12 - Comparação dos resultados obtidos pelos métodos utilizados para determinação das taxas de migração

Setor	Método 1	Método 2
1	0,03 m/dia	0,04 m/dia
2	0,04 m/dia	0,05 m/dia
3	0,01 m/dia	0,01 m/dia
4	-	-

Fonte: A autora, 2020.

### 5.1.2 Bancos transversais de orientação NO-SE

Ao longo dos três anos de análise (2016, 2017 e 2018) foram obtidas 104 imagens do satélite Sentinel 2, sendo que os bancos de orientação NO-SE puderam ser observados em 36 delas, mesmo que parcialmente submersos (Tabela 13).

No ano de 2016 os bancos foram observados em apenas 3 imagens. Das 23 imagens obtidas no ano de 2017, em apenas 7 foi possível observar a presença das feições, pois 12 apresentaram forte nebulosidade e 4 foram obtidas sob condições de maré alta. Já o ano de 2018 apresentou o maior número de imagens, dentre as quais 35 apresentaram forte nebulosidade e 7 foram classificadas como “MARÉ ALTA”, fatores estes que inibiram a visualização dos bancos.

Tabela 13 - Total de imagens do satélite Sentinel 2 A/B

Ano	Total imagens	Imagens com bancos
<b>2016</b>	13	3
<b>2017</b>	23	7
<b>2018</b>	68	26

Legenda: O total de imagens compreende o somatório das imagens classificadas como “MARÉ ALTA”, “NUVENS” e ‘IMAGEM OK’.

Fonte: A autora, 2020.

Dentre as imagens com a presença dos bancos, metade estava em condições de maré de sizígia (2 na maré baixa de sizígia e 1 na maré alta de sizígia) e a outra metade na maré de quadratura (2 na maré baixa de quadratura). Segundo as informações do satélite e a informação na tábua de maré, a maré variou entre 0 e 1,2 m de altura durante a aquisição das imagens

analisadas. Os bancos transversais de orientação NO-SE ficam totalmente expostos quando a altura da maré está no momento 0m enquanto no geral, em níveis acima de 0,9m os bancos não podem ser observados nas imagens de satélite. (Figura 34).

Figura 34 - Bancos de orientação NO-SE totalmente submersos

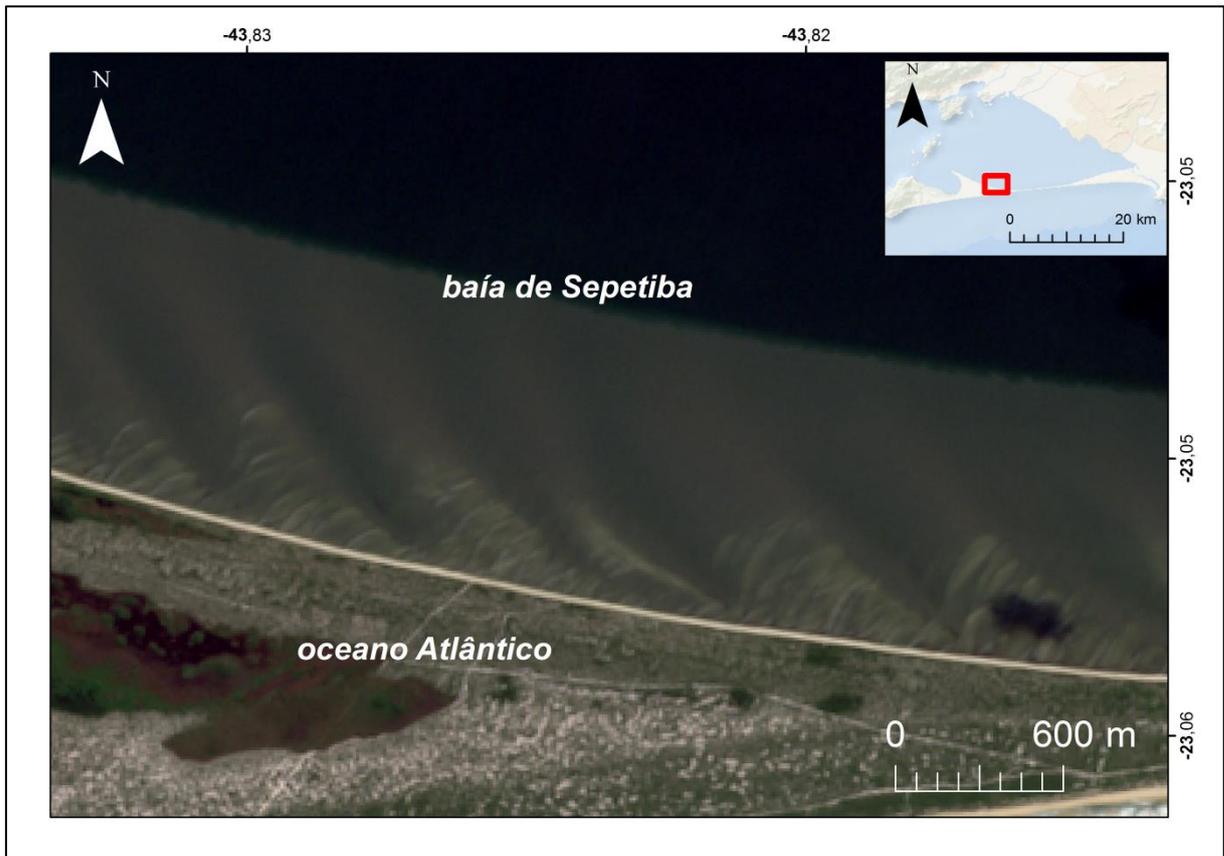


Legenda: Imagem do satélite Sentinel 2A/B. Nível da maré 1,1 m (quadratura). Imagem do dia 23 de junho de 2018.

Fonte: EARTH EXPLORER, 2020.

Durante a baixa mar extrema de sizígia (0m) os bancos transversais de orientação NO-SE podem ser traçados a até 875 m de distância transversal à costa ( $\Delta x$ ). Nestas condições, são encontrados 3 bancos/km no setor oeste da restinga, com comprimento de onda médio de 532 m e desvio-padrão de 165 m (Figura 35). Em contrapartida, no nível máximo da maré em que os bancos ainda podem ser visualizados (0,8m), os bancos alcançam 510 m de distância transversal à costa ( $\Delta x$ ), com comprimento de onda médio de 522m e desvio-padrão de 172m. No Apêndice D (Tabela 31) são apresentados os parâmetros estatísticos médios dos bancos obtidos em diferentes níveis de maré.

Figura 35 - Bancos de orientação NO-SE presentes no setor oeste da margem interna da restinga da Marambaia, RJ



Legenda: Imagem do Satélite Sentinel 2A/B. Nível da maré 0,0 m. Imagem do dia 13 de julho de 2018.  
Fonte: EARTH EXPLORER, 2020.

#### 5.1.2.1 Taxas de migração

Para acompanhamento dos bancos de orientação NO-SE, um banco marcante e continuamente presente nas imagens foi analisado e comparado entre os dias 06 de setembro de 2017, com nível de maré 0,2m (maré de sizígia) e 13 de julho de 2018, com nível de maré 0m (baixa-mar de sizígia) (Figura 36). Dentro deste período, de aproximadamente 310 dias, os bancos migraram lateralmente cerca de 0,04m/dia em direção a oeste. Neste caso, também foram comparados os resultados obtidos com diferentes intervalos de tempo. Por exemplo, num intervalo de 45 dias (29 de maio a 13 de julho de 2018) a taxa média de migração foi de 0,02 m/dia para oeste, valor que corresponde à menor taxa de migração destes bancos. Os mapas representando as taxas de migração dos bancos encontram-se no Apêndice F.

Figura 36 - Determinação da taxa de migração dos bancos transversais de orientação NO-SE a partir do método 1



Legenda: Em amarelo a posição da crista do banco em 13 de julho de 2018. Imagem do satélite Sentinel do dia 06 de setembro de 2017.

Fonte: EARTH EXPLORER, 2020.

## 5.2 Caracterização sedimentológica

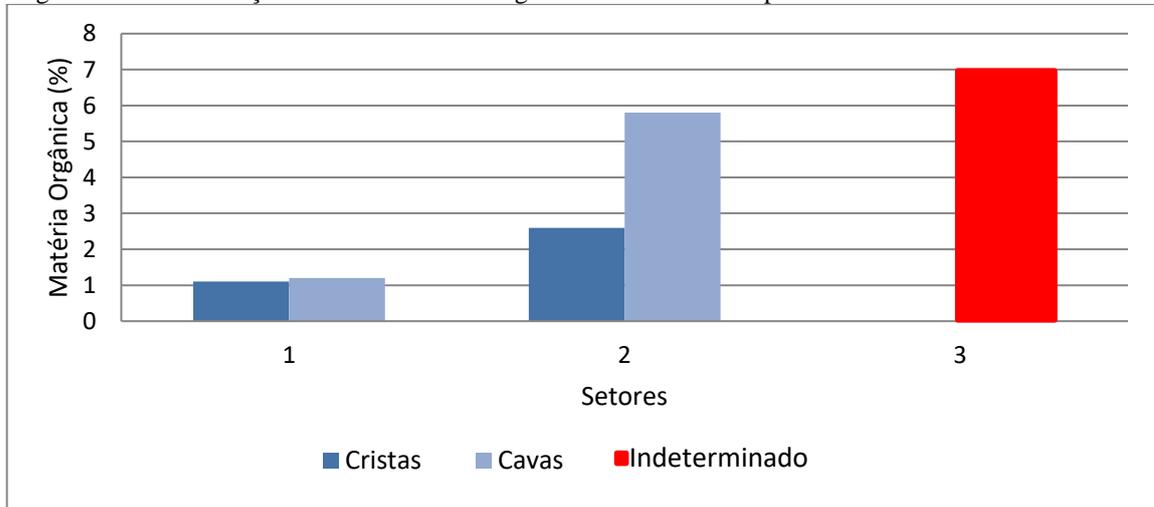
Nesta seção são apresentados os resultados das análises dos sedimentos coletados na região dos bancos transversais descritos na seção anterior. Vale ressaltar que foram coletados sedimentos apenas nas cristas e cavas dos bancos de orientação NE-SO.

### 5.2.1 Matéria Orgânica

Como pode ser observado na Figura 37, o teor médio de matéria orgânica nos sedimentos analisados oscilou entre 1,1 e 7%, aumentando em direção a leste. Vale ressaltar que no setor 3 não foi determinada a localização precisa das cristas e cavas dos bancos durante

a coleta das amostras e que, além disso, o setor 4 não foi amostrado. No geral, as cavas dos bancos transversais apresentam maior concentração de material orgânico do que as cristas.

Figura 37 - Concentração média de material orgânico nos sedimentos presentes na área de estudo



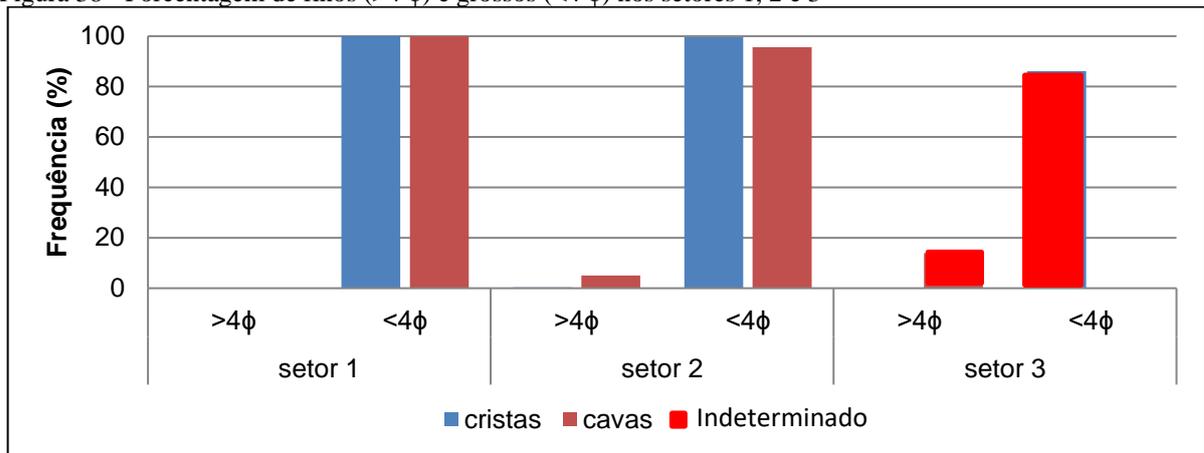
Fonte: A autora, 2020.

### 5.2.2 Parâmetros Texturais

Quanto à classificação textural, os bancos transversais de orientação NE-SO são compostos por sedimentos classificados como areia média, tanto em suas cristas como em suas cavas, com exceção de uma amostra no setor 2 (cava de um banco) que foi classificada como areia fina. No setor 3, onde não foi possível determinar a localização das cristas e cavas dos bancos, o sedimento é classificado como areia fina. Os gráficos com a distribuição granulométrica de cada amostra encontram-se no Apêndice G.

No setor 1, as cavas dos bancos transversais tem, em média, 0,1% de finos (silte e argila), enquanto que nas cristas os sedimentos finos não estão presentes. Já no setor 2, as cristas apresentam, em média, 0,4% de finos (silte e argila), enquanto que nas cavas o teor de finos chega a uma média de 5,1%. As maiores concentrações de finos encontram-se no setor 3, chegando a 14% nos sedimentos coletados (Figura 38).

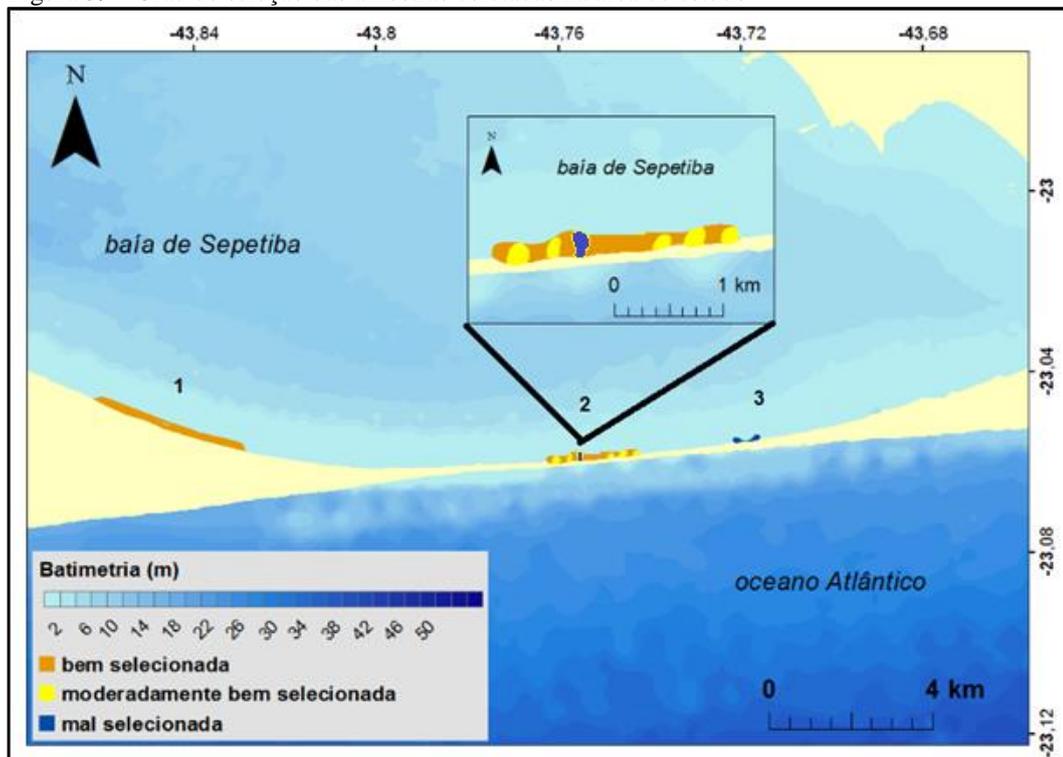
Figura 38 - Porcentagem de finos ( $>4\phi$ ) e grossos ( $<4\phi$ ) nos setores 1, 2 e 3



Fonte: A autora, 2020.

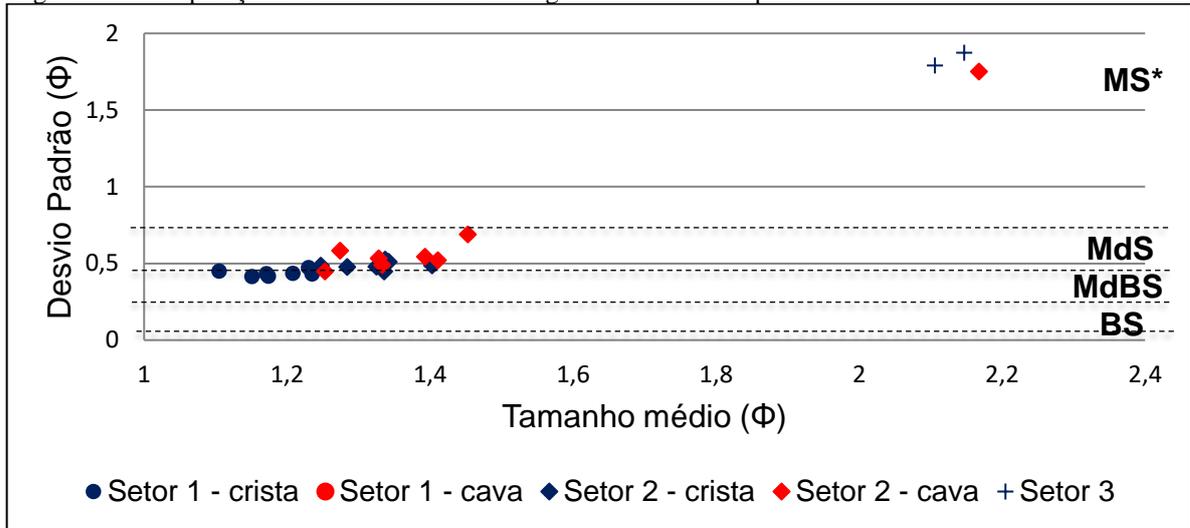
Quanto ao grau de selecionamento, no setor 1 as amostras são classificadas como bem selecionadas, tanto nas cristas como nas cavas dos bancos transversais. No setor 2 as cristas tendem a ser bem selecionadas e as cavas moderadamente bem selecionadas, com exceção de duas amostras classificadas como bem selecionadas e uma mal selecionada (Figura 39). Por fim, no setor 3, o sedimento é mal selecionado, coincidindo com uma área mais lamosa. No geral, as amostras classificadas como areia fina (entre 2 e 3φ) apresentam caráter mal selecionado (Figura 40).

Figura 39 - Grau de seleção das amostras coletadas na área de estudo



Legenda: Batimetria interpolada a partir dos pontos das folhas de bordo compiladas pelo grupo de pesquisa Geomargem.

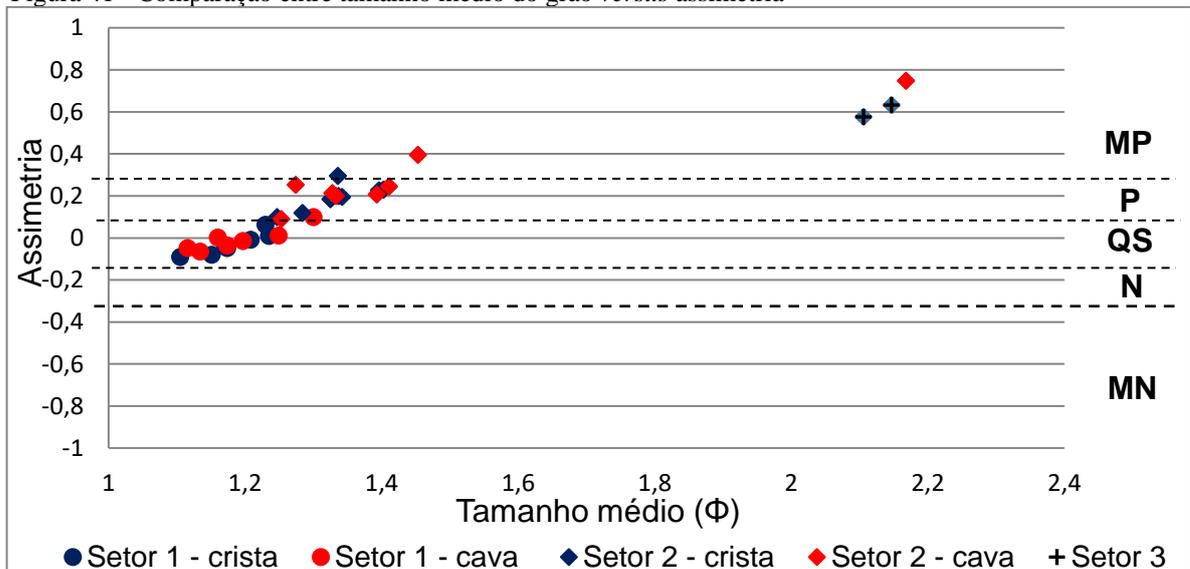
Fonte: A autora, 2020.

Figura 40 - Comparação entre tamanho médio do grão *versus* desvio-padrão

Legenda: MS\* = mal selecionado; MdS = moderadamente selecionado; MdBS = moderadamente bem selecionado; BS = bem selecionado.

Fonte: A autora, 2020.

Os sedimentos das cristas e cavas dos bancos coletados no setor 1 são quase simétricos. No setor 2 as cristas e cavas dos bancos possuem assimetria positiva, com algumas exceções. No primeiro banco, localizado na porção oeste do setor, o sedimento da crista é quase simétrico e o da cava tem assimetria muito positiva. A aproximadamente 490 metros de distância a leste do primeiro banco, também foi amostrado um banco em que o sedimento da cava possui assimetria muito positiva. Na parte leste do setor, foi amostrado um banco em que o sedimento da cava foi classificado como quase simétrico. As duas amostras do setor 3 tem assimetria muito positiva. (Figura 41).

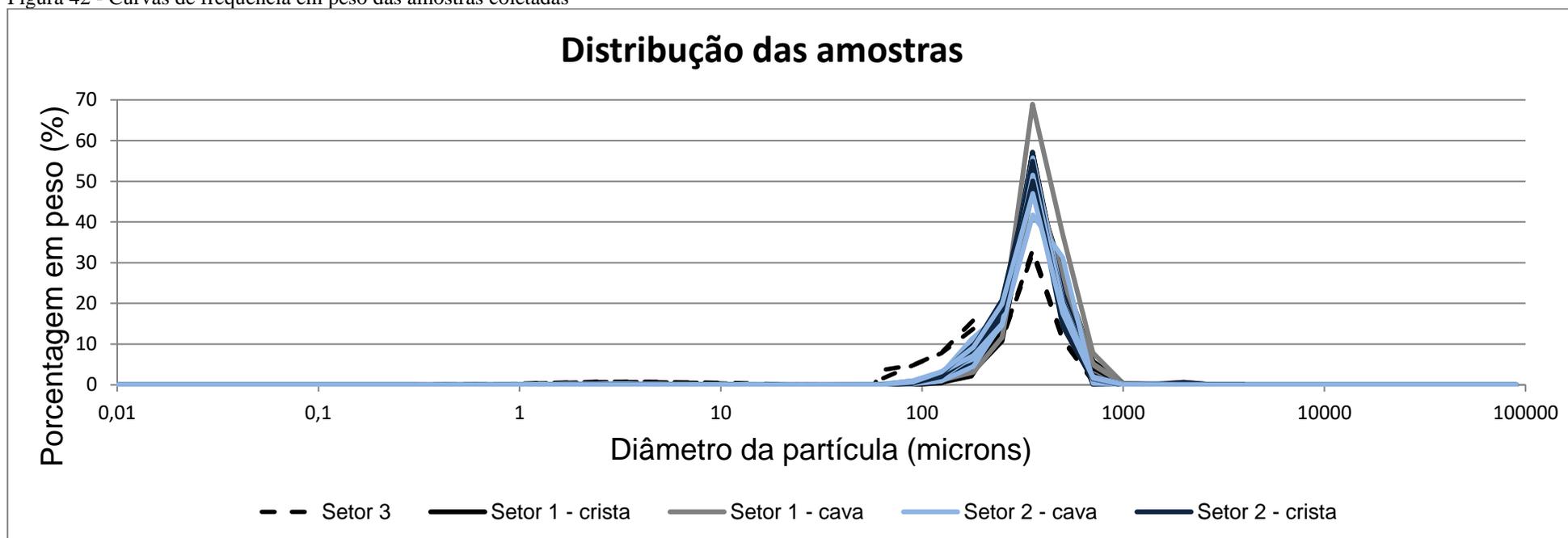
Figura 41 - Comparação entre tamanho médio do grão *versus* assimetria

Legenda: MN= assimetria muito negativa; N=assimetria negativa; QS= quase simétrica; P= assimetria positiva; MP=assimetria muito positiva.

Fonte: A autora, 2020.

As curvas de frequência em peso denotam o caráter leptocúrtico da maior parte das amostras analisadas (Figura 42). São exceção três amostras coletadas na cava de bancos no setor 2 e as amostras do setor 3, onde o material é classificado como muito leptocúrtico, além de duas regiões de cava de bancos no setor 1, onde o material é classificado como mesocúrtico.

Figura 42 - Curvas de frequência em peso das amostras coletadas



Fonte: A autora, 2020.

### 5.3 Caracterização hidrodinâmica - fundeios de 25 horas

Nesta seção serão apresentados os dados dos dois fundeios simultâneos, com duração de 25 horas, realizados nos dias 24 e 25 de julho de 2019 próximo à margem interna da restinga da Marambaia (Figura 23).

Segundo a previsão para a estação Porto de Itaguaí (22° 55'.9 S/ 043° 50'.5 W), a maré prevista para o período do fundeio variou entre 0,5 e 1,2 m e as medições ocorreram sob condições de quadratura. A primeira baixa mar ocorreu às 16h13min do dia 24/07/2019 (0,5 m de altura), a primeira preamar às 20h06min (1,2 m de altura), a segunda baixa mar às 04h49min do dia 25/07/2019 (0,6 m de altura) e a segunda preamar às 8h41min (1,2 m de altura) (Tabela 14).

Tabela 14 - Variação da maré durante o período do fundeio

	<b>1ª Baixa mar</b>	<b>1ª Preamar</b>	<b>2ª baixa mar</b>	<b>2ª Preamar</b>
Hora	16h13min	20h06min	04h49min	8h41min
Dia	24/07/2019	24/07/2019	25/07/2019	25/07/2019
Altura	0,5m	1,2m	0,6m	1,2m

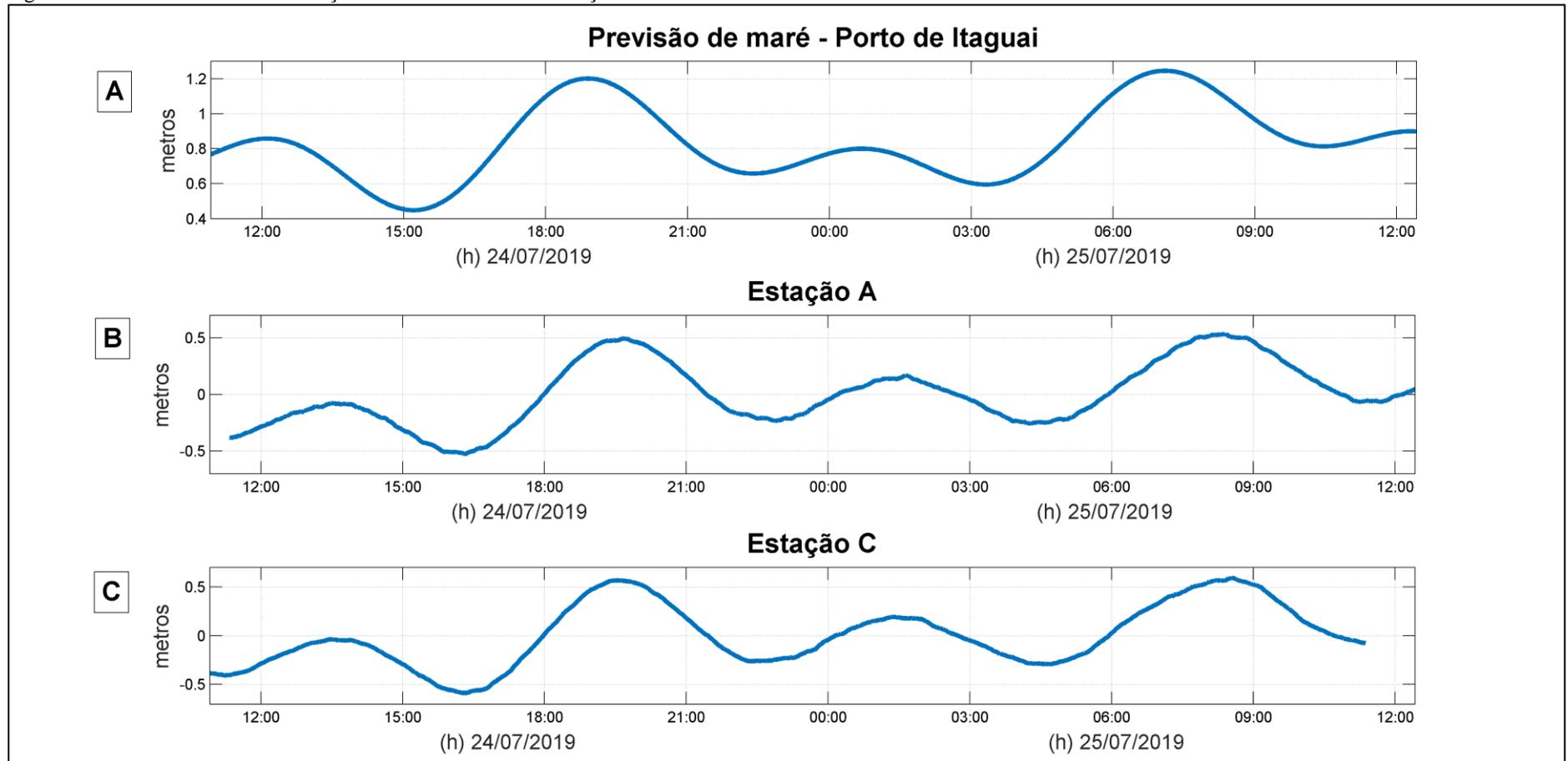
Legenda: Tabela elaborada a partir dos dados da estação maregráfica Porto de Itaguaí.

Fonte: A autora, 2020.

Os dados de pressão adquiridos nas estações apresentam bom ajuste entre eles, assim como uma boa relação com a maré prevista (Figura 43). Em geral, os períodos de maré enchente foram mais curtos, durando em média 3h26min, enquanto que os períodos de vazante foram mais longos (em média 9 h). Observa-se a possível influência da constituinte M4 da maré na mencionada assimetria de duração dos níveis e na variação do nível da água durante as vazantes. Segundo Fonseca (2019) a relação de M4/M2 apresenta valores sempre próximos de 0° e 180°, indicando o caráter não linear da maré nesta região e a contribuição para a geração de assimetrias.

Em relação às condições do tempo durante o período dos fundeios, a velocidade média do vento foi de 3,2 m/s, com variação entre 1,7 e 5,6 m/s (Figura 44a). Os ventos sopraram das direções NE, SE e NO, com predomínio dos ventos de NNE (Figura 44b). Nas vazantes houve predomínio dos ventos de NE e nas enchentes predomínio dos ventos de L e NE. A velocidade média dos ventos nas vazantes foi de 3,1 m/s enquanto nas enchentes foi de 3,4 m/s.

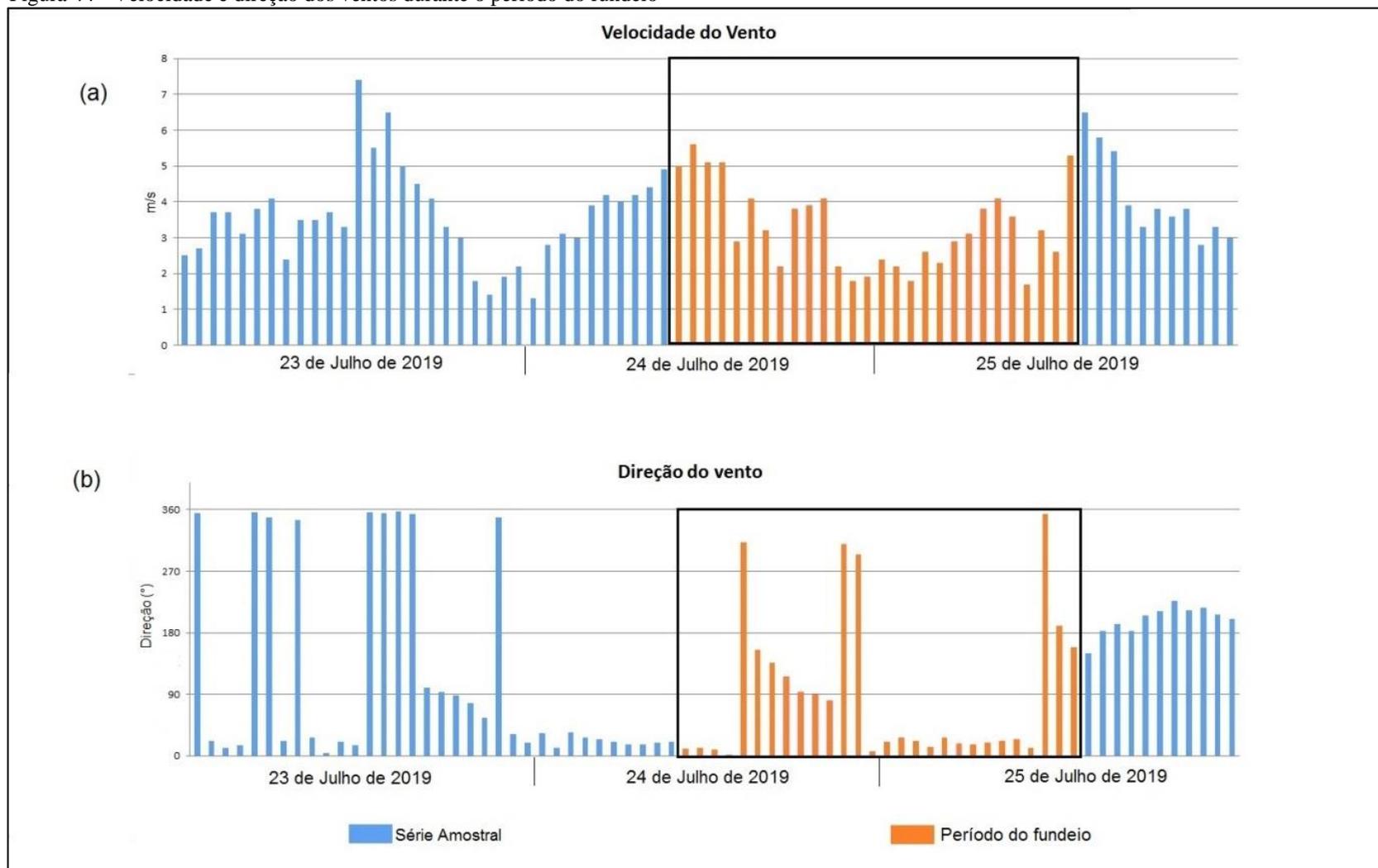
Figura 43 - Previsão de maré e variação do nível residual nas estações A e C



Legenda: (A) Previsão da maré segundo a tábua de maré da DHN (Estação Porto de Itaguaí). (B) e (C) Médias do nível residual medido nas estações A e C (localização na Figura 23), calculadas a intervalos de 1 minuto. Observa-se a possível influência da constituinte M4 da maré na variação do nível da água durante as vazantes.

Fonte: A autora, 2020.

Figura 44 - Velocidade e direção dos ventos durante o período do fundeio

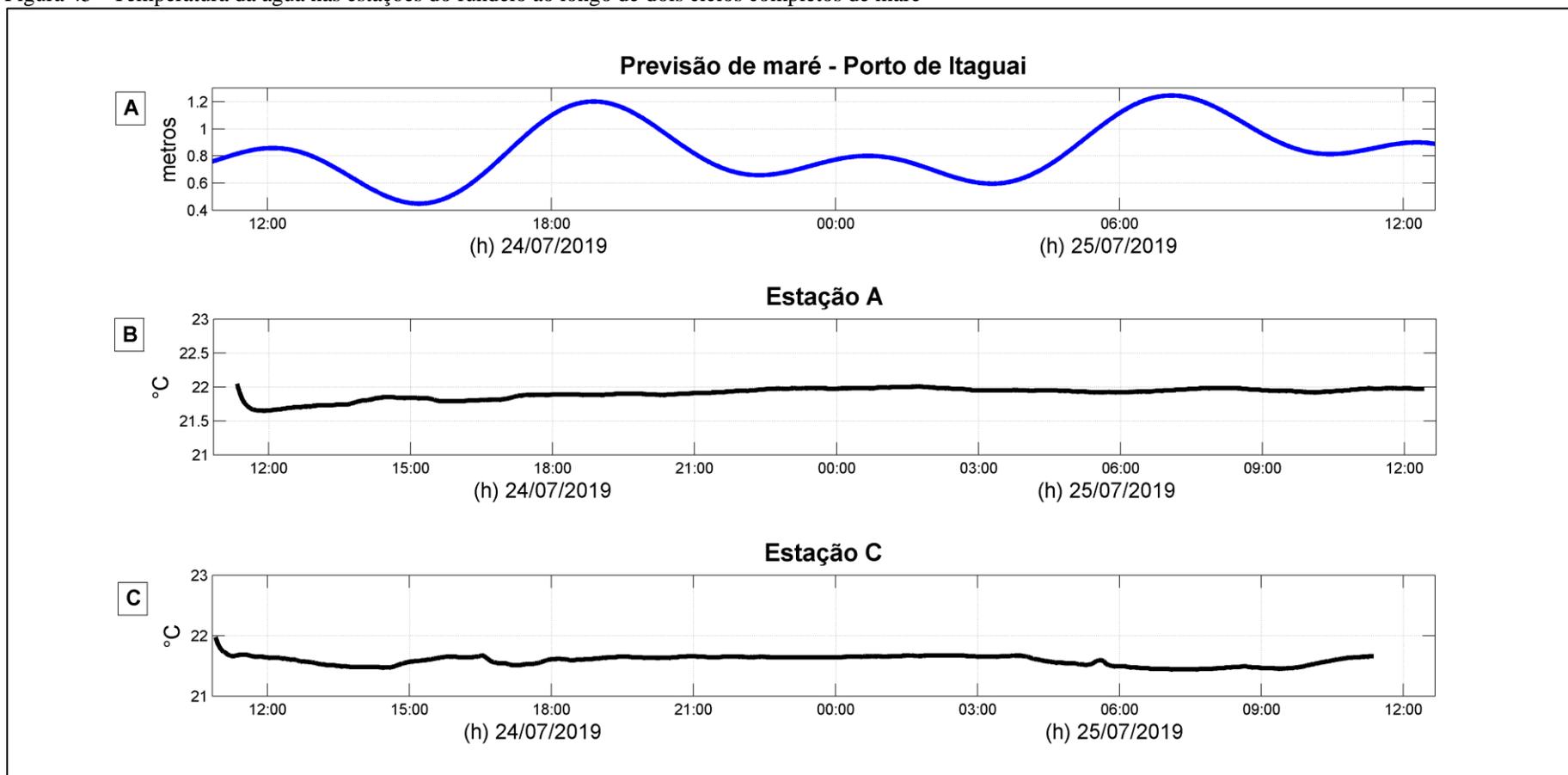


Legenda: Dados horários oriundos da Estação meteorológica Rio de Janeiro – Marambaia - A602. As barras em laranja destacam o período dos fundeios.  
 Fonte: INMET, 2020.

### 5.3.1 Propriedades físicas da água

De acordo com os dados obtidos a partir dos sensores de temperatura presentes nos perfiladores acústicos, a temperatura da água não apresentou variação significativa ao longo de todo o fundeio, mantendo-se entre 21 e 22°C nas duas estações (Figura 45). Na Estação C, os dados de temperatura do CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) acoplado à estrutura também se mantiveram no mesmo intervalo. A partir dos dados obtidos por este CTD, verificou-se que a salinidade se manteve constante em 30 ups ao longo de todo o fundeio. Como resultado, o mesmo padrão pôde ser constatado quanto à densidade da água, que se manteve em torno de 1021 kg/m<sup>3</sup>.

Figura 45 - Temperatura da água nas estações do fundeio ao longo de dois ciclos completos de maré



Legenda: (A) Previsão da maré segundo a tábua de maré da DHN (Estação Porto de Itaguaí). (B) e (C) Variação da temperatura nas estações A e C (localização na Figura 23). Médias da temperatura calculadas a intervalos de 1 minuto.

Fonte: A autora, 2020.

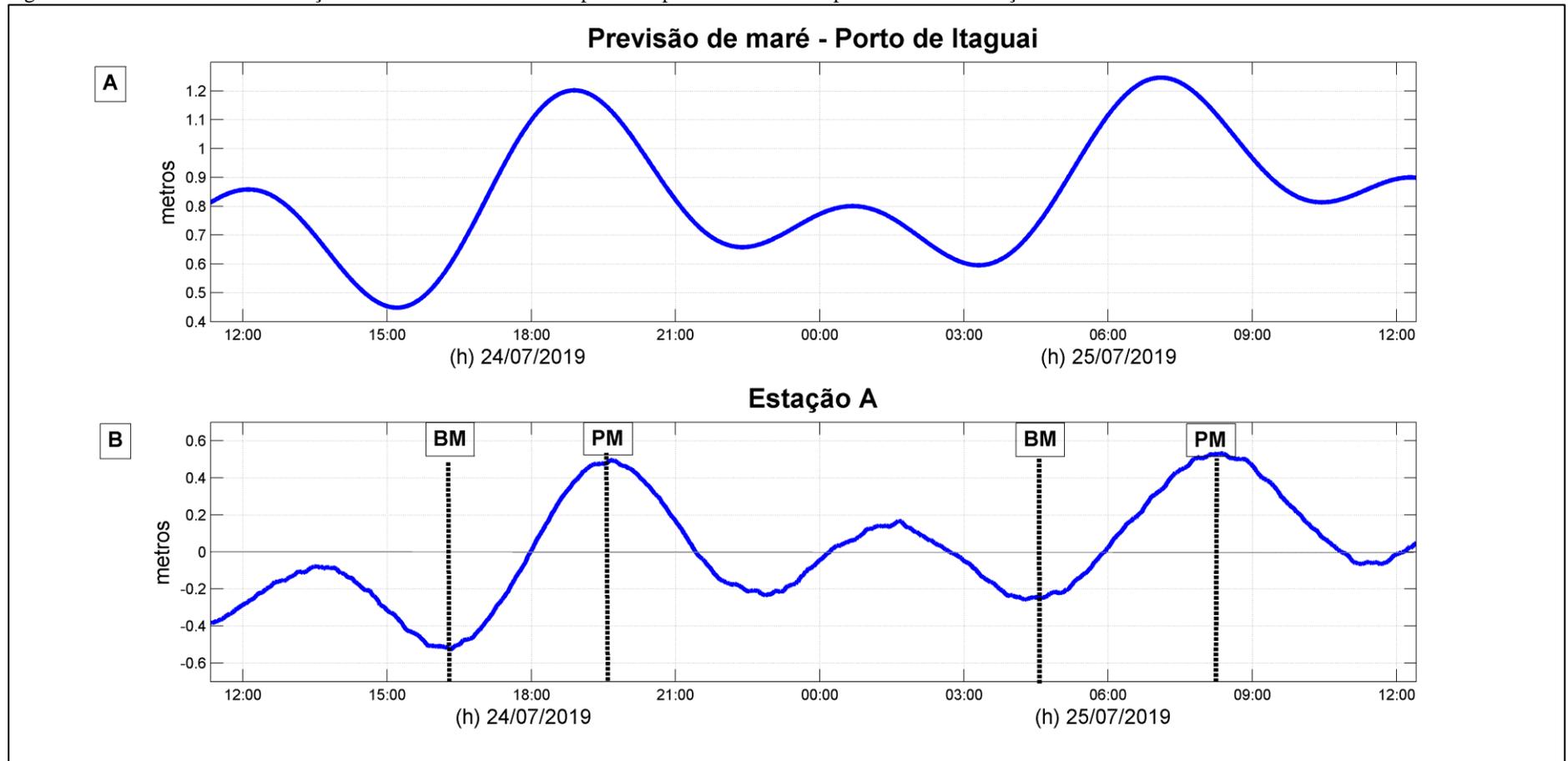
### 5.3.2 Estação A

A estação A foi posicionada na direção da cava de um banco de orientação NO-SE (Figura 25a) (profundidade local de ~5 metros), com a primeira célula de medição a 71cmaf. Os dados de pressão mostram boa relação com a maré prevista e observa-se uma rápida subida do nível durante as enchentes e a presença de um duplo pico de baixa-mar ao longo das vazantes, que são mais longas (Figura 46).

Quanto à intensidade das correntes (Figura 47), o valor máximo foi de 0,26 m/s, com média de 0,09 m/s. A 71cmaf e a 116cmaf a média da intensidade das correntes foi de, respectivamente, 0,08m/s e 0,1m/s. No geral, durante os períodos de enchente as correntes são mais intensas (média 0,1m/s) do que nos períodos de vazante (0,08m/s). Também, pode ser observado que a onda de maré apresenta características estacionárias, com os picos de velocidade ocorrendo aproximadamente nas meias marés de enchente e vazante.

Em relação à direção das correntes, durante a maré enchente predominam fluxos para L e SE, enquanto durante a maré vazante os fluxos se dirigem principalmente para O e NO. Na Figura 48 é possível observar que, cerca de 24 minutos antes da preamar, as correntes invertem para O apesar de o nível da água continuar a subir. No final da segunda vazante o mesmo padrão se repete, e as correntes invertem para SE cerca de 30 minutos antes da baixa-mar. Já na segunda enchente a inversão no sentido das correntes acontece cerca de 35 minutos antes da preamar.

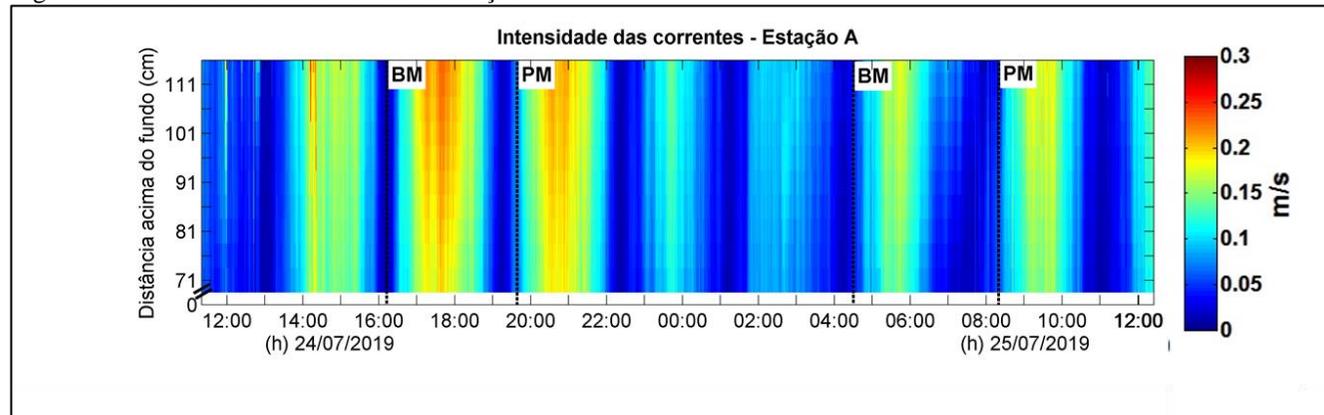
Figura 46 - Previsão de maré variação do nível residual obtido a partir do perfilador acústico posicionado na estação A



Legenda: (A) Previsão da maré segundo a tábua de maré da DHN (Estação Porto de Itaguaí). (B) Média do nível residual calculada a intervalos de 1 minuto na estação A. A linha tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

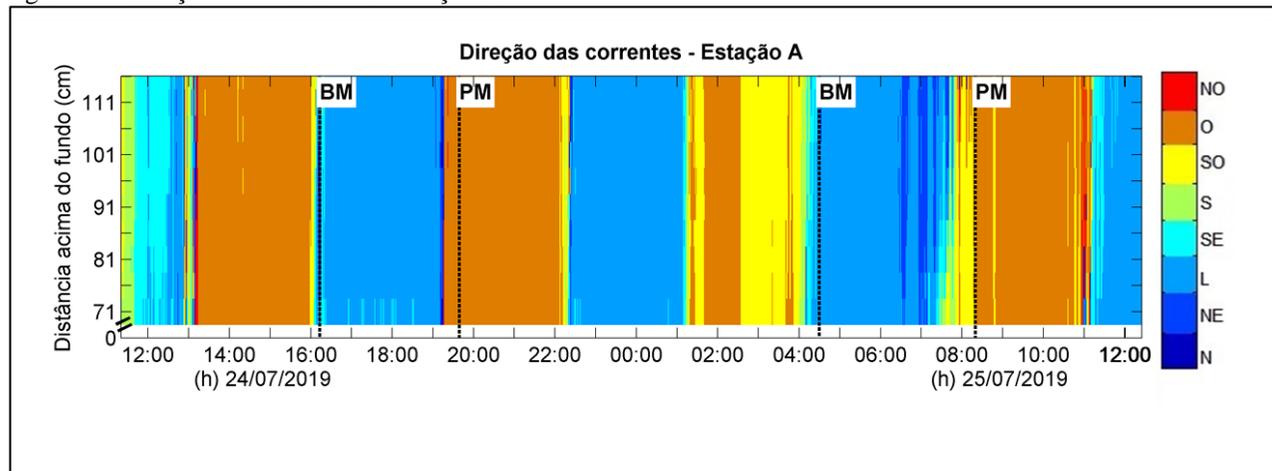
Figura 47 - Intensidade das correntes na estação A



Legenda: Médias da intensidade das correntes calculadas a intervalos de 1 minuto. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

Figura 48 - Direção das correntes na estação A



Legenda: Médias da direção das correntes calculadas a intervalos de 1 minuto. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

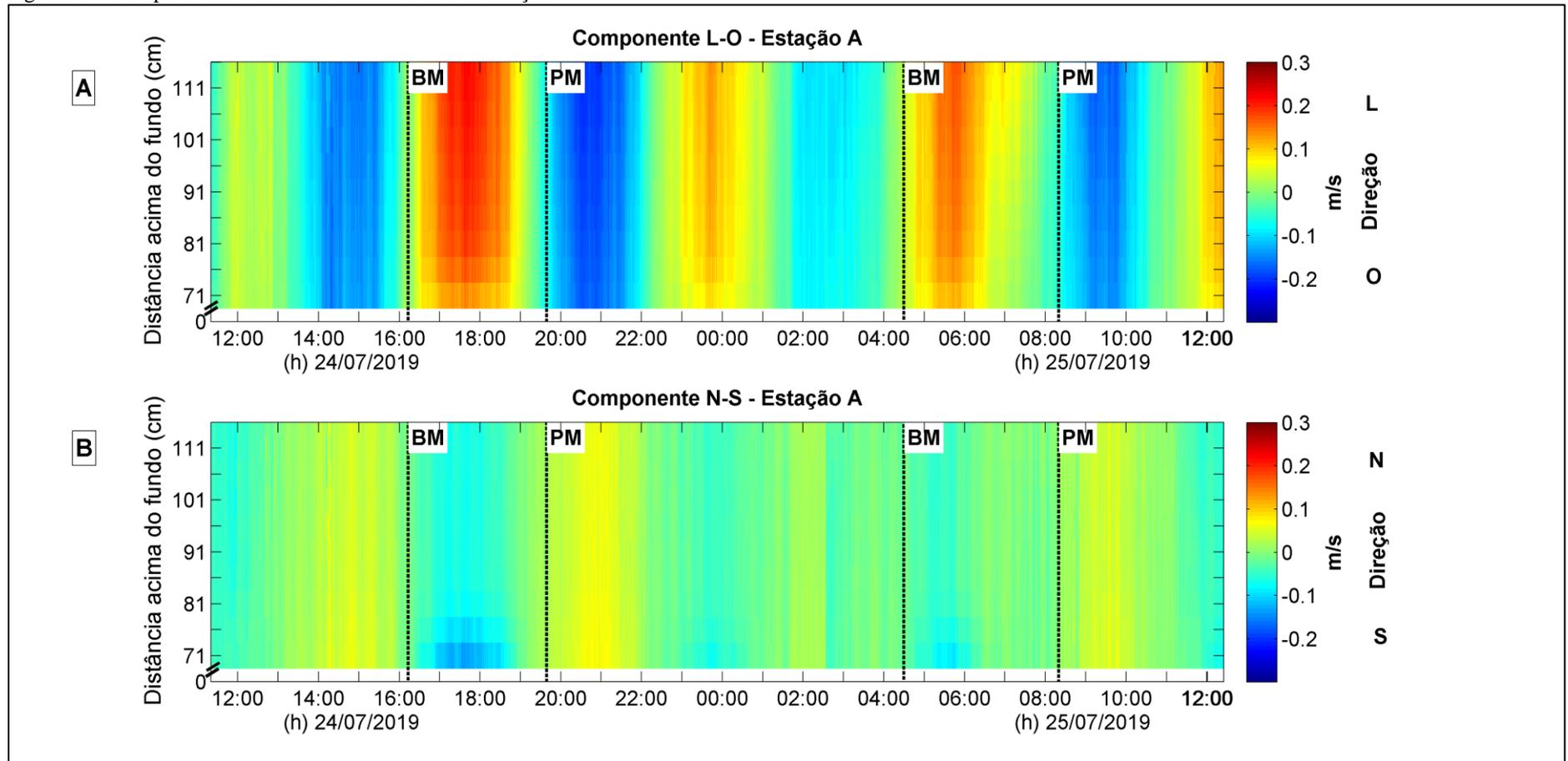
Fonte: A autora, 2020.

A componente L-O (Figura 49A) apresentou correntes com velocidades máximas de 0,22 m/s na direção L e 0,20 m/s na direção O. Na primeira vazante as correntes para O apresentaram velocidades máximas de 0,17 m/s, enquanto as correntes para leste alcançaram 0,07 m/s. Na primeira enchente (16h05min às 19h15min do dia 24/07/2019), as correntes apresentaram-se em direção a L, com velocidades máximas de 0,22 m/s. Na segunda vazante (19h15min às 04hs do dia 25/07/2019), registrou-se uma inversão de correntes de O para L, próximo das 22h00min, e durante as horas finais uma nova inversão ocorreu, e as correntes se mantiveram com velocidade próxima de 0,1m/s. Por fim, durante a segunda enchente (04h às 7h45min do dia 25/07/2019), as correntes apresentaram velocidades de 0,17 m/s para L e 0,03 m/s para O.

No geral, a componente N-S (Figura 49B) registrou velocidades menores do que a componente L-O. As correntes dirigidas para N apresentaram velocidade máxima de 0,08 m/s e as correntes para S, 0,14 m/s. Durante a primeira vazante, as correntes registradas apresentaram valor máximo de 0,07 m/s para S, e próximo de 13h invertem para N. Durante o período de maré enchente subsequente (16h05min às 19h15min do dia 24/07/2019), os fluxos junto ao fundo apresentaram as maiores velocidades registradas ao longo de todo o fundeio (0,14 m/s para S). Na vazante subsequente (19h15min às 04hs do dia 25/07/2019) as correntes apresentam velocidades máximas de 0,08m/s para N e 0,07m/s para S. Na última enchente (04hs às 7h45min do dia 25/07/2019), as correntes apresentaram direção predominante para S de até 0,1 m/s.

Na Figura 50 são apresentadas a direção e a intensidade das correntes em três posições ao longo da coluna d'água na estação A. Ambas são semelhantes nas três posições durante as 25 horas de medições. No início do fundeio as correntes apresentam direção para S e próximo das 13h invertem para NO. Na segunda vazante (19h15min às 04h do dia 25/07/2019), as correntes para NO são mais intensas do que as correntes para SE. A inversão das correntes durante o período de vazante está associada a picos de maré menos intensos, reflexo da influência de determinados constituintes harmônicos da maré. Já durante as enchentes as correntes apresentam direção para SE, coincidindo com o padrão geral observado.

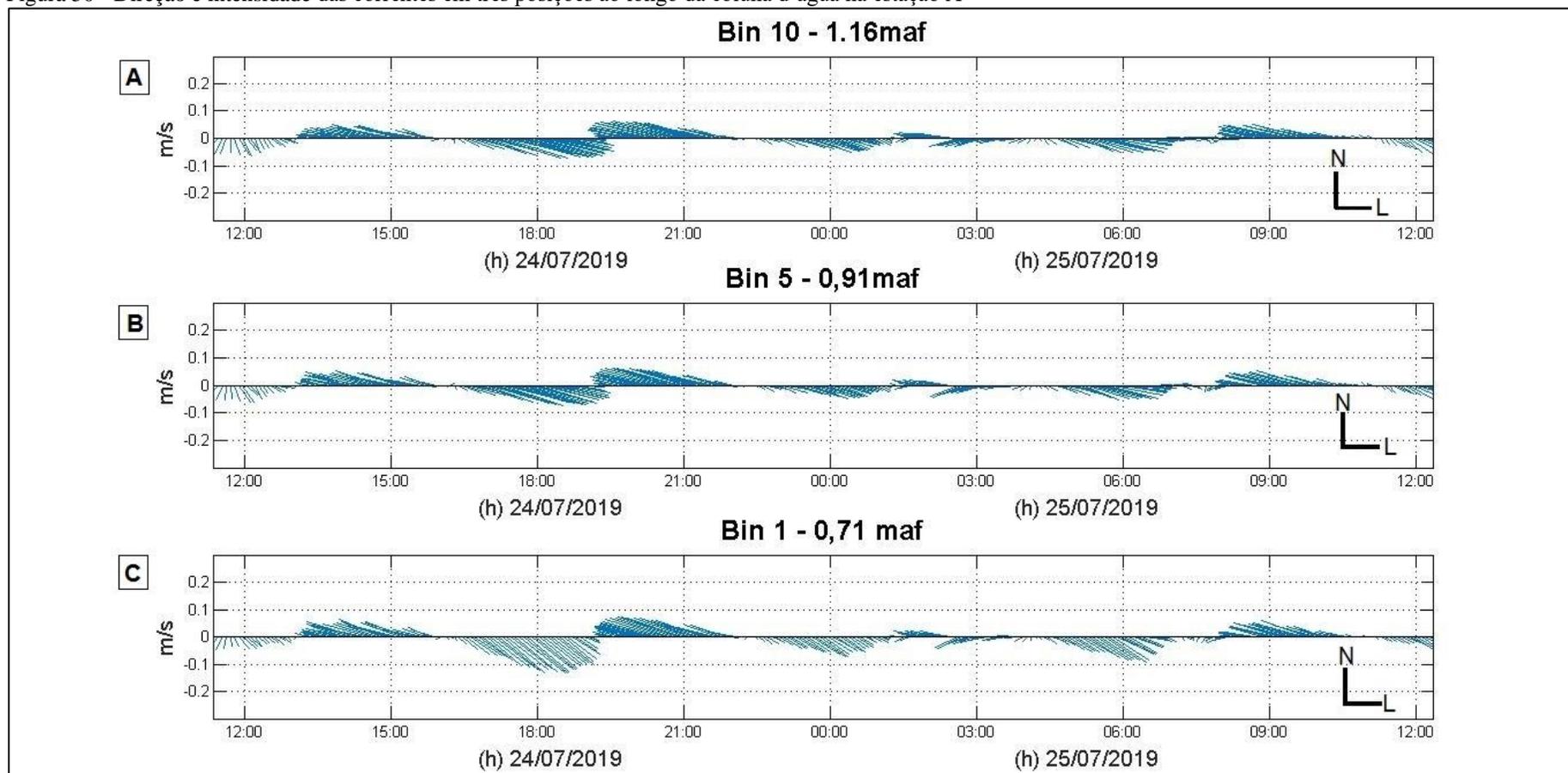
Figura 49 - Componentes L-O e N-S das correntes na estação A



Legenda: (A) Componente L-O das correntes na estação A. (B) Componente N-S das correntes na estação A. Médias a intervalos de 1 minuto. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

Figura 50 - Direção e intensidade das correntes em três posições ao longo da coluna d'água na estação A



Legenda: (A) 1,16 maf; (B) 0,91 maf; (C) 0,71 maf. Médias a intervalos de 5 minutos.

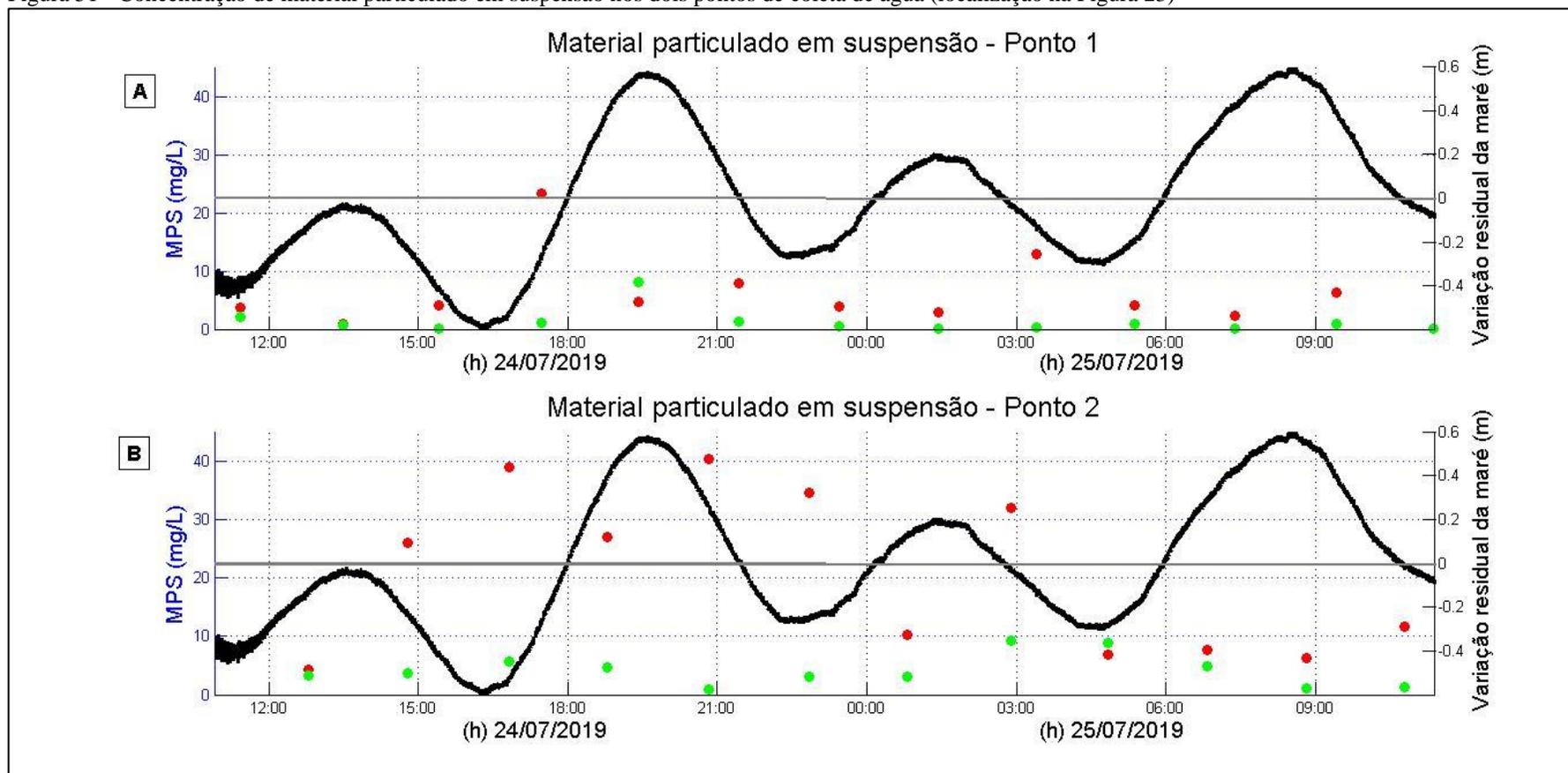
Fonte: A autora, 2020.

A concentração de material particulado em suspensão (MPS) na estação A, determinada próximo ao fundo (média de 6,3 mg/L) foi maior que na superfície (média de 1,1 mg/L) (Figura 51A). Durante a primeira vazante os valores encontrados na superfície da coluna d'água variaram de 0,61 a 2 mg/L, e próximo ao fundo foi registrada concentração de até 3,64 mg/L. Durante o período de enchente subsequente (16h05min às 19h15min do dia 24/07/2019), os valores chegam 23,3 mg/L no fundo, coincidindo com os picos de velocidade. Na segunda vazante (19h15min às 04h do dia 25/07/2019), a concentração tanto na superfície (entre 0,2 e 8 mg/L) como no fundo (entre 3 e 12,9 mg/L) diminui. Na última enchente (04h às 7h45min do dia 25/07/2019), em superfície e próximo ao fundo a concentração máxima de MPS alcança, respectivamente, valores até 1 mg/L, e 4 mg/L.

A Figura 52 representa a amplitude do eco sem correção (Figura 52A) e corrigida (Figura 52B) quanto às perdas por absorção e atenuação da energia acústica. Durante o fundeio, a amplitude do eco corrigida variou entre 50 dB e 64,6 dB, com média de 56 dB. Durante a primeira vazante registrou-se amplitude máxima de 62,2 dB e na primeira enchente (16h05min às 19h15min do dia 24/07/2019) foram registrados os maiores valores de amplitude (64,6 dB). No início da segunda vazante (19h15min às 04h do dia 25/07/2019) a amplitude chegou a 63,1 dB. Na segunda enchente (04h às 7h45min do dia 25/07/2019) foi registrada amplitude máxima de 57,9 dB ao longo do período.

Para as conversões dos valores de amplitude do sinal acústico corrigido em concentrações de MPS foi realizado o procedimento descrito no item 4.3.2.1. Na Figura 53 está representada a relação entre o sinal acústico corrigido, a concentração de sedimentos obtida por método direto (filtração de amostras de água) e a concentração estimada a partir dos valores de amplitude do sinal acústico corrigido (bin 1), localizado a 71cmaf. É possível relacionar os períodos de maior amplitude do eco a maior concentração de sedimentos na coluna d'água. Nos períodos de enchente a concentração média de MPS é maior do que nos períodos de vazante. Além disso, as concentrações de sedimentos estimadas a partir da amplitude do eco corrigida, variaram entre 1,7 e 21,6 mg/L, enquanto que as concentrações medidas diretamente apresentaram valores entre 0,02 e 23,3 mg/L no fundo.

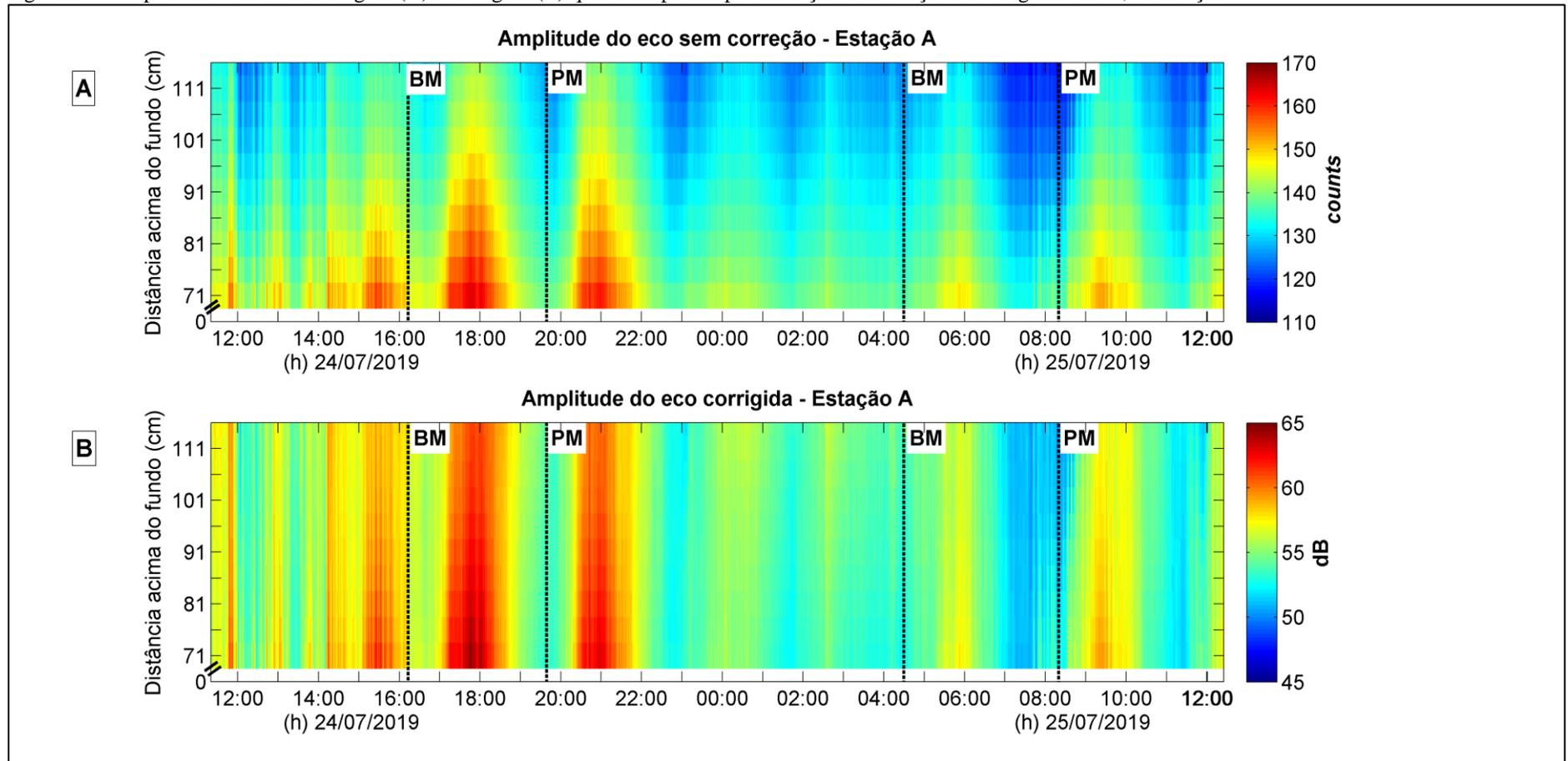
Figura 51 - Concentração de material particulado em suspensão nos dois pontos de coleta de água (localização na Figura 23)



Legenda: (A) Material particulado em suspensão na estação A; (B) Material particulado em suspensão na estação C. Os símbolos em **vermelho** indicam as amostras coletadas no **fundo** e os símbolos em **verde** amostras coletadas na **superfície**. A linha preta representa a variação do nível da água em relação ao nível médio amostrado obtido com o perfilador acústico. Médias a intervalos de 1 minuto.

Fonte: A autora, 2020.

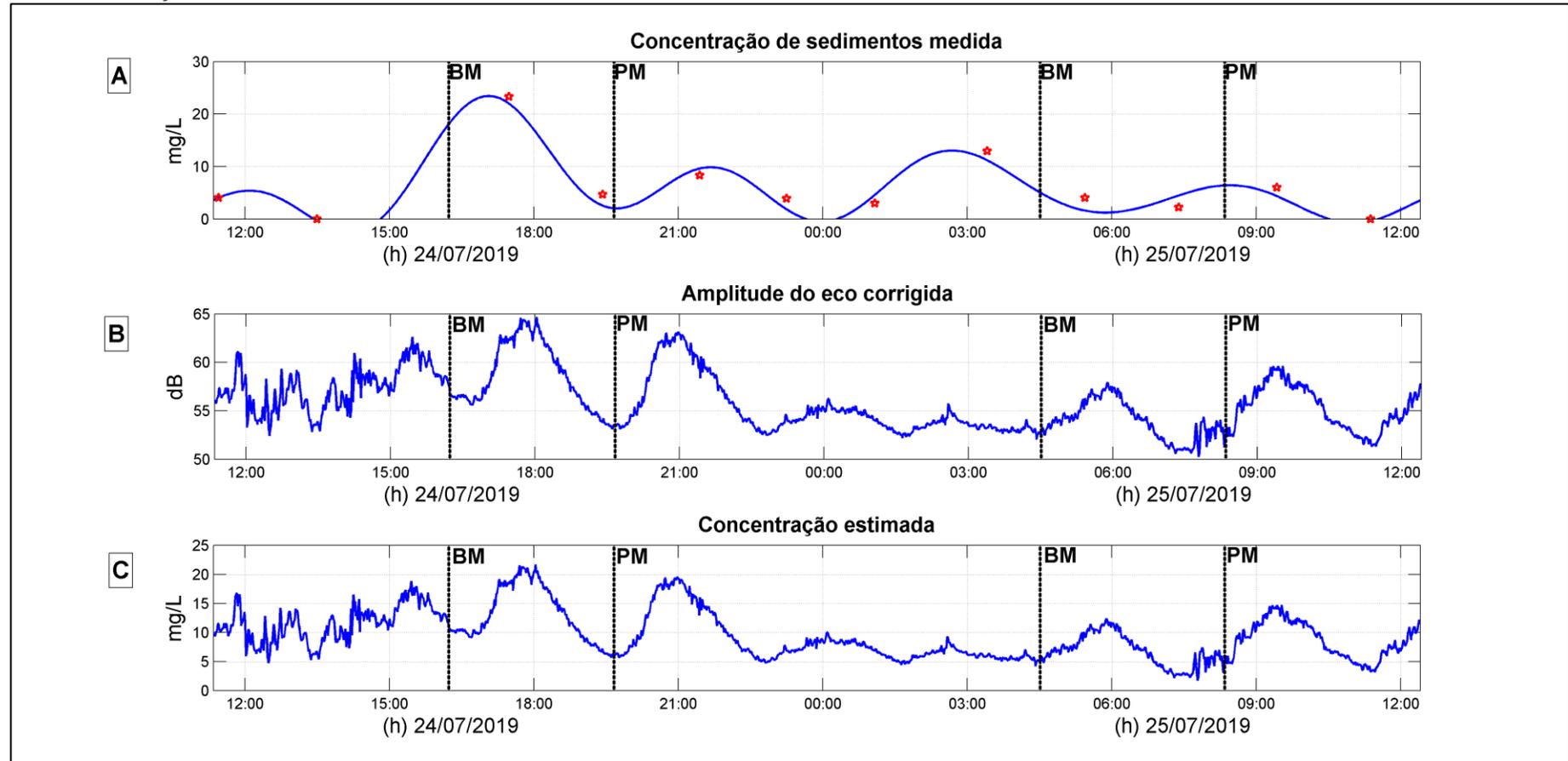
Figura 52 - Amplitude do eco não corrigida (A) e corrigida (B) quanto às perdas por absorção e atenuação da energia acústica, na estação A



Legenda: Amplitude do eco: (A) sem correção (*counts*); (B) corrigido (dB). Médias a intervalos de 1 minuto. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

Figura 53 - Relação entre a concentração de sedimentos obtida por método direto, sinal acústico corrigido e concentração estimada a partir da amplitude do sinal acústico, na estação A



Legenda: (A) Concentração de sedimentos próximo ao fundo determinada a partir da coleta de amostras de água. Os símbolos vermelhos indicam os momentos em que as amostras foram coletadas; (B) Amplitude do eco corrigida quanto às perdas por absorção e atenuação da energia acústica; (C) Concentração de sedimentos estimada a partir dos dados de amplitude do eco corrigida. Médias a intervalos de 1 minuto. Dados referentes ao bin 1, localizado a 71 cmaf. A linha preta vertical indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

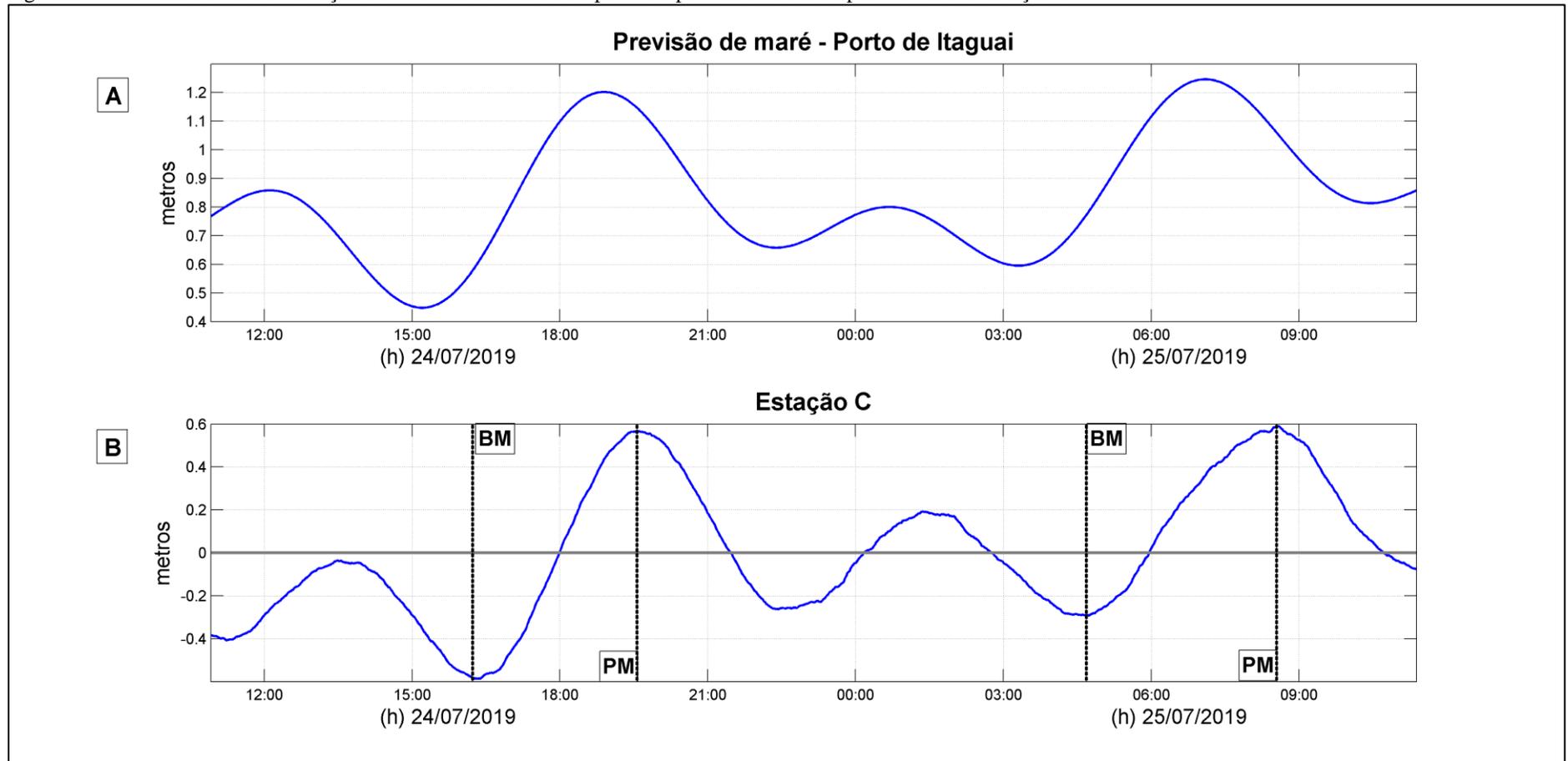
### 5.3.3 Estação C

Os dados da estação C foram coletados a partir de 0,37maf (profundidade local de 3 metros), a uma distância de aproximadamente 540 metros dos bancos de orientação NE-SO (Figura 25b) A Figura 54 demonstra o bom ajuste entre os dados de pressão adquiridos pelo equipamento e a previsão de maré, observando-se uma subida mais rápida e duas baixa-mares por ciclo.

Quanto à intensidade das correntes (Figura 55), o valor máximo foi de 0,22 m/s, com média de 0,08 m/s. Próximo ao fundo (37cmf), foram registradas velocidades médias de 0,07m/s enquanto a 112cmf a média da velocidade das correntes foi de 0,09m/s, com valor máximo de 0,22m/s. No geral, durante os períodos de enchente as correntes são mais intensas (média 0,1m/s) do que nos períodos de vazante (0,06m/s). Assim como na estação A, a onda de maré apresenta características estacionárias, com os picos de velocidades apresentados aproximadamente nas meias marés de enchente e vazante.

Em relação à direção das correntes, as principais direções registradas nesta estação são NE e SO. Durante as vazantes predominam os fluxos para SO e na enchente o fluxo predominante é para NE. Na Figura 56 é possível observar que no final da primeira e segunda enchente a direção das correntes começa a inverter, mas o nível da água continua a subir. Esta inversão ocorre cerca de 12 minutos antes das preamares.

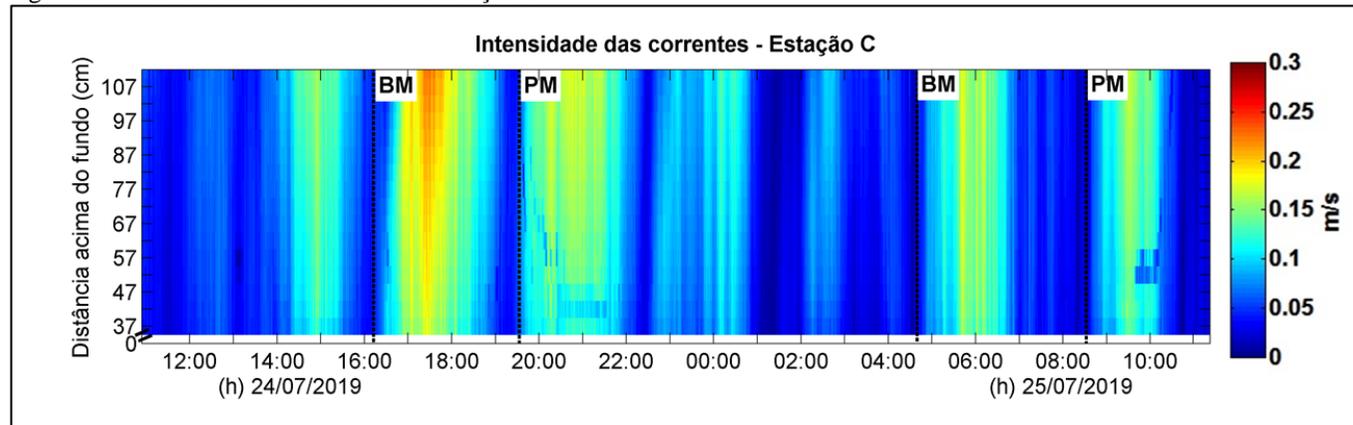
Figura 54 - Previsão de maré e variação do nível residual obtido a partir do perfilador acústico posicionado na estação C



Legenda: (A) Previsão da maré segundo a tábua de maré da DHN (Estação Porto de Itaguai). (B) Média do nível residual calculada a intervalos de 1 minuto na estação C. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

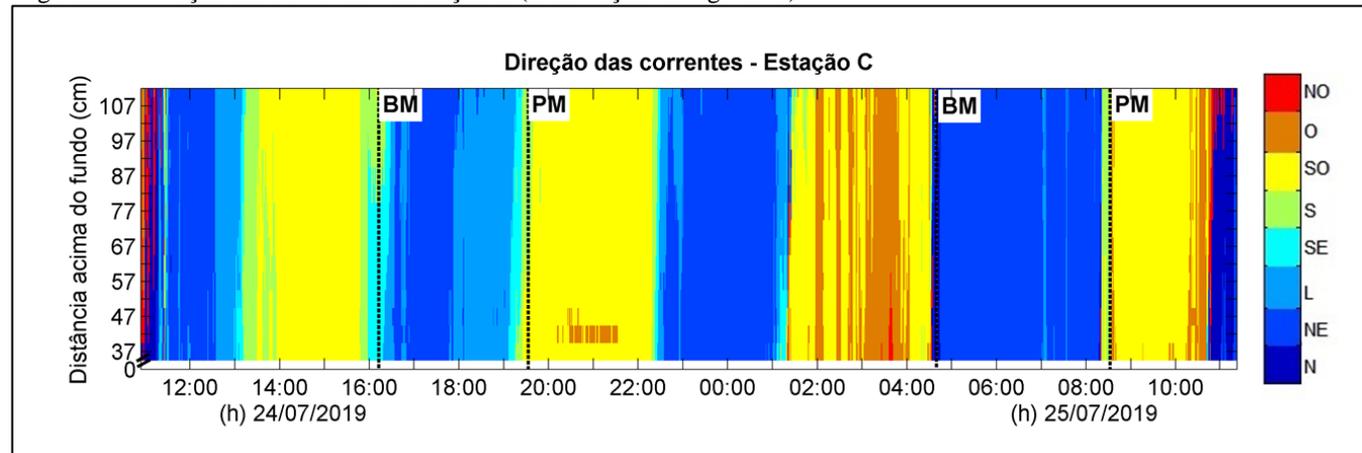
Figura 55 - Intensidade das correntes na estação C



Legenda: Médias da intensidade das correntes calculadas a intervalos de 1 minuto. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

Figura 56 - Direção das correntes na estação C (localização na Figura 23)



Legenda: Médias da direção calculadas a intervalos de 1 minuto. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

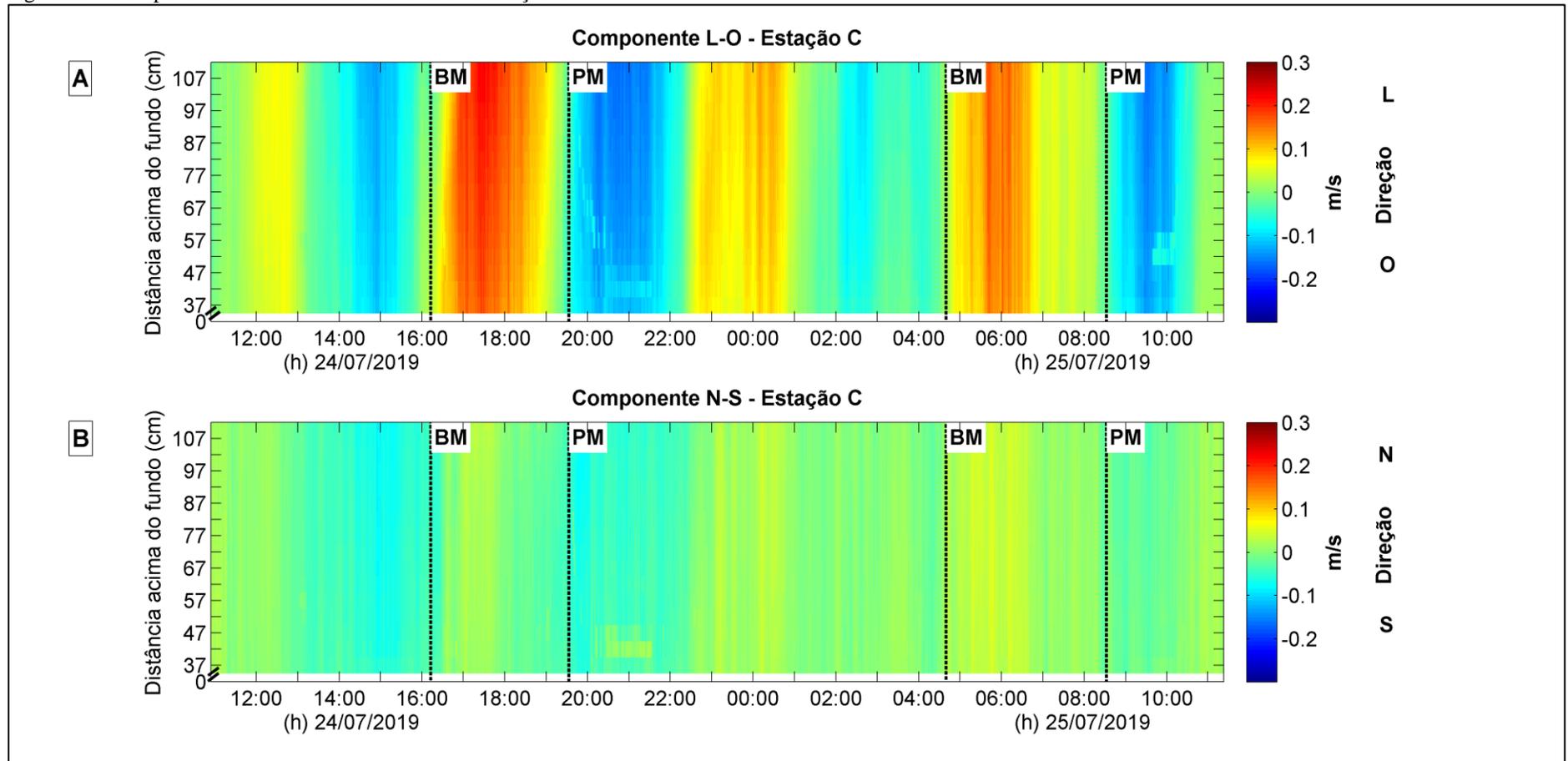
Fonte: A autora, 2020.

A componente L-O (Figura 57A) apresentou velocidades máximas de 0,22 m/s na direção L e 0,17 m/s na direção O. No início do fundeio, as correntes apresentam-se em direção a L; próximo das 14h da tarde do dia 24/07/2019 registrou-se uma inversão das correntes para O ao longo de toda a coluna d'água amostrada (37 a 112cm). Às 16h13min uma nova inversão acontece, coincidindo com a primeira baixa-mar, e as correntes voltam a apresentar direção para L, com velocidades máximas de 0,22m/s. No início da segunda vazante (19h20min do dia 24/07/2019 às 04h34min do dia 25/07/2019), as correntes apresentaram valores de até 0,17 m/s para oeste e após as 22h, invertem para L apresentando velocidades de até 0,13m/s. Entre 1h e 02h do dia 25/07/2019, uma nova inversão ocorre para O, e as correntes se mantem a velocidades bem próximas a zero. Por fim, durante a segunda enchente (04h34min às 8h20min do dia 25/07/2019) as correntes fluíram para L, com velocidades de até 0,17 m/s.

A componente N-S registrou velocidades menores do que a componente L-O (Figura 57B). As correntes dirigidas para N apresentaram velocidade máxima de 0,05 m/s e as correntes para S, de 0,08 m/s. No início do fundeio, as correntes se dirigiram para S, com velocidades de até 0,08 m/s. Na primeira enchente (16h13min às 19h20min do dia 24/07/2019), as correntes apresentaram velocidades de até 0,05 m/s para S e 0,03 m/s para N. No início da segunda vazante (19h20min do dia 24/07/2019 às 04h34min do dia 25/07/2019), as correntes apresentaram velocidades máximas de 0,08 m/s para S e depois invertem para N, onde chegam a 0,04 m/s. Na última enchente (04h34min às 8h20min do dia 25/07/2019), as correntes dirigem-se para N com velocidades de até 0,05 m/s.

A Figura 58 representa a direção e a intensidade das correntes em três posições ao longo da coluna d'água na estação C. Na primeira vazante as correntes apresentam direção para S e SO. Na segunda vazante (19h20min do dia 24/07/2019 às 04h34min do dia 25/07/2019) as correntes apresentam direção, ora para SO ora para NE, com as correntes para SO apresentando-se mais intensas. Tanto na primeira (16h13min às 19h20min do dia 24/07/2019) como na segunda enchente (04h34min às 8h20min do dia 25/07/2019) as correntes tem direção para NE.

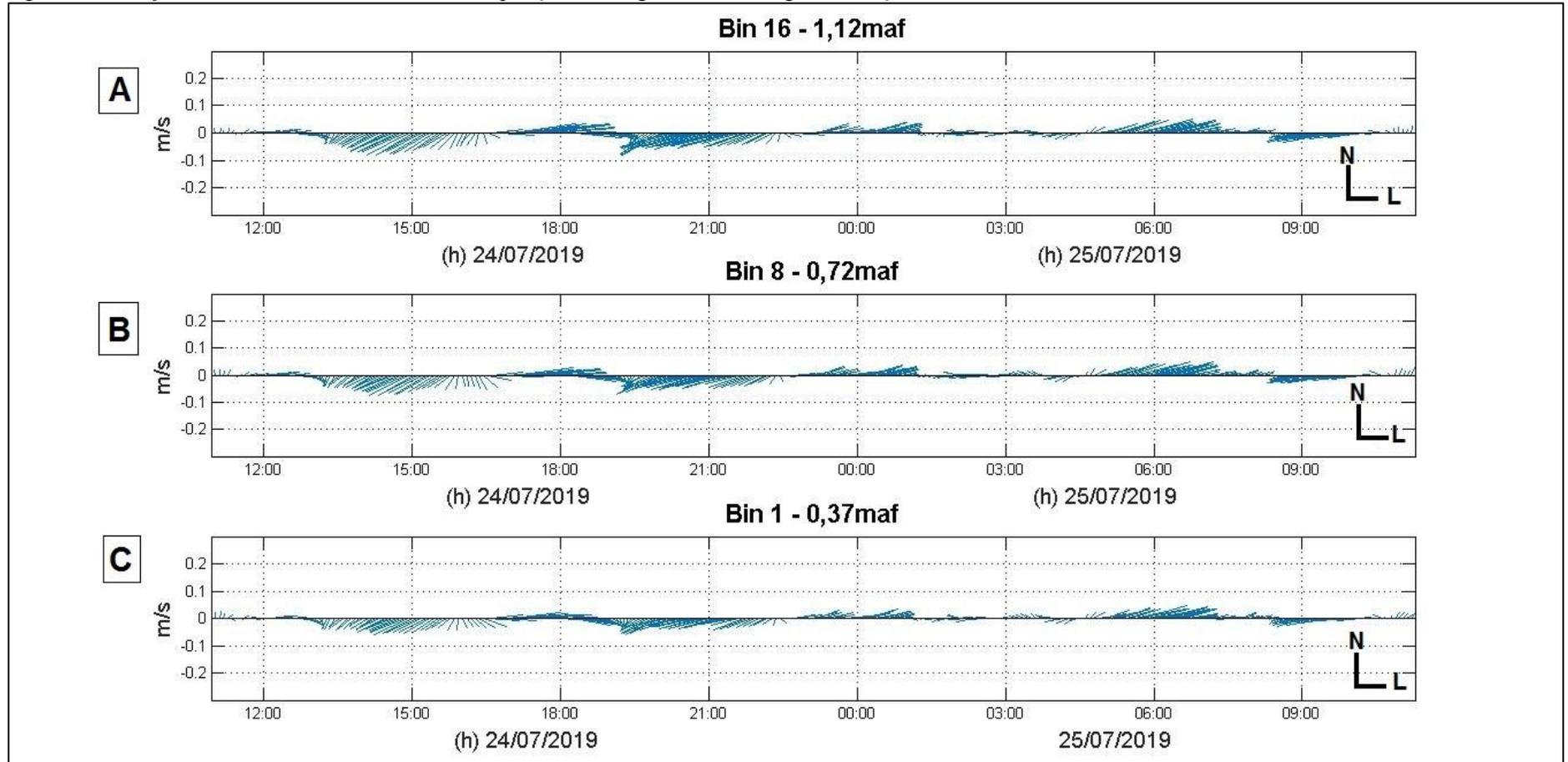
Figura 57 - Componentes L-O e N-S das correntes na estação C



Legenda: (A) Componente L-O das correntes na estação C. (B) Componente N-S das correntes na estação C. Médias a intervalos de 1 minuto. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

Figura 58 - Direção e intensidade das correntes em três posições ao longo da coluna d'água na estação C



Legenda: (A) 1,12 maf; (B) 0,72 maf; (C) 0,37 maf. Médias a intervalos de 5 minutos.

Fonte: A autora, 2020.

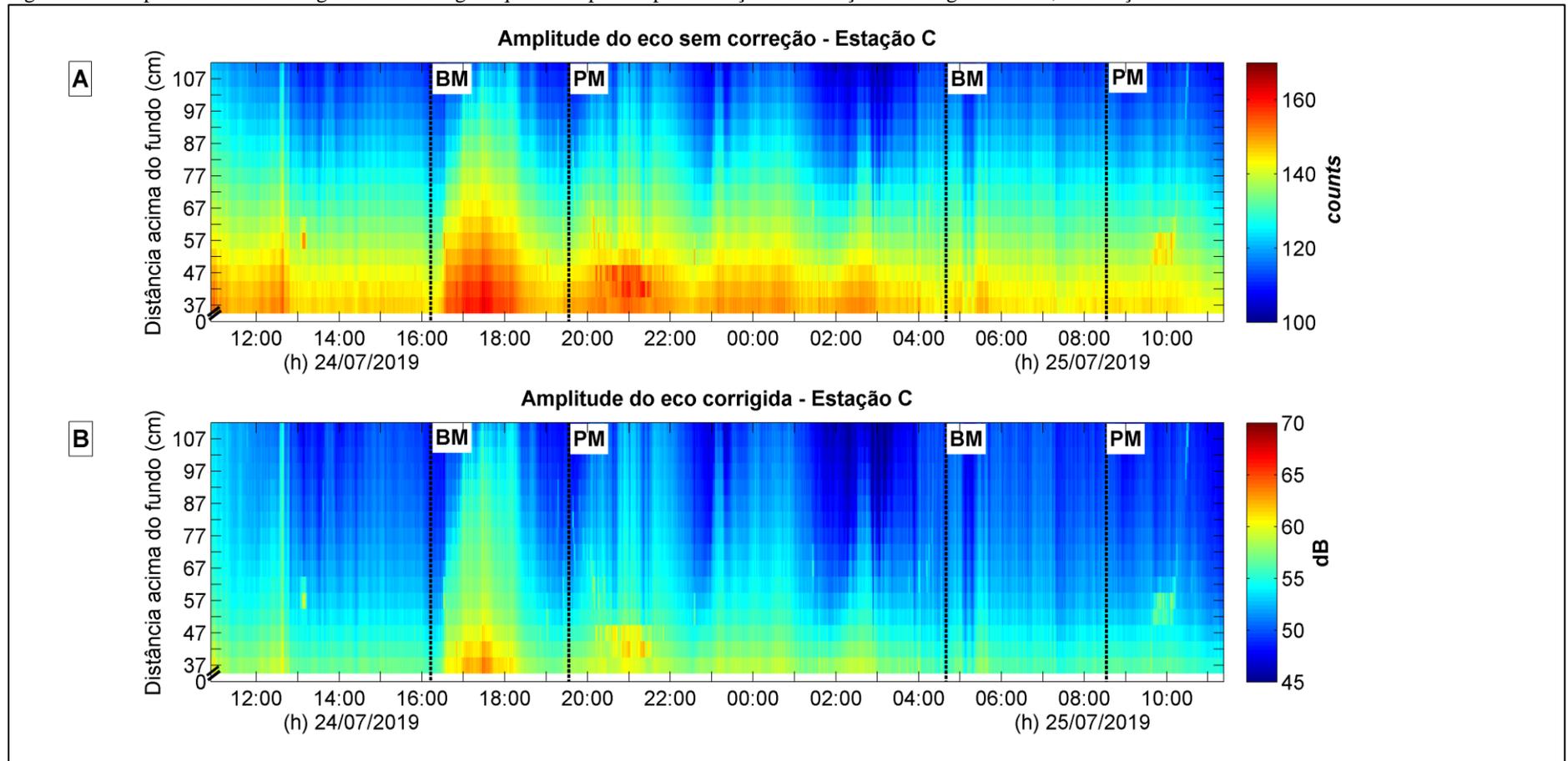
A concentração de material particulado em suspensão (MPS) na estação C (Figura 23), registrada próximo ao fundo (média de 21,6 mg/L) foi maior que na superfície (média de 5,3 mg/L) (Figura 51B). No início do fundeio os valores encontrados na superfície da coluna d'água variaram de 3,3 a 5,6 mg/L, e próximo ao fundo se manteve entre 4,2 e 26 mg/L. Durante a primeira enchente (16h13min às 19h20min do dia 24/07/2019) os valores chegam a um máximo de 5,6 mg/L na superfície e 39 mg/L no fundo. Na segunda vazante (19h20min do dia 24/07/2019 às 04h34min do dia 25/07/2019), foram registradas as maiores concentrações de sedimentos nesta campanha amostral (40,3 mg/L no fundo e 9,2 mg/L na superfície). Na última enchente (04h34min às 8h20min do dia 25/07/2019), a concentração de sedimentos na superfície variou entre 4,9 e 8,8 mg/L, e 6,9 e 7,6 mg/L no fundo.

Na Figura 59 é apresentada a amplitude do eco sem correção (Figura 59A) e corrigida (Figura 59B) quanto às perdas por absorção e atenuação da energia acústica. Durante o fundeio, a amplitude corrigida variou entre 45 dB e 64,3 dB, com média de 52,7 dB. Na primeira vazante a amplitude do eco média registrada foi de 52,7 dB. Na enchente subsequente, entre 17h e 18h, foi registrado o maior valor de amplitude do eco (64,3 dB) de todo o fundeio. Na segunda vazante (19h20min do dia 24/07/2019 às 04h34min do dia 25/07/2019) a amplitude máxima chegou a 60,5 dB. Na última enchente (04h34min às 8h20min do dia 25/07/2019) os valores se mantiveram entre 47 e 58,5 dB.

A Figura 60 representa a relação entre o sinal acústico corrigido, a concentração de sedimentos obtida a partir da filtração de amostras de água e a concentração estimada a partir dos valores de amplitude do sinal acústico corrigido no bin 1, localizado a 37cm. No geral, é possível relacionar os períodos onde foram registradas as maiores amplitude do eco, a períodos de maior concentração de sedimentos na coluna d'água. Além disso, as concentrações de sedimentos estimadas a partir da amplitude corrigida variaram entre 0 e 168,7 mg/L, enquanto que as concentrações obtidas pela coleta de água apresentaram valores entre 4,2 e 40,3 mg/L no fundo. Ainda assim, o padrão geral entre ambas apresentou um ajuste considerável.

Quando comparados os resultados obtidos nas estações A e C, esta última apresentou maior variação das concentrações obtidas pela filtração de amostras de água ( $\Delta[MPS] = 36,1$  mg/L) e menor variação nos valores de amplitude corrigida. Com isso, o coeficiente angular obtido a partir da reta de regressão entre MPS e amplitude corrigida (Figura 28) na estação C (7,2) apresentou ordem de grandeza 12x maior, quando comparado ao coeficiente angular obtido a partir dos dados da estação A (0,6), onde  $\Delta[MPS] = 7,85$  mg/L. Vale destacar que, amostras que se afastavam da tendência geral observada foram desconsideradas na análise.

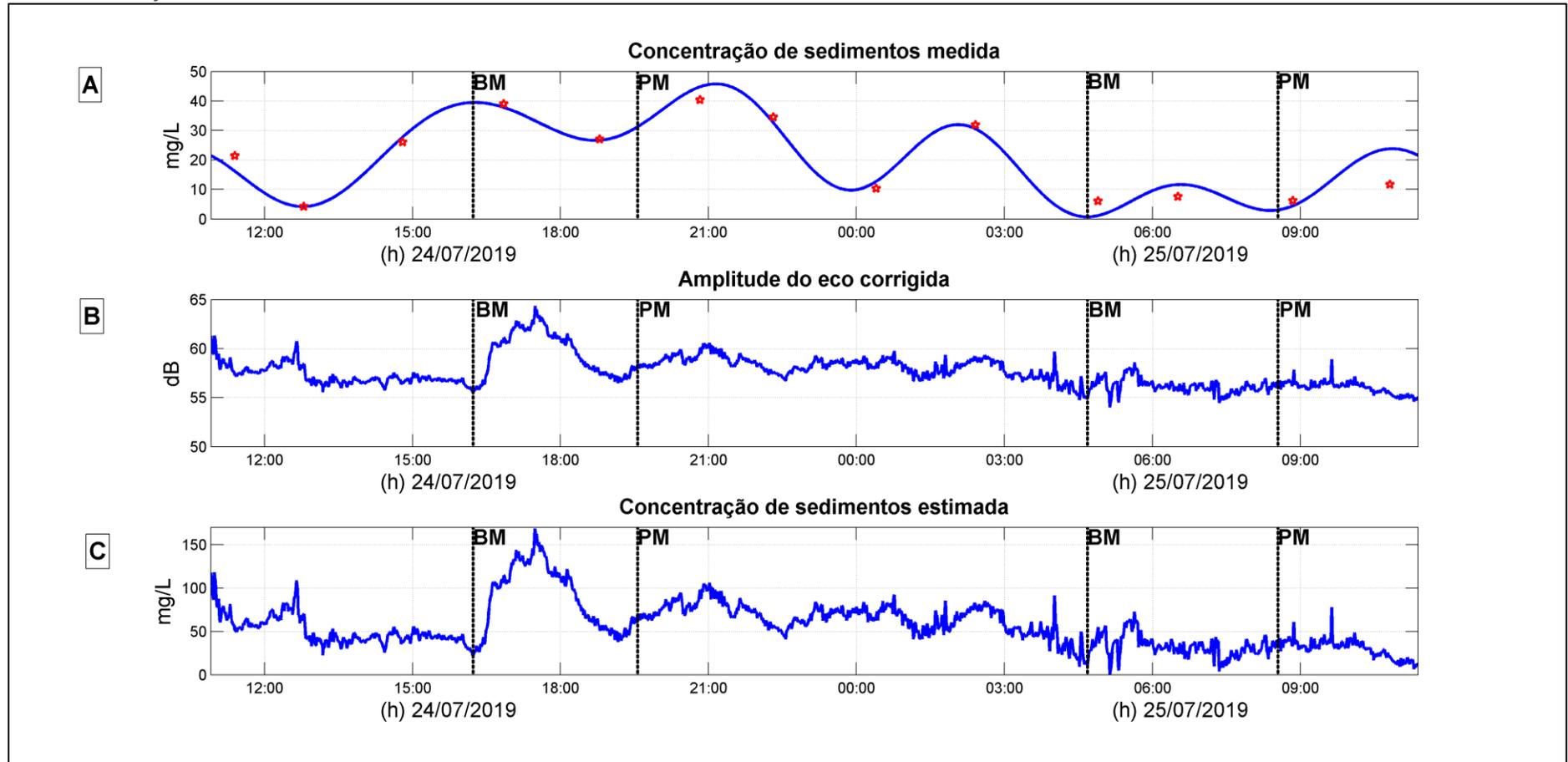
Figura 59 - Amplitude do eco corrigida e não corrigida quanto às perdas por absorção e atenuação da energia acústica, na estação C



Legenda: Amplitude do eco: (A) sem correção (*counts*); (B) corrigido (dB). A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM). Médias a intervalos de 1 minuto

Fonte: A autora, 2020.

Figura 60 - Relação entre a concentração de sedimentos obtida por método direto, sinal acústico corrigido e concentração estimada a partir da amplitude do sinal acústico, na estação C



Legenda: (A) Concentração de sedimentos próximo ao fundo determinada a partir da coleta de amostras de água. Os símbolos vermelhos indicam os momentos em que as amostras foram coletadas; (B) Amplitude do eco corrigida quanto às perdas por absorção e atenuação da energia acústica; (C) Concentração de sedimentos estimada a partir dos dados de amplitude do eco corrigida (Figura 28). Médias a intervalos de 1 minuto. Dados referentes ao bin 1, localizado a 37 cmaf. A linha preta vertical indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

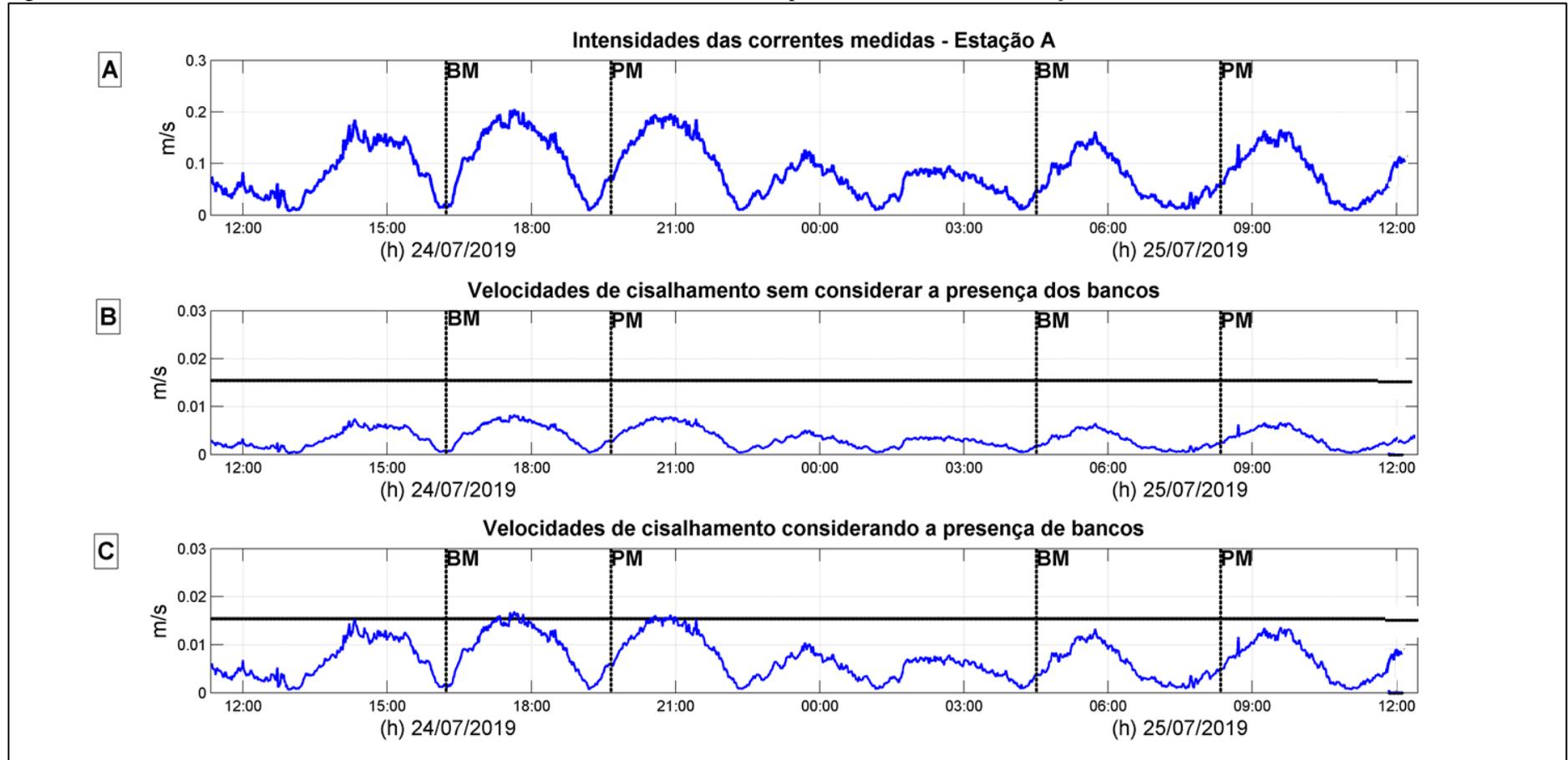
Fonte: A autora, 2020.

#### 5.4 Limiar para remobilização de sedimentos

Na Figura 61 estão representadas a intensidade das correntes na estação A obtidas com o perfilador acústico no bin 1 (71 cmaf) e as velocidades de cisalhamento obtidas a partir do modelo SEDTRANS, considerando a presença, ou não, das feições de fundo. No geral, quando não são inseridos os parâmetros dos bancos no modelo (altura e comprimento), a velocidade de cisalhamento se mantém abaixo da velocidade de cisalhamento crítica para a remobilização de areias médias (0,015m/s) durante todo o fundeio. No entanto, quando é considerada a presença dos bancos, a velocidade de cisalhamento se aproxima do valor crítico próximo das 15h e 18h, e também às 21h do dia 24/07/2019, o que indica a possibilidade de remobilização de sedimentos; nestes intervalos, a velocidade de cisalhamento junto ao fundo foi cerca de 0,017 e 0,016m/s, respectivamente, superando assim a velocidade de cisalhamento crítica.

Na Figura 62 estão representadas a intensidade das correntes obtidas com o perfilador acústico no bin 1 (37cmaf) e as velocidades de cisalhamento obtidas a partir do modelo, com e sem a presença dos bancos na estação C. No geral, como observado na estação A, quando não são inseridos os parâmetros dos bancos no modelo (altura e comprimento), as velocidades de cisalhamento se mantêm abaixo da velocidade de cisalhamento crítica para a remobilização de areias médias (0,016m/s) durante todo o fundeio (Figura 62B). Em contrapartida, quando considerada a presença dos bancos, as velocidades de cisalhamento (Figura 62C), se aproximam (mas não superam) a velocidade de cisalhamento crítica próximo das 18h do dia 24/07/2019 e às 06h do dia 25/07/2019, quando alcançam, próximo ao fundo, 0,015 m/s e 0,013 m/s, respectivamente.

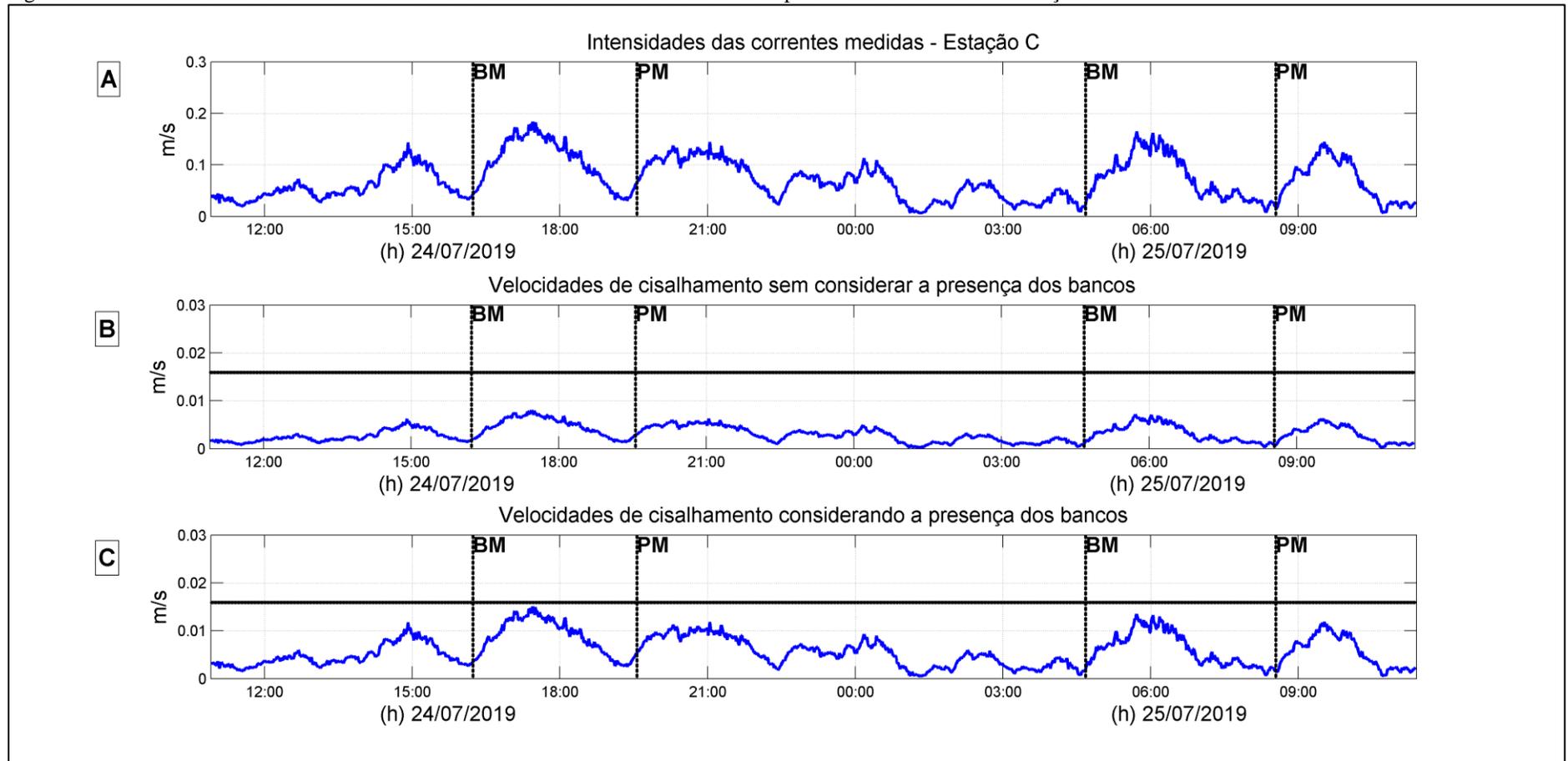
Figura 61 – Intensidade das correntes medidas e velocidade de cisalhamento calculadas pelo modelo SedTrans na estação A



Legenda: (A) Intensidade das correntes medidas no bin 1 (71 cmaf); (B) e (C) Velocidade de cisalhamento obtida pelo modelo SedTrans, respectivamente, sem considerar a presença dos bancos e com presença dos bancos. A linha preta paralela ao eixo x representa a velocidade de cisalhamento crítica para início do transporte de areias médias como carga de fundo. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

Figura 62 - Intensidade das correntes medidas e velocidade de cisalhamento calculadas pelo modelo SedTrans na estação C



Legenda: (A) Intensidade das correntes no bin 1 (37cmaf); (B) e (C) Velocidade de cisalhamento obtida pelo modelo SedTrans, respectivamente, sem considerar a presença dos bancos e com presença dos bancos. A linha preta paralela ao eixo x representa a velocidade de cisalhamento crítica para início do transporte de areias médias como carga de fundo. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

## 6 DISCUSSÃO

### 6.1 Caracterização dos bancos transversais

#### 6.1.1 Geometria dos bancos

Dois grupos de bancos transversais, um com orientação NE-SO e outro com orientação NO-SE ocorrem na margem interna da restinga da Marambaia (Figura 15). Com base na classificação proposta por Barçilon e Lau (1973), pode-se dizer que cada grupo corresponde a uma família de bancos transversais. Na Tabela 15 são apresentados os parâmetros estatísticos médios dos bancos transversais analisados no presente estudo.

Na literatura, uma série de trabalhos relata a presença de bancos transversais em zonas costeiras associados a outros tipos de feições rítmicas, como o trabalho de Konicki e Holman (2000) que investigaram a presença de bancos transversais e de bancos paralelos à costa na praia de Duck (Estados Unidos). Outro exemplo é o trabalho de Ribas e Kroon (2007), que relataram a presença de bancos transversais e bancos crescentes em Noordwijk (Holanda).

A partir da análise das imagens de satélite, pode-se dizer que os bancos transversais investigados no presente estudo se mostram persistentes na linha de costa e, além disso, não estão associados a outro tipo de padrão rítmico costeiro.

Tabela 15 - Parâmetros estatísticos médios dos bancos transversais analisados no presente estudo. Localização dos setores na Figura 16

Setor	Orientação dos bancos	$\lambda$ (m)	Desvio Padrão (m)	$\Delta x$ (m)	Número de bancos	Bancos p/ km	Taxa de migração (m/dia)
1	NE- SO	87	44	20 a 680	92	8	0,03/0,04
	NO - SE	538	177	170 - 875	18	2	0,02/0,04
2	NE- SO	66	25	24 a 389	51	13	0,04/0,05
3	NE-SO	73	44	30 a 330	36	9	0,01
4	NE- SO	65	24	32 a 220	15	3	-

Fonte: A autora, 2020.

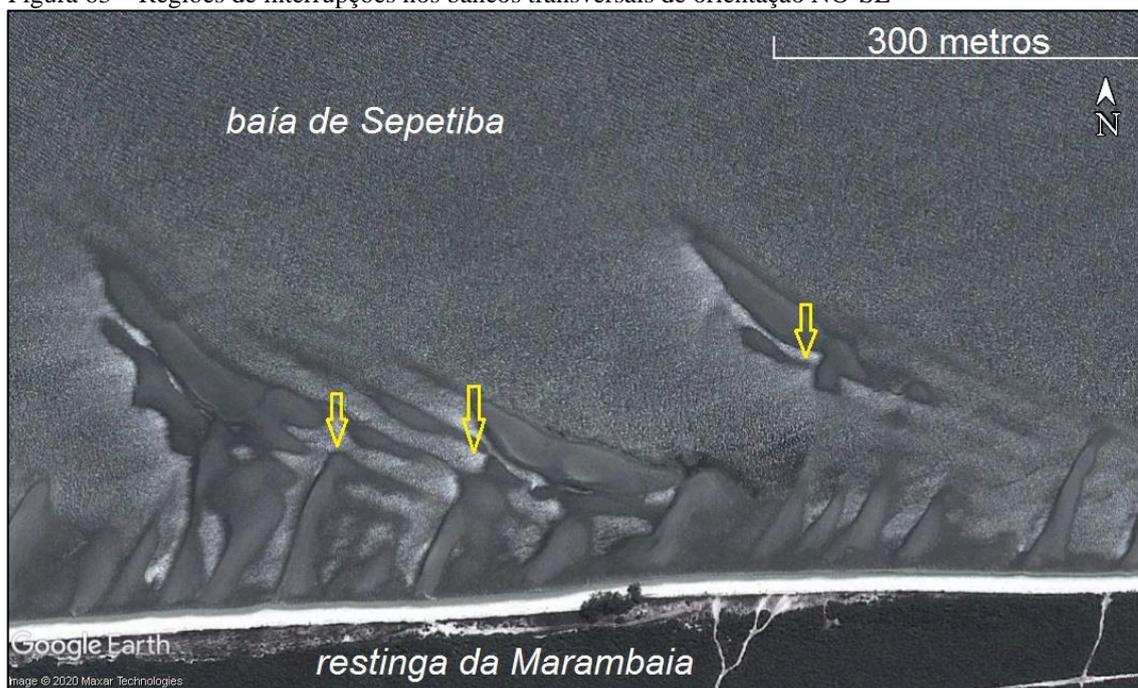
Os bancos transversais de orientação NO-SE, que se concentram no setor oeste da restinga (Figura 19), apresentam comprimento de onda médio ( $\lambda$ ) ~7 vezes maior (537 m) e

distância transversal à linha de costa ( $\Delta x$ ) ~4 vezes maior (875m) que os bancos de orientação NE-SO que os sobrepõem. O comprimento de onda médio dos bancos de orientação NO-SE é maior (618 metros) na área onde a linha de costa apresenta curvatura proeminente.

Como já é de se esperar, quanto menor o nível da maré maior a distância transversal em que os bancos de orientação NO-SE puderam ser observados nas imagens. No entanto, as outras características, tais como comprimento de onda, desvio padrão e densidade, determinadas no presente estudo, não apresentaram padrão específico em relação à variação do nível da maré (APÊNDICE D – Tabela 31).

A partir das imagens de satélite foi possível identificar regiões de interrupções sobre estes bancos. Estas zonas de interrupção podem estar associadas à complexidade morfológica do fundo, causada pela sobreposição dos bancos transversais, que alteram a batimetria influenciando na interseção e arrebenção das ondas no local (Figura 63).

Figura 63 – Regiões de interrupções nos bancos transversais de orientação NO-SE



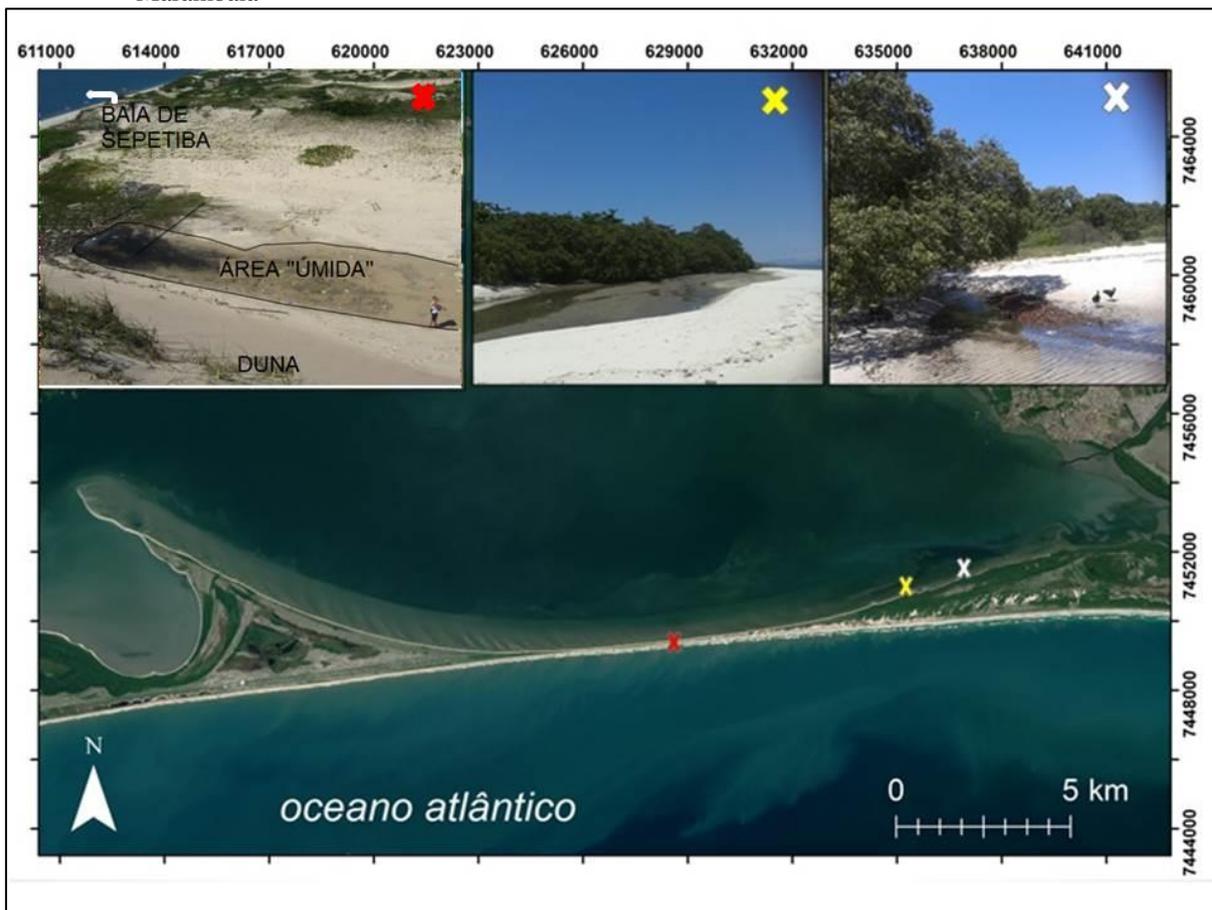
Legenda: As setas em amarelo indicam as interrupções. Imagem do dia 31 de agosto de 2012.

Fonte: GOOGLE EARTH, DIGITAL GLOBE, 2020.

Os bancos transversais de orientação NE-SO são observados ao longo de todos os setores analisados (Figura 16) sobre um terraço de 2 metros de profundidade. Sua concentração no setor 2 é duas a quatro vezes maior quando comparada aos outros setores, refletindo em menores comprimentos de onda (66 metros). Com base nestes dados, sugere-se que a configuração retilínea da linha de costa no setor 2 pode favorecer o desenvolvimento dos bancos

transversais de orientação NE-SO. Outro fator que pode contribuir para o desenvolvimento dos bancos neste setor são zonas de transposição (*overwash*) observadas nas imagens de satélite (Figura 64), e já relatadas por Bahiense et al. (2014), Dadalto (2017) e Carvalho e Guerra (2020).

Figura 64 - Desembocadura de canais intermitentes e indício de transposição na margem interna da restinga da Marambaia



Legenda: Os símbolos amarelo e branco representam pontos de desembocadura de canais. O símbolo vermelho indica possível local de transposição (*overwash*). As fotos que representam as desembocaduras dos canais intermitentes foram registradas no dia 12 de dezembro de 2018 pela autora. A foto que representa o indício de transposição foi retirada do trabalho de Carvalho (2014).

Fonte: A autora, 2020.

Mujal-Colilles et al. (2017) destacam a possibilidade de eventos de transposição (*overwash*) ou até mesmo do rompimento da barreira arenosa durante tempestades severas, ter um papel importante no sistema rítmico interno. Os autores assumem que talvez estas regiões possam atuar como uma perturbação inicial dando o *input* para os mecanismos de retroalimentação entre morfologia e hidrodinâmica, que mais tarde poderiam criar mais bancos e induzir a periodicidade ao longo da costa.

No setor 4 (Figura 16), a concentração de bancos é menor (3/km) e, no geral, quanto mais a leste menor a distância transversal em relação à costa ( $\Delta x$ ). Os canais intermitentes que deságuam no setor leste também poderiam interferir na formação e manutenção dos bancos, ao desestabilizar seus processos de desenvolvimento, fazendo com que as feições sejam menos presentes no setor 4. Por outro lado, o aporte de sedimento carregado para a margem interna da restinga através destes canais (Figura 64) pode ser uma importante fonte para o desenvolvimento das formas de fundo.

Dentro do período analisado foi constatada a maior concentração média de bancos de orientação NE-SO no mês de agosto. Este mês faz parte do inverno, estação marcada pelo período menos chuvoso na região sudeste do Brasil, e pelas incursões de massas de ar frio oriundas do sul do continente (INMET, 2019). Apesar de se tratar de um ambiente protegido, os ventos do quadrante sul, que são mais energéticos do que os do quadrante norte (BORGES, 1990; FRAGOSO, 1999) podem favorecer a atuação de processos hidrodinâmicos que levem à manutenção das zonas de transposição na restinga, favorecendo a formação dos bancos transversais. Porém, devido às limitações do número de imagens disponíveis na plataforma *Google Earth*, no presente estudo não foram analisadas imagens de todos os meses durante o período estudado (Figura 30).

As características dos bancos de orientação NO-SE (distância transversal em relação à costa, comprimento de onda e seu respectivo desvio padrão e densidade) foram comparadas apenas em relação ao nível da maré, dada a disponibilidade da plataforma *Earth Explorer*. No entanto, os dados permitem dizer que, ao longo dos meses a densidade dos bancos de orientação NO-SE não apresentou variações significativas, se mantendo entre 1 e 3 bancos a cada quilômetro. Além disso, a nebulosidade interferiu significativamente na visualização das feições nas imagens, principalmente nos anos de 2016 e 2017. Portanto, para uma análise sazonal completa dos dois grupos de bancos presentes na margem interna da restinga seria necessário um conjunto de dados mais robusto.

#### 6.1.2 Taxas de migração

Com base nos parâmetros texturais de sedimentos de superfície de fundo coletados na baía de Sepetiba, Ponçano (1976) relatou uma faixa de intensa movimentação junto à restinga, atribuindo-a em parte à direção de movimentação que afeta a ponta da Pombeba (Figura 1), e

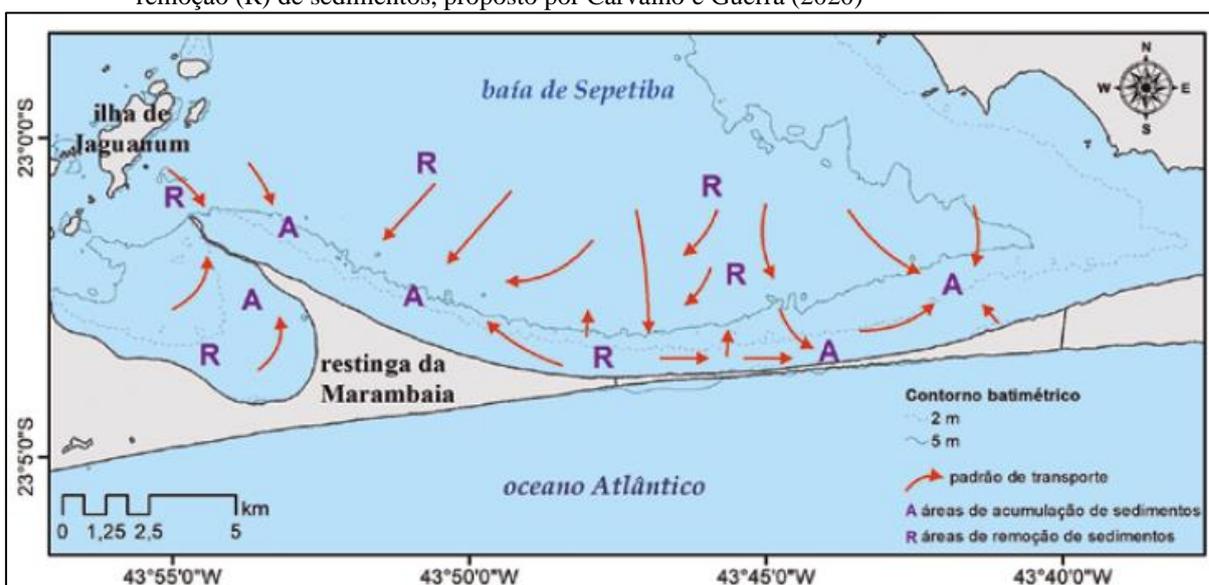
em parte as correntes de maré vindas dos canais de barra de Guaratiba (Figura 1). O autor sugere um sentido de movimentação dos sedimentos para oeste, ao longo de toda a porção oeste da restinga, que corresponde ao setor 1 do presente estudo, e em uma parte do setor leste (setor 4 do presente estudo).

Borges (1990) também coletou sedimentos na região, e sugeriu que na porção central da restinga, as ondas geradas pelo vento local de NE e as correntes transportam os sedimentos lançados na deriva litorânea em direção à Ponta da Pombeba. A direção de transporte sugerida por Ponçano (1976) e Borges (1990) coincide com a direção de migração dos bancos descritos no presente trabalho.

Segundo Borges (1990) e Carvalho e Guerra (2020), no setor leste, a presença de esporões formados na foz de pequenos canais evidenciam o transporte de sedimentos do centro da restinga para leste. Vale ressaltar que, na região onde ocorrem as desembocaduras dos canais (setor 4), a escassez de imagens não permitiu a determinação das taxas de migração dos bancos.

A partir da análise dos parâmetros estatísticos de sedimentos da superfície do fundo, Carvalho e Guerra (2020) aplicaram um modelo de tendência direcional de transporte à área de estudo, e sugeriram a ocorrência de transporte lateral para leste no setor central mais raso adjacente à restinga (profundidade < 2m) (Figura 65). As autoras sugerem uma dinâmica governada principalmente por correntes geradas pelos ventos e, secundariamente, pelas correntes de maré.

Figura 65 - Esquema das tendências direcionais de transporte de sedimentos, incluindo áreas de acumulação (A) e remoção (R) de sedimentos, proposto por Carvalho e Guerra (2020)



Legenda: A – áreas de acumulação de sedimentos; R – área de remoção de sedimentos.

Fonte: CARVALHO; GUERRA, 2020.

No presente estudo foram encontradas taxas de migração dos bancos de até 0,05 m/dia, ou seja, ~18 m/ano, para oeste. Gelfenbaum e Brooks (2003) também relataram taxas de migração de bancos transversais nesta magnitude. Os autores descreveram bancos de até 4000m de distância transversal à costa ( $\Delta x$ ), com comprimentos de onda de 75 a 120 m e taxas de migração de 0,05m/dia, na ilha de Ana Maria (Flórida, Estados Unidos).

Outro exemplo é o trabalho de Péllon, Garnier e Medina (2014), que documentaram a presença de bancos transversais de até 130 m de distância da costa, comprimento de onda da ordem de 25 metros e taxas de migração de 0,06 m/dia em Santander (Espanha). Estes autores sugerem que, em geral, quanto maior o comprimento de onda menor a taxa de migração dos bancos, o que está de acordo com estudos anteriores sobre bancos transversais (GARNIER et al., 2006). No presente estudo, os bancos de orientação NO-SE ( $\lambda = 538$  m) apresentaram taxas de migração mínima menores (2 cm/dia para oeste) quando comparados à migração dos bancos NE-SO dos setores 1 e 2 com, respectivamente, comprimento de onda médio de 87 e 66 m. No entanto, no setor 3, onde os bancos apresentam uma média de 73 m de comprimento de onda, foram registradas taxas de migração de cerca de 1cm/dia para oeste.

## 6.2 Parâmetros Texturais dos sedimentos dos bancos transversais

Ao longo de toda a margem interna da restinga da Marambaia, os sedimentos coletados nos bancos de orientação NE-SO foram classificados como areia média, tanto nas cristas como nas cavas. Segundo Ponçano (1976), a grande área de distribuição de areia média na face interna da restinga revela uma redistribuição pelas correntes de maré que adentram a baía. Além disso, a baixa concentração de matéria orgânica e o carácter leptocúrtico das amostras coletadas na região sugerem forte movimentação de sedimentos.

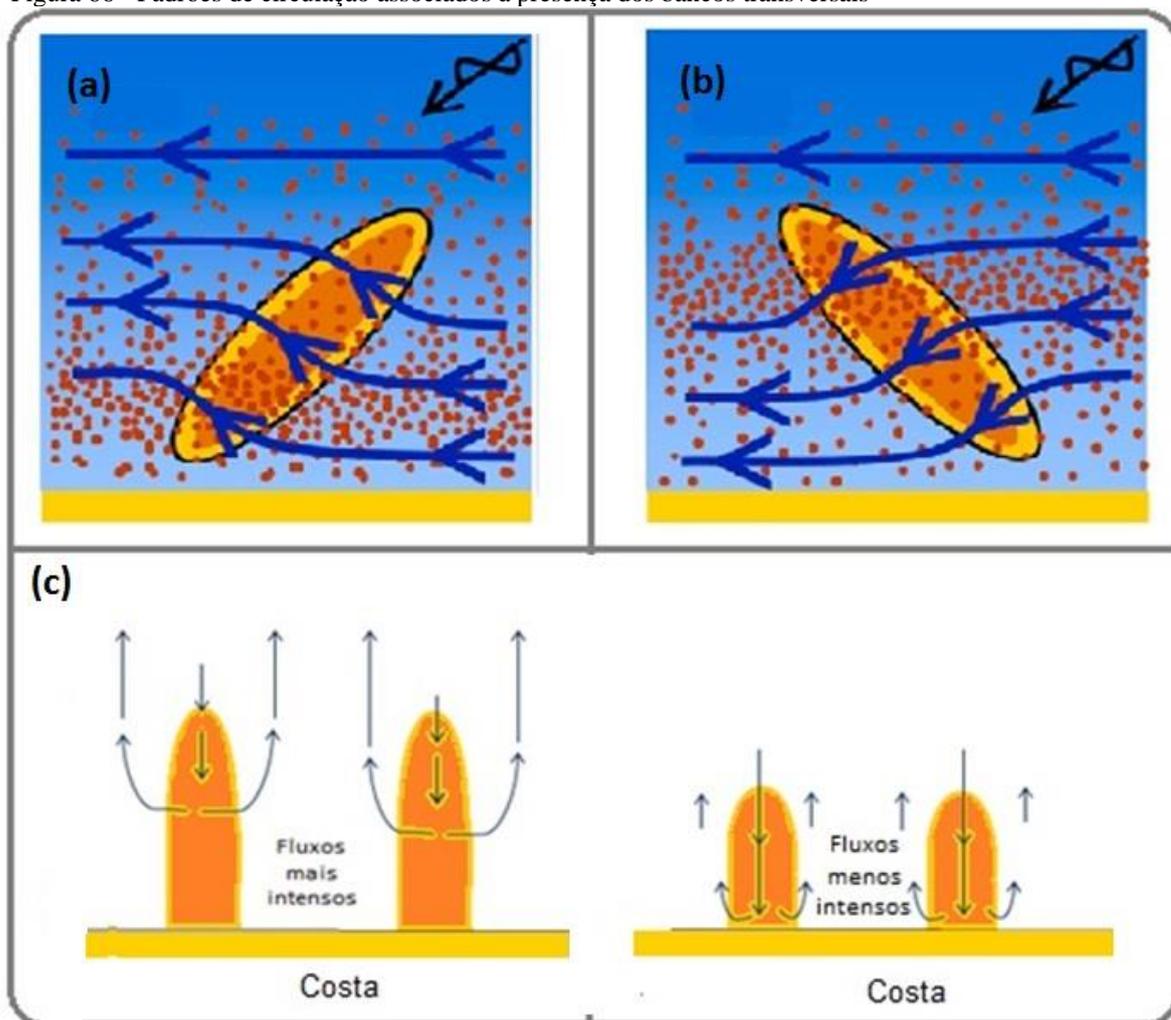
A concentração de sedimentos finos ( $>4\Phi$ ) e grossos ( $<4\Phi$ ) nas amostras fornecem indicações a respeito das energias envolvidas nos processos hidrodinâmicos. O teor de finos, assim como a concentração de matéria orgânica aumentam em direção à porção leste da restinga, e refletem na má seleção e assimetria positiva das amostras coletadas no setor 3 (Figura 16). Tais fatores podem ser atribuídos à proximidade de uma área de manguezais e à presença de canais fluviais que deságuam próximo a este setor, que também é fortemente influenciado pelas correntes que adentram na baía pelos canais de maré de Barra de Guaratiba.

No setor 1, as cristas dos bancos não apresentam sedimentos finos ( $>4\Phi$ ) e a concentração média de finos nas cavas dos bancos é extremamente baixa (0,1%). No geral os sedimentos são bem selecionados, leptocúrticos e quase simétricos, tanto nas cristas quanto nas cavas dos bancos, indicativos de alta energia hidrodinâmica. Este fato pode estar associado à proximidade do canal entre a ilha de Jaguanum e a Ponta da Pombeba (Figura 1), local de entrada das correntes de maré que atuam no retrabalhamento dos sedimentos.

Caballeria et al. (2002), Ribas et al. (2003), Garnier et al. (2006) e Ribas et al. (2015) são exemplos de alguns estudos que utilizaram modelos numéricos para compreender a evolução de padrões rítmicos relacionados a circulação na região costeira. No geral a incidência de ondas oblíquas associadas à presença dos bancos transversais resulta em um meandro da corrente litorânea, que é defletida *onshore* ou *offshore* dependendo da orientação dos bancos (Figuras 66a e 66b). Em contrapartida, ao se considerar a incidência de ondas normal ou quase normal à costa, são formadas correntes de retorno nas cavas dos bancos e correntes em direção à costa nas cristas.

Niederoda e Tanner (1970) discutiram a possível relação entre o comprimento dos bancos e a intensidade dos fluxos nas cavas e cristas. Os autores assumem, que no caso de bancos mais curtos (ex. Evans, 1938; Tanner, 1967), a corrente consegue se manter relativamente forte sobre a crista em direção à costa e apresenta-se mais lenta nas cavas com direção contrária à costa (Figura 66c). No presente estudo, os sedimentos coletados nos setores 1 e 2 refletem esta dinâmica, indicando regiões de menor energia nas cavas das feições, onde são encontradas maiores concentrações de material fino e matéria orgânica. No entanto, no setor 1, a diferença entre essas concentrações é muito pequena, levando à mesma classificação dos parâmetros texturais dos sedimentos coletados nas cristas e cavas dos bancos.

Figura 66 - Padrões de circulação associados à presença dos bancos transversais



Legenda: Mecanismos de circulação de correntes associados à presença dos bancos transversais. (a) Bancos orientados contrários ao sentido da corrente (*upcurrent*); (b) Bancos orientados no sentido da corrente (*downcurrent*); (c) Padrões de circulação proposto por Niederoda e Tanner (1970) associados à formação de bancos de maior e menor distância em relação à costa.

Fonte: adaptado de RIBAS et al., 2015 pela autora, 2020.

### 6.3 Características hidrodinâmicas na região dos bancos

A análise dos dados hidrodinâmicos permite a investigação da atuação das forças que influenciam sobre uma dada região. Fluxos perpendiculares e paralelos à costa dominam os processos de transporte e remobilização de sedimentos. A análise das componentes L-O e N-S das correntes medidas nas Estações A e C demonstra o predomínio da componente L-O, ou seja, ao longo da orientação das isóbatas paralelas à restinga (Figuras 49 e 57). Na estação A, a intensidade máxima chegou a 0,08 m/s para norte e 0,14 m/s para sul (1,16maf), enquanto na

estação C foram registradas intensidades máximas de 0,05 m/s para norte e 0,08 m/s para sul (1,12maf).

A partir dos resultados obtidos através das medições realizadas pelos perfiladores acústicos nas estações A e C, verificou-se a presença de um duplo pico de baixa-mar durante o período de vazante (Figura 46B e 54B). Esta feição também foi reportada nos trabalhos de Gutierrez (2012), Fonseca (2013), e Carvalho (2014).

Na literatura científica que aborda o desenvolvimento de duplos picos na curva de maré, atribui-se à constituinte M4 a geração desta deformação. Fonseca (2019), com base na reprodução de ensaios já realizados por Pugh (1987), destacou que na baía de Sepetiba, principalmente nos períodos de quadratura (condição em que aconteceram as medições discutidas neste trabalho), a relação de amplitude dos harmônicos e os valores da relação de fase entre as constituintes da maré M2 e M4 favorecem a formação de duplos picos.

Segundo Allen et al. (1980), em estuários com baixa profundidade, a crista da onda da maré enchente se propaga mais rapidamente que a de maré vazante, provocando a assimetria nos níveis (tempos de subida menores que os de descida) e produzindo correntes mais intensas na enchente. Na baía de Sepetiba, correntes de enchente mais intensas que as de vazante foram registradas por Gutierrez (2012) e Fonseca (2013) na região do canal de acesso à baía de Sepetiba. Ainda na baía de Sepetiba, Carvalho (2014) e D'Oliveira (2015) registraram correntes mais intensas no período de vazante, próximo à margem interna da restinga e da Ponta da Pombeba, respectivamente.

Apesar de a intensidade das correntes apresentar pequena variação nos diferentes momentos da maré, pode-se afirmar que, de acordo com as medições correntométricas realizadas na Estação A, as correntes apresentam intensidades médias maiores durante o período de enchente (0,1 m/s), quando comparadas ao período de vazante (0,08 m/s). Na estação C (profundidade local de 3 metros) o mesmo padrão foi observado (a intensidade média das correntes registradas no período de enchente foi de 0,1 m/s, enquanto na vazante a média foi de 0,06 m/s). Vale ressaltar, que no presente trabalho foram realizadas medições de no máximo 1,16maf na estação A, e 1,12maf na estação C.

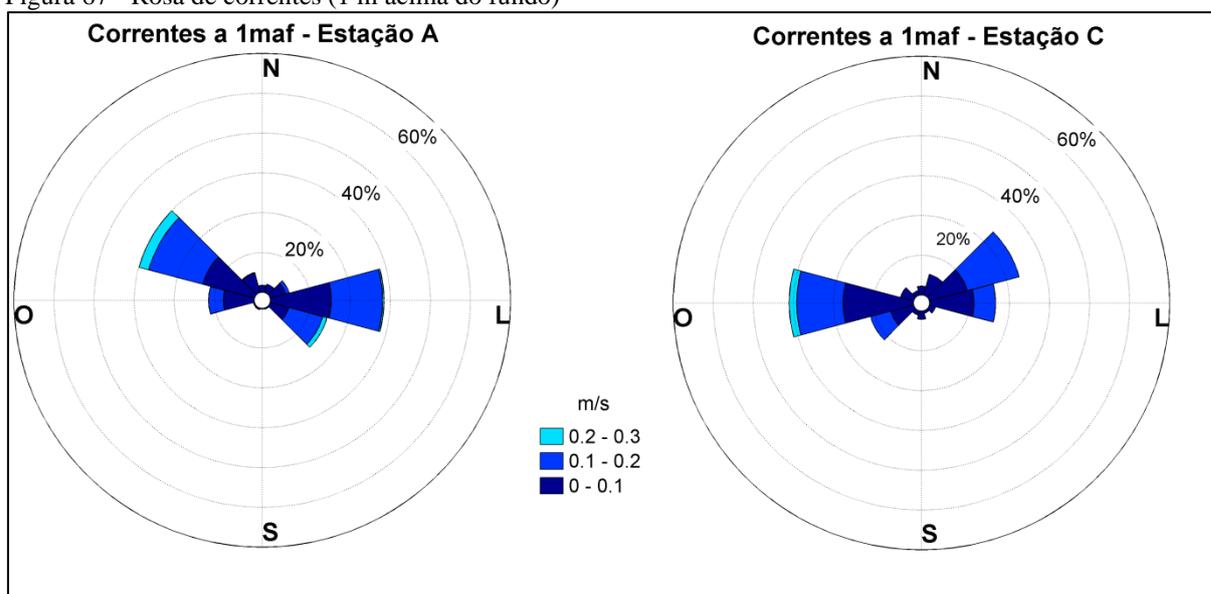
Fonseca (2019) enfatiza em seu trabalho que para a correta determinação das assimetrias das correntes na baía de Sepetiba, devem-se levar em consideração as oscilações de 3h e 4h que apresentam significativa energia associada às correntes, principalmente nos pontos mais rasos, devido à maior tensão de cisalhamento junto ao fundo. Desta forma, sugere-se que a assimetria das correntes e principalmente a forte expressividade do duplo pico nas vazantes, observadas nos resultados obtidos no presente estudo, pode estar relacionada à profundidade de medição

dos parâmetros hidrodinâmicos (3 e 5 metros), além da presença dos bancos transversais, que podem influenciar nas velocidades de cisalhamento junto ao fundo (Figuras 61C e 62C). Contudo, é importante enfatizar que na estação C, as medições foram realizadas a 540m de distância dos bancos de orientação NE-SO.

Na estação A, durante a maré enchente, registrou-se o predomínio de fluxos para SE e L, enquanto na vazante os fluxos se dirigiram para O e NO. Na estação C, no período de enchente os fluxos apresentaram sentido para NE e nas vazantes sentido para SO. Dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) mostram o predomínio dos ventos de NE na maior parte do período do fundeio, que coincide com a direção das correntes no período de vazante na estação C. No entanto, os ventos foram moderados (máximo de 5,6 m/s, com média de 3,2 m/s) não apresentando influência significativa nas correntes junto ao fundo medidas no presente estudo.

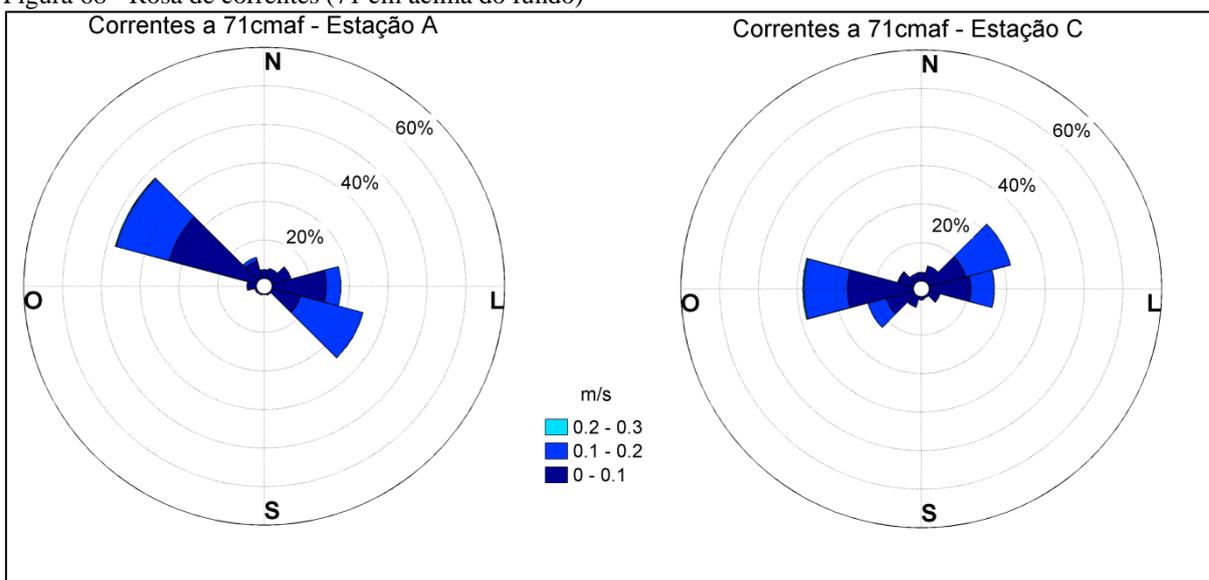
Quando comparadas as direções das correntes medidas nas estações de fundeio a 1 metro acima do fundo (Figura 67), na estação A, os fluxos para L e NO (mais intensos) foram mais frequentes. Na estação C predominaram os fluxos para NE e O (mais intensos). Estes resultados se enquadram ao padrão geral de direção das correntes apresentado anteriormente. Quando comparadas a 71 cm acima do fundo (menor distância acima do fundo em que os dados, puderam ser comparados entre as estações) a estação A apresenta fluxos mais frequentes para SE, L e os mais intensos para NO. Na estação C foram registrados fluxos principais para LNE e O (Figura 68).

Figura 67 - Rosa de correntes (1 m acima do fundo)



Fonte: A autora, 2020.

Figura 68 - Rosa de correntes (71 cm acima do fundo)



Fonte: A autora, 2020.

Outra característica importante observada nos dados de corrente foi a inversão dos fluxos de maré enchente para maré vazante associadas à variação do nível da água (preamar e baixamar) (Figuras 48 e 56). Cortez (2014) relata que, na região dos canais de Barra de Guaratiba, em condições de maré de sizígia, a inversão das correntes de maré enchente para maré vazante ocorre cerca de 1h45min antes de o nível da água atingir o seu máximo (preamar). Vianna (2016) utilizou dados de temperatura e salinidade da água coletados em condições de maré de quadratura, para reforçar a observação acerca da inversão das correntes feita por Cortez (2014), ao verificar a presença de águas mais quentes e menos salinas, provavelmente resultado da influência da baía de Sepetiba sobre os canais de Barra de Guaratiba, cerca de 1h30min antes da preamar. Alves (2018), também em condições de quadratura, reportou o mesmo fato, onde destacou a inversão dos fluxos de maré enchente para maré vazante cerca de 2 horas antes do nível da água atingir o seu máximo (preamar).

No presente estudo, na estação A esta inversão ocorreu cerca de 24 e 35 minutos antes da primeira e segunda preamar, respectivamente. Já na estação C, esta inversão foi registrada cerca de 12 minutos antes das preamares. Além disso, na Estação A também se observou inversão da maré vazante para a enchente cerca de 30 minutos antes da baixamar. Cortez (2014) destacou que esta complexa inversão seria uma consequência do maior volume de água que adentra a baía de Sepetiba através da conexão principal desta com o oceano, localizada na porção oeste da baía, conforme também postulado por Hamacher (2001).

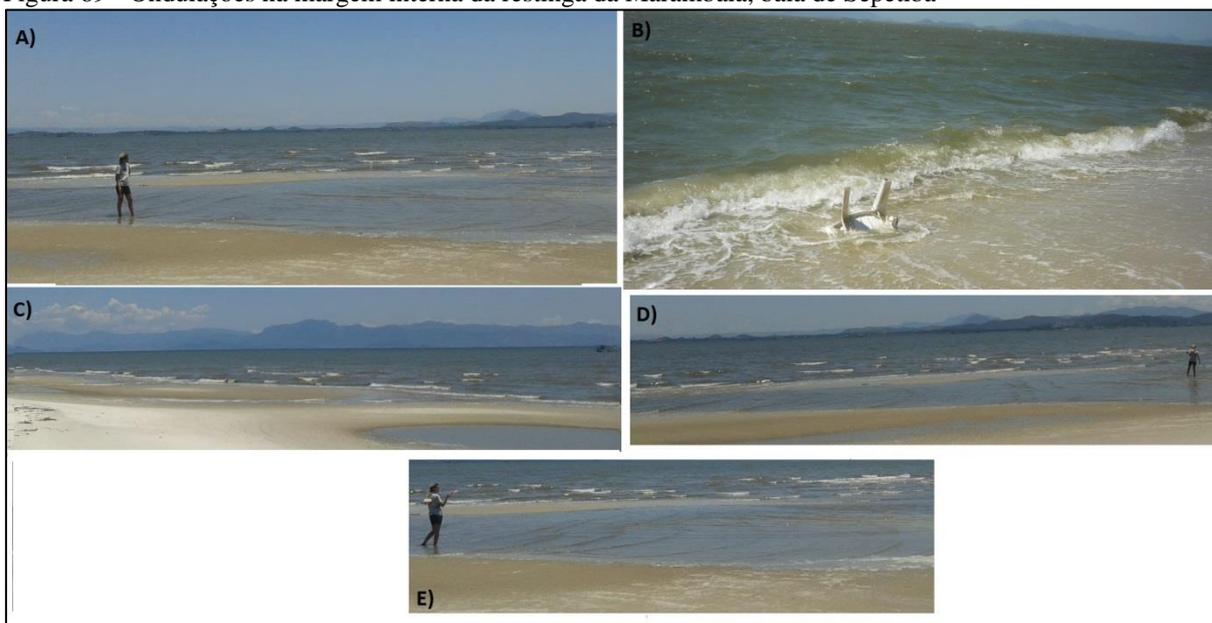
Medellín et al. (2008), Garnier et al. (2012), Péllon, Garnier e Medina (2014), Falqués (1989), Mujal-Colilles, Grifoll e Falqués (2017) e mais recentemente Mujal-Colilles, Grifoll e

Falqués (2019) são exemplos de estudos que relatam a presença de bancos transversais em ambientes costeiros restritos, expostos a condições semelhantes às encontradas na margem interna da restinga da Marambaia. Geralmente, os estudos se baseiam em processos de auto-organização, considerando a ação significativa das ondas, para explicar os mecanismos que levam à formação dos bancos transversais.

Tendo em vista a influência da incidência de ondas oblíquas na formação de bancos transversais, foram realizadas medições nas imagens de satélite. No setor 1, pode-se constatar a incidência de ondas com ângulo médio que varia entre  $30^\circ$  e  $75^\circ$  em relação à costa. Já no setor 2, o ângulo de incidência varia de  $38^\circ$  a  $50^\circ$  em relação à orientação da costa. Medellín et al. (2008) associaram o desenvolvimento dos bancos transversais na margem interna do El Puntal, baía de Santander (Espanha), à incidência de ondas oblíquas com ângulos entre  $50^\circ$  e  $85^\circ$  com a linha de costa.

Dadas as condições de baixa energia no período dos fundeios, não foram realizadas medições dos parâmetros das ondas no presente estudo. No entanto, as mesmas podem desempenhar um papel importante na dinâmica e formação dos bancos na região. Durante a campanha amostral para coleta de sedimentos, mais especificamente no dia 12 de dezembro de 2018, foram observadas ondulações de até 1,5 metros de altura próximo ao setor 3. Segundo dados do INMET, neste dia ocorreram rajadas de ventos de NE de até 14 m/s. Na Figura 69 é apresentada uma série de fotografias da área de estudo nas quais é possível observar a presença de ondulações junto à margem interna da restinga da Marambaia.

Figura 69 - Ondulações na margem interna da restinga da Marambaia, baía de Sepetiba



Legenda: A, C, D e E) Fotografias registradas no dia 12/12/2018 (setor 4), pela autora; B) Fotografia registrada por Rafael Cortez próximo à Ponta da Pombeba, em 12/09/2013;

Fonte: A autora, 2020.

Ponçano (1976) assume que a distribuição das características texturais dos sedimentos superficiais da baía de Sepetiba revela forte influência marinha. Carvalho (2014) enfatiza a importância das correntes de maré no setor raso adjacente à restinga (profundidade < 2m), assim como a ação das correntes geradas pelo vento. Segundo a literatura, a formação e manutenção dos bancos transversais são condicionadas pelo somatório de diferentes forçantes de variadas magnitudes. Dadas as características da região do presente estudo, sugere-se que os mecanismos envolvidos na formação e manutenção dos bancos transversais, presentes na margem interna da restinga da Marambaia, sofrem grande influência das correntes de maré que adentram a baía.

No entanto, as fracas correntes medidas para este estudo resultaram em velocidades de cisalhamento junto ao fundo que se situam abaixo ou no limite dos valores mínimos necessários para a remobilização do tamanho médio dos sedimentos que formam os bancos. Ainda assim, correntes mais intensas já foram descritas no local. Carvalho (2014) registrou correntes com intensidade máxima de 0,2 m/s durante a enchente e 0,3 m/s durante a vazante em condições de sizígia próximo à margem interna da restinga (Figura 8 - Estação 1) a 1,44 maf. Por outro lado, D'Oliveira (2015) mediu, também sob condições de sizígia, correntes de 0,46 m/s a 2maf num ponto com profundidade local entre 10 e 12 m, a cerca de ~1,8 km da margem interna da Ponta da Pombeba. Portanto, medições de ondas e correntes em condições hidrodinâmicas mais energéticas nos setores mais rasos, onde são observados os bancos transversais, são necessárias

para o entendimento da atuação das forçantes sobre a formação dos bancos presentes na margem interna da restinga da Marambaia, e sua posterior evolução.

#### 6.4 Concentrações e remobilização de sedimentos

Neste trabalho, a análise da variação temporal das concentrações de MPS medidas diretamente mostrou boa relação com as variações do sinal de amplitude do eco, principalmente na estação A. Em contrapartida, quando comparadas às concentrações de MPS medidas diretamente e as estimadas através da amplitude do sinal acústico, na estação C, as concentrações estimadas superestimaram (~4x) as concentrações máximas medidas diretamente (Figura 60), enquanto na estação A, as concentrações estimadas se mantiveram bem próximas das medidas diretamente (Figura 53). Nas duas estações, as curvas de concentração de MPS medido e estimado apresentaram relação consistente quanto ao padrão de aumento e diminuição dos valores.

Como já descrito nos resultados, no presente estudo foi aplicada a formulação proposta por Gartner (2004) para conversão da amplitude do sinal acústico em concentração de sedimentos. Este autor aplicou a formulação em estudos realizados com o equipamento ADCP, com frequência de 1200 e 2400 kHz e observou que no geral, o método acústico tende a subestimar a concentração de sedimentos quando ocorre a presença de partículas menores (areia muito fina e silte), já na presença de partículas maiores essas tendências são revertidas. Porém em algumas exceções, o método pareceu superestimar a concentração de sedimentos na presença de partículas menores, assim como foi observado na estação C do presente estudo, onde também foi constatada uma maior concentração de finos (silte e argila). Desta forma, apesar da boa relação entre as variações temporais das curvas de concentração medida e estimada, ajustes são necessários de acordo com o fabricante e frequência do equipamento utilizado.

Na Tabela 16 é possível observar as concentrações médias de MPS medidas diretamente nos períodos de enchente e vazante. Na estação A (superfície) e estação C (fundo) as concentrações médias são maiores no período de vazante do que no período de enchente. Já na estação A (fundo) e estação C (superfície) ocorre o inverso, com maiores concentrações médias na enchente quando comparadas ao período de vazante.

Tabela 16 - Concentração média de MPS (em mg/L) nos períodos de enchente e vazante (Figura 23)

	ESTAÇÃO A		ESTAÇÃO C	
	Vazante	Enchente	Vazante	Enchente
Superfície	1,6	0,6	4,8	5,9
Fundo	4,3	8,4	23,2	20,3

Fonte: A autora, 2020.

Apesar de apresentar valores bem próximos dos registrados na enchente, durante os períodos de vazante a intensidade média das correntes é menor, resultando em velocidades de cisalhamento mais baixas. Além disso, neste período o sinal de amplitude do eco corrigido também é menor, o que sugere que parte das partículas disponíveis na coluna d'água são depositadas durante esta fase, podendo repousar sobre o fundo, e posteriormente ser recolocadas na coluna d'água.

Em contrapartida, na estação C, as concentrações médias de MPS medido próximo ao fundo, são maiores no período de vazante do que no período de enchente (Tabela 16). Tal fato denota a forte influência dos canais que deságuam próximo a este setor, que contribuem com o aporte de sedimentos para a região, fazendo com que mesmo nas vazantes, quando a intensidade média das correntes é menor a concentração de MPS se mantenha significativa. Ainda assim, o padrão entre intensidade das correntes, amplitude do eco corrigida e MPS medido apresentou bom ajuste. Na Estação C a amplitude média do eco corrigida se mostrou bem próxima nos dois períodos, 53 dB na enchente e 52,5 dB na vazante.

De uma maneira geral, o comportamento da amplitude do eco corrigida apresentou boa relação com a intensidade das correntes nas duas estações, de tal modo que nos picos de intensidade foram registrados maiores valores de amplitude do eco. Esta relação entre o aumento da intensidade das correntes e amplitude do sinal acústico corrigido sugere o processo de ressuspensão *in situ*, documentada pelo aumento da concentração de material particulado em suspensão medido, assim como pelo aumento das velocidades de cisalhamento junto ao fundo. D'Oliveira (2015) e Vianna (2016) também destacaram essa relação a partir de medições realizadas, respectivamente, próximo à Ponta da Pombeba e nos canais de Barra de Guaratiba.

Nas Figuras 70 e 71 é possível observar a relação entre intensidade das correntes, amplitude do eco e velocidade de cisalhamento referentes ao bin 1 (71 cmaf na estação A e 37 cmaf na estação C). No geral, em ambas as estações com o aumento da intensidade das correntes são registradas as maiores amplitudes do eco, coincidindo com os picos de concentrações. Vale

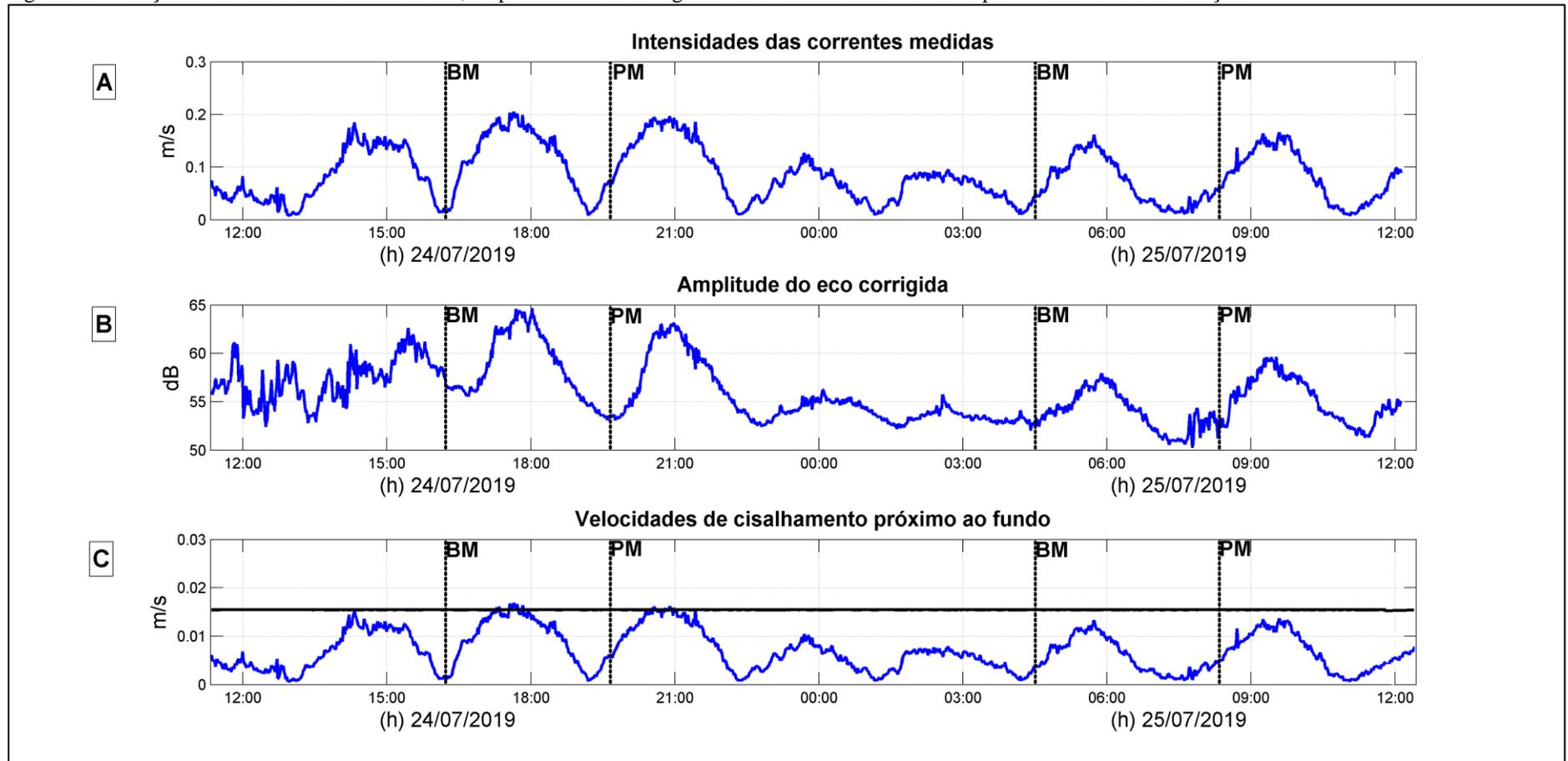
ressaltar que as velocidades de cisalhamento apresentadas nas figuras foram obtidas com os parâmetros dos bancos incorporados aos dados de entrada do modelo.

Cortez e Guerra (2013) destacam a relação entre a intensidade das correntes e a concentração de material particulado em suspensão a partir da determinação da tensão de cisalhamento junto ao fundo gerada pelas correntes medidas nos canais de Barra de Guaratiba. Os autores verificaram que os maiores valores de tensão cisalhante (cerca de 0,02 Pa) estavam fortemente relacionados à concentração de material particulado em suspensão estimado.

Na estação A, a velocidade de cisalhamento supera a velocidade de cisalhamento crítica próximo das 18h (Figura 70), quando as amostras de água coletadas junto ao fundo apresentaram as maiores concentrações de MPS de todo o fundeio (23,3 mg/L). Próximo de 21h do dia 24/07/2019 a velocidade de cisalhamento também supera a velocidade de cisalhamento crítica, e as amostras de água coletadas junto ao fundo apresentaram concentração 7,8 mg/L. Vale ressaltar, que a velocidade de cisalhamento crítica obtida segundo o modelo se refere ao limiar para início do transporte como carga de fundo, que é o processo que leva à formação e manutenção dos bancos.

Na estação C, a velocidade de cisalhamento se aproxima, mas não supera a velocidade de cisalhamento crítica para areias médias em nenhum momento durante o fundeio, de forma a iniciar seu transporte como carga de fundo (Figura 71). Próximo das 18h do dia 24/07/2019, quando a velocidade de cisalhamento se aproxima da velocidade crítica, também foram encontradas concentrações elevadas de MPS próximo ao fundo (39 mg/L).

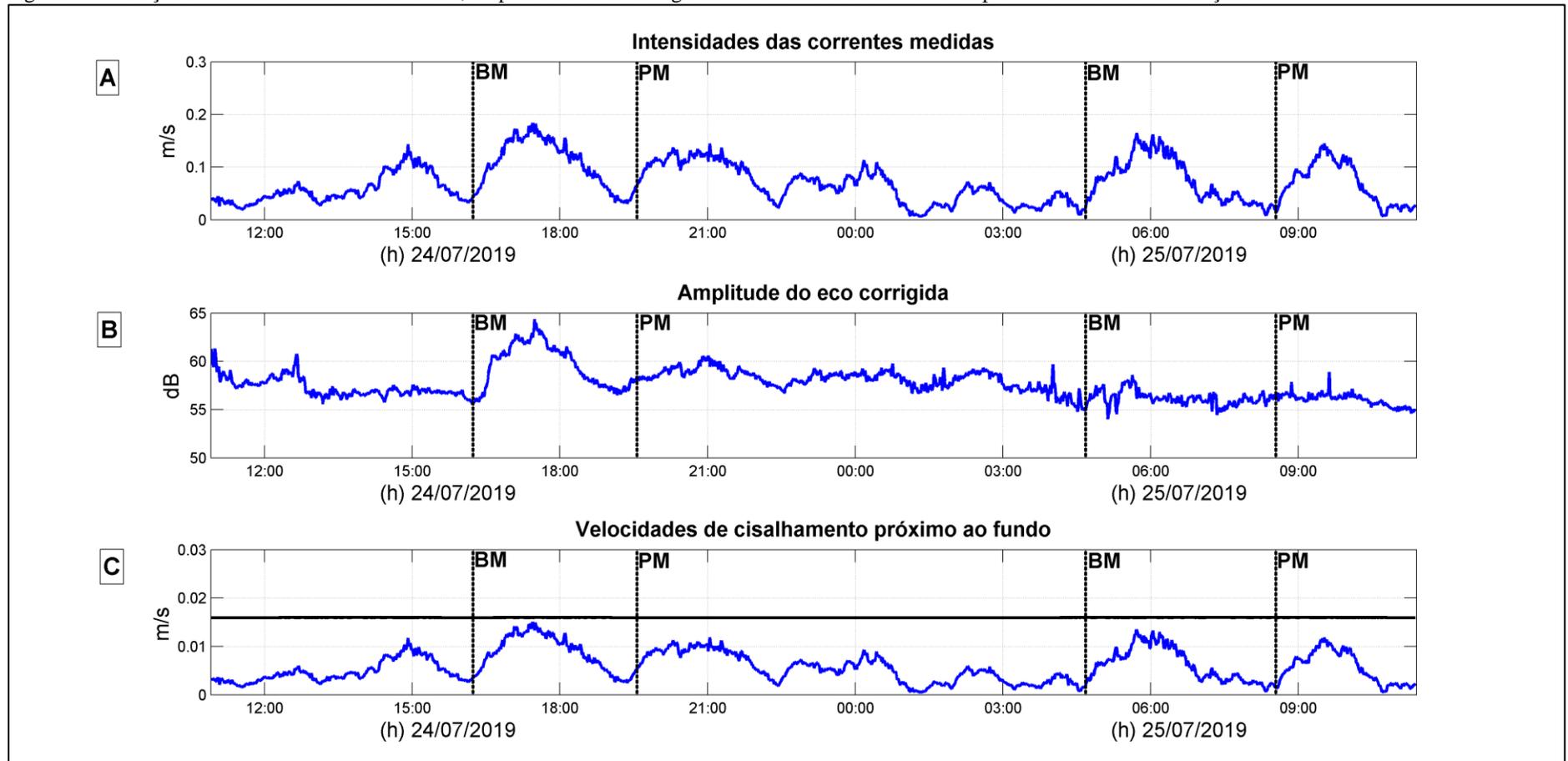
Figura 70 - Relação entre intensidade das correntes, amplitude do eco corrigida e velocidade de cisalhamento próximo ao fundo na Estação A



Legenda: (A) Intensidade das correntes no bin 1 (71cmaf); (B) Amplitude do eco corrigida no bin 1 (71cmaf); (C) Velocidade de cisalhamento próximo ao fundo. A linha preta paralela ao eixo x representa o cisalhamento crítico para início do transporte de areias médias como carga de fundo. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

Figura 71 - Relação entre intensidade das correntes, amplitude do eco corrigida e velocidade de cisalhamento próximo ao fundo na Estação C



Legenda: (A) Intensidade das correntes no bin 1 (37cmaf); (B) Amplitude do eco corrigida no bin 1 (37cmaf); (C) Velocidade de cisalhamento próximo ao fundo. A linha preta paralela ao eixo x representa o cisalhamento crítico para início do transporte de areias médias como carga de fundo. A linha preta tracejada indica os limites de baixa-mar (BM) e preamar (PM).

Fonte: A autora, 2020.

Van Rijn (2007) destaca que a rugosidade do leito tem uma influência relativamente grande no transporte de sedimentos, com o aumento da rugosidade no leito levando ao aumento das taxas de transporte de sedimentos como carga de fundo. O autor também destaca que em leitos ondulados a tendência de formação de vórtices é maior, e seus movimentos em torno das marcas onduladas (*ripples*) são muito eficazes na agitação de sedimentos do leito. No presente estudo, com base nos dados obtidos a partir do modelo de Yalin (1963), pode-se constatar que a velocidade de cisalhamento sofre influência direta dos bancos, pois sua presença leva ao aumento da velocidade de cisalhamento junto ao fundo, induzindo a remobilização de sedimentos.

Quanto maior a altura dos bancos maior a velocidade de cisalhamento junto ao fundo, o que está de acordo com a relação proposta por Li e Amos (1998), segundo os quais ondulações de maior altura geralmente se associam a maiores velocidades de cisalhamento. Em contrapartida, com o aumento do comprimento dos bancos (distância em relação à costa), a velocidade de cisalhamento tende a diminuir. Na estação A foram consideradas as dimensões dos bancos de orientação NO-SE (1 metro de altura e 170m de comprimento) e na Estação C, as dimensões dos bancos de orientação NE-SO (30cm de altura e 30m de comprimento). Em ambos os casos, foram considerados os comprimentos mínimos obtidos a partir das imagens de satélite.

Apesar de o modelo estimar feições de grande magnitude, como dunas subaquáticas de grande porte (*sandwaves*), Li e Amos (1998) sugerem que no caso de bancos de magnitude muito elevada, é necessário maior sensibilidade na acurácia dos resultados, já que ainda são necessários mais estudos sobre o entendimento da formação dessas feições. No presente estudo, os resultados obtidos se apresentaram dentro do esperado, se enquadrando nas relações propostas pelos autores supracitados (LI, AMOS, 1998; VAN RIJN, 2007).

Na estação A, as correntes alcançaram intensidade máxima de 0,26 m/s, e a amplitude do sinal acústico média ficou em torno de 56,08 dB, já na estação C, a intensidade máxima foi de 0,22 m/s e a amplitude do sinal acústico média foi de 52,7 dB. Ainda assim, nesta última foram registrados os maiores valores de concentração de MPS. Este fato pode estar relacionado à proximidade da desembocadura de canais intermitentes, que atuam como fonte de sedimentos para esta região. Cortez (2014) a partir da determinação da temperatura e de propriedades físico-químicas da água (transmissividade, fluorescência e oxigênio dissolvido) amostrada na porção leste da baía de Sepetiba, apontou a influência das áreas de manguezal sobre esta região. Na estação C, a concentração de material particulado em suspensão (fundo e superfície) apresentou-se 3 vezes maior do que as concentrações observadas na estação A.

Além do transporte próximo ao fundo, também há evidências de transporte ativo por suspensão e/ou ressuspensão de sedimentos na região que, como já descrito, em condições menos energéticas podem ser incorporados aos bancos transversais. Carvalho (2014) registrou concentração de MPS de até 23,7 mg/L na superfície da água, próximo à área central da margem interna da restinga, enquanto D'Oliveira (2015) registrou concentração de MPS de até 19 mg/L próximo à Ponta da Pombeba. No presente estudo, foram encontradas concentrações na superfície de até 8 mg/L na estação A e 9,2 mg/L na estação C. Nas imagens de satélite a presença de sedimentos em suspensão é bem documentada (Figura 72).

Figura 72 - Sedimentos em suspensão na margem interna da restinga da Marambaia



Legenda: Setas em amarelo destacam a presença de sedimentos em suspensão ao longo da margem norte da restinga, indicando advecção e/ou ressuspensão *in situ*. O símbolo azul representa o ponto de coleta de água realizado por D'Oliveira (2015); os símbolos rosa e branco representam respectivamente, as Estações A e C do presente estudo; o símbolo verde representa um dos pontos de coleta de água realizado por Carvalho (2014). Imagem de dezembro de 2005.

Fonte: GOOGLEARH, LANDSAT, 2020.

## CONCLUSÃO

A margem interna da restinga da Marambaia apresenta um complexo padrão morfológico rítmico, com a presença de bancos transversais do tipo *finger bars*. A partir das metodologias aplicadas no presente estudo pode-se concluir que:

- a) Com base na classificação de Barcelon e Lau (1973), duas famílias de bancos transversais ocorrem na margem interna da restinga da Marambaia, uma de orientação NO-SE e outra NE-SO;
- b) Ambas as famílias apresentam orientação oblíqua em relação à costa, com a maior concentração de bancos de orientação NE-SO na parte central da restinga, onde a costa é retilínea. Já os bancos de orientação NO-SE ocorrem no setor oeste da restinga;
- c) A análise de séries temporais de imagens de satélite sugere que ambos os sistemas rítmicos são persistentes e migram para oeste no setor central e oeste da restinga, com taxas entre 3,65 m/ano e 18,5 m/ano.
- d) Os bancos transversais de orientação NE-SO são compostos de areia média tanto nas cristas, quanto nas cavas. Os parâmetros texturais e teor de matéria orgânica nos sedimentos coletados são indicativos de forte movimentação de sedimentos na região;
- e) Ao longo de dois ciclos de maré sob condições de quadratura as correntes apresentaram forte influência sobre a circulação e o transporte de sedimentos. No entanto, medições correntométricas e de ondas nas porções mais rasas (< 2 metros de profundidade), mais precisamente nas cristas e cavas dos bancos, são essenciais para estudos mais específicos a respeito dos mecanismos que atuam na formação e manutenção dos bancos transversais.
- f) O sinal de amplitude do eco corrigido apresentou relação direta com a intensidade das correntes, evidenciando eventos de ressuspensão.
- g) A presença das feições tende a aumentar a velocidade de cisalhamento junto ao fundo. Quanto maior a altura e menor o comprimento dos bancos, maior a velocidade de cisalhamento calculada pelo modelo de Yalin (1963).

- h) A metodologia aplicada no presente estudo permitiu uma investigação inicial dos bancos transversais presentes na região, porém características como o grau de assimetria dos flancos ainda precisam ser investigados.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, G.P.; SALOMON, J.C.; BASSOULLET, P.; DU PENHOAT, Y.; DE GRANDPRÉ, C. Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedimentary Geology*, v. 26, p. 69-79, 1980.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. The upper Precambrian of South America. *Bol. Inst. Geociências USP*, v. 7, p. 45-80, 1976.
- ASHTON, A.; MURRAY, A.B.; ARNAULT, O. Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high-angle waves. *Nature* 414, p. 296–300, 2001.
- ASHTON, A.; MURRAY, A.B. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. modeling of sand waves, flying spits, and capes. *J. Geophys. Res.* 111, 422 p.; 2006a.
- ASHTON, A.; MURRAY, A.B. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 2. Wave climate analysis and comparisons to nature. *J. Geophys. Res.* 111, 423p., 2006b.
- ALVES, K. M. Estudo da variabilidade temporal e espacial da circulação dos canais de maré de Barra de Guaratiba (Rio de Janeiro). 2018. 124 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Oceanografia) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia.
- BAGNOLD, R.A. Mechanics of marine sedimentation. In: Hill, M.N. (Ed.). *The Sea*. New York: Wiley-Interscience, v. 3, p. 507–527, 1963.
- BAHIENSE, F.; PEREIRA, S. D.; GERALDES, M. C.; MENEZES, G. Emprego de análise multitemporal de fotografias aéreas na evolução geomorfológica da Restinga da Marambaia, RJ, Brasil. Rio de Janeiro: Corbã, 2014. Separata de: PEREIRA, S. D.; FREITAS, J. G.; BERGAMASCHI, S.; RODRIGUES, M. A. C (Ed.). Rio de Janeiro, 2014, p. 35-52.
- BARCELLOS, C.; LACERDA, L. D.; CERADINI, S. Sediment origin and budget in Sepetiba Bay (Brazil) – an approach base don multielemental analysis. *Environmental Geology*, v. 32, n. 3, p. 203-209. 1997
- BARCILON, A. I.; LAU, J. P. A A model for formation of transverse bars. *J. Geophys. Res.*, 78, (15), p. 256-264. 1973.
- BLOTT, S.J.; PYE, K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 26, p. 1237-1248, 2001.
- BORGES, H.V. Dinâmica Sedimentar da Restinga da Marambaia e Baía de Sepetiba. Rio de Janeiro. 1990. 82 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- BORGES, H.V. Holocene geological evolution of Sepetiba Bay and Marambaia Barrier Island, Brazil. 1998. 145 p. Tese de doutorado, University of New York, SUNY.

- BRÖNIMANN, P.; MOURA, J.A.; DIAS-BRITO, D. Ecologia dos Foraminíferos e microrganismos associados da área de Guaratiba/Sepetiba: modelo ambiental e sua aplicação na pesquisa de hidrocarbonetos. Rio de Janeiro: Petrobras, 81 p. Relatório 3549 p., 1981
- BROW, C. B. Sediment transportation. In: Rouse, H. (Ed), Engineering Hydraulics Wiley, New York, p. 769-857, 1950.
- BRUUN P. Migrating sand waves or sand humps, with special reference to investigations carried out on the Danish North Sea coast, Proc. Coastal Eng. Conf., 5th, p. 269– 295, 1955.
- CABALLERIA, M.; COCO, G.; FALQUÉS, A.; HUNTLEY, D. A Self-organization mechanisms for the formation of nearshore crescentic and transverse sand bars. J. Fluid Mech. 465, p. 379–410, 2002.
- CAMENEN, B.; LARROUDE. P. Nearshore and transport modelling: Application to Trucvert Beach, paper presented at IAHR symposium, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Int. Assoc. for Hydraul. Res., Delft, Netherlands, 1999.
- CARELLI, S. G.; RONCARATI, H.; NASCIMENTO, D. N.; GERALDES, M. C. Síntese da Evolução Geológica Cenozóica da Baía de Sepetiba e Restinga da Marambaia, sul do estado do Rio de Janeiro. XIII ABEQUA Congress – The South American Quaternary, 2011.
- CARVALHO, B. C.; Aplicação de múltiplas ferramentas no estudo do transporte de sedimentos na margem interna da restinga da Marambaia (baía de Sepetiba, RJ). 2014. 140 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia.
- CARVALHO, B. C.; GUERRA, J. V. Aplicação de Modelo de Tendência Direcional de Transporte ao longo de uma ilha - barreira: Restinga da Marambaia (RJ, SE Brasil). Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. V. 43, p. 101 – 118, 2020.
- CLARKE, L.B.; WERNER, B.T. Tidally modulated occurrence of megaripples in a saturated surf zone. J. Geophys. Res. v. 109, C1012, 2004.
- COCO, G; MURRAY, A. B. Patterns in the sand: From forcing templates to self-organization. Geomorphology 91; p. 271–290, 2007.
- COCO, G.; O'HARE, T.J.; HUNTLEY, D.A. Beach cusps: a comparison of data and theories for their formation. J. Coast. Res. 15 (3), p. 741–749, 1999.
- COOPER, J. A. G.; PILKEY, O. H. Longshore drift: Trapped in an expected universe. Journal of Sedimentary Research. v. 74, n. 5, p. 599-606, 2004a.
- COOPER, J. A. G.; PILKEY, O. H. Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. Global and Planetary Change. v. 43, n. 3-4, p. 157-171, 2004b.
- CORTEZ, R.H.C. Circulação e fluxo de Material Particulado em Suspensão no canal de Barra de Guaratiba (Baía de Sepetiba – RJ). 2012. 62 p. Monografia – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- CORTEZ, R.H.C. Caracterização oceanográfica de um canal de maré e da zona costeira adjacente: canal de Barra de Guaratiba - Baía de Sepetiba, RJ. 2014. Dissertação de mestrado – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CORTEZ, R. H. C.; GUERRA, J. V. Observação da tensão cisalhante e transporte de material particulado em suspensão em um canal de maré - Barra de Guaratiba, RJ. In: X Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélites - OMARSAT, Arraial do Cabo. 2013.

CUNHA, C.L.N.; ROSMAN, P.C.C.; FERREIRA, A. P.; MONTEIRO, T. C. N. Hydrodynamics and water quality models applied to Sepetiba Bay. *Continental Shelf Research*, v. 26, p. 1940–1953, 2006.

DADALTO, T. P. Arquitetura estratigráfica e evolução geológica da restinga da Marambaia (RJ). Rio de Janeiro. 2017. 275 p. Dissertação (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense.

DAVIDSON-ARNOTT, R. G. D.; VAN HEYNINGEN A. G. Migration and sedimentology of longshore sandwaves, Long Point, Lake Erie, Canada, *Sedimentology*, 50, p. 1123– 1137, 2003.

DEINES, K.L. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profiles. In: IEEE WORKING CONFERENCE ON CURRENT MEASUREMENT, 1., 1999, San Diego. Proceedings... San Diego: IEEE, 1999. p. 249-253, 1999.

DIAS, J. A.; FREIRE, P.; FREITAS, C.; KLEIN, A.; SILVA P. The importance of estuarine and coastal morphodynamics in littoral management. *Journal of Integrated Coastal Zone Management* 11(3). p. 271-272, 2011.

DIAS, G.T.M.; KJERFVE, B. Barrier and Beach Ridge Systems of the Rio de Janeiro Coast. In: Dillenburg, S.; Hesp, P. *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. [S.I.]: Springer, 388 p, 2009.

D' OLIVEIRA, V. S. Circulação e transporte de sedimentos em suspensão no entorno da Ponta da Pombeba (Baía de Sepetiba- RJ), durante dois ciclos de maré. 2015. 64 p. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia.

ENGELUND, F.; HANSEN, E. A monograph on sediment transport in alluvial streams. *TekniskVorlag*, Copenhagen, Denmark, 62p, 1967.

EVANS, O. F. The classification and origin of beach cusps. *J. Geology* n. 46, p. 615–627, 1938.

FALQUÉS, A. Formación de topografía rítmica en el Delta del Ebro. *Revista de Geofísica* v. 45, p. 143–156, 1989.

FALQUÉS, A.; CALVETE, D. Large scale dynamics of sandy coastlines. Diffusivity and instability. *J. Geophys. Res.* 110, C03007, 2005.

FERREIRA, A. P.; HORTA, M. A. P.; CUNHA, C. L. N. Avaliação das concentrações de metais pesados no sedimento, na água e nos órgãos de *Nycticorax nycticorax* (Garça-da-noite) na Baía de Sepetiba, RJ, Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada* 10(2). *Journal of Integrated Coastal Zone Management* 10(2). p. 229-241, 2010.

FOLK, R.L.; WARD, W.C. Brazos river bar: a study in the significance of grain-size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*. v. 27, n. 1, p. 3–26, 1957.

FONSECA, S.A.R. Observações dos Padrões de Circulação e do Fluxo de Material Particulado em Suspensão nas Proximidades do Canal de Acesso à Baía de Sepetiba (RJ). Rio de Janeiro, 2013. 78 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

FONSECA, S.A.R. Oscilações devidas aos sobre-harmônicos de maré na baía de Sepetiba (RJ) e sua influência nas correntes residuais. Rio de Janeiro, 2019. 111 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FRAGOSO, M.R. Estudo numérico da circulação marinha da região das baías de Sepetiba e Ilha Grande (RJ). 1999. 109 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

FRIEDERICHS, Y.L. O sistema flúvio-estuarino da baía de Sepetiba preservado na estratigrafia rasa da plataforma interna adjacente. Rio de Janeiro 2012. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

FRIEDERICHS, Y.L.; REIS, A.T.; SILVA, C.G.; TOULEMONDE, B.; MAIA, R.M.C.; GUERRA, J.V. Arquitetura sísmica do sistema flúvio-estuarino da Baía de Sepetiba preservado na estratigrafia rasa da plataforma adjacente, Rio de Janeiro, Brasil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 43, n. 1, p. 998-1012, 2013.

GADD, P.E.; LAVELLE, J.W.; SWIFT, D.J.P. Estimates of Sand Transport in the New York Shelf Using Near-Bottom Current Meter Observations. *Journal of Sedimentary Petrology*, Miami, v. 48, n. 1, p. 239-252, 1978.

GALLAGHER, E.L., ELGAR, S., THORNTON, E.B. Observations and predictions of megaripple migration in a natural surf zone. *Nature* 394, p. 165–168, 1998.

GARNIER, R.; CALVETE D.; FALQUES A.; CABALLERIA M. Generation and nonlinear evolution of shore-oblique/transverse sand bars. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 567, p 327-360, 2006.

GARNIER, R.; MEDINA, R.; PELLÓN, E.; FALQUÉS, A.; TURKI, I. Intertidal finger bars at El Puntal Spit, Bay of Santander, Spain. *Environmental Hydraulics Institute “IH Cantabria”*, Universidad de Cantabria, p. 1-8, 2012.

GARTNER, J. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, v. 211, p. 169 – 187, 2004.

GELFENBAUM, G.; BROOKS, G. R. The morphology and migration of transverse bars off the west-central Florida coast, *Mar. Geol.*, 200, p. 273–289, 2003.

GOES, H.A. Baixada de Sepetiba. 1ed. Rio de Janeiro. Imprensa Nacional, 383p, 1942.

GUILCHER, A.; GODARD, A.; VISSEAU, E. Les cretes et sillons obliques de l’estran des Landes de Gascogne. *Comite d’Oceanogr. et d’Etudes des Cotes Bull.* v. 4, p. 151–157, 1952.

GUILLÉN, J.; ACOSTA, J.; CHIOCCI, F.; PALANQUES, A. Atlas of Bedforms in the Western Mediterranean. Springer International Publishing, Cham, 2017.

GUTIERREZ, M.T. Variabilidade espacial e temporal da distribuição do material particulado em suspensão nas proximidades do canal de navegação da baía de Sepetiba (RJ). Rio de Janeiro. 2012. 149 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

HOM-MA, M.; SONU, C. Rhythmic patterns of long-shore bars related to sediment characteristics. Proc. Conf. Coastal Eng., Council Wave Res., 8<sup>th</sup>. p. 248-278, 1963.

HUNTER, R. E.; CLIFTON, H. E.; PHLLIPS, R. L. Depositional processes, sedimentary structures, and predicted vertical sequences in barred nearshore systems, Southern Oregon coast, J. Sediment. Petrol., n. 49, p 711 –726, 1979.

JOHNSON, R.S. Some contributions to the theory of edge waves. J. Fluid Mech. v. 524, p. 81–97, 2005.

KOMAR, P.D. Beach Processes and Sedimentation. 2nd ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J, 1998.

KONICKI, K. M.; HOLMAN, R. A. The statistics and kinematics of transverse bars on an open coast. Mar. Geol. 169, p. 69–101, 2000.

KRUMBEIN, W. C.; PETTIJOHN, F. J. Manual of sedimentary petrography. D. Appleton Century, New York, 549 p, 1938.

LACERDA, L. D.; PARAQUETII, H. H. M.; MOLISANI, M. M.; BERNARDES, M. C. Transporte de materiais na interface continente-mar na Baía de Sepetiba, RJ. XII Congresso Latino Americano de Ciências do Mar. Florianópolis, 2007.

LAFON, V., DUPUIS, H., HOWA, H.; FROIDEFOND, J. M. Determining ridge and runnel longshore migration rate using Spot imagery. Oceanol. Acta 25, p 149–158, 2002.

LAMEGO, A. R. Ciclo evolutivo das lagoas fluminenses. In: Boletim Geográfico, Rio de Janeiro, n. 60, p. 1404-1430, 1945.

LANE, A.C. The geology of Nahant. Boston Society. Nature. History. p. 91–95, 1888.

LEVOY, F.; ANTHONY, E.; MONFORT, O.; ROBIN, N.; BRETTEL, P. Formation and migration of transverse bars along a tidal sandy coast deduced from multi-temporal Lidar datasets. Marine Geology, v. 342, p. 39–52, 2013.

LI, M.Z.; AMOS, C.L. Predicting ripple geometry and bed roughness under combined waves and currents in a continental shelf environment. Continental Shelf Research 18, p. 941–970, 1998.

LI, M.Z.; AMOS, C.L. SEDTRANS96: the upgraded and better calibrated sediment-transport model for continental shelves. Computers & Geosciences 27, p. 619–645, 2001.

LIDHOLM, R. A Practical Approach to Sedimentology. Boston: Allen & Unwin. 279 p, 1987.

LOHRMANN, A. Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments. Norway: Nortek, 2001. Nortek Technical Note N. 003.

- MACMAHAN, J.; THOMTON, E.; RENIERS A. Rip current review, *Coastal Eng.*, n. 53, p. 191–208, 2006.
- MEDELLÍN, G.; MEDINA, R; FALQUÉS, A.; GONZÁLEZ, M. Coastline sand waves on a low-energy beach at “El Puntal” spit, Spain. *Marine Geology* 250; p. 143–156, 2008.
- MOODY, D. W. Coastal Morphology and Processes in Relation to the Development of Submarine Sand Ridges off Bethany Beach, Delaware. *Dissertação*. Johns Hopkins University, 108 p, 1964.
- MOURA, J.A.; DIAS-BRITO, D.; BRÖNNIMAN, P. Modelo ambiental de laguna costeira clástica - Baía de Sepetiba, RJ. In: *Simpósio do Quaternário no Brasil*, 4, Rio de Janeiro. Atas... São Paulo: Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, p. 135-152, 1982.
- MUJAL – COLILLES, A.; GRIFOLL, M.; FALQUÉS. Low Energy transverse sand bars at El Trabucador beach, Ebro Delt A. A Preliminary study. *Coastal Dynamics*. Paper n. 2014, 2017.
- MUJAL – COLILLES, A.; GRIFOLL, M.; FALQUÉS, A. Rhythmic morphology in a microtidal low-energy beach. *Geomorphology*, v. 334, p. 151 – 164, 2019.
- NIEDERODA, A. W.; TANNER, W. F. Preliminary study on transverse bars. *Mar. Geol.* 9, p. 41–62, 1970.
- NEUMEIER, U.; FERRARIN, C.; AMOS, C.L.; Umgieser, G.; Li, M.Z. Sedtrans05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters with a new algorithm for cohesive sediments. *Computers & Geosciences*, v 34, p. 1223-1242, 2008.
- NORTEK. Principles of operation. *Manual Nortek Aquadopp Profiler*. 2013.
- OLIVEIRA, F.S.C.; KAMPEL, M., AMARAL, S. Avaliação multi-temporal da evolução geomorfológica da Restinga da Marambaia, Rio de Janeiro – Brasil. In: *Simpósio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica*, 12. Cartagena. Anais... Cartagena: SELPER, p. 1-7, 2006.
- OTVOS, E.G. Coastal barriers – Nomenclature, processes, and classification issues. *Geomorphology*, v. 139-140, p. 39-52, 2012.
- PARK, H. B.; LEE, G. Evaluation of ADCP Backscatter Inversion to Suspended Sediment Concentration in Estuarine Environments. *Ocean Science Journal*, v. 51(1), p. 109-125, 2016.
- PEDREROS, R., HOWA, H. L. & MICHEL, D. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Mar. Geol.* 135, p. 35–49, 1996.
- PELLON, E.; GARNIER, R.; MEDINA, R. Intertidal finger bars at El Puntal, Bay of Santander, Spain: observation and forcing analysis, *Earth Surface Dynamics*, v. 2, p. 349-361, 2014.
- PEREIRA, S. D. Influência da variação relativa do nível do mar no manguezal de Guaratiba – Baía de Sepetiba – RJ. 1998, 133 p. Tese de Doutorado. Centro de Geologia Costeira e Oceânica. UFRGS.

PILKEY, O.H.; COOPER, J.A.G.; LEWIS, D.A. Global Distribution & Geomorphology of Fetch-Limited Barrier Islands. *Journal of Coastal Research*, v. 25, n. 4, p. 819-837, 2009.

PONÇANO, W.L. Sedimentação atual na Baía de Sepetiba, Estado do Rio de Janeiro: contribuição à avaliação da viabilidade geotécnica de implantação de um porto. São Paulo. 1976. 278 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

PONÇANO, W.L.; FULFARO, V.J.; GIMENEZ, A.F. Sobre a origem da restinga da Marambaia, RJ. In: *Simpósio Regional de Geologia Rio Claro*. Atas Rio Claro: SBG, v. 1, p. 291-204, 1979.

PUGH, D. T. Tides surges and mean sea level. 1 ed. Natural Environment Research Council, Swindon, UK, 1987.

REINECK, H.E.; SINGH, I. B. *Depositional Sedimentary Environments*. 2<sup>nd</sup>. ed. New York: Springer-Verlag and Berlin Heidelberg, 549 p., 1980.

REIS, A.T.; MAIA, R M.; SILVA, C.G.; RABINEAU, M.; GUERRA, J.V.; GORINI, C.; AYRES, ARANTES-OLIVEIRA, R.; BENABDELLOUAHED, M.A.; SIMÕES, I.V.; TARDIN, R. Origin of step-like and lobate seafloor features along the continental shelf off Rio de Janeiro State, Santos basin-Brazil. *Geomorphology*, v. 203, p. 25-45, 2013a.

RIBAS, F.; FALQUE'S, A.; MONTOTO, A. Nearshore oblique sand bars, *J. Geophys. Res.*, 108(C4), 3119, 2003.

RIBAS, F.; FALQUÉS, A.; SWART, H. E.; DODD, N.; GARNIER, R.; CALVETE, D. Understanding coastal morphodynamic patterns from depth-averaged sediment concentration. *Reviews of Geophysics*, 53, 2015.

RIBAS, F; KROON, A. Characteristics and dynamics of surfzone transverse finger bars. *J Geophys Res* 112(F03028), 2007.

RIO DE JANEIRO (Estado). Departamento de Recursos Minerais. *Geologia do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: DRM. 1 mapa, colorido. Escala: 1:50.000, 1990.

RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. *Bacias Hidrográficas e Rios Fluminenses - Síntese Informativa por Macrorregião Ambiental*. Rio de Janeiro: SEMADS, 73 p, 2001.

RONCARATI, H.; BARROCAS, S.L.S. Projeto Sepetiba: estudo geológico preliminar dos sedimentos recentes superficiais da Baía de Sepetiba, município do Rio de Janeiro, Itaguaí e Mangaratiba. Rio de Janeiro: CENPES-Petrobrás, 1978.

RONCARATI, H.; MENEZES L.F.T. Marambaia, Rio de Janeiro: origem e evolução. In: Menezes, L.F.T.; Peixoto, A.L.; Araujo, D.S.D. (orgs). *História Natural da Marambaia*. Seropédica: Editora da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, p.15-38, 2005.

RONCARATI, H.; NEVES, L.E. Estudo preliminar dos sedimentos recentes superficiais da Baixada de Jacarepaguá - Município do Rio de Janeiro (Projeto Jacarepaguá). Rio de Janeiro: Petrobrás, CENPES, 89 p, 1976.

- SHEPARD, F. P. Revised nomenclature for depositional coastal features. American Association of Petroleum Geologists. v. 36, n. 10. p. 1902-1912, 1952.
- SHORT, A.D. Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. Wiley, Chichester, 1999.
- SIGNORINI, S. R. A study of the circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba Part I: a survey of the circulation based on experimental field data. Boletim Instituto Oceanográfico, v. 29, n. 1. p. 41 – 55. 1980a.
- SONU, C. J. Three-dimensional beach changes. Journal of Geology. 81, p. 42-64, 1973.
- SOULSBY, R. L. Dynamics of Marine Sands, Thomas Telford, London, 1997.
- STERNBERG, R. W. Predicting initial motion and bedload transport of sediment particles in the shallow marine environment. In: Swift, D.J.P., Duane, D.B., Pilkey, O. H. (Eds), Shelf Sediment Transport, Process and Pattern, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., p. 61-83, 1972.
- STEWART, C. J.; DAVIDSON-ARNOTT, R. G. D. Morphology, formation and migration of longshore sandwaves: Long Point, Lake Erie, Canada, Mar. Geol., 81, p. 63– 77, 1998.
- STUTZ, M.L.; PILKEY, O.H. Open-ocean barrier islands: global influence of climatic, oceanographic, and depositional settings. Journal of Coastal Research, v. 27, n. 2, p. 207–222. 2011.
- TANNER, W. F. Finger bars on an ideal low-wave, low-tide beach, Santa Catarina Island, Brazil. Geological Society of American Special Papers (abstracts), v. 115, p. 219, 1967.
- THE OPEN UNIVERSITY. Waves Tides and Shallow-Water Processes. 2. ed. Oxford: Cultrix, 1999.
- TRAYKOYSKI, P.; HAY, A.E.; IRISH, J.D.; LYNCH, J.F. Geometry, migration, and evolution of wave orbital ripples at LEO-15. J. Geophys. Res. 104 (C1), p. 1505–1524, 1999.
- VAN RIJN, L.C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Amsterdam: AquaPublications, 1993.
- VAN RIJN, L. C. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. Journal of Hydraulic Engineering, v. 133, n. 6, p. 649-667, 2007.
- VIANNA, J. C. Caracterização oceanográfica dos canais de maré de Barra de Guaratiba (RJ). 2016. 57 p. Trabalho de Conclusão de curso (Monografia). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia.
- VILLENA, H. H. Baía de Sepetiba: Considerações Geológicas e Oceanográficas com Base em Dados Batimétricos e Sedimentológicos. Anais do IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Mídia Digital (CD). 4 p., 2003.
- VILLENA, H. H. Capítulo 4: Item 4.1 *Batimetria*; in: *Caracterização Oceanográfica da Costa do estado do Rio de Janeiro: Trecho I – Baía de Sepetiba. Relatório de Pesquisa à FAPERJ*, Departamento de Oceanografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, p. 20-29, 2004.

VILLENA, H. H.; PEREIRA, S. D.; CHAVES, H. A. F.; DIAS, M. S.; GUERRA, J. V. Índícios da variação do nível do mar na Baía de Sepetiba. Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Geologia, Baía de Sepetiba: estado da arte, 2012.

WIBERG, P.L., HARRIS, C.K. Ripple geometry in wave-dominated environments. *J. Geophys. Res.* 99 (C1), p. 775–790, 1994.

WRIGHT, D.; A. D. SHORT. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: synthesis. *Mar. Geol.*, 56: p. 93-118, 1984.

WALL, G. R.; ELIZABETH, A. N.; SIMON, L. Use of an ADCP to Compute Suspended–Sediment Discharge in the Tidal Hudson River, New York. Scientific Investigation Report 2006 – 6055, In cooperation with New York State Department of Environmental Conservation., 2005.

**APÊNDICE A** – Classificação, quando possível, das imagens do *Google Earth*

Tabela 17 – Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NE-SO no ano de 2012

<b>Dia/Mês</b>	<b>Setor 1</b>	<b>Setor 2</b>	<b>Setor 3</b>	<b>Setor 4</b>
Janeiro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Fevereiro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
5 de Março	sem imagem	sem imagem	maré alta	maré alta
4 de abril	imagem ok	maré alta	maré alta	maré alta
Maiο	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Junho	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Julho	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
31 de Agosto	imagem ok	imagem ok	imagem ok	imagem ok
Setembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
26 de Outubro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	maré alta
Novembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Dezembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 18 – Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NE-SO no ano de 2013

<b>Dia/Mês</b>	<b>Setor 1</b>	<b>Setor 2</b>	<b>Setor 3</b>	<b>Setor 4</b>
Janeiro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Fevereiro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Março	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Abril	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
19 de Maio	sem imagem	maré alta	maré alta	maré alta
4 de Junho	maré alta	maré alta	maré alta	maré alta
Julho	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
5 de Agosto	sem imagem	maré alta	maré alta	sem imagem
19 de Setembro	sem imagem	imagem ok	imagem ok	maré alta
10 de Outubro	sem imagem	maré alta	maré alta	maré alta
Novembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Dezembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 19 - Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NE-SO no ano de 2014

<b>Dia/Mês</b>	<b>Setor 1</b>	<b>Setor 2</b>	<b>Setor 3</b>	<b>Setor 4</b>
Janeiro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
5 de Fevereiro	imagem ok	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Março	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
9 de abril	imagem ok	maré alta	maré alta	maré alta
7 de Maio	maré alta	maré alta	maré alta	maré alta
Junho	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Julho	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Agosto	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Setembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Outubro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
18 de Novembro	maré alta	maré alta	maré alta	maré alta
Dezembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 20 - Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NE-SO no ano de 2015

<b>Dia/Mês</b>	<b>Setor 1</b>	<b>Setor 2</b>	<b>Setor 3</b>	<b>Setor 4</b>
7 de Janeiro	maré alta	maré alta	maré alta	maré alta
Fevereiro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Março	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
17 de abril	imagem ok	imagem ok	maré alta	maré alta
Maio	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Junho	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
29 de Julho	imagem ok	imagem ok	imagem ok	maré alta
6 de Agosto	sem imagem	maré alta	maré alta	maré alta
Setembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Outubro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Novembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Dezembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 21 – Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NE-SO no ano de 2016

<b>Dia/Mês</b>	<b>Setor 1</b>	<b>Setor 2</b>	<b>Setor 3</b>	<b>Setor 4</b>
31 de Janeiro	sem imagem	sem imagem	maré alta	maré alta
3 de Fevereiro	maré alta	maré alta	sem imagem	sem imagem
6 de Março	imagem ok	imagem ok	imagem ok	sem imagem
22 de Abril	imagem ok	imagem ok	sem imagem	sem imagem
5 de Maio	sem imagem	sem imagem	maré alta	maré alta
16 de Junho	maré alta	maré alta	sem imagem	sem imagem
4 de Julho	sem imagem	maré alta	maré alta	maré alta
Agosto	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Setembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
31 de Outubro	imagem ok	sem imagem	sem imagem	sem imagem
27 de Novembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Dezembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 22 – Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NE-SO no ano de 2017

<b>Dia/Mês</b>	<b>Setor 1</b>	<b>Setor 2</b>	<b>Setor 3</b>	<b>Setor 4</b>
27 de Janeiro	sem imagem	maré alta	maré alta	maré alta
Fevereiro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Março	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Abril	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
9 de Maio	imagem ok	maré alta	sem imagem	sem imagem
7 de Junho	maré alta	maré alta	maré alta	sem imagem
Julho	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Agosto	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
2 de Setembro	sem imagem	imagem ok	imagem ok	maré alta
Outubro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Novembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem
Dezembro	sem imagem	sem imagem	sem imagem	sem imagem

Fonte: A autora, 2020.

## APÊNDICE B - Classificação, quando possível, das imagens do satélite Sentinel 2

Tabela 23 – Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NO-SE no ano de 2016

<b>Dia/ Mês</b>	<b>Condição</b>
25 de Janeiro	nuvens
Fevereiro	sem imagem
25 de Março	nuvens
24 de abril	imagem ok
Maio	sem imagem
Junho	sem imagem
13 de Julho	nuvens
02 de Agosto	nuvens
11 de Setembro	imagem ok
01 e 21 de Outubro	nuvens
10, 20 e 30 de Novembro	maré alta/nuvens/nuvens
20 e 30 de Dezembro	nuvens e imagem ok

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 24 – Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NO-SE no ano de 2017

<b>Dia/ Mês</b>	<b>Condição</b>
19 e 29 de Janeiro	nuvens
08 e 18 de Fevereiro	nuvens e imagem ok
10 e 30 de Março	maré alta e imagem ok
19 de abril	nuvens
09 e 29 de Maio	imagem ok/imagem ok
18 de Junho	maré alta
28 de Julho	imagem ok
17 de Agosto	nuvens
06 e 26 de Setembro	imagem ok/imagem ok
16 e 31 de Outubro	nuvens
05, 20, 25 e 30 de Novembro	nuvens, nuvens, maré alta e nuvens
10 e 15 e 20 de Dezembro	nuvens, nuvens e maré alta

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 25 – Classificação das imagens associadas à presença dos bancos transversais de orientação NO-SE no ano de 2018

<b>Dia/ Mês</b>	<b>Condição</b>
04 e 09, 19, 24 e 29 de Janeiro	nuvens/ imagem ok/ imagem ok/ imagem ok/ nuvens
08, 13, 18, 23 e 28 de Fevereiro	imagem ok/ nuvens/ nuvens/ nuvens/ imagem ok
05, 10, 15, 25 e 30 de Março	imagem ok/ nuvens/ nuvens/ maré alta/ imagem ok
09, 14, 19, 24 e 29 de abril	imagem ok/ nuvens/ imagem ok/ maré alta/ imagem ok
04, 09, 14, 19, 24 e 29 de Maio	imagem ok/ nuvens/ imagem ok/ nuvens/ nuvens/ imagem ok
03, 08, 13, 18, 23 e 28 de Junho	nuvens/ nuvens/ nuvens/ nuvens/maré alta/ imagem ok
03, 08, 13, 18, 23, 28 de Julho	imagem ok/ imagem ok/ imagem ok/ imagem ok/ maré alta/ imagem ok
02, 07, 12, 17, 22 e 27 de Agosto	nuvens
01, 06, 11, 16, 21e 26 de Setembro	maré alta/ nuvens/ nuvens/ imagem ok/ nuvens/ imagem ok
01, 06, 11, 16, 21, 26 e 31 de Outubro	nuvens/ nuvens/ nuvens/ nuvens/ nuvens/ nuvens/ maré alta
05, 10, 15 e 25 e 30 de Novembro	nuvens/ nuvens/ maré alta/ nuvens/ nuvens
05, 10, 15, 20, 25 e 30 de Dezembro	imagem ok/ imagem ok/ imagem ok/ imagem ok/ nuvens/ imagem ok

Fonte: A autora, 2020.

## APÊNDICE C - Condição de maré no momento da aquisição das imagens obtidas

Tabela 26 - Condição de maré das imagens associadas à presença dos bancos de orientação NO-SE no ano de 2016

<b>MÊS</b>	<b>DIA</b>	<b>MARÉ</b>
Janeiro	-	-
Fevereiro	-	-
Março	-	-
Abril	24	sizígia
Maio	-	-
Junho	-	-
Julho	-	-
Agosto	-	-
Setembro	11	quadratura
Outubro	-	-
Novembro	-	-
Dezembro	30	sizígia

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 27 - Condição de maré das imagens associadas à presença dos bancos de orientação NO-SE no ano de 2017

<b>MÊS</b>	<b>DIA</b>	<b>MARÉ</b>
Janeiro	-	-
Fevereiro	18	quadratura baixa
Março	30	sizígia
Abril	-	-
Maio	9	quadratura
	29	sizígia
Junho	-	-
Julho	28	sizígia
Agosto	-	-
Setembro	6	sizígia baixa
	26	sizígia
Outubro	-	-
Novembro	-	-
Dezembro	-	-

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 28 - Condição de maré das imagens associadas à presença dos bancos de orientação NO-SE no ano de 2018

<b>MÊS</b>	<b>DIA</b>	<b>MARÉ</b>
Janeiro	9	quadratura
	19	sizígia
	24	sizígia
Fevereiro	8	quadratura
	28	quadratura
Março	5	sizígia
	30	quadratura
Abril	9	quadratura
	19	sizígia
	29	quadratura
Maio	4	sizígia
	14	quadratura
	29	baixa quadratura
Junho	28	quadratura
Julho	3	sizígia
	8	quadratura
	13	sizígia baixa
	18	sizígia
	28	sizígia
agosto	-	-
setembro	1	-
	16	quadratura
	26	sizígia
outubro	31	-
novembro	15	-
dezembro	5	quadratura
	10	sizígia alta
	15	quadratura
	20	quadratura
	30	quadratura

Fonte: A autora, 2020.

**APÊNDICE D** - Parâmetros estatísticos médios dos bancos transversais encontrados na margem interna da restinga

Tabela 29 - Médias anuais dos parâmetros estatísticos dos bancos de orientação NE-SO entre os anos de 2012 e 2017.  $\lambda$  = distância entre as cristas dos bancos;  $\Delta x$  = distância transversal à costa

<b>Ano</b>	<b><math>\lambda</math> (m)</b>	<b>Desvio Padrão (m)</b>	<b>Delta X (m)</b>	<b>Número de bancos</b>	<b>Bancos p/ km</b>	<b>Setor analisado</b>
<b>2012</b>	57	22	20 a 620	271	10	1,2,3,4
<b>2013</b>	68	25	73 a 340	65	8	2 e 3
<b>2014</b>	102	52	45 a 342	39	3	1
<b>2015</b>	78	48	24 a 325	163	8	1, 2 e 3
<b>2016</b>	64	23	50 a 680	193	9	1, 2 e 3
<b>2017</b>	99	62	30 a 400	177	9	1, 2 e 3

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 30 - Médias mensais dos parâmetros estatísticos dos bancos de orientação NE-SO entre os anos de 2012 e 2017.  $\lambda$  = distância entre as cristas dos bancos;  $\Delta x$  = distância transversal à costa

2012 a 2017						
<b>Mês</b>	<b><math>\lambda</math> (m)</b>	<b>Desvio Padrão (m)</b>	<b>Delta X (m)</b>	<b>Número de bancos</b>	<b>Bancos p /km</b>	<b>Setor Amostrado</b>
<b>01</b>	-	-	-	-	-	-
<b>02</b>	82	36	45 a 342	53	4	1
<b>03</b>	62	20	70 a 550	209	10	1,2 e 3
<b>04</b>	84	40	24 a 680	118	7	1, 2
<b>05</b>	99	57	30 a 400	127	10	1
<b>06</b>	-	-	-	-	-	-
<b>07</b>	73	43	35 a 225	213	10	1,2 e 3
<b>08</b>	57	24	20 a 540	301	11	1,2,3 e 4
<b>09</b>	84,2	44,6	30 a 340	57,5	7	2 e 3
<b>10</b>	90	44	50 a 550	66	5	1
<b>11</b>	-	-	-	-	-	-
<b>12</b>	-	-	-	-	-	-

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 31 - Parâmetros estatísticos médios dos bancos de orientação NO-SE em diferentes níveis de maré.  $\lambda$  = distância entre as cristas dos bancos;  $\Delta x$  = distância transversal à costa

<b>Altura da maré (m)</b>	<b><math>\lambda</math> (m)</b>	<b>Desvio Padrão (m)</b>	<b><math>\Delta x</math> (m)</b>	<b>Número de bancos</b>	<b>Bancos p/ km</b>
<b>0</b>	532	165	330 a 875	29	3
<b>0,1</b>	552	178	330 a 825	22	2
<b>0,2</b>	452	132	339 a 720	22	2
<b>0,3</b>	505	126	200 a 690	20	2
<b>0,4</b>	530	187	200 a 640	17	2
<b>0,5</b>	575	257	180 a 625	14	2
<b>0,6</b>	510	119	200 a 600	15	2
<b>0,7</b>	654	255	350 a 552	9	1
<b>0,8</b>	522	172	170 a 510	12	2
<b>0,9</b>	-	-	-	-	-
<b>1</b>	-	-	-	-	-
<b>1,1</b>	-	-	-	-	-
<b>1,2</b>	-	-	-	-	-
<b>1,3</b>	-	-	-	-	-
<b>Média</b>	537	177	170 a 875	18	2

Fonte: A autora, 2020.

**APÊNDICE E - Parâmetros estatísticos anuais dos bancos NE-SO para cada setor delimitado**

Tabela 32 - Dados referentes ao setor 1.  $\lambda$  = distância entre as cristas dos bancos;  $\Delta x$  = distância transversal à costa

<b>SETOR 1 (12 km)</b>					
	$\lambda$ (m)	Desvio Padrão (m)	$\Delta x$ (m)	Número de bancos	Bancos p/ km
<b>2012</b>	66	27	20 a 620	104	8
<b>2013</b>	-	-	-	-	-
<b>2014</b>	102	52	45 a 342	39	3
<b>2015</b>	89	52	36 a 325	79	6
<b>2016</b>	76	32	50 a 680	109	10
<b>2017</b>	99	57	30 a 400	127	10
<b>Médias</b>	87	44	20 a 680	92	8

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 33 - Dados referentes ao setor 2.  $\lambda$  = distância entre as cristas dos bancos;  $\Delta x$  = distância transversal à costa

<b>SETOR 2 (4,5 km)</b>					
	$\lambda$ (m)	Desvio Padrão (m)	$\Delta x$ (m)	Número de bancos	Bancos p/ km
<b>2012</b>	64	18	30 a 389	69	15
<b>2013</b>	70	29	73 a 340	33	14
<b>2014</b>	-	-	-	-	-
<b>2015</b>	66	29	24 a 225	50	11
<b>2016</b>	62,5	22	70 a 340	61	15
<b>2017</b>	68	28	30 a 175	40	9
<b>Médias</b>	66	25	24 a 389	51	13

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 34 - Dados referentes ao setor 3.  $\lambda$  = distância entre as cristas dos bancos;  $\Delta x$  = distância transversal à costa

<b>SETOR 3 (4 km)</b>					
	$\lambda$ (m)	Desvio Padrão (m)	$\Delta x$ (m)	Número de bancos	Bancos p/ km
<b>2012</b>	34	21	30 a 330	83	20
<b>2013</b>	66	22	86 a 310	32	8
<b>2014</b>	-	-	-	-	-
<b>2015</b>	79	63	130 a 222	34	8
<b>2016</b>	55	16	230	23	6
<b>2017</b>	132	100	40 a 130	10	2
<b>Médias</b>	73	44	30 a 330	36	9

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 35 - Dados referentes ao setor 4.  $\lambda$  = distância entre as cristas dos bancos;  $\Delta x$  = distância transversal à costa

<b>SETOR 4 (5,5 km)</b>					
	$\lambda$ (m)	Desvio Padrão (m)	$\Delta x$ (m)	Número de bancos	Bancos p/ km
<b>2012</b>	65	24	32 a 220	15	3
<b>2013</b>	-	-	-	-	-
<b>2014</b>	-	-	-	-	-
<b>2015</b>	-	-	-	-	-
<b>2016</b>	-	-	-	-	-
<b>2017</b>	-	-	-	-	-
<b>Médias</b>	65	24	32 a 220	15	3

Fonte: A autora, 2020.

**APÊNDICE F - Mapas representando as taxas de migração dos bancos de orientação NE-SO**

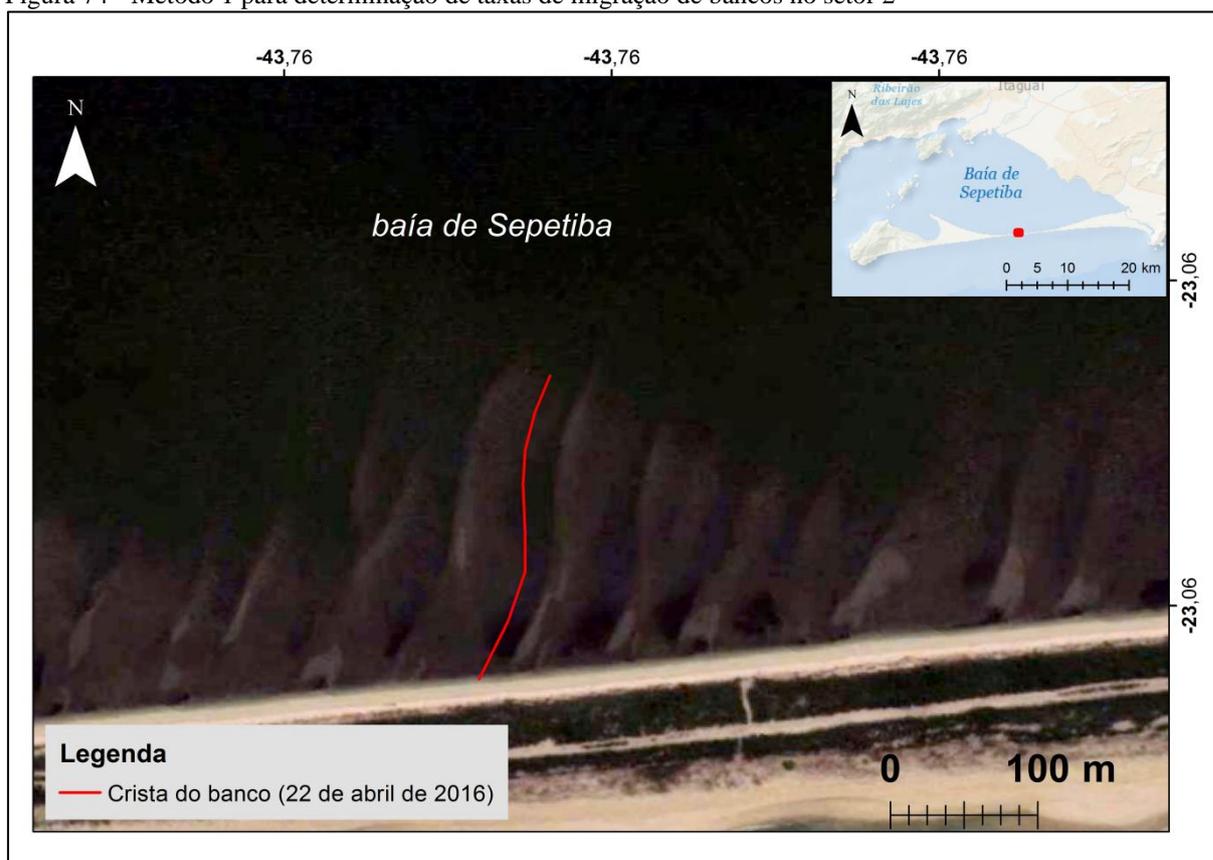
Figura 73 - Método 2 para determinação de taxas de migração de bancos no setor 1



Legenda: Imagem do dia 22 de abril de 2016 (contraste +14% e transparência +36%) sobreposta a imagem do dia 29 de julho de 2015 (contraste 38%). As setas amarelas indicam à posição dos bancos em 29 de julho de 2015 e as setas em vermelho a posição dos bancos em 22 de abril de 2016.

Fonte: GOOGLE EARTH, DIGITAL GLOBE, 2020.

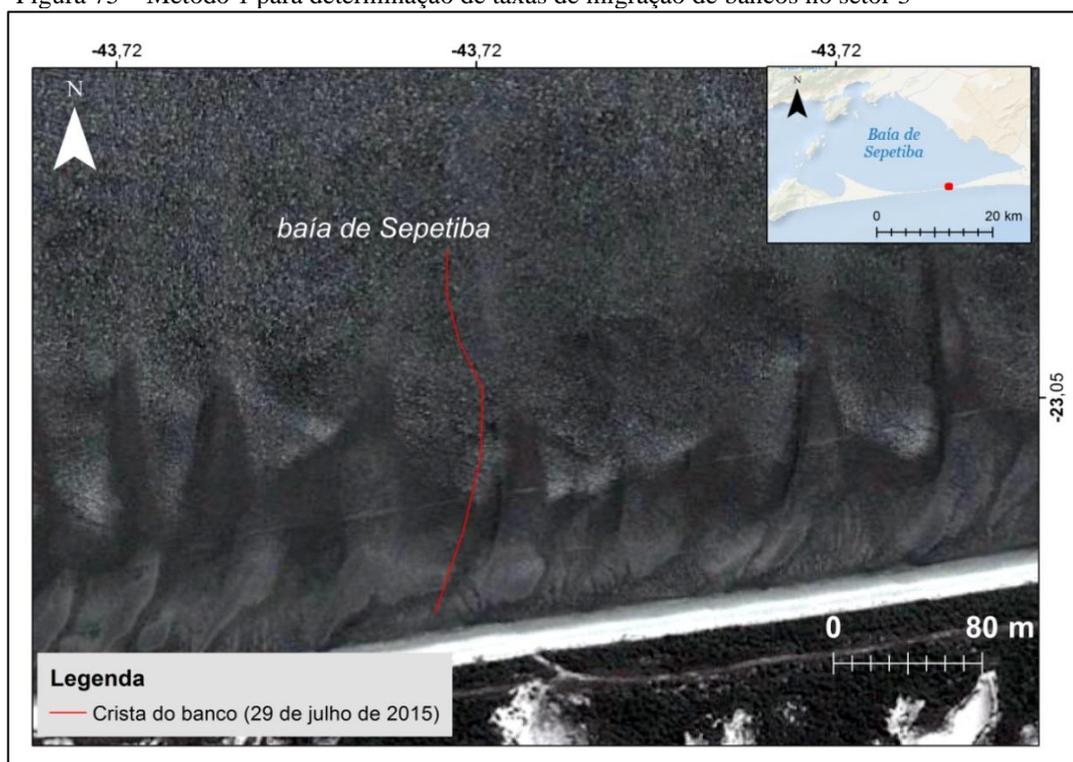
Figura 74 - Método 1 para determinação de taxas de migração de bancos no setor 2



Legenda: Imagem do dia 29 de julho de 2015.

Fonte: GOOGLE EARTH, DIGITAL GLOBE, 2020.

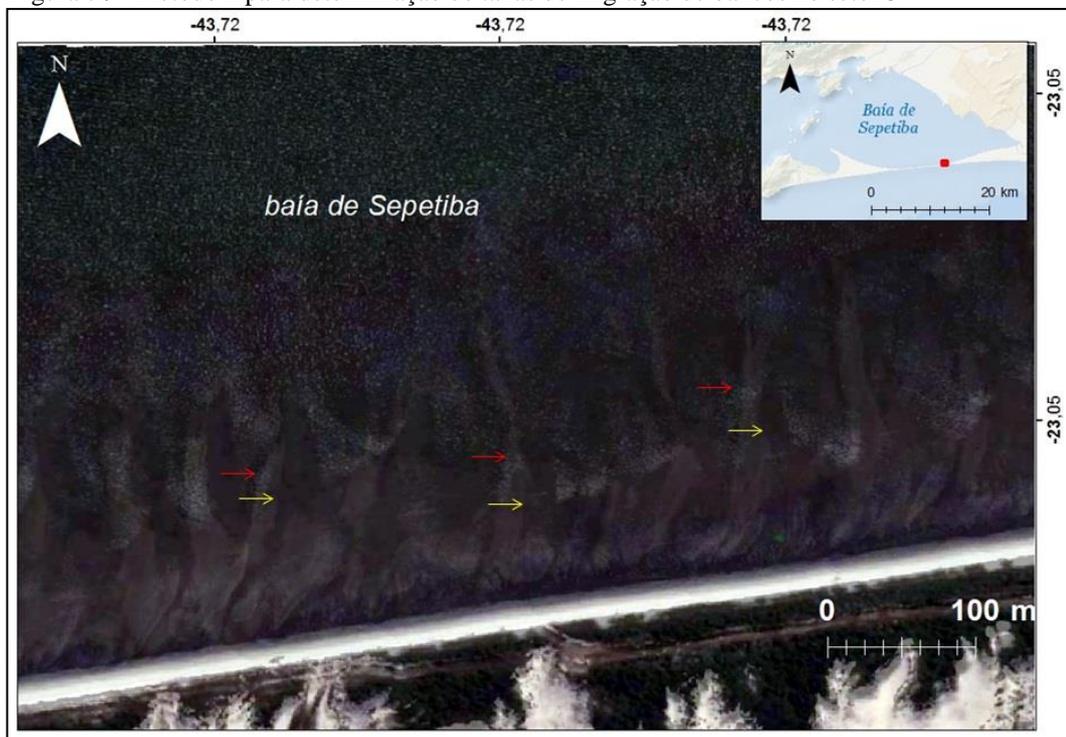
Figura 75 – Método 1 para determinação de taxas de migração de bancos no setor 3



Legenda: Imagem do dia 31 de agosto de 2012.

Fonte: GOOGLE EARTH, DIGITAL GLOBE, 2020.

Figura 76 - Método 2 para determinação de taxas de migração de bancos no setor 3

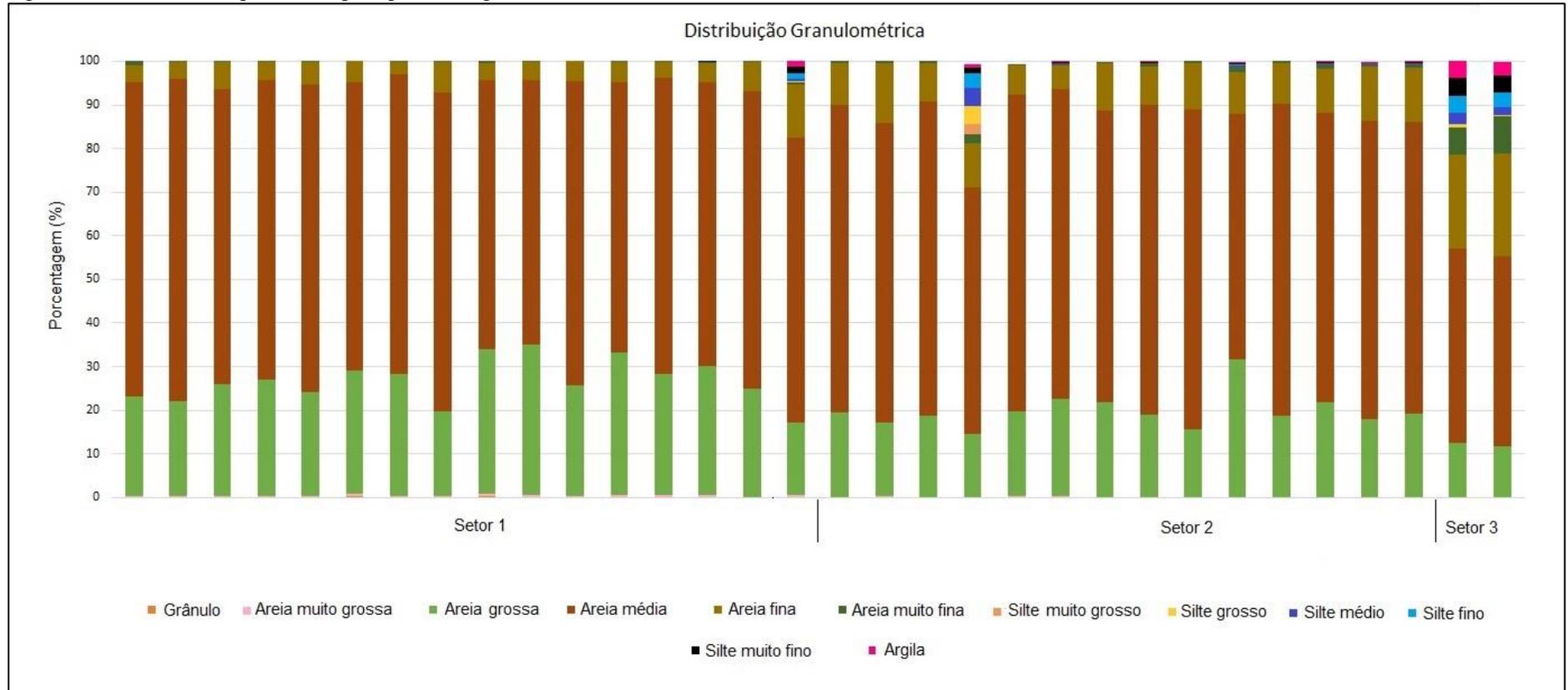


Legenda: Imagem do dia 29 de julho de 2015 (contraste +14% e transparência +65%) sobreposta a imagem do dia 31 de agosto de 2012 (contraste 38%). As setas amarelas indicam a posição dos bancos em 31 de agosto de 2012 e as setas em vermelho a posição dos bancos em 29 de julho de 2015.

Fonte: GOOGLE EARTH, DIGITAL GLOBE, 2020.

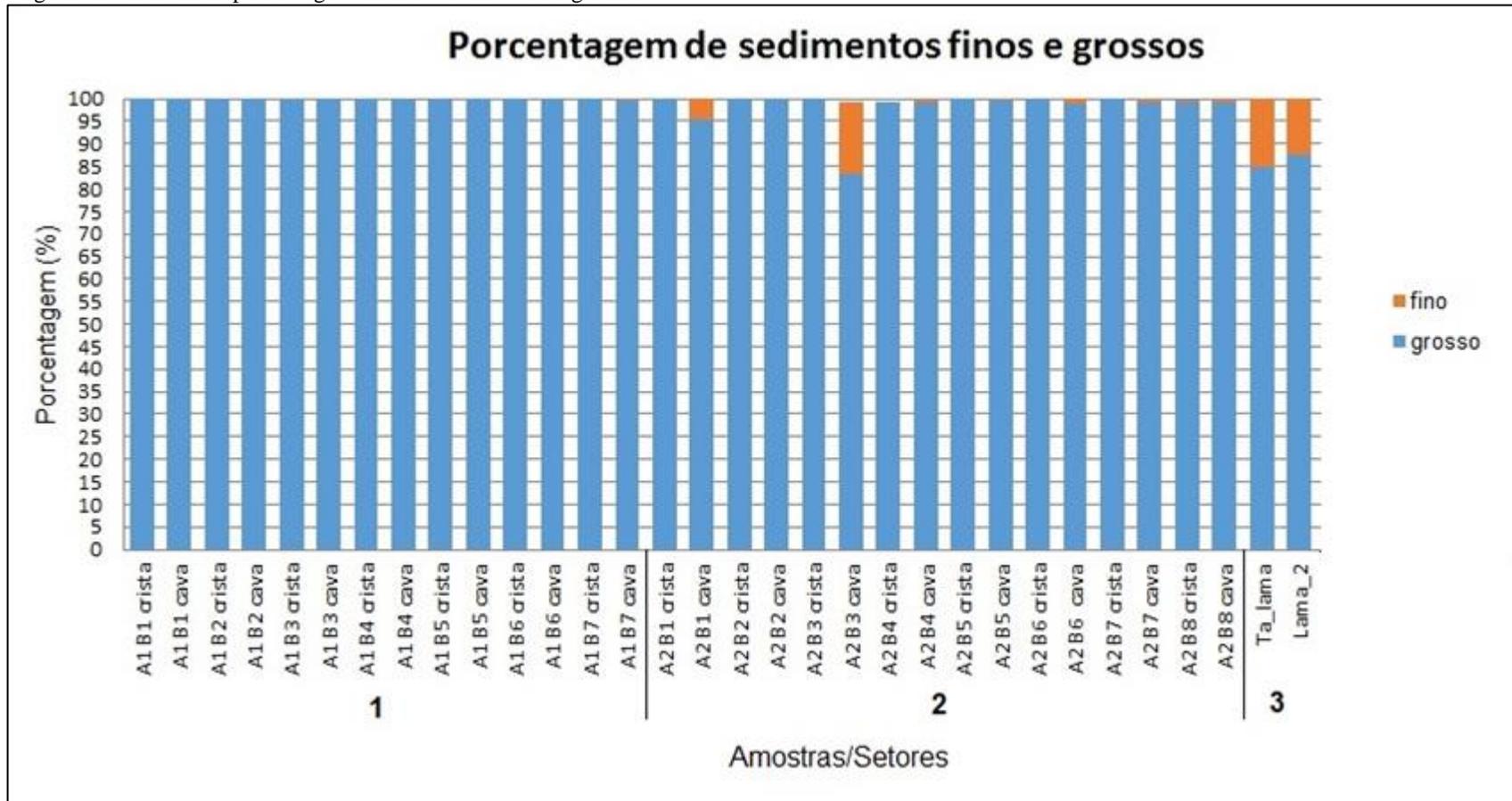
**APÊNDICE G - Gráficos da Análise Granulométrica**

Figura 77 - Gráfico da frequência em peso por classe granulométrica



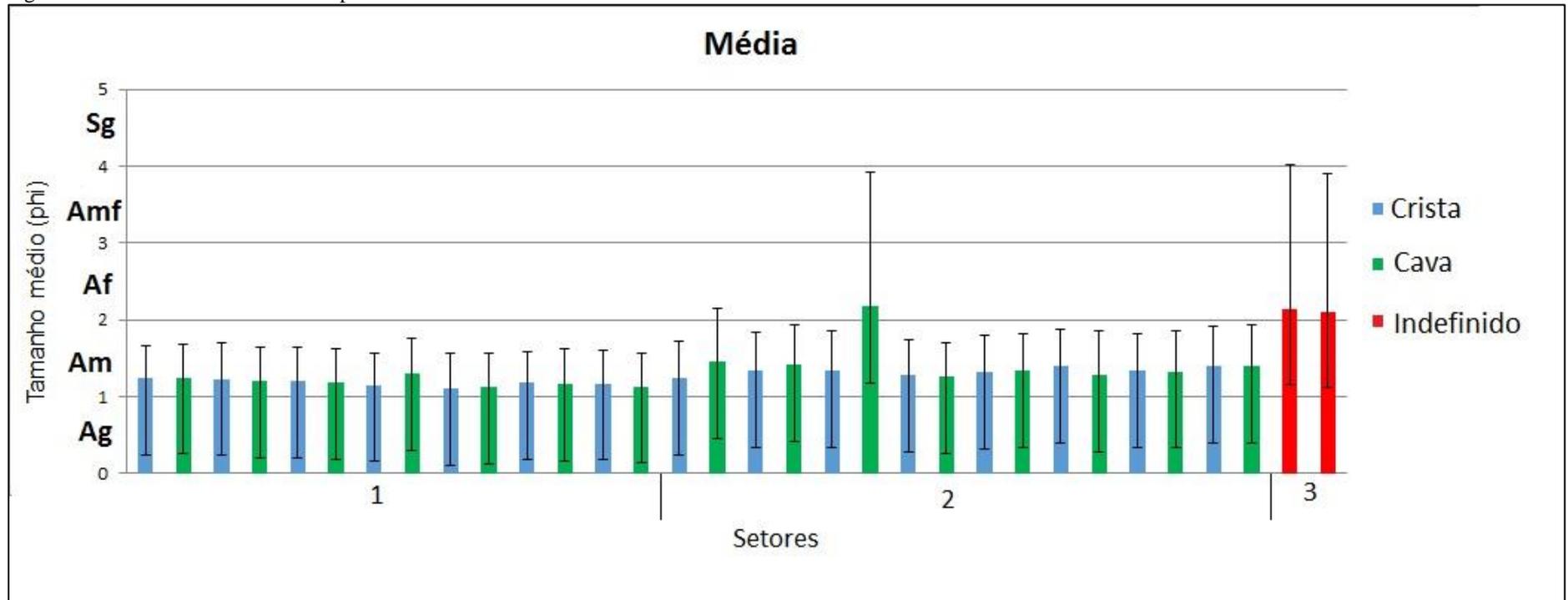
Fonte: A autora, 2020.

Figura 78 - Gráfico da percentagem de sedimentos finos e grossos



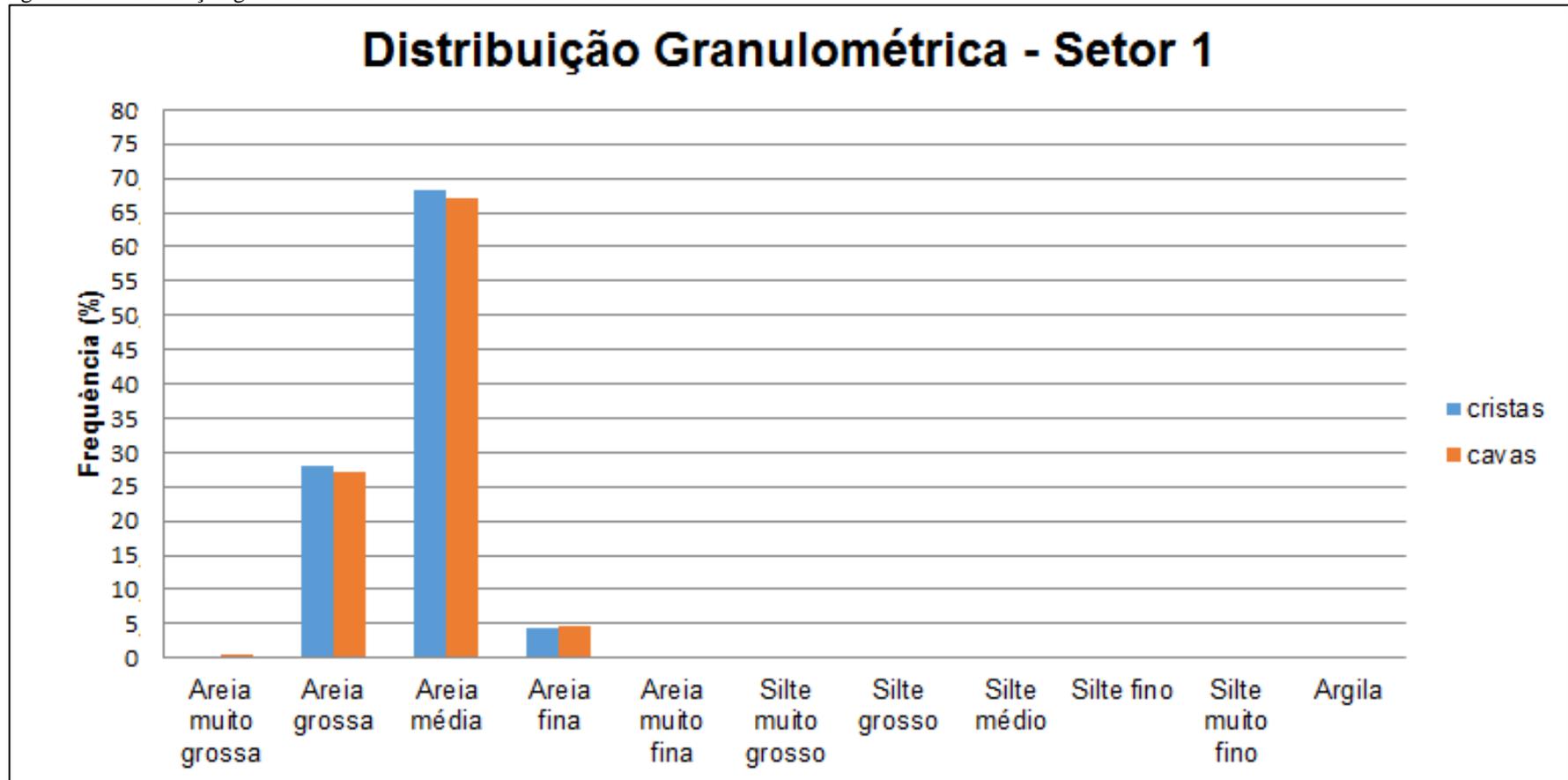
Fonte: A autora, 2020.

Figura 79 - Tamanho médio e desvio padrão das amostras coletadas



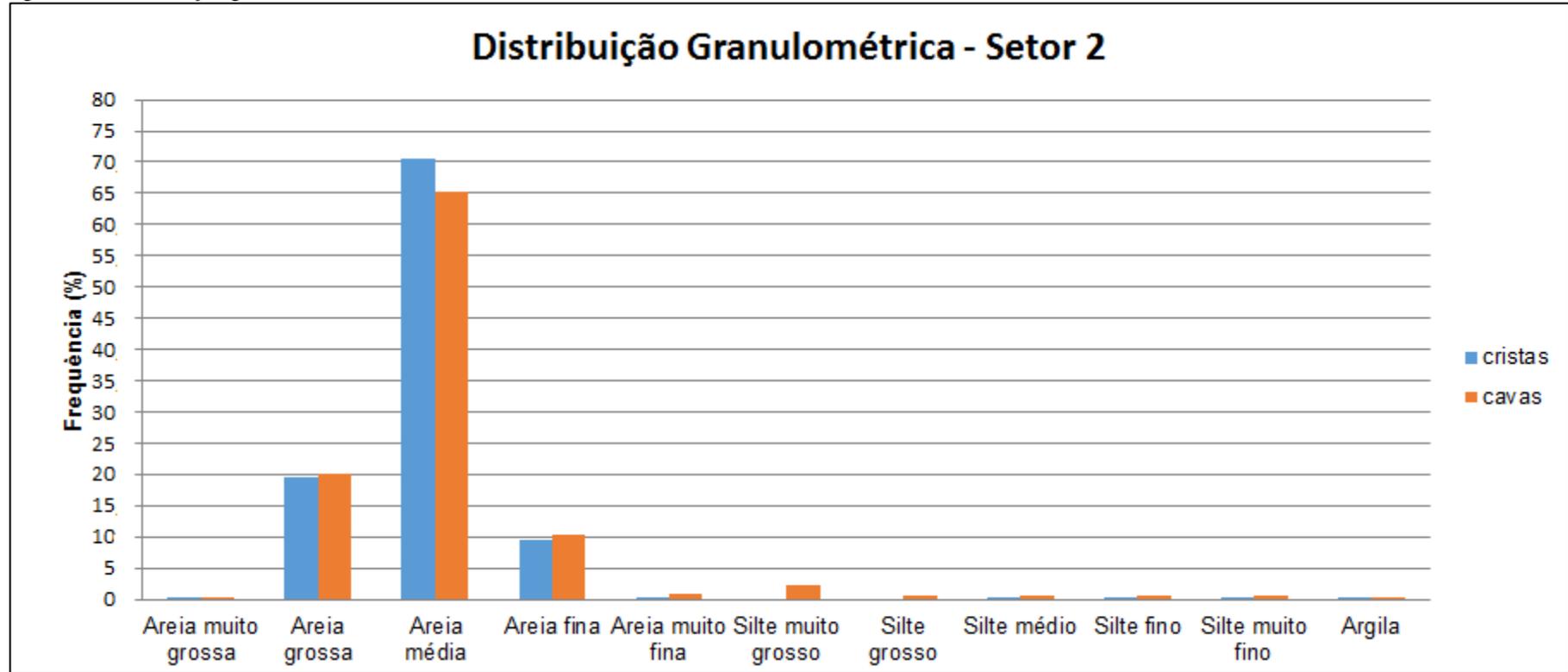
Legenda: Ag = areia grossa; Am = areia média; Af = areia fina; Amf = areia muito fina; Sg = silte grosso.  
 Fonte: A autora, 2020.

Figura 80 - Distribuição granulométrica média das amostras coletadas no setor 1



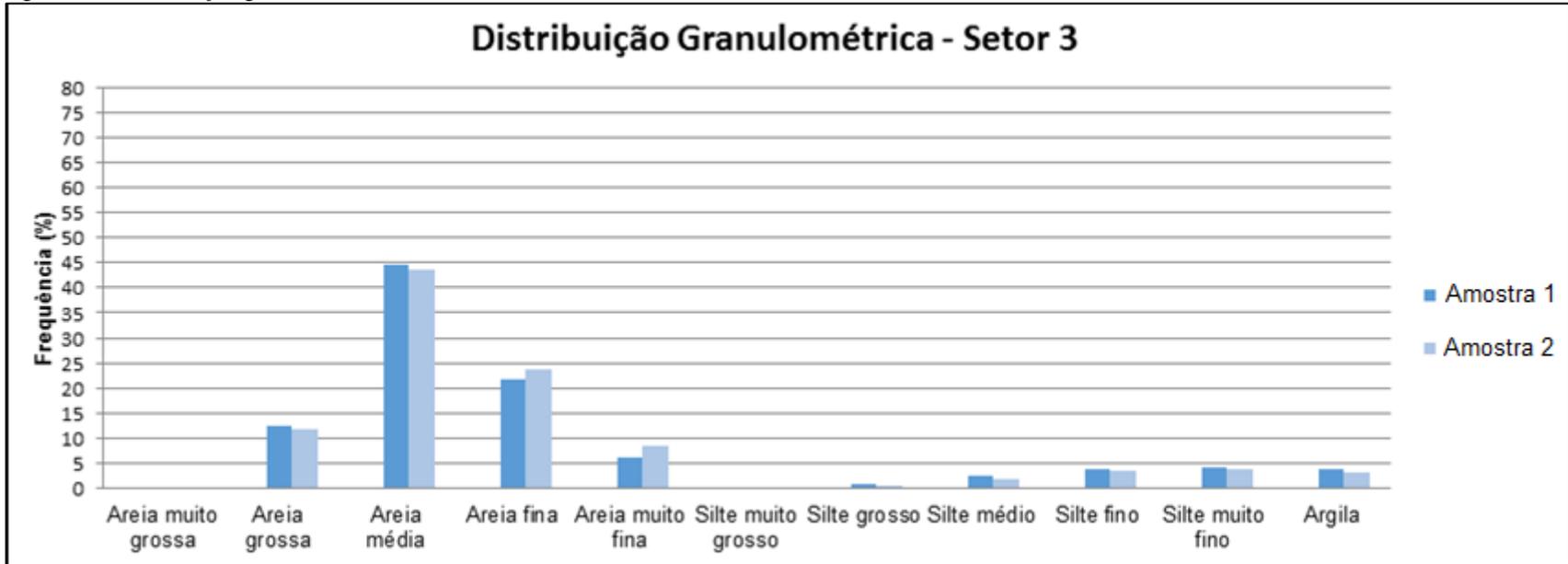
Fonte: A autora, 2020.

Figura 81 - Distribuição granulométrica média das amostras coletadas no setor 2



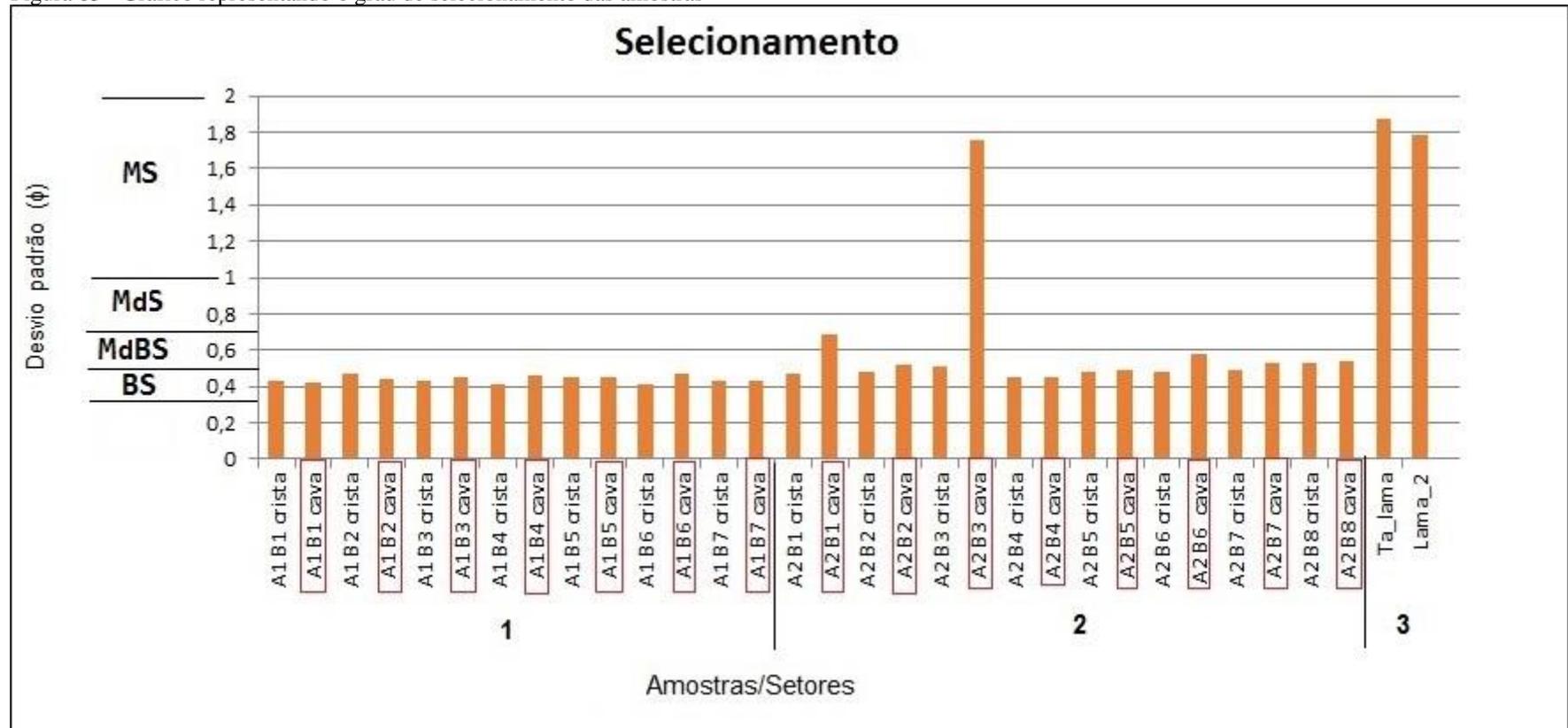
Fonte: A autora, 2020.

Figura 82 - Distribuição granulométrica média das amostras coletadas no setor 3



Fonte: A autora, 2020.

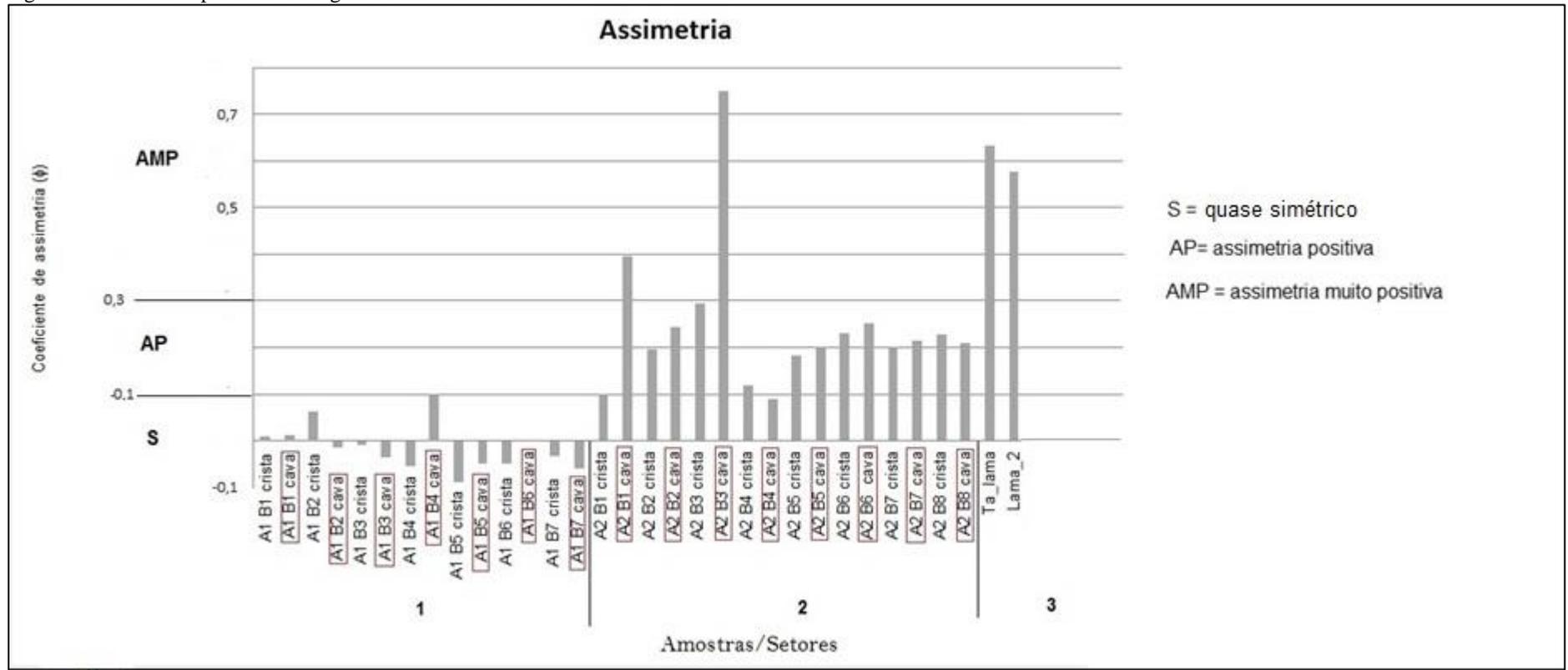
Figura 83 - Gráfico representando o grau de selecionamento das amostras



Legenda: Em vermelho estão destacadas as amostras coletadas nas cavas dos bancos transversais. MS\* = mal selecionado; MdS = moderadamente selecionado; MdBS = moderadamente bem selecionado; BS = bem selecionado.

Fonte: A autora, 2020.

Figura 84 - Gráfico representando o grau de assimetria das amostras



Legenda: Em vermelho estão destacadas as amostras coletadas nas cavas dos bancos transversais.

Fonte: A autora, 2020.