



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

RODOLFO JORGE VALE DE ARAÚJO

**DINÂMICA COSTEIRA E PROCESSOS EROSIVOS: Alternativas de Controle
para o Pontal Sul da Ilha de Itamaracá – PE, Brasil**

Recife

2022

RODOLFO JORGE VALE DE ARAÚJO

**DINÂMICA COSTEIRA E PROCESSOS EROSIVOS: Alternativas de Controle
para o Pontal Sul da Ilha de Itamaracá – PE, Brasil**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Oceanografia.

Área de concentração: Oceanografia Abiótica.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Tereza Cristina Medeiros de Araújo.

Coorientador: Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira.

Recife

2022

Catálogo na Fonte
Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves Luz, CRB4/1361

- A663d Araújo, Rodolfo Jorge Vale de
Dinâmica costeira e processos erosivos: Alternativas de controle para o pontal sul da Ilha de Itamaracá - PE, Brasil / Rodolfo Jorge Vale de Araújo – 2022.
147 f.: il., figs., tabs., abrev. e sigl.
- Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tereza Cristina Medeiros de Araújo.
Coorientador: Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Recife, 2022.
Inclui referências e apêndices.
1. Oceanografia. 2. Dinâmica sedimentar. 3. Erosão costeira. 4. Sensoriamento remoto. 5. Linha de Costa. 6. Gerenciamento costeiro. 7. Forte Orange. I. Araújo, Tereza Cristina Medeiros de (Orientadora). II. Pereira, Pedro de Souza (Coorientador). III. Título.

UFPE

551.46 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 29

RODOLFO JORGE VALE DE ARAÚJO

**DINÂMICA COSTEIRA E PROCESSOS EROSIVOS: Alternativas de Controle
para o Pontal Sul da Ilha de Itamaracá – PE, Brasil**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Oceanografia.

Área de concentração: Oceanografia Abiótica.

Aprovado em: 26 de outubro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Tereza Cristina Medeiros de Araújo (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Monica Ferreira Costa (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Doris Velela (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. João Luiz Nicolodi (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais essa vitória e por estar sempre presente em minha vida, guiando meus passos e me abençoando frente aos desafios que preciso superar.

À minha família, pela inspiração, motivação, apoio e exemplos de dedicação acadêmica e aos estudos deixados por meu pai, Prof. Me. Alfredo Rodolfo Beuttenmüller de Araújo, Biomédico e Bacharel em Direito; minha mãe, Prof.^a Dr.^a Hulda Vale de Araújo, Enfermeira; minha tia Prof.^a Izabel Virgínia Beuttenmüller de Araújo; meu irmão, futuro mestre, André Luiz Vale de Araújo, Engenheiro de *Software*; meu irmão, futuro doutor, Me. Alfredo César Vale de Araújo, Engenheiro Civil e de Minas; e meu primo Dr. Persus Beuttenmüller.

Aos meus orientadores, a Prof.^a Dr.^a Tereza Cristina Medeiros de Araújo, pelo acolhimento, confiança e por me receber de braços abertos no Laboratório de Oceanografia Geológica deste departamento, e o Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira, por todo apoio, incentivo e amizade dedicados ao longo desses últimos quatro anos de estudo, pesquisa e muito trabalho.

Às Professoras Dr.^a Monica Costa, Dr.^a Doris Veleza e Dr.^a Mirella Costa e aos Professores Dr. Rodrigo Gonçalves, Dr. Roberto Barcellos, Dr. Augusto Schettine, Dr. Valdir Manso e Dr. Renato Henriques, pelos conselhos e orientações.

Aos amigos do ICMBio/CMA Itamaracá, Fábio Adonis e Iara Sommer.

Aos meus amigos e parceiros da gestão costeira Andrea Olinto, Sidney Vieira e Luiz Costa, sempre me apoiando, incentivando e caminhando juntos comigo, e à Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade de Pernambuco – SEMAS/PE.

Ao amigo Anderson Lino, por todo apoio, amizade e muitas horas de ajuda.

Ao amigo e compadre, Theo de Carvalho pela amizade, paciência e, principalmente, pela ajuda com “o meu computador”.

À Ilca Araújo, pelo companheirismo, dedicação, apoio e as muitas orações neste último ano de doutorado.

Aos amigos e colegas do Labogeo e do Docean, conquistados ao longo desses anos de convívio, as “Lucianas”, Karol, Tiago, Marcos, Nat, Luis, Nivaldo, Cris, Paulo, Juliana, Mari, Ernesto, José Filho, André e Daniel.

Aos amigos e parceiros da S&S Topografia, Anderson Schwab, e da StudioLUMIX, Herbet Costa.

À Fundação CAPES pela bolsa de doutorado.

RESUMO

A intensificação da pressão antrópica e as alterações dos padrões climáticos têm interferido sobremaneira nos processos físicos responsáveis pelo equilíbrio e variabilidade naturais dos ecossistemas costeiros, tornando cada vez mais evidentes e perceptíveis às populações litorâneas os problemas relacionados à erosão. De comparável importância, os padrões de uso e ocupação do litoral interferem na estabilidade e na morfologia da planície costeira, assumindo um importante papel em sua evolução. Através da combinação de um conjunto de dados formados por imagens de sensoriamento remoto, pontos geodésicos, séries temporais da linha de costa, reanálises globais e índices climáticos oceano-atmosfera, foram analisados e identificados os processos costeiros dominantes, o balanço sazonal dos estoques sedimentares, e as variações espaço-temporal e morfológica da linha de costa, das praias e dos bancos arenosos localizados na margem insular da desembocadura sul do Canal de Santa Cruz, na Ilha de Itamaracá, Pernambuco – Brasil. Além disso, imagens e documentos históricos, instrumentos e diretrizes para gestão costeira foram utilizados para avaliar as estratégias de proteção às praias e os riscos ao patrimônio histórico. O trecho de praia mais abrigado do pontal sul da Ilha de Itamaracá, entre dez/2017 e dez/2018, apresentou balanço sedimentar positivo (+704,52m³) enquanto o intermediário e o mais exposto, negativos (-5.009 e -14.110m³, respectivamente). A variação espaço-temporal da linha de costa, na escala interanual 2011-2020, classificou todas as praias analisadas em erodida ou criticamente erodida, com taxas máximas de regressão de -6,78 e -8,55m/ano. Os períodos erosivos foram relacionados às fases mais energéticas da potência de onda, impulsionados, por sua vez, por eventos de La Niña, mais intensos a partir de 2006 e durante a estação chuvosa. Por fim, expostas à erosão costeira e localizadas entre praias erodidas e criticamente erodidas, as estruturas do Forte Orange (1633), além de achados arqueológicos e documentos históricos, serviram como registro das primeiras tentativas de se lidar com o processo erosivo atuante na área de estudo. Atualmente, a adaptação à erosão costeira exige Políticas Públicas eficientes e instrumentos adequados para Gestão Integrada da Zona Costeira, que possam promover a responsabilidade compartilhada e a ampla participação na tomada de decisões para a gestão sustentável dos recursos e sistemas costeiros.

Palavras-chave: dinâmica sedimentar; erosão costeira; sensoriamento remoto; linha de costa; gerenciamento costeiro; Forte Orange.

ABSTRACT

The human pressure intensification and changes in weather patterns have greatly interfered in the physical processes responsible for the natural balance and variability of coastal ecosystems, making problems related to erosion increasingly evident and perceptible to coastal populations. Of comparable importance, the patterns of coast use and occupation interfere in the coastal plain stability and morphology, assuming an important role in its evolution. Through the combination of remote sensing data, geodetic points, coastline time series, global reanalysis and ocean-atmosphere climate indexes, the dominant coastal processes, the seasonal balance of sedimentary stocks, and the spatial-temporal and morphological shoreline variations, beaches and sandy banks located on the insular margin of the Santa Cruz Channel southern mouth, Itamaracá Island, Pernambuco - Brazil, were analyzed and identified. In addition, images and historical documents, tools and guidelines for coastal management were used to assess beach protection strategies and risks to historical heritage. The most sheltered stretch of beach on the Itamaracá Island southern, between Dec/2017 and Dec/2018, presented a positive sedimentary balance (+704.52 m³) while the intermediate and the most exposed, were negative (-5,009 and -14,110 m³, respectively). The shoreline spatial-temporal variation, on the interannual scale 2011-2020, classified all beaches analyzed as eroded or critically eroded, with maximum regression rates of -6.78 and -8.55m/year. Erosive periods were related to more energetic phases of wave power, driven, in turn, by La Niña events, more intense from 2006 onwards and during the rainy season. Lastly, the structures of Fort Orange (1633), exposed to coastal erosion and located between eroded and critically eroded beaches, served as a record, in addition to archaeological finds and historical documents, of the first attempts to deal with the erosion process active in the study area. Today, adapting to coastal erosion requires effective public policies and appropriate tools for integrated coastal zone management, which can promote shared responsibility and broad participation in decision-making for the sustainable management of coastal resources and systems.

Keywords: sediment dynamics; coastal erosion; remote sensing; shoreline; coastal management; Fort Orange.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ARTIGO 1 – MORPHODYNAMIC STUDY OF SANDY BEACHES IN A TROPICAL TIDAL INLET USING RPAS

Figure 1 –	Study area location: (a) Pernambuco state – NE, Brazil; (b) Itamaracá Island municipality and SCC U-shaped; and (c) Itamaracá Island southeastern beaches sectors: <i>Sector 1</i> – in red; <i>Sector 2</i> – in green; and <i>Sector 3</i> – in blue.....	19
Figure 2 –	Tidal, wave and wind conditions: (a) tide signal; (b) significant wave height; (c) wave period; (d) wave direction; (e) wave power; (f) wind speed; (g) wind direction.....	27
Figure 3 –	RMSEz per campaign in each analyzed sector.....	29
Figure 4 –	Total sediment volume for each campaign.....	31
Figure 5 –	Net volume changes between campaigns, expressed in terms of loss (red) and gain (blue).....	31
Figure 6 –	Net and total volume variation within each sector, expressed in terms of loss (red) and gain (blue). <i>Sectors 1</i> and <i>2</i> (Dec/2017–Dec/2018); and <i>Sector 3</i> (Apr–Dec/2018).....	32
Figure 7 –	<i>Sector 1</i> cross shore profiles. Mean sea level (MSL; dashed line) = 1.28m.....	33
Figure 8 –	<i>Sector 2</i> cross shore profiles. Mean sea level (MSL; dashed line) = 1.28m.....	35
Figure 9 –	<i>Sector 3</i> cross shore profiles. Mean sea level (MSL; dashed line) = 1.28m.....	37
Figure 10 –	Net sedimentary volume variation within each cross-shore profile, expressed in terms of loss (red) and gain (blue).....	38
Figure 11 –	Variation and sediment transport (yellow arrows) expressed in terms of gains (blue) and losses (red): <i>Sectors 1</i> and <i>2</i> (Dec/2017–Dec/2018); and <i>Sector 3</i> (Apr–Dec/2018).....	43

ARTIGO 2 – VARIABILIDADE DA LINHA COSTA EM PRAIAS ARENOSAS TROPICAIS DO ATLÂNTICO SUL

EM RELAÇÃO À POTÊNCIA DE ONDA E TELECONEXÕES GLOBAIS (1984-2020)

Figura 1 –	Localização da área de estudo: a) Estado de Pernambuco, Brasil, NE; b) Ilha de Itamaracá, litoral norte de Pernambuco; e c) Praias do pontal sul da Ilha de Itamaracá.....	54
Figura 2 –	Resultados da extração das linhas de costa: classificação qualitativa do status e variação espaço-temporal interdecadal.....	67
Figura 3 –	Gráficos de tendência da variação espacial da linha de costa nas escalas multidecadal e interanual, para cada uma das praias dos setores analisados. Declive da reta de tendência: erosão crítica, em vermelho; erosão, em laranja; estável, em verde; e acrescida, em azul. A linha tracejada marca a separação entre as praias dos <i>Setores 1</i> e <i>2</i> : da praia do Pontal à do ICMBio/CMA, <i>Setor 1</i> ; e praias dos Bancos de Areia e do Loteamento São Paulo, <i>Setor 2</i>	69
Figura 4 –	Variação temporal e espacial (<i>eixos x</i> e <i>y</i> , respectivamente) da linha de costa. As escalas de cores indicam a distância da posição média com valores positivos (negativos) demonstrando a migração no sentido do mar (da terra). As linhas tracejadas marcam os trechos de praia analisados: <i>Setor 1</i> (O–E), a) Praia do Pontal, b) Praia do Polo Comercial/Turístico, c) Praia do Forte e d) Praia do ICMBio/CMA; e <i>Setor 2</i> (S–N), e) Praia dos Bancos de Areia e f) Praia do Loteamento São Paulo.....	72
Figura 5 –	Condições predominantes de onda: a) Altura significativa (H_s); b) Período (T_p); c) Direção ($^\circ$); e d) Potência.....	74
Figura 6 –	Distribuição temporal da média mensal das anomalias de potência de onda (WP) e da variação média anual da linha de costa dos <i>Setores 1</i> e <i>2</i> (S1 e S2, respectivamente). DP: desvio padrão ($\pm 1,624$) para as anomalias de potência de onda.....	76
Figura 7 –	Distribuição temporal das anomalias (positiva como vermelho e negativa como azul) dos índices de teleconexão globais e da potência (linha cinza) de onda (WP) entre 1984 e 2020.....	79
Figura 8 –	Coerência de ondeleta e fase entre as anomalias dos índices padronizados de teleconexão global (BEST, MEI, ONI, Niño 3, 81	

TNA e TSA) e a potência de onda (WP). O Cone de Influência (CI), onde os efeitos de borda podem causar distorção nos dados, está destacado pela linha pontilhada branca. Os vetores indicam o nível de significância estatística de 5% contra o ruído vermelho e a relação de fase, indicada pela sua orientação, com anti-fase (180°) à esquerda e fase (0°) à direita.....

Figura 9 –	Escores, variâncias e pesos da PCA realizada: a) (<i>Scatter Plot</i>) Gráfico bidimensional da matriz de correlação (escores) dos componentes principais PC1 (<i>eixo x</i>) e PC2 (<i>eixo y</i>), dispersão das réplicas (em escala colorida, cada ponto representa um ano específico) e das variáveis (setas azuis); b), c) e d) Peso de cada variável (<i>Variable Loadings</i>) para o percentual de variância (<i>Variance</i>) explicado pelos respectivos componentes principais (PC1, PC2 e PC3).....	83
------------	---	----

ARTIGO 3 – GESTÃO DO AMBIENTE COSTEIRO: EXPOSIÇÃO E ADAPTAÇÃO À EROSÃO COSTEIRA EM PRAIAS ARENOSAS DE UM SISTEMA ESTUARINO TROPICAL

Figura 1 –	Localização da área de estudo: a) Pernambuco, NE – Brasil; b) Litoral norte de Pernambuco; c) Ilha de Itamaracá, canal de Santa Cruz e linha de recifes submersos; e d) Pontal Sul da Ilha de Itamaracá e área das feições arenosas mapeadas.....	107
Figura 2 –	Sistema GNSS <i>Trimble®</i> R4: a) Receptores GNSS e controladora; b) Receptor móvel acoplado à mochila-suporte; c) Receptor na estação base; e d) Caminhamento com o receptor móvel.....	112
Figura 3 –	Mapeamento do relevo das feições arenosas da margem leste do PSII.....	116
Figura 4 –	Diferenças entre os modelos de elevação: variações altimétricas do relevo mapeado e movimentação dos estoques de sedimento, expresso em termos de ganho (azul) e perda (vermelho).....	119
Figura 5 –	Evolução morfológica e urbana da área de estudo: a) Mapa do período holandês do PSII; b) Forte holandês (em rosa) circunscrito	124

	pela fortaleza luso-brasileira (linhas pretas); c); d) e e) Pontal sul da Ilha de Itamaracá.....	
Figura 6 –	Danos à estrutura da Fortaleza de Santa Cruz: a) Planta de danos de 1788; b); c) e d) Ruínas do baluarte SW e da cortina sul (décadas de 1920, 1950 e 1970, respectivamente); e) Restauração do baluarte SW e da cortina sul.....	126
Figura 7 –	Fortaleza de Santa Cruz (preamar): a) Área de manguezal, a norte, e CSC-Sul, a sul; b) Baluarte SE e cortina sul; c) Baluarte SW e barracas de praia; e d) Praia do polo comercial e turístico e Forte Orange; e e) Recuo da linha de costa a oeste da fortaleza.....	128
Figura 8 –	Vista aérea do recuo da linha de costa na margem leste, imediações do ICMBio/CMA (baixa-mar): a) Faixa de praia e linha de costa em 2007; e b) Recuo da linha de costa e terraço de baixa-mar contíguo a bancos de areia em 2017.....	129

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1 – MORPHODYNAMIC STUDY OF SANDY BEACHES IN A TROPICAL TIDAL INLET USING RPAS

Table 1 –	Statistical validation and altimetric accuracy for each analyzed sector.....	28
Table 2 –	Main results obtained in the SfM processing.....	30

ARTIGO 2 – VARIABILIDADE DA LINHA COSTA EM PRAIAS ARENOSAS TROPICAIS DO ATLÂNTICO SUL EM RELAÇÃO À POTÊNCIA DE ONDA E TELECONEXÕES GLOBAIS (1984-2020)

Tabela 1 –	Classificação do status da linha de costa baseada nos resultados da LRR.....	60
Tabela 2 –	Resultados dos parâmetros estatísticos calculados.....	70
Tabela 3 –	Matriz de Correlação de Pearson (r): combinação entre as variáveis utilizadas (médias anuais padronizadas, Z_{ij}). Os valores em destaque (*) possuem nível de significância inferior a α ($p < 0,05$)..	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
1.2	ESTRUTURA DA TESE.....	15
2	MORPHODYNAMIC STUDY OF SANDY BEACHES IN A TROPICAL TIDAL INLET USING RPAS.....	17
3	VARIABILIDADE DA LINHA COSTA EM PRAIAS ARENOSAS TROPICAIS DO ATLÂNTICO SUL EM RELAÇÃO À POTÊNCIA DE ONDA E TELECONEXÕES GLOBAIS (1984-2020).....	50
4	GESTÃO DO AMBIENTE COSTEIRO: EXPOSIÇÃO E ADAPTAÇÃO À EROSÃO COSTEIRA EM PRAIAS ARENOSAS DE UM SISTEMA ESTUARINO TROPICAL.....	103
5	CONCLUSÃO.....	143
	REFERÊNCIAS.....	144
	APÊNDICE A – DATAS DE AQUISIÇÃO DAS IMAGENS LANDSAT.....	147

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a intensificação da pressão antrópica sobre os ambientes costeiros tem interferido nos processos físicos responsáveis pelo equilíbrio e variabilidade destes ambientes. Notadamente, desde as últimas décadas do século XX, os problemas relacionados à erosão costeira e sua percepção por parte das populações que habitam estes ambientes tornaram-se mais evidentes. Contudo, o que é observado no litoral, por vezes, tem sua origem em solo continental o que, em sinergia com o aumento populacional e as dinâmicas costeira e climática, podem induzir a mudanças significativas no balanço sedimentar natural do ambiente costeiro (Chen et al., 2015; Luijendijk et al., 2018; Williams et al., 2018).

Historicamente, o padrão de uso e povoamento do litoral brasileiro se deu de forma descontínua e por bolsões de adensamento urbano, não planejado e com pouca infraestrutura e, preferencialmente, entorno de áreas estuarinas, favorecendo a degradação e a ocupação desordenada do ambiente natural (Araújo et al., 2007; Souza, 2009). De comparável importância aos processos e fenômenos costeiros, os padrões de uso e ocupação do litoral, dentro de uma escala espaço-temporal histórica e contemporânea, são forçantes que interferem na estabilidade e na morfologia da planície costeira e de suas feições arenosas, assumindo um importante papel na evolução e na exposição da costa ao risco de erosão (Dallas e Barnard, 2011; Aiello et al., 2013; Davis e Fitzgerald, 2004; Gomes e Silva, 2014).

O pontal sul da Ilha de Itamaracá apresenta uma hidrodinâmica influenciada pela desembocadura do canal de Santa Cruz, onde, de modo geral, a energia das correntes de maré é a força responsável pela dinâmica sedimentar das suas praias, barras, pontais e bancos arenosos. A força hidráulica das correntes de maré desta desembocadura se sobressai à força das correntes de transporte litorâneo, promovendo deposição sedimentar a barlar e o respectivo processo erosivo a sotamar (Mendonça, 2005; Mendonça et al., 2006; Moura, 2009; Albuquerque, 2009; Almeida e Manso, 2011).

Um crescente número de pesquisas vem se dedicando a estudar os efeitos da ação antrópica nos ambientes marinhos e costeiros, através do uso associado de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), do Sensoriamento Remoto (SR) e de Sistemas Globais

de Navegação por Satélite (GNSS), possibilitando assim o mapeamento, o monitoramento e a avaliação de áreas costeiras vulneráveis ao deslocamento espaço-temporal da linha de costa e à migração de grandes volumes de sedimentos (Batista et al., 2009; Moura, 2009; Silveira et al., 2011; Gonçalves et al., 2019; Holanda et al., 2020; Araújo et al., 2021). Sendo assim, a combinação SIG e SR auxilia nas decisões sobre o uso e a ocupação do solo, fornecendo resultados rápidos, de baixo custo e com grande automação no processamento de dados, permitindo assim uma análise do ambiente costeiro de curto, médio e longo prazo com considerável autonomia e sem perda de qualidade na aquisição dos dados (Almeida, 2008; Barry e Coakley, 2013; Dada et al., 2016; Turner et al., 2016).

Pernambuco não possui grandes e caudalosos rios desaguando em sua costa. Sendo assim, naturalmente, o aporte sedimentar ao seu litoral é baixo. A plataforma continental do Estado é estreita, o que dificulta a remobilização do estoque sedimentar que possui. Além disso, a existência de cordões de arenito submersos, paralelos à costa, interfere na dinâmica do transporte sedimentar, dificultando sua chegada ao ambiente praiar. Adicionalmente, seu padrão de uso e ocupação do litoral permitiu a urbanização e instalação de equipamentos sobre áreas de dunas e pós-praia, alterando o balanço sedimentar natural (Araújo et al., 2007; Martins, 2015; Martins et al., 2016).

Entender os efeitos das variações espaciais e temporais nos processos costeiros atuantes e a resposta da linha de costa e das feições arenosas a estes, se faz necessário para um eficiente manejo do ambiente praiar. Neste contexto, a compreensão das mudanças de curto, médio e longo prazo fundamentam decisões e intervenções eficazes (Brielle, 2014; Chen et al., 2015; Silva et al., 2016; Williams et al., 2018). Outrossim, tais conhecimentos, oferecem subsídios para pesquisas científicas e para projetos de engenharia costeira que almejam a melhoria dos cenários atuais e a preparação para alternativas futuras de ordenamento, proteção e urbanização costeira sustentáveis. O entendimento da evolução do ambiente costeiro e a avaliação das pressões e impactos sofridos por este, são relevantes para o estudo de soluções adequadas de controle e mitigação dos danos ocasionados pelos processos erosivos atuantes.

1.1 OBJETIVOS

O presente estudo buscou, através da combinação de um conjunto de dados formados por imagens de sensoriamento remoto, pontos geodésicos, séries temporais da

linha de costa, reanálises globais e índices climáticos oceano-atmosfera, identificar e analisar a sazonalidade dos processos costeiros dominantes, do balanço sazonal dos estoques sedimentares, e das variações espaço-temporal e morfológica da linha de costa, das praias e dos bancos arenosos localizados na margem insular da desembocadura sul do Canal de Santa Cruz, na Ilha de Itamaracá, Pernambuco – Brasil.

1.1.1 Objetivo geral

Estudar como a dinâmica e os processos costeiros atuam na evolução das feições e dos depósitos sedimentares adjacentes à desembocadura sul do canal de Santa Cruz.

1.1.2 Objetivos específicos

- i. Descrever os processos costeiros atuantes e a sua dominância (acréção ou erosão);
- ii. Estudar as variações espaço-temporal e morfológica da linha de costa e das praias;
- iii. Identificar o sentido do transporte sedimentar ao longo litoral analisado; e
- iv. Analisar a exposição do patrimônio natural, cultural e econômico aos processos costeiros atuantes, observando alternativas adequadas de adaptação e mitigação aos efeitos da erosão costeira.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

O presente estudo está subdividido em três capítulos principais (2, 3 e 4) que descreveram a dinâmica costeira envolvida no transporte, na disponibilidade e na sazonalidade dos estoques sedimentares distribuídos ao longo da margem insular do Pontal Sul da Ilha de Itamaracá. Os capítulos desta tese foram construídos em forma de artigos independentes e completos, podendo ser lidos separadamente. Contudo, são complementares e a sua leitura na sequência oferecida poderá enriquecer o entendimento e a discussão dos resultados aqui alcançados.

O Capítulo 2, *MORPHODYNAMIC STUDY OF SANDY BEACHES IN A TROPICAL TIDAL INLET USING RPAS*, apresenta um estudo sobre a variação sazonal dos estoques sedimentares da faixa de praia arenosa da margem insular, da entrada de maré localizada no quadrante SE da Ilha de Itamaracá, formada pelo encontro do braço sul do Canal de Santa Cruz com o oceano Atlântico. Neste estudo, foi medido o balanço sedimentar e identificado o processo costeiro dominante das praias analisadas.

O Capítulo 3, *VARIABILIDADE DA LINHA COSTA EM PRAIAS ARENOSAS TROPICAIS DO ATLÂNTICO SUL EM RELAÇÃO À POTÊNCIA DE ONDA E TELECONEXÕES GLOBAIS (1984-2020)*, seguindo a tendência do uso de dados públicos de sensoriamento remoto, além de uma nova abordagem no seu processamento, descreveu a variação espaço-temporal da linha de costa das praias arenosas do Pontal Sul da Ilha de Itamaracá. Foram analisados a dinâmica da distribuição sedimentar, os padrões cíclicos de acreção/erosão e a sua correlação com a variação energética da potência de onda e dos índices climáticos.

Por fim, o Capítulo 4, *GESTÃO DO AMBIENTE COSTEIRO: EXPOSIÇÃO E ADAPTAÇÃO À EROSÃO COSTEIRA EM PRAIAS ARENOSAS DE UM SISTEMA ESTUARINO TROPICAL*, baseado em diretrizes da Gestão Integrada da Zona Costeira, buscou analisar (i) a exposição do ambiente praial à erosão costeira; (ii) apresentar estratégias compatíveis à gestão e ao uso sustentável do ambiente costeiro para o Pontal Sul da Ilha de Itamaracá; (iii) realizou o registro da exposição do patrimônio público, privado, histórico e cultural à dinâmica e aos processos costeiros atuantes neste trecho de litoral; e (iv) descreveu a variação altimétrica e o transporte sazonal dos estoques sedimentares da área de estudo.

2 MORPHODYNAMIC STUDY OF SANDY BEACHES IN A TROPICAL TIDAL INLET USING RPAS

2.1 INTRODUCTION

River mouths, tidal inlets or ebb tidal deltas are characterized by the presence of extensive areas of sedimentary accumulations formed by the interaction between tidal and wave energy flux (Fitzgerald, 1984; Harrison et al., 2017; Ford and Dickson, 2018; Humberston et al., 2019). Such environments play an important role in the dynamics of coastal systems, influencing sedimentary transport and movement patterns, reallocating reservoirs and modeling sandy features (beaches, swash bars, and sandy banks) along the adjacent areas, being subject to short term morphology variations (Mitchell et al., 2015; Long et al., 2016; Ford and Dickson, 2018; Genchi et al., 2020). Often sheltered in estuarine systems (Medeiros and Kjerfve, 1993; Gonçalves et al., 2019), the coastal depositional environment formed the tidal inlets is vulnerable to human activities (Chen et al., 2015; Mitchell et al., 2015; Luijendijk et al., 2018; Ford and Dickson, 2018).

Moreover, these environments are commonly of difficult access (*i.e.*, remote areas, sensitive or restricted environments) for conducting data surveys and temporal studies necessary for a better understanding of its dynamics. Recent studies present the promising use of the Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) in photogrammetric surveys of coastal areas (Turner et al., 2016; Casella et al., 2020), dynamic coastal environments (Bañón et al., 2019; Laporte-Fauret et al., 2019), with difficult access (Long et al., 2016; Genchi et al., 2020), and with intense sedimentary movement (Papakonstantinou et al., 2016; Scarelli et al., 2017; Mury et al., 2019; Nahon et al., 2019), resulting in less interference in the studied area.

With low cost of operation and providing high temporal and spatial resolution, RPASs provide practicality for the morphodynamic study of coastal areas (Gonçalves and Henriques, 2015; Casella et al., 2016; Long et al., 2016; Martínez-Carricondo et al., 2018; Bañón et al., 2019; Laporte-Fauret et al., 2019; Nahon et al., 2019; Genchi et al., 2020). Combining the RPAS use with the Global Navigation Satellite System (GNSS) and photogrammetric processing based on Structure from Motion (SfM) algorithms (Clapuyt et al., 2016; Ferreira et al., 2017; James et al., 2017), makes it possible to obtain data that is both accurate and reliable for several applications in coastal environments (Gonçalves

and Henriques, 2015; Scarelli et al., 2017; Bañón et al., 2019; Laporte-Fauret et al., 2019; Genchi et al., 2020).

Remote sensing-based studies have shown the importance of both behavior and role of morphologic dynamics for coastal sedimentary environments (Chen and Chang, 2009; Ford and Dickson, 2018; Gonçalves et al., 2019; Zhang et al., 2019; Zhou et al., 2019). Commonly extracting data from satellite images, such studies apply different methodologies at different temporal and spatial scales (Ford and Dickson, 2018; Zhou et al., 2019). Chen and Chang (2009) investigated the shoreline change and beach evolution on a large sandbank located on the Western coast of Taiwan. In their approach, 20 cloudless satellite images were used from SPOT (1–5) and FORMOSA–2, collected from 1993 to 2007, with 8–20m spatial resolution.

On New Zealand's west coast, Ford and Dickson (2018) mapped features of the morphological dynamics (on decadal and inter annual scales) in an ebb tidal delta, using 339 scenes acquired during 2000–2017 from the Landsat 7 (ETM+) and 8 (OLI) collection, with 30m spatial resolution. In the northeast of the Shandong Peninsula, China, Zhou et al. (2019) provided basic data for protection and coastal zone development using three orbital Landsat 5 (TM) images, collected in a 10-year interval, with 30m spatial resolution.

If on the one hand satellite images offer advantages over the acquisition of a long temporal series, on the other hand quantifying the short-term sedimentary variations in a specific beach extension becomes difficult. A limiting factor in using satellite images on coastal environments is cloud coverage, which can make it difficult to get a continuous temporal series. RPAS use can overcome such limitations, as well as minimize cloud coverage issues. In proposed study area several researches have been carried out with different purposes (Medeiros and Kjerfve, 1993; Mendonça et al., 2006; Almeida and Manso, 2011; Gonçalves et al., 2019; Melo et al., 2019).

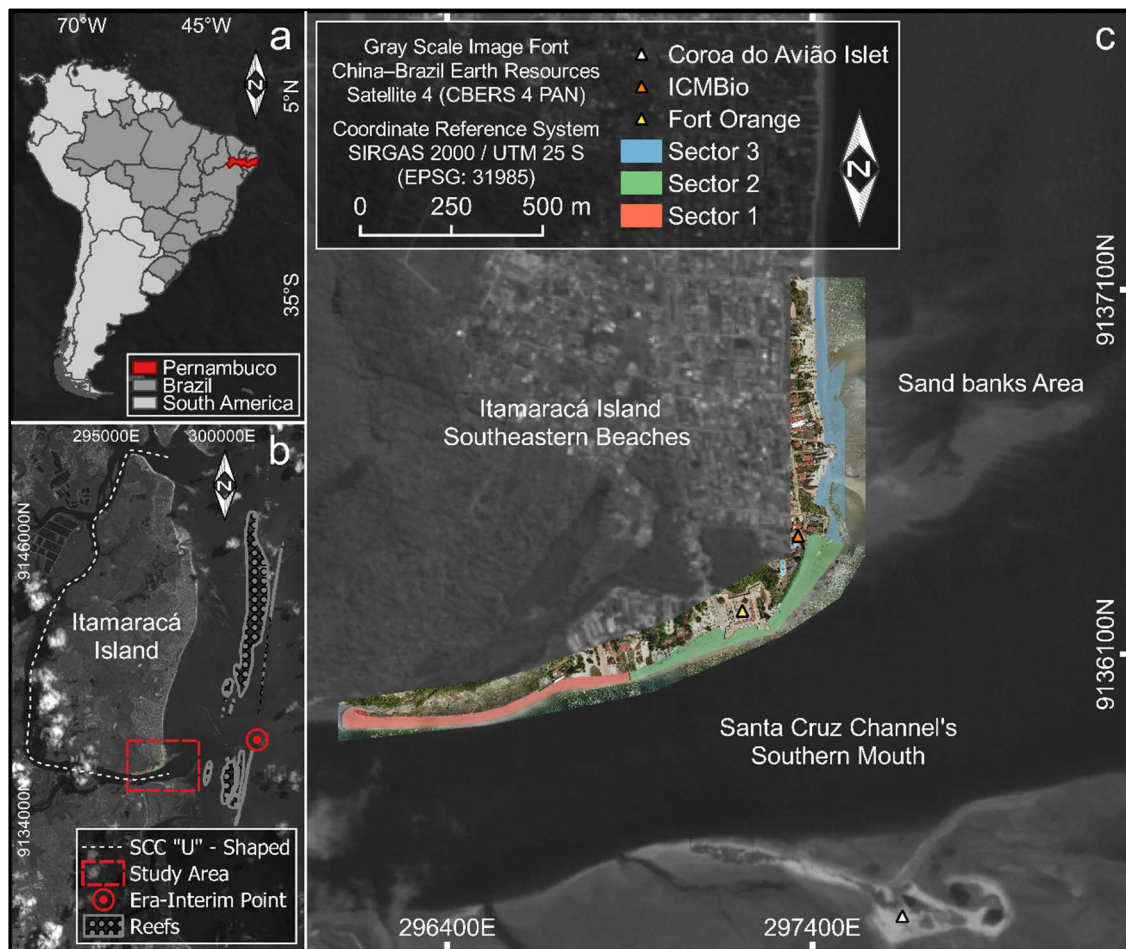
However, RPAS use is unprecedented in a morphological and sedimentary evolution study of a tropical tidal inlet and its local effects, in a short period and with high spatial resolution (centimetric). In this regard, through the combined use of RPAS and GNSS, the present study aimed to achieve the following goals: *(i)* to quantify the seasonal variation of sedimentary stock, *(ii)* to describe the morphological changes in the cross

shore profile, and (iii) to identify the dominant coastal process on sandy beaches, with different locations and alignments, but all exposed to marine processes, located alongshore of the insular margin of a tidal inlet within a tropical estuarine system, from Dec/2017 to Dec/2018.

2.2 STUDY AREA

The study area comprises the southeastern beaches on the Itamaracá Island (north coast of Pernambuco state, in Northeast Brazil, Figure 1a), located alongshore of the insular margin of the Santa Cruz Channel's south mouth (SCC). It consists of elongated channel, ~20km long and U-shaped (Figure 1b), which isolates the Island block from the mainland (Medeiros and Kjerfve, 1993; Almeida and Manso, 2011).

Figure 1. Study area location: **a)** Pernambuco state – NE, Brazil; **b)** Itamaracá Island municipality and SCC U-shaped; and **c)** Itamaracá Island southeastern beaches sectors: *Sector 1* – in red; *Sector 2* – in green; and *Sector 3* – in blue.



Source: the author (2021).

The area is limited to the south by the Coroa do Avião Islet (Figure 1c) and to the east by discontinued parallel lines of submerged reef present in the region's inner shelf (Medeiros and Kjerfve, 1993; Mendonça et al., 2006; Almeida and Manso, 2011; Pereira et al., 2017). The submerged reefs consist in a cemented sand (sandstone, geologically young) with 20–80% of quartz and the remainder being biogenic detritus (fragments of calcareous algae, shells, sea urchins, and calcareous sponges) (Figure 1b) (Medeiros and Kjerfve, 1993). This feature provides a favorable environment for the deposition of terrigenous sediments from the SCC and some fraction of carbonate sediments from the reef line, forming extensive sandbanks contiguous to low tide terraces (Figure 1c) (Almeida and Manso, 2011; Pereira et al., 2017).

Following the coast features and the location in relation to SCC, the study area was subdivided into three sectors, as follows: *Sector 1* – internal beaches (O–L), with 800m long (in red, Figure 1c); *Sector 2* – intermediate beaches (SW–NE), with 700m long (in green, Figure 1c); and *Sector 3* – external beaches (S–N), with 730m long (in blue, Figure 1c); reaching approximately 2230m in total length.

2.3 REGIONAL SETTING

The SCC estuary originated in the early Holocene, starting with the seawater entrance in a coast parallel fault (Medeiros and Kjerfve, 1993). The SCC supplies the study area with land sediments and presents a predominance of the sand textural class (0.062 to 2.0mm) and almost homogeneity in the variation of the Medium Grain Diameter, ranging from Fine Sand (0.125 to 0.25mm) to Medium (0.25 to 0.5mm) (Almeida and Manso, 2011). The sediments of these beaches have a Total Organic Matter content of 0.43%, between 3.3 and 10% of carbonate, dominance of quartz grains, mesokurtic and approximately symmetrical (characteristic of environments with intermediate energy levels). With ~515m width and an average depth of ~7m (ranging from 2 to 10m), the SCC has a bottom relief with irregular topography (reef structures, beachrocks, channels, and sandy features) and gentle slope towards the sea, until its external limit, where it meets with a discontinuity at the submerged reef line (Barros et al., 2007; Pereira et al., 2017; Melo et al., 2019).

The Pernambuco coast has a Tropical Atlantic climate, with distinct dry and wet periods, characterized by a bimodal pattern with a dry season (summer) from October to

March, and a rainy season (winter) from April to September (Pereira et al., 2017). According to Medeiros and Kjerfve (1993), in the Itamaracá Island region the main winds blow from the southeast at 3.2m/s mean speed. The dry season presents light winds (average of 2.6m/s, from NE) and the strongest winds blow from SE during the rainy season (average of 4.0m/s).

The tides are basely controlled by astronomic sources with low meteorological interference (just enough to cause small storms surges) (Pereira et al., 2017). The Directory of Hydrography and Navigation from the Brazilian Navy provides regular tide forecast for the Recife harbor (geographically, ~27km from the study area), classifying it as mesotidal type, dominated by waves, with a variation of 2–4m, and semidiurnal ($F = 0.09$ and period of 12.42h) reaching a maximum variation in amplitude of ~1.8m, with two high and low tides per lunar day (with a small diurnal inequality), having a mean height of 1.67m, with the spring tides reaching 2.7m (Barros et al., 2007; Almeida and Manso, 2011; Pereira et al., 2017; Melo et al., 2019).

The Itamaracá Island is located in an environmental protection area (Santa Cruz APA) and is one of the most popular tourist destinations in the northern coast of Pernambuco – with well frequented beaches all year around, being exposed to heavy human influence. Within the study area is found a national historic landmark (Fort Orange) and the Chico Mendes Institute for Biodiversity Conservation office (ICMBio) (Figure 1c), both exposed to high vulnerability to coastal erosion (Gonçalves et al., 2019).

Along the Itamaracá Island are commonly found protection structures to avoid coastal erosion process. In most of cases, consist of masonry walls, granite rock fillings, or concrete blocks. Installed (at local level) by the private owners of the affected lands or by the local public administration. In both cases without appropriate technical support.

2.4 MATERIALS AND METHODS

2.4.1 Wave and wind data acquisition

Prevailing regional conditions of oceanic surface gravity waves and winds were analyzed from the ERA Interim reanalysis dataset (*European Centre for Medium Range Weather Forecasts* – ECMWF | Public Datasets – <https://apps.ecmwf.int/datasets/>).

The wind and wave data information came from the ERA-Interim. (<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>), selecting the smallest possible grid size ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) and choosing the nearest coast point as a standard reference for this coastal region.

The variables used were u and v wind components, mean wave period (T_p) and direction, and significant height (H_s) of combined wind waves and swell. The tide signal data obtained by the closet tidal gauge ($08^\circ 03'04''$ S and $034^\circ 52'01''$ W), located at Recife harbor. The wave power (P) was then calculated by Como et al. (2015) equation:

$$P = 0.98 h^2 T \quad (1)$$

where: h is wave height and T is the wave period. The results are expressed in kW/m. The data are from a global atmospheric analysis in a 4D variational system, having a 12h analysis window, from 1979 and continuously updated in real time to the present day.

The data products in grid include a wide variety of surface parameters every three hours, describing the weather, as well as the Earth's oceanic surface gravity wave (Dee et al., 2011). The Era-Interim model is based on a statistical description of ocean waves describing the sea state by the two-dimensional wave spectrum and gives the distribution of wave variance over different frequencies and propagation directions with wave energy resulting from water density, acceleration of gravity and wave variance.

As the wave spectrum is based on the WAM approach, that includes several enhancements (physics and numeric), it resolves the evolution of this spectrum and determines its change rate by adiabatic processes and by physical mechanism (such as bottom dissipation) (Janssen, 2004; Janssen, 2008; Janssen et al., 2005; Dee et al., 2011). The data used correspond to the coordinates 7.8° S e 34.7° W (oceanic waters outside of study area) (ERA-Interim Point, Figure 1b), between Dec/2017–Dec/2018.

2.4.2 RPAS survey

The photogrammetric data acquisition campaign was performed over the months of Dec/2017, Feb/2018, Apr/2018, Jul/2018, Sep/ 2018 and Dec/2018, always at the spring lower low tides (0.0–0.2m, according to tidal forecast from DHN Brazilian Navy for the Recife harbor). A small and light (743g) quadcopter (DJI Mavic Pro) was used to

perform autonomous flights, equipped with a CMOS ($1/2.3'' - 6.17\text{mm} \times 3.47\text{mm}$) optical sensor with 12 Mpixel maximum resolution and a GPS/GLONASS navigation system. The aircraft collected images at 10m/s maximum speed, respecting the Brazilian law for RPAS flight ($<120\text{m}$), with the camera positioned at $\sim 90^\circ$ in relation to the ground and imagery overlap of 80% front and 70% side.

Each campaign performed one flight per sector, totaling $\sim 45\text{min}$ and consuming three batteries for the overflight of all the three sectors. The flights were performed perpendicular to the wind direction in relation to the aircraft heading (crosswind), assisted by mapping (*DroneDeploy*) and control (*DJI GO 4*) flight apps, compatible with the *DJI Mavic* series and Android mobile devices.

As a precaution, the following flight safety recommendations were obeyed: take off with $<10\text{m/s}$ wind speed and return to the take off point when the batteries in use (aircraft or remote controller) reach 20% capacity. All flights followed the current Brazilian legislation for RPAS use and were previously authorized by the Airspace Control Department (DECEA) from the Ministry of Defense, Brazilian Air Force, through a Request for Remotely Piloted Aircraft Access (SARPAS).

2.4.3 GNSS survey

Simultaneously to the RPAS survey campaigns, collections of hundreds of three-dimensional geodesic points ($3D_{GNSS}$) were carried out which were converted into planimetric coordinates in the UTM system (N, E) and orthometric altitudes (H), in order to (i) statistically validate the altimetric errors and (ii) evaluate the RPAS/SfM based products vertical accuracy (Gonçalves and Henriques, 2015; Bañón et al., 2019; Casella et al., 2020). In addition, the pre signalized ground control points (GCPs) were determined for use in the georeferencing phase during the photogrammetric processing (Gonçalves and Henriques, 2015; Casella et al., 2016; Long et al., 2016; Turner et al., 2016; Scarelli et al., 2017; Bañón et al., 2019; Laporte-Fauret et al., 2019).

2.4.3.1 Relative kinematic positioning

A pair of geodetic receivers (GNSS *Trimble*® R4 System) was used: one stationary (base station) and the other mobile (rover). (i) *Base station*: it was installed at the ICMBio office maneuvering yard and configured for a 5s recording rate, previously determined

and established by precise coordinates ($07^{\circ}48'30,511''\text{S}$ and $034^{\circ}50'16,712''\text{W}$; $H = 3.148\text{m}$), and provided the baseline for the correction in post processing mode of the points observed by the rover receiver; and *(ii) Rover receiver*: it was configured to continuous kinematic capturing with a 5s recording rate and used to determine the walked trajectory for $3D_{GNSS}$ point acquisition (Almeida et al., 2019; Marques et al., 2019; Wiggins et al., 2019; Holanda et al., 2020), corresponding to the same RPAS surveyed areas, with an $\sim 85\text{m}$ spacing grid.

2.4.3.2 GCP placement and signaling

Based on previous studies, 4 to 6 GCPs were installed (as evenly spaced as possible) every $10 \times 10^3 \text{m}^2$ (Gonçalves and Henriques, 2015; James et al., 2017; Martínez-Carricondo et al., 2018; Bañón et al., 2019; Laporte-Fauret et al., 2019). In this procedure the following three main criteria were observed: *(i)* synchronicity with the rising tide; *(ii)* performing the data surveying on the emerged areas only at low tide in a timely manner; and *(iii)* collecting all artificial materials placed in the beach environment (plastic or rubber targets) when used for GCP signaling.

Here, natural or handmade features, notable points visible during post processing, and marks drawn on the sand were defined as GCPs points (Casella et al., 2014; Casella et al., 2016; Gonçalves and Henriques, 2015).

2.4.3.3 Data post processing

The collected data during the GNSS survey were post-processed using *Trimble® Business Center* software, being converted into the GNSS standard format and referenced to the SIRGAS 2000 (Brazilian official *datum*) and UTM 25S coordinate system. Some acceptance criteria were established to ensure the horizontal and vertical accuracy of each measured point, being approved when: both horizontal and vertical $> 0.10\text{m}$, with 95% significance level.

2.4.4 SfM processing

SfM algorithm was used to process the RPAS based images with *Agisoft PhotoScan® Pro 1.3* software. For each analyzed sector, orthophotomosaics and dense 3D point clouds were generated ($3D_{RPAS}$ – planimetric coordinates N , E and orthometric altitudes H) (Long et al., 2016; Bañón et al., 2019; Laporte-Fauret et al., 2019). SfM

processing uses multiple overlapping images, captured at different angles, for reconstruction of interest area's (or scene) three-dimensional geometry according to three basic criteria: (i) matching of a common point (target) in between the processed images; (ii) corresponding features identification among the multiple captured images; and (iii) captured images bundle adjustment (Cullen et al., 2018; Ferreira et al., 2017; James et al., 2017; Clapuyt et al., 2016; Micheletti et al., 2015; Westoby et al., 2012).

A common point shared by more than one captured scene is tracked image by image (during captured images bundle adjustment), allowing for the estimate of the optical sensor position as well as the common point coordinates at the exact time each image was shot. Thus, the target scenario should be static and only the optical sensor spatial position can be varied. Non static targets (trees blown by the wind, the rough waters from breaking sea waves, automobiles or even people) induce anomalies that can be observed in the final products of SfM processing (Gonçalves and Henriques, 2015).

To compensate for the *rolling shutter* effect (native issue of *DJI Mavic Pro* optical sensor), thus avoiding a discernible systematic distortion in the photos, the *Fit Rolling Shutter* parameter was selected in *Agisoft PhotoScan® Pro 1.3* workflow.

2.4.4.1 RPAS based products georeferencing

This stage of processing was carried out by identifying the homologous points between the field determined GCPs and the same ones captured by the RPAS based images, manually, one by one, on each image (James et al., 2017; Martínez-Carricondo et al., 2018; Bañón et al., 2019). Here, all GCPs collected during the GNSS survey were used directly in *Agisoft PhotoScan® Pro 1.3* (by *Place Markers* and *Import* coordinate data workflow). This procedure precisely georeferences the captured images and minimizes the horizontal and vertical errors of the final photogrammetric products (Scarelli et al., 2017).

2.4.5 GIS processing

Once built, the photogrammetric products were spatially analyzed through a Geographic Information System (GIS – *QGIS 3.4* software, *Madeira* version). Maps of the study area and each analyzed sector were generated; the limits of each sector were selected; points and unwanted areas were removed; digital terrain models (DTM) were

interpolated; DTM volumes and areas were calculated; the data were extracted for analysis and construction of the cross-shore profiles and finally the statistical validation accuracy was done.

2.4.5.1 Interpolation of 3D_{RPAS} points

To standardize the spacing grid between the different digital models generated (sectoral and temporal DTMs), thus obtaining DTMs with the same dimensions (X_{width} ; Y_{height} ; and pixel size) for each sector, the *Delaunay Triangulation Algorithm* (Triangulated Irregular Network – TIN) (Wheaton et al., 2010; Mury et al., 2019) was used to interpolate DTMs with spatial resolution of 1m²/pixel (Wiggins et al., 2019). Then the interpolated areas beyond the desired limits were removed (Wheaton et al., 2010) by using a polygonal cutting layer, which limited the area of each sector within limits of 0.0m quota (sea level zero) and upper backshore area. This approach made it possible to compare pixel by pixel the altimetric, or volumetric, values at the same geographical coordinates between the different DTMs in each sector.

2.4.5.2 Volume calculation

The total volume of each temporal DTM was calculated (i) integrating each *pixel* individually, multiplying the values of surface area (m²) by altitude (m) (Wheaton et al., 2010; Wiggins et al., 2019), thus providing the volume value (m³) by using *Raster Calculator* function; and then, (ii) performing the sum of the values found through *Zonal Statistics* function.

2.4.5.3 Profiles extraction

By using the Profile from lines function, the data for the cross-shore profile analysis were extracted from overlapping linear layers containing groups of 12 profiles per sector (*Sector 1*: P01–P12; *Sector 2*: P13–P24; and *Sector 3*: P25–P36). Each DTM pixel (DTM_{PIXEL}), overlapped by the profiles layer, had its altimetric value extracted. The volume of each profile was also calculated through the individual integration of each DTM_{PIXEL} and the sum of the values found.

2.4.5.4 Statistical parameters calculation

All collected 3D_{GNSS} points were used as independent checkpoints for validation and evaluation of final photogrammetric product accuracy (Laporte-Fauret et al., 2019; Bañón et al., 2019; Valentini et al., 2019; Casella et al., 2020). By using the Sample raster

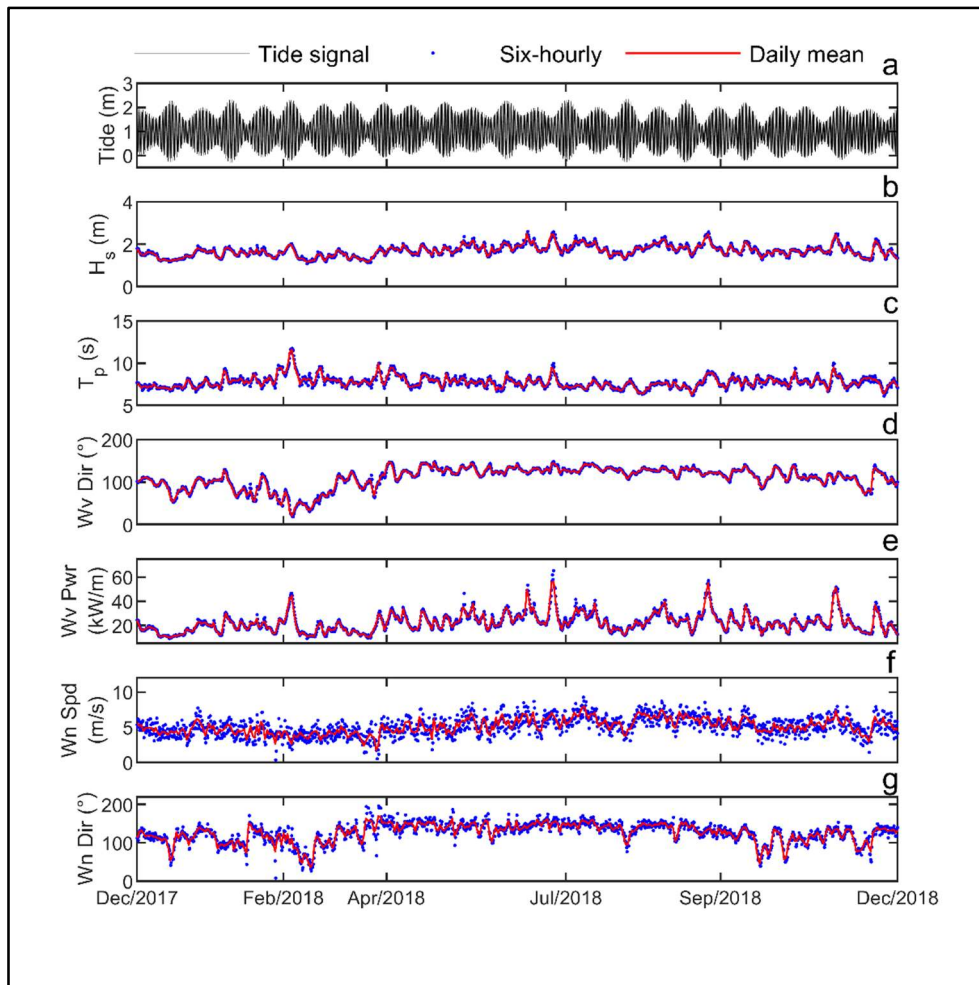
values function, each DTM_{PIXEL} overlapped by corresponding $3D_{GNSS}$ point, had its altimetric value extracted (Almeida et al., 2019). These values were utilized to quantify the altimetric differences (DTM_{PIXEL} vs. $3D_{GNSS}$) through the coefficient of determination (R^2); the root mean square error (RMSE_z); the standard deviation (SD); the vertical mean difference; and 95% confidence interval (CI) (Wiggins et al., 2019; Bañón et al., 2019; Laporte-Fauret et al., 2019; Almeida et al., 2019).

2.5 RESULTS

2.5.1 Wave and wind data

The predominant conditions of waves and winds for the Itamaracá Island region between Dec/2017–Dec/2018 are summarized in Figure 2.

Figure 2. Tidal, wave and wind conditions: **a)** tide signal; **b)** significant wave height; **c)** wave period; **d)** wave direction; **e)** wave power; **f)** wind speed; **g)** wind direction.



Source: the author (2021).

The tide signal temporal series for the rainy season (Apr–Sep/2018) presented average amplitude of 2.64m (2.35/ -0.28) and in the dry season (Dec/2017–Apr/2018 and Sep–Dec/2018) of 2.63m (2.32/ -0.28) and 2.4m (2.2/ -0.21), respectively. The H_s showed rising trend during the rainy season with an average of 1.84m and a peak of 2.6m, and a decrease during the dry season with averages of 1.5–1.68m and peaks of 2.02–2.49m. In the rainy season, the average for T_p was of 7.6s and a peak of 9.9s while, in the dry season, the averages were of 7.9–7.8s and peaks of 10–11.7s. During the rainy season the southeastern waves (128°) prevail. In the dry season, between Dec/2017–Apr/2018, the eastern waves (84.4°) and, between Sep–Dec/2018, the southeastern waves (111.5°) were predominant. Wave power also showed a rising trend in the rainy season, with an average of 26kW/m and peaks of 57–65.3kW/m, and a decrease during the dry season, with averages of 18–22.1kW/m and peaks of 46.5–51.8kW/m. In the rainy season, winds from 142° were predominant and presented a speed average of 5.7m/s with a peak of 9.2m/s. During the dry season, winds from 112.2–113.7° prevail with speed averages of 4.2–5.2m/s and a peak of 7.9m/s.

2.5.2 Statistical validation and accuracy

Table 1 summarizes the findings to quantify the errors in the comparison between the altimetric values DTM_{PIXEL} vs. $3D_{GNSS}$.

Table 1. Statistical validation and altimetric accuracy for each analyzed sector.

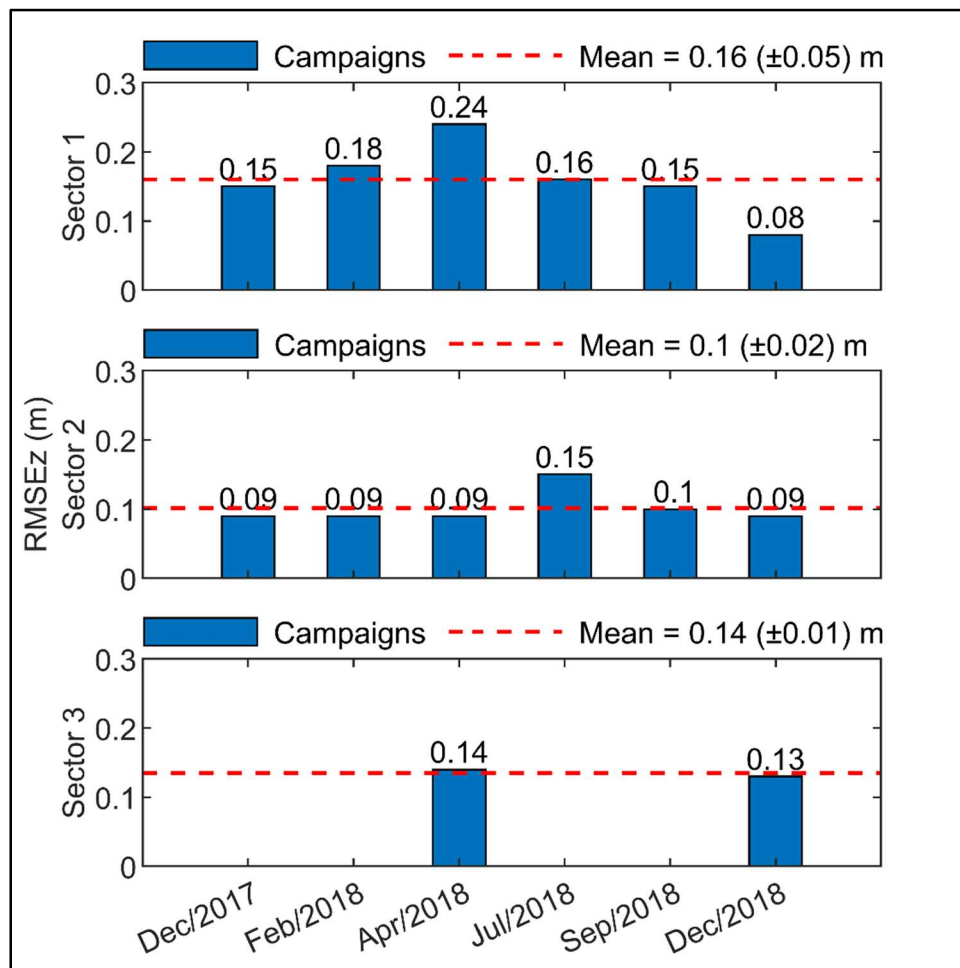
Area	Campaign	3D _{GNSS} pts.	Mean (m)	Min. / Max. (m)	SD	RMSE (m)	R ²	95% CI
Sector 1	Dec/2017	256	-0.007	-0.383 / 0.768	0.15	0.15	0.953	-0.447 / 0.432
	Feb/2018	197	-0.058	-0.743 / 0.314	0.17	0.18	0.936	-0.567 / 0.452
	Apr/2018	163	-0.097	-0.574 / 0.491	0.22	0.24	0.902	-0.761 / 0.566
	Jul/2018	184	-0.053	-0.694 / 0.290	0.15	0.16	0.954	-0.509 / 0.403
	Sep/2018	137	-0.084	-0.398 / 0.294	0.12	0.15	0.964	-0.446 / 0.277
	Dec/2018	178	-0.014	-0.230 / 0.508	0.08	0.08	0.987	-0.255 / 0.226
Sector 2	Dec/2017	248	-0.020	-0.335 / 0.210	0.09	0.09	0.908	-0.292 / 0.251
	Feb/2018	335	0.000	-0.341 / 0.256	0.09	0.09	0.983	-0.276 / 0.276
	Apr/2018	211	0.023	-0.165 / 0.256	0.08	0.09	0.985	-0.226 / 0.271
	Jul/2018	140	-0.020	-0.296 / 0.618	0.15	0.15	0.983	-0.475 / 0.435
	Sep/2018	146	-0.012	-0.285 / 0.334	0.09	0.10	0.985	-0.298 / 0.273
	Dec/2018	97	-0.024	-0.212 / 0.190	0.08	0.09	0.990	-0.277 / 0.230
Sector 3	Apr/2018	209	0.051	-0.341 / 0.554	0.13	0.14	0.977	-0.354 / 0.457
	Dec/2018	183	-0.072	-0.289 / 0.386	0.10	0.13	0.973	-0.386 / 0.243

Source: the author (2021).

Throughout the campaigns, the number of compared $3D_{GNSS}$ points varied from 97 to 335. The results presented $R^2 \geq 0.90$; $RMSE_z \leq 0.24\text{m}$; the mean difference (Mean) of -0.097 to 0.051m ; and $SD \leq 0.22\text{m}$.

Figure 3 presents the altimetric accuracy graphs for the RPAS/SfM based products, containing each campaign value and the average per sector. *Sector 1* showed the lowest accuracy average of 0.16m and 0.24m in the Apr/2018 campaign.

Figure 3. RMSE_z per campaign in each analyzed sector.



Source: the author (2021).

2.5.3 SfM processing

The main parameters obtained in the SfM based photogrammetric processing are summarized in Table 2. Considering all sectors, between 71 and 205 images were processed and 12 to 29 GCPs were utilized. The flight coverage area of each RPAS survey was of $116\text{--}225 \times 10^3 \text{m}^2$ and, after selecting the limits, the analyzed area was of $\sim 23\text{--}$

$37 \times 10^3 \text{m}^2$. The generated orthophotomosaics presented a spatial resolution lower than 4cm/pixel and the $3D_{RPAS}$ point clouds (with more than 39 points/m^2) allowing for the construction of DTMs, even resized to $1 \text{m}^2/\text{pixel}$, with dense spatial information.

Table 2. Statistical validation and altimetric accuracy for each analyzed sector.

Area / Fligth / Fligth Time	Campaign	No. of Images	No. of GCPs	Fligth Coverage Area (m^2)	Clipped Coverage Area (m^2)	GCP RMSE_{XY} (cm)	GCP RMSE_Z (cm)	Ground Resolution (cm/pix)	3D Cloud Density (pts/ m^2)
Sector 1	Dec/2017	86	13	174×10^3	24×10^3	3.94	2.77	3.51	50.7
# 1 Fligth / ~15 min	Feb/2018	157	15	124×10^3	23×10^3	3.52	2.00	3.01	68.8
	Apr/2018	92	12	118×10^3	23×10^3	3.08	4.19	3.98	39.4
	Jul/2018	77	14	116×10^3	23×10^3	5.57	0.98	3.72	45.1
	Sep/2018	94	17	106×10^3	23×10^3	5.08	1.54	2.89	74.8
	Dec/2018	119	15	122×10^3	24×10^3	4.72	1.56	3.10	64.8
Sector 2	Dec/2017	71	26	121×10^3	37×10^3	2.94	1.05	3.38	54.6
# 2 Fligth / ~15 min	Feb/2018	205	26	142×10^3	35×10^3	3.45	2.08	2.76	82.3
	Apr/2018	122	29	171×10^3	35×10^3	2.74	2.13	3.76	44.3
	Jul/2018	120	24	169×10^3	34×10^3	2.46	1.13	3.86	42.0
	Sep/2018	145	17	158×10^3	33×10^3	2.36	0.67	3.28	58.2
	Dec/2018	187	25	187×10^3	32×10^3	6.41	2.46	3.31	57.0
Sector 3	Apr/2018	92	21	201×10^3	28×10^3	2.55	1.45	3.82	42.8
# 3 Fligth / ~15 min	Dec/2018	198	27	225×10^3	32×10^3	3.97	3.17	3.62	47.7

Source: the author (2021).

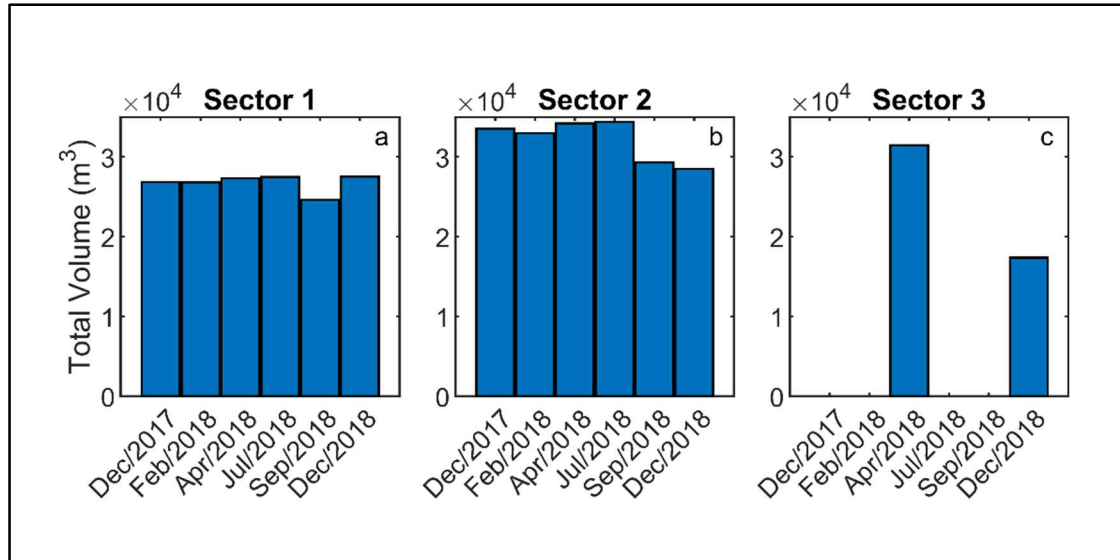
Local features such as precipitation and wind and gust speed, in addition to the area extension of each sector, were restrictive to the performance of the RPAS flights interfering in data collection. For this reason, in *Sector 3*, it was only possible to perform the RPAS/GNSS surveys simultaneously in the Apr/2018 and Dec/2018 campaigns. Thus, observing the goal of a combined RPAS/GNSS usage.

2.5.4 Sediment budget and prevailing coastal process

Sector 1 presented on average a total volume of $26,766.21 \text{m}^3$ (± 1087.59), distributed over $\sim 24 \times 10^3 \text{m}^2$. Sedimentary gain was observed until Jul/2018 ($27,484 \text{m}^3$), loss in Sep/2018 ($24,646 \text{m}^3$), and a new gain period in Dec/2018 ($27,530 \text{m}^3$). The average total volume for *Sector 2* was of $32,138.39 \text{m}^3$ (± 2576.57), distributed over $\sim 34 \times 10^3 \text{m}^2$. The campaigns of Apr/2018 and Jul/2018 showed the highest sediment volume ($\sim 34,400 \text{m}^3$), while Dec/2018 saw the lowest volume ($28,500 \text{m}^3$). In *Sector 3* the

maximum and minimum values corresponded to the Apr/2018 ($31,468\text{m}^3$) and Dec/2018 ($17,356\text{m}^3$) campaigns, respectively (Figure 4).

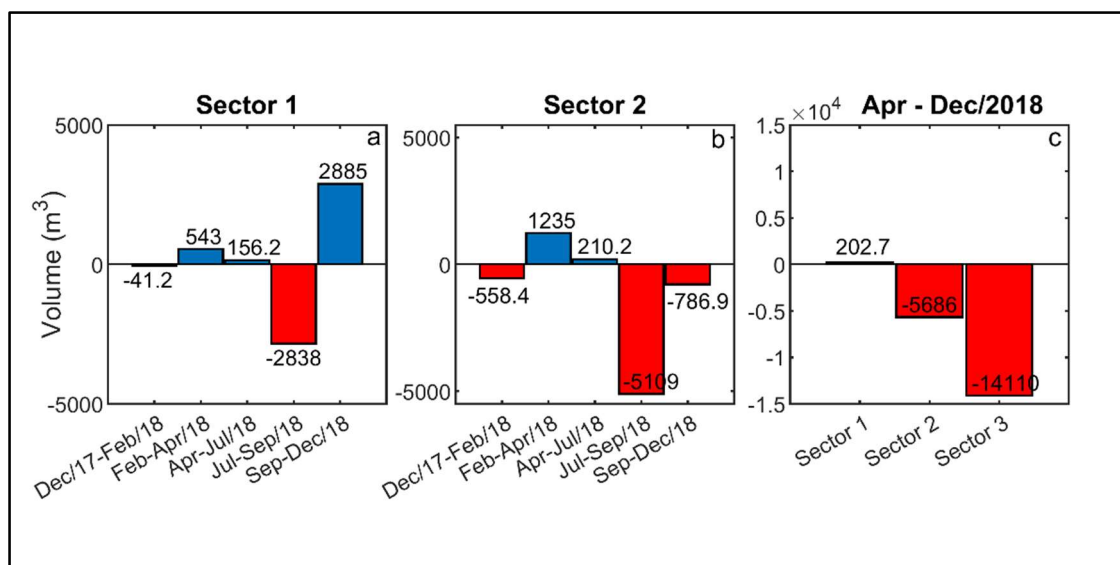
Figure 4. Total sediment volume for each campaign.



Source: the author (2021).

Throughout the period from Dec/2017–Jul/2018 (mid between dry and rainy seasons) *Sector 1* presented a positive sediment budget, whereas only the end of the rainy season (Jul–Sep/2018) represented a significant sediment loss period (Figure 5).

Figure 5. Net volume changes between campaigns, expressed in terms of loss (red) and gain (blue).

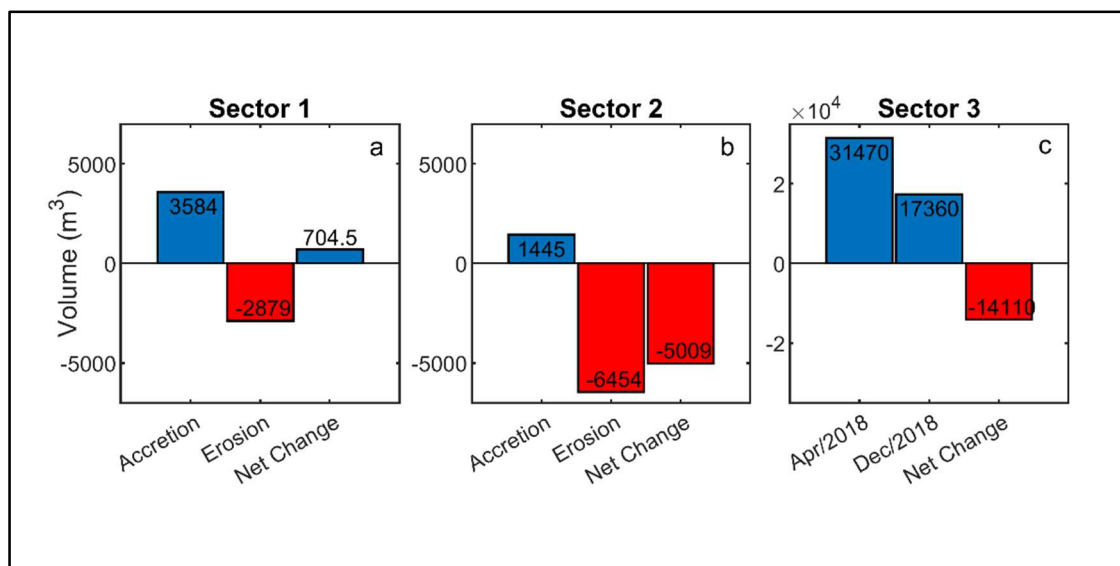


Source: the author (2021).

However, between Sep–Dec/2018, in the beginning of the next dry season, recovery with new contribution of sediments was observed. In *Sector 2*, between Apr–Jul/2018 sedimentary contribution was ceased and between Jul–Dec/2018 a continuous volumetric loss was observed (Figure 5). *Sector 3* presented sedimentary package volumetric loss between the beginning of the rainy season (Apr/2018) and the middle of the following dry season (Dec/2018). Comparing only the Apr–Dec/2018 period, *Sectors 1* and *2* presented, respectively, sediment gain and loss (Figure 5).

Figure 6 presents the results of the total volume net variation for *Sectors 1* and *2* (Dec/2017–Dec/2018) and *Sector 3* (Apr–Dec/2018). *Sector 1* was the only one to present a positive sedimentary budget, adding 704.52m^3 to its sedimentary package. *Sectors 2* and *3* reported, respectively, losses of 5009m^3 and $14,110\text{m}^3$, thus characterizing an erosive trend for the period.

Figure 6. Net and total volume variation within each sector, expressed in terms of loss (red) and gain (blue). *Sectors 1* and *2* (Dec/2017–Dec/2018); and *Sector 3* (Apr–Dec/2018).



Source: the author (2021).

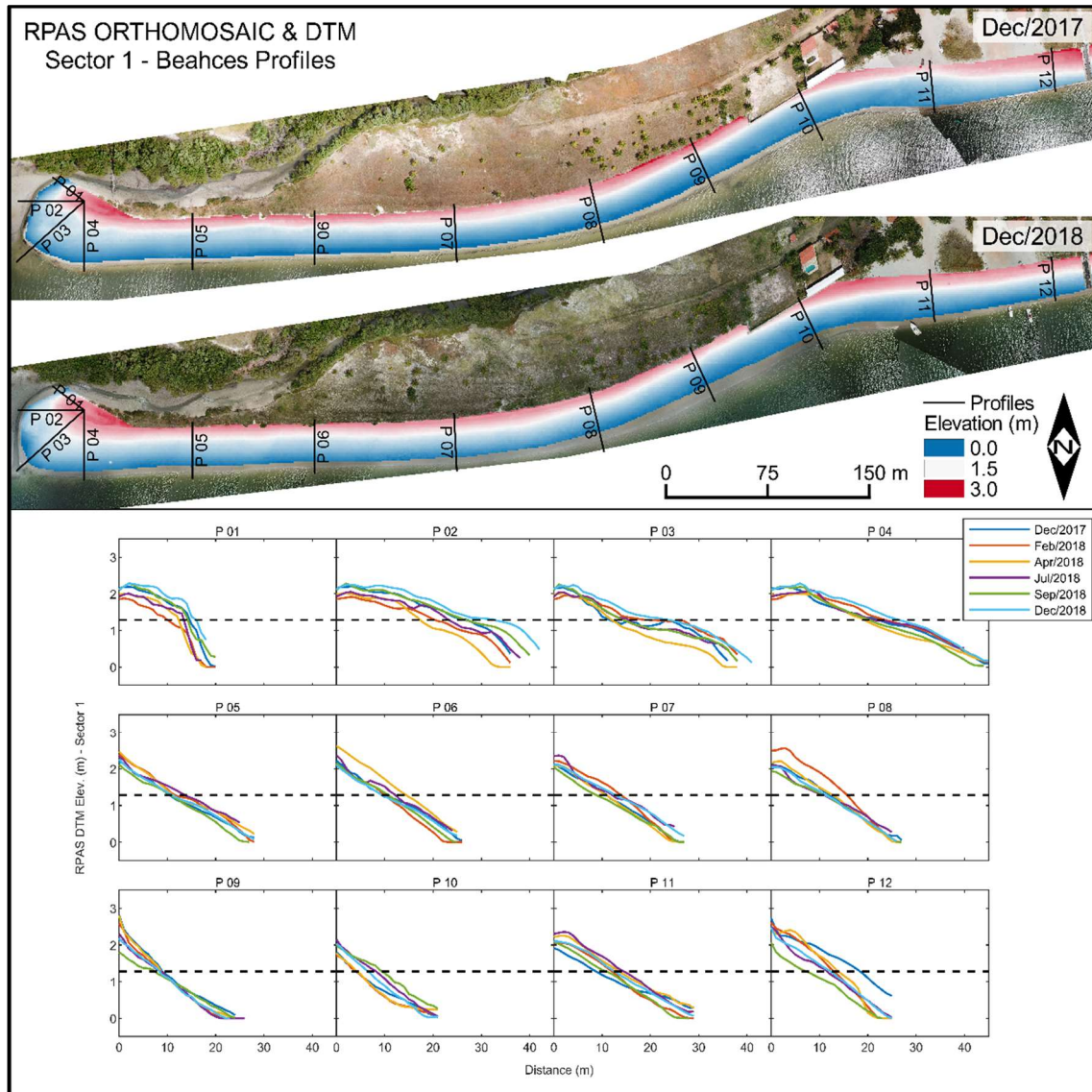
2.5.5 Morphological and volumetric variations in cross shore profiles

2.5.5.1 Sector 1

Sector 1 (Figure 7) was the most internal beach environment among the sectors studied, where two highlighted sections of altimetric gain were recorded: (i) at its western

edge, distributed between P01–P04, the existence of a depositional process was observed that supplies a thin margin parallel sandy spit; and (ii) the beach strip between P10–P11, downstream of a shore protection structure, obliquely installed to the horizontal beach plane on upper backshore. Likewise, sections with little altimetric variation (P04–P08) and with more highlighted altimetric losses (P08–P10 and P11–P12) were observed.

Figure 7. *Sector 1* cross shore profiles. Mean sea level (MSL; dashed line) = 1.28m.



Source: the author (2021).

Figure 7 illustrates the altimetric differences between the DTMs generated in Dec/2017 and Dec/2018, in addition to the morphological differences recorded in each cross-shore profile throughout the performed campaigns in *Sector 1*. The greatest losses were observed between the end of the dry season and the second half of the rainy season

(Feb/2018 to Jul/2018). At the end of the study period, in the middle of the following dry season (Dec/2018), an increase of the altimetric quota was observed in the narrow backshore zone (prominent berms) and at the foreshore ending limit (close to 0.0m elevation). These cross-shore profiles presented ~4–8.5% beach slope and ~ 20–45m extension (*x axis*).

Between P05–P08, comparing Dec/2017 and Dec/2018, altimetric gains of 7–16 cm and losses of ~4cm in median values were obtained. At the narrow backshore zone greater sediment input was observed between Feb–Jul/2018, end of the dry season and second half of rainy season, respectively, and a highlighted berm line. These cross-shore profiles presented ~8–10% beach slope and < 30m extension.

Between P09–P12 there was an altimetric decrease in P09 and P12 and an increase in P10 and P11, comparing Dec/2017 to Dec/2018. The narrow backshore zone between P09 and P10 was suppressed by shoreline retraction due to erosion in P09 and replaced by a shore protection structure in P10 (Figure 7).

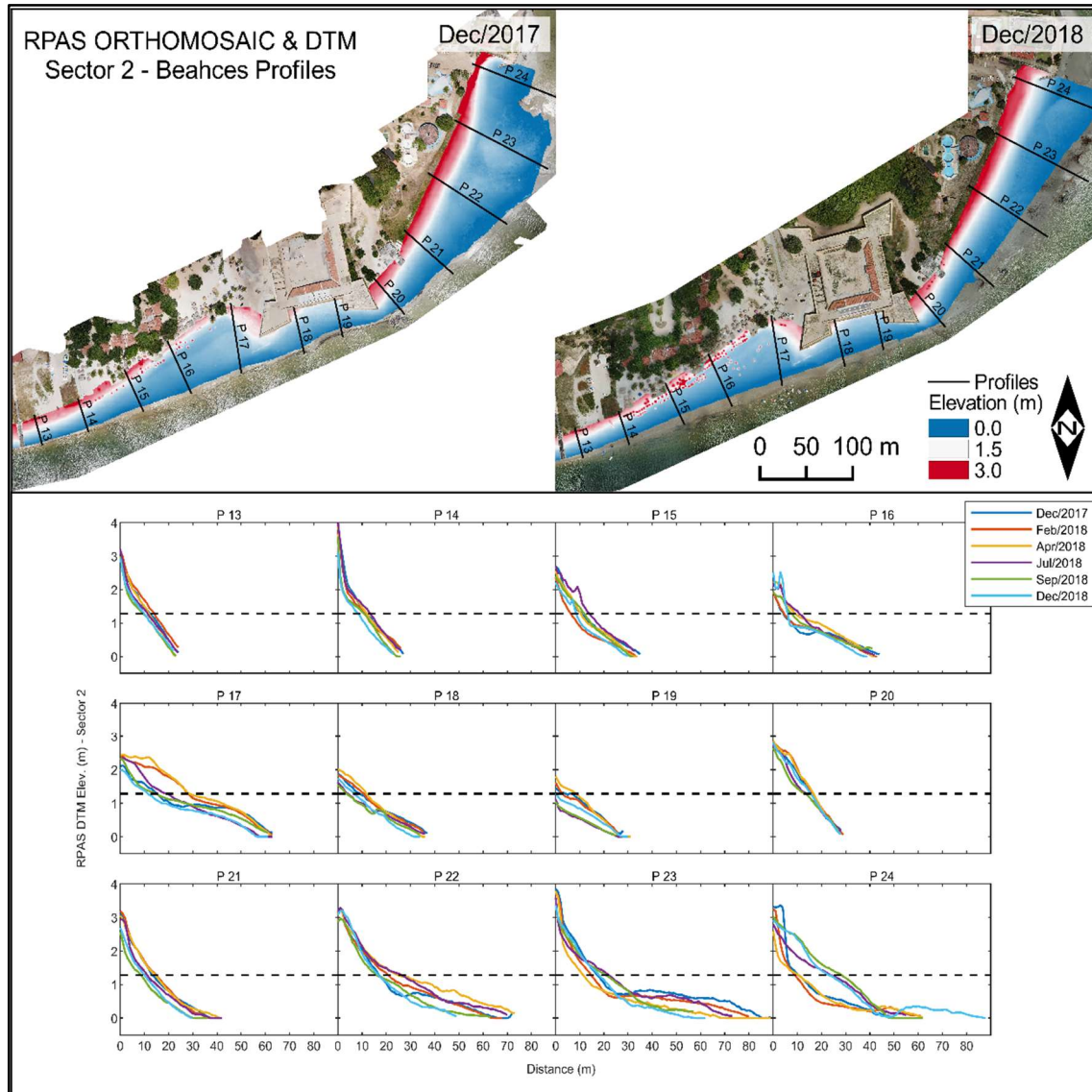
The backshore altimetric decrease in P09 and P12 was of ~65 and 25cm, and at the foreshore ending limit was of ~9 and 60cm, respectively. From the second half of the first dry season until the end of the following rainy season (Dec/2017 to Sep/2018) P09 and P12 presented the sector's greatest altimetric loss (~0.50 to 1.00m). P10 and P11 showed the greatest altimetric gain in the Jul/2018 campaign, mid rainy season, and ~ 20cm in median values, in the study period. P09–P12 profile section presented ~7–10% beach slope and <30m extension (Figure 7).

2.5.5.2 Sector 2

In sequence, in *Sector 2* (Figure 8), P13 to P24 profiles were placed. In general, at the end of study period, the profiles demonstrated altimetric reduction. However, gain patterns were also observed: (i) parallel strip on the foreshore of the upper limit between P15–P17; (ii) parallel strip close to the backshore zone on P22; and (iii) between P23–P24. *Sector 2* presented an anthropized backshore zone with an acting erosion process, in addition to a foreshore zone with extensive low tide terraces. P13 to P17 were placed throughout a section constantly modified by anthropic and erosion action. These profiles were positioned juxtaposed to vegetated dunes sectioned remnants and to a dunes field

occupied by masonry constructions. Except for P16, this section presented losses of ~50cm at the end of the study period.

Figure 8. Sector 2 cross shore profiles. Mean sea level (MSL; dashed line) = 1.28m.



Source: the author (2021).

In the Dec/2018 campaign, P13 to P16 profiles presented ~6.5–14% beach slope and altimetric loss, close to the foreshore ending limit, of ~23.5cm. This section showed great sedimentary input between the end of the dry season and halfway into the rainy season (Feb–Jul/2018). The lower sedimentary input was seen in the beginning of the following dry season (Sep–Dec/2018).

The profiles P17 to P20 were positioned around to the Fort Orange structures: (i) P17 and P20, adjacent to the southwest (upstream) and southeast (downstream) bastions,

respectively; and (ii), juxtaposed to the fortress curtain wall, P18 and P19, with total absence of the backshore zone. Throughout the studied period, these profiles registered altimetric variations up to 1.00m. However, comparing the Dec/2017 and Dec/2018 campaigns, the elevation showed losses between 15 and 50cm and 3.3–9.7% beach slope. The sedimentary package between P17–P20 received the largest input from Feb/2018 to Apr/2018, while the lowest input was from Jul/2018 to Sep/2018. However, in Dec/ 2018, P17 reported the sector's largest sedimentary loss.

The section between P21–P24, positioned on the beach in front of the ICMBio area, represented the beach section of *Sector 2* with less anthropic interference throughout the studied period, but characterized by beach erosion and presence of a shore protection structure on its north limit, and an extensive low tide terrace.

In Dec/2018, the corresponding area to the starting point of each cross-shore profile (upper backshore zone between P21–P24) had lost ~44cm altimetric quota when compared to Dec/2017. P21 and P23 showed significant sediment loss between the end of the rainy season and beginning of the dry season (Sep–Dec/2018). This section presented 3–9% beach slope.

However, the greatest sediment input took place in P24 during the Jul–Dec/2018 period, presenting backshore zone recovery, with characterized berm in the Sep/2018 and Dec/2018, and sedimentary gain along this stretch.

2.5.5.3 *Sector 3*

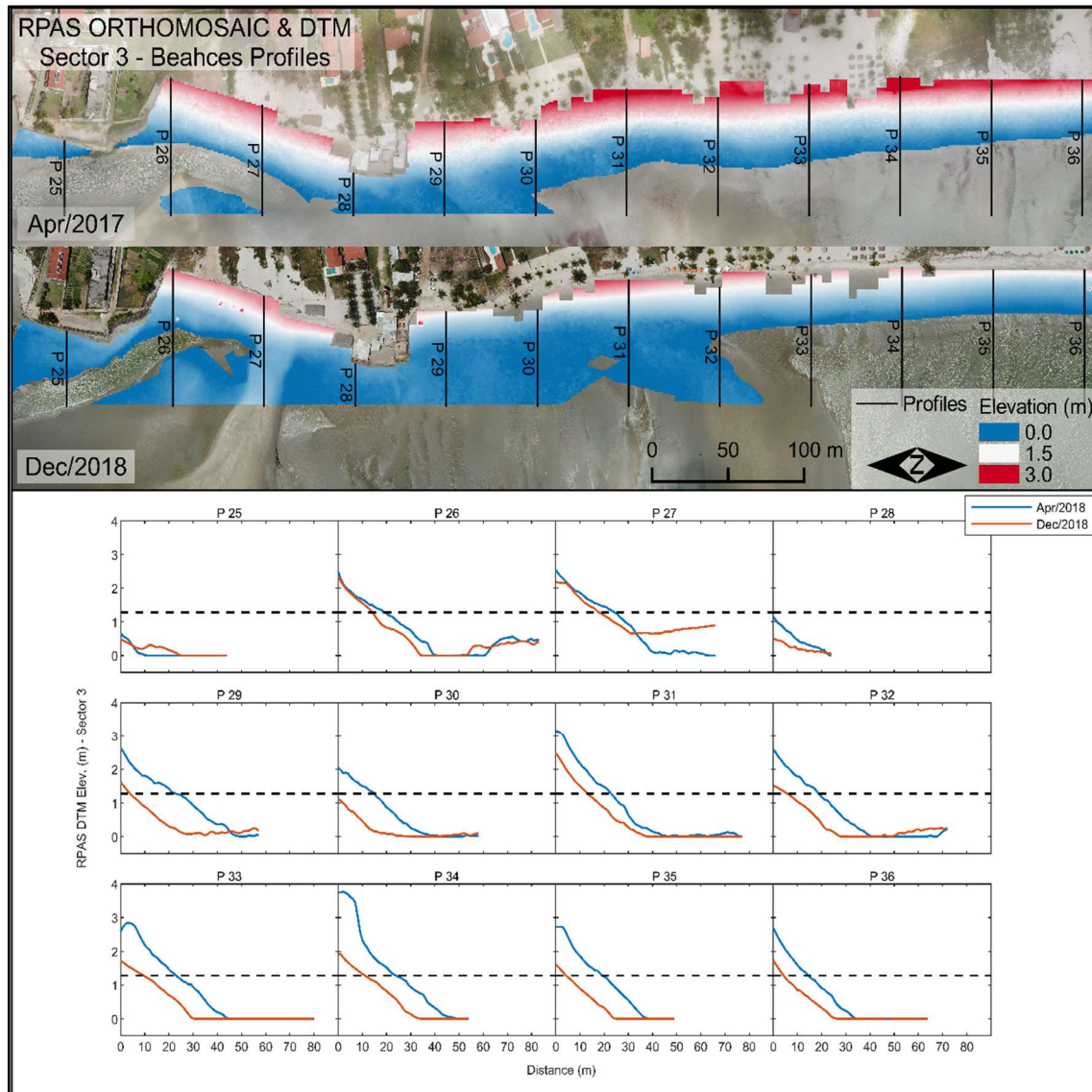
The following area, *Sector 3* (Figure 9), was the most exposed beach to ocean wave action, diffracted by submerged reefs line and sandbanks presents in the internal shelf. This sector was characterized by shoreline retraction and by presence of extensive low tide terrace contiguous to sandbanks and swash bars.

In this sector, the cross-shore profiles of P25 to P36 were positioned. P25 and P28 were positioned in front of the sea containment structures where a complete absence of the backshore zone and its retraction between P26–P27 was observed.

At the end of the studied period, the sedimentary package variation below the MSL line was remarkable, especially P27, which increased by ~90cm at the foreshore lower zone. Between P29 and P36 altimetric reduction, backshore zone narrowing and

the shoreline retraction was observed. During the Apr–Dec/2018 period, *Sector 3* lost approximately 1.00m of elevation in the backshore zone. The elevation reduction of ~1.85m and the dune line retraction in P34 were noteworthy.

Figure 9. *Sector 3* cross shore profiles. Mean sea level (MSL; dashed line) = 1.28m.



Source: the author (2021).

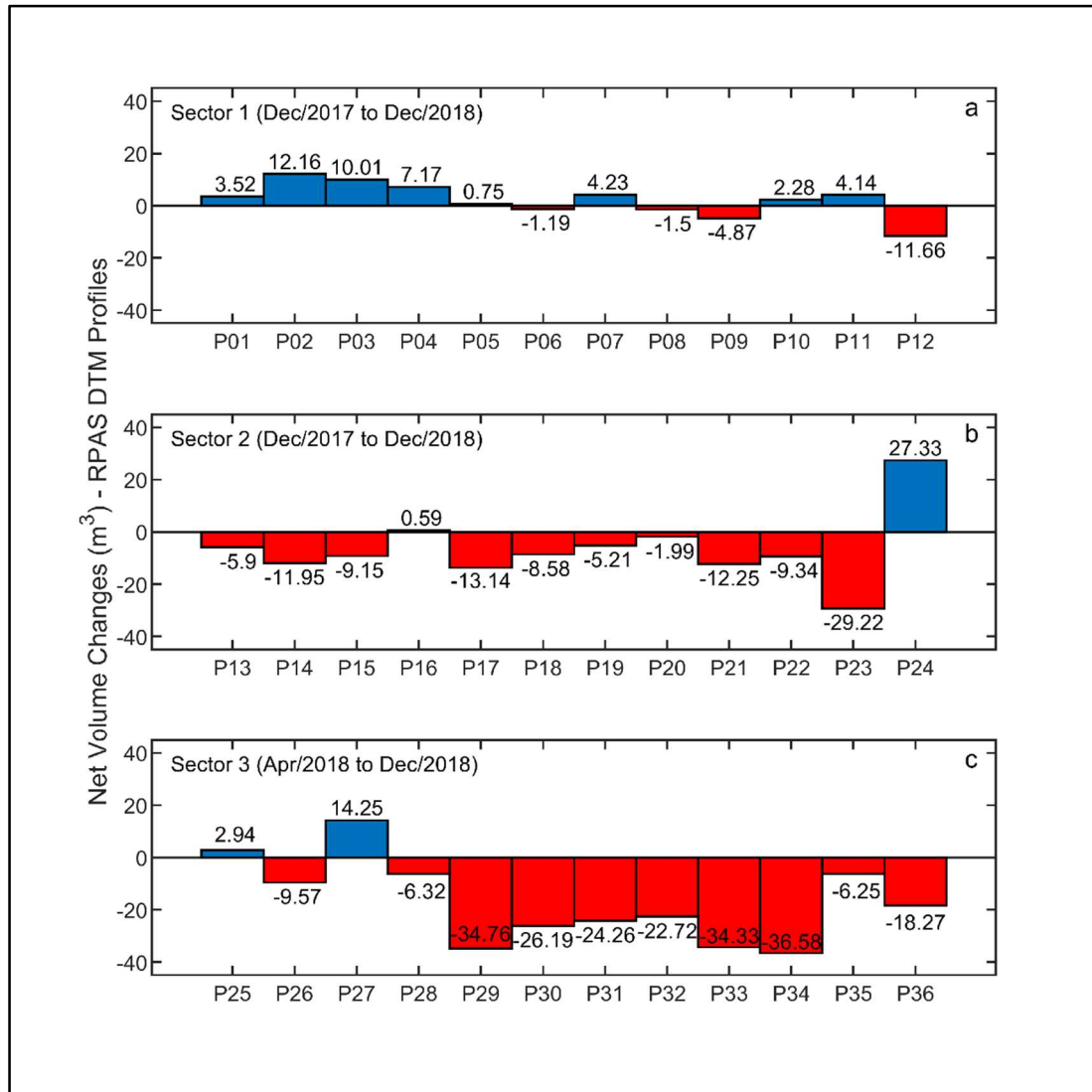
2.5.5.4 Volumetric variations

The cross-shore profile analysis also allowed for the quantifying of each profile volumetric budget, thus correlating these variations to the observed altimetric changes.

In *Sector 1* it was possible to observe that the largest volumetric gains occurred between P01–P04, while the losses were concentrated in P09 and P12. In *Sector 2* just P24 demonstrated volumetric gain; the other profiles showed decreasing of sedimentary

volume at the end of the studied period. The gains in *Sector 3* were concentrated in P27 and P25, while significant losses were recorded in the other profiles (Figure 10).

Figure 10. Net sedimentary volume variation within each cross-shore profile, expressed in terms of loss (red) and gain (blue).



Source: the author (2021).

2.6 DISCUSSION

2.6.1 Environmental parameters: wave and wind

The prevailing wave and wind patterns presented in this study are similar to those found by other authors for the Itamaracá Island and adjacent region (Medeiros and Kjerfve, 1993; Mendonça et al., 2006; Almeida and Manso, 2011; Pereira et al., 2017; Melo et al., 2019). Yet, the analysis carried out here points to a seasonal trend of energetic

increase in such patterns during the rainy season. According to Medeiros and Kjerfve (1993), during the rainy season, an increase of about 40% is expected for the peak flood current speeds at the SCC. In this study, higher values were observed in the tide average amplitude and wave power during the rainy season.

In this context, the months of Apr to Sep/2018 represented the period of greatest sedimentary loss for the studied area (see Figure 5a, Jul-Sep/18; Figure 5b, Jul-Sep/18 and Sep-Dec/18; and Figure 5c, *Sectors 2 and 3*). This interval corresponds to the second half of the rainy season and the beginning of the following dry season. Looking at Figure 2e, it is possible to identify the most energetic moments for wave power between Apr–Sep/2018 (53.3; 65.3; and 57kW/m), for the period studied, at ERA-Interim point.

The first dry season period (Dec/2017 to Feb/2018) corresponded to less energetic conditions and sediment input, for *Sectors 1 and 2* (see Figure 5a and b, Dec/17-Feb/18 and Feb-Apr/18). Looking at Figure 2e, it is possible to verify the least energetic moment for wave power in these months (maximum of 46.5kW/m). The second dry season (Sep-Dec/18, Figure 5) presented more powerful waves (maximum of ~52kW/m) than the first one, but less potent in relation to the rainy season (Figure 2e). According to Medeiros and Kjerfve (1993) and Pereira et al. (2017), lower waves, longer periods, and weaker winds are expected for the dry season (Figure 2b, c, and f).

The shallow and irregular relief of the Itamaracá Island southern inner shelf also interferes with the wave's power and propagation that enter through the discontinuity in the submerged reef line (near the ERA-Interim Point, Figure 1b) (Medeiros and Kjerfve, 1993; Pereira et al., 2017). The presence of submerged reefs and sandy banks causes a modulation effect on the wave height and a change in its incident direction, caused by refraction and diffraction. Thus, creating gradients in the angle of approach and incident wave energy, promoting convergence and divergence zones, and areas of erosion and/or sediment deposition on the sectors' beach line.

2.6.2 Statistical validation and accuracy

RPAS based photogrammetry allows for the generation of orthophotomosaics and DTMs in a practical and economical way. However, it is necessary to know if these products have acceptable accuracy for the proposed use. Several factors can affect the

accuracy of photogrammetric products based on SfM processing. A particular one is GCPs quantity and distribution along the survey area (James et al., 2017); a stratified distribution is best suited when a vertical accuracy improvement is intended (Martínez-Carricondo et al., 2018). The GCPs coordinates provide scale and orientation for the orthophotomosaics and digital models, which are generated by the homologous points in the image coordinate system (Martínez-Carricondo et al., 2018).

Gonçalves and Henriques (2015) call attention to the minimum number of GCPs to be positioned (3 GCPs) in order to improve the statistical redundancy of the least square adjustment, thus avoiding that long blocks of images remain linked only by conjugated points. These authors adopted a general rule of positioning at least 9 GCPs (or as many as possible) with uniform distribution. Laporte-Fauret et al. (2019) found errors of 0.67 and 0.50m with the establishment of 3 and 4 GCPs, respectively; and from the establishment of 5 to 10 GCPs, the RMSE_z stabilized between at 0.13–0.15m.

The photogrammetric products generated in this study reached $R^2 \geq 0.90$ and RMSE_z between 0.08 and 0.24m (average ≤ 0.16 m), stratified deploying of 4 to 6 GCPs. These results are similar to those found by other authors. Gonçalves and Henriques (2015) obtained RMSE_z between ~ 0.04 – 0.11 m, analyzing RPAS usage in mapping and monitoring of beaches and sandy dunes.

Bañón et al. (2019), studying sandy beaches through the combined use of RPAS and GNSS, reached R^2 0.88 and RMSE_z ~ 0.17 m. Long et al. (2016) and Genchi et al. (2020) also validated and compared their RPAS based products with GNSS surveys, highlighting the advantages of combined use with SfM processing.

Other authors performed the combined usage of kinematic GNSS, RPAS and airborne LiDAR (Light Detection and Ranging) (Long et al., 2016; Wiggins et al., 2019) or terrestrial TLS (Terrestrial Laser Scanning) (Nahon et al., 2019). These studies discuss the associated use and comparisons between these technologies: (i) significantly more affordable costs for executing RPAS surveys; (ii) RPAS surveys can be conducted with more speed, flexibility and technical ease; and (iii) the RPAS based products altimetric accuracy are equivalent or at least, depending on the product purpose, acceptable. Still according to Gonçalves and Henriques (2015), ~ 20 cm accuracy is acceptable for detecting small morphological and sedimentary changes on sandy beaches.

2.6.3 Sedimentary budget and dominant coastal process

In general terms, in the analyzed beaches the sediments input was observed until the middle of Apr–Jul/2018, when its maximum was reached. In the region, this period represents the first half of the rainy season. At the end of the rainy season (Sept/2018) sediment volume decreases were recorded in *Sectors 1* and 2. In the following dry season (Sep–Dec/2018), *Sector 1* presented a new pulse of sediment input, while the output predominated in *Sectors 2* and 3 until Dec/2018. This fact may be related to *Sector 1* location and alignment (internal and parallel, respectively, to the flood tide flow).

Medeiros and Kjerfve (1993) mention that at the SCC the flood tide current flow moves westward (270°), helping to boost the sediment input and transport along *Sector 1* (with L–O beach orientation), and shaped on its beaches by the incidence of propagated ocean waves. Another aspect, related to the energy of coastal processes, in the rainy season, stronger winds, higher power and shorter wave periods were observed. According to Medeiros and Kjerfve (1993) and Pereira et al. (2017), this is an expected pattern for this season. In fact, looking at Figs. 2e and 5, it is possible to notice the moments that punctuated sediment loss correspond to events of increase in wave power, e.g., Feb/2018 (Dec/17-Feb/18), Jul/2018 (Jul-Sep/18), and Sep/2018 (Sep-Dec/18).

On the other hand, during the rainy season, higher speeds are expected from the ebb and flood tide currents at the SCC (Medeiros and Kjerfve, 1993; Pereira et al., 2017). Despite the accretion tendency within *Sector 1*, at the end of the studied period, *Sectors 2* and 3 lost, respectively, the equivalent to 7 and 20 times the sediments volume that was deposited along *Sector 1*.

Gonçalves et al. (2019) observed that at the southeastern beaches on the Itamaracá Island, in the periods of 1989–1996, 1996–2005, 2005–2011 and 2011–2016, erosion was a predominant process. Medeiros and Kjerfve (1993) and Mendonça et al. (2006) discuss that, at the SCC, the channel's southern margin would be more protected than its northern one. These authors suggest that the submerged reefs line presence and the sediment retention to the south helped to form the Coroa do Avião Islet (Figure 1c), providing protection to the channel mouth windward side. Thus, being on the lee side, the north margin (insular margin) is more exposed to the action of prevailing winds and waves.

2.6.4 Beach profiles morphological changes

The altimetric and volumetric data obtained from cross shore profiles helped to understand how the sedimentary package of each sector behaved throughout the period studied. It was possible to observe that each sector presented areas, or sections, in erosion and accretion at different times.

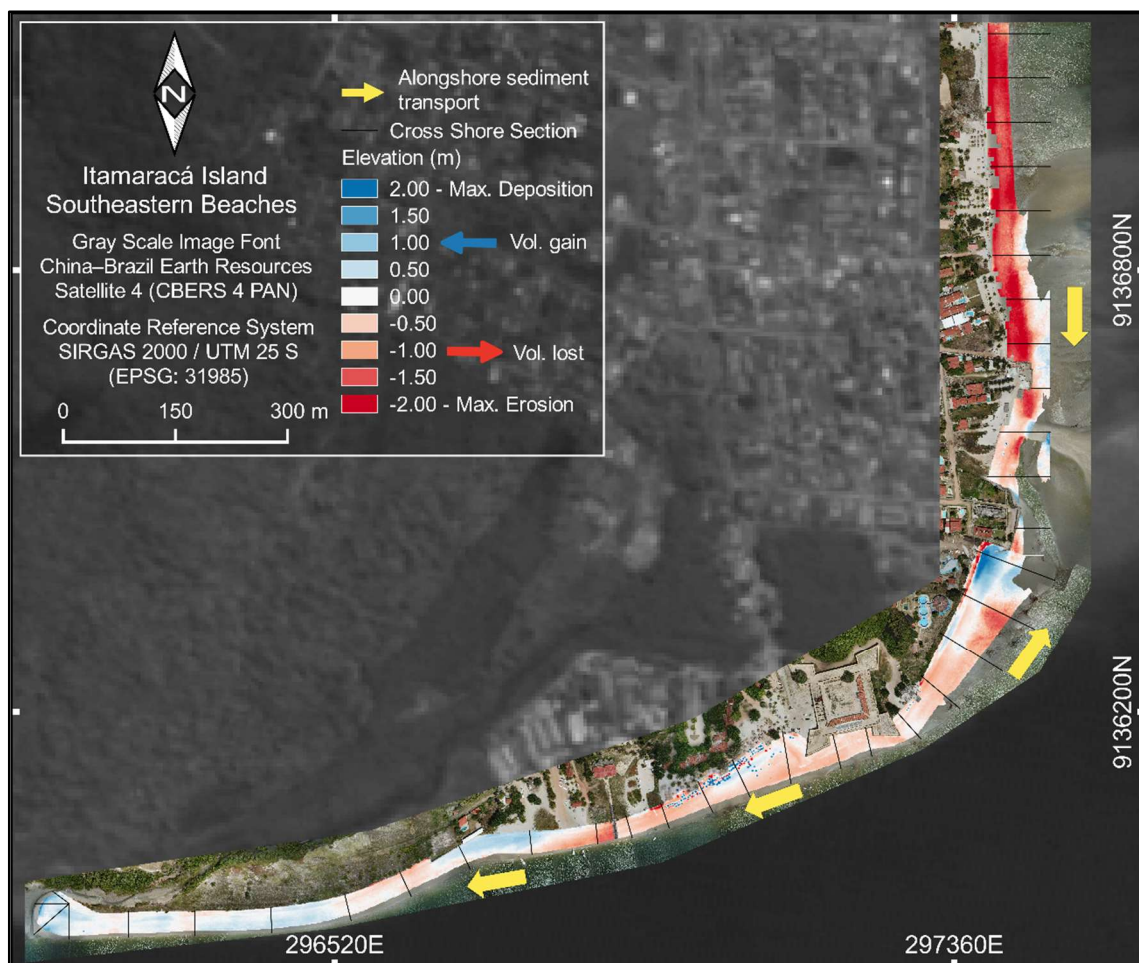
In *Sector 1*, the most significant losses were located within two main sections: (i) in P12, upstream of a pier installed across the beach (supported by fixed columns); and (ii) in P09, section upstream of a wall installed obliquely to the longitudinal axis of the beach. Regarding the gains, these occurred (i) in a small sandy spit on the *Sector 1* western limit (accretion process of P01 to P04); and (ii) immediately downstream to the wall, between profiles P10 and P11. Between P05–P08, a low variation zone (altimetric and volumetric) was observed, when comparing Dec/2017–Dec/2018. The anthropic interference on the SCC insular margin was pointed by Gonçalves et al. (2019), where they classified the Fort Orange surroundings (*Sector 2*) as an area of high human impact in the coastal zone, and the corresponding beach area to *Sector 1* was classified as having moderate to high impact.

Sector 1 profiles analysis also corroborated the proposal of sedimentary transport to occur in the L–O direction. Still according to Medeiros and Kjerfve (1993), at the SCC, the flow of the ebb current assumes the direction of 113° (~L–SE). However, the sedimentary gain areas occurred in sections whose features, either anthropic (wall) or natural (sandy spit), promoted sediment damming on the east face (downstream) and loss on the west face (upstream) (Figure 11). In this context, the flood tide flow in the 270° (O) direction may be one of the predominant factors in the transportation and redistribution of sediments displaced from downstream beaches (*Sector 2*), thus promoting the alternating pattern of sedimentation and erosion observed between the P19–P01 profiles (from *Sector 2* to *1*).

Between P20–P36 profiles (from *Sector 2* to *3*), the shoreline direction becomes S–N, making the beaches more exposed to coastal processes. Thus, the coastal dynamics starts to promote sediment transport in the predominant direction S–N. The areas that presented sedimentary gain corroborate this hypothesis. At the end of the studied period, in the P24 and P25 profiles, at the windward side of a shore protection structure (south

face) sediment damming and the consequent erosion to lee side (north face) were noted and registered by P26 profile (Figure 11). *Sector 3* beaches were more exposed to the action of winds and waves diffracted by the submerged reefs line and sandbanks, accommodated contiguous to extensive low tide terraces areas. Observing *Sector 3*'s morphological conformation, it is possible to ponder that the predominant waves come from the east (Figure 11).

Figure 11. Variation and sediment transport (yellow arrows) expressed in terms of gains (blue) and losses (red): *Sectors 1* and *2* (Dec/2017–Dec/2018); and *Sector 3* (Apr–Dec/2018).



Source: the author (2021).

According to Pereira et al. (2017), the presence of reef lines (parallel to the Itamaracá Island) dissipates most of the wave energy arriving on their respective beaches, presenting flat and shallow beach faces. Such characteristics can promote the formation of swash bars to these beaches. In the P27 profile, in Dec/2018, a sedimentary input was noted that connected the sandbank to the adjacent beach. The sandbanks and swash bars,

in addition to the extensive low tide terrace, form a bathymetric pattern that can promote wave–front convergence to the P23–P29 section, concentrating the wave energy and boosting sediment transport, allowing for the swash bars formation and sediment input to this section. Another aspect about sediment transport along the SCC may be linked to the 113° flow of the ebb tide (Medeiros and Kjerfve, 1993). Other research, based on the remote sensing approach (Harrison et al., 2017; Ford and Dickson, 2018; Humberston et al., 2019), has demonstrated the morphological changes in ebb tidal environments controlled by the waves and tides forces.

The SCC is the major sediment source for the sectors analyzed (Almeida and Manso, 2011) and a tidal dominated environment (Medeiros and Kjerfve, 1993). Melo et al. (2019) discussed that such environments can be conducive to sediment deposition, thus controlling the distribution of these inputs, through relief features, such as shallows, valleys, or channels, where the sedimentary volumes could settle. Thus, sediments carried by the flood tidal flow ($\sim 270^\circ$) into the channel and deposited along *Sector 1*, could be transported by the ebb tidal flow (113°) to the main channel bed and to the sandbanks area adjacent to *Sector 3*.

2.7 CONCLUSIONS

This study presented the volumetric and morphological variations of the insular margin of SCC through the RPAS based usage. In addition, the RPAS and GNSS simultaneous surveys detecting the sediment budget and the dominant coastal processes within the studied sectors, where the main conclusions were found:

- i. It was possible to record the sandy spit evolution at the *Sector 1* western limit and to evidence the erosive process acting on the beaches of *Sectors 2* and *3*;
- ii. The photogrammetric approach, through light and low-cost aircraft, proved to be adequate and adaptable in its use for research work and coastal areas monitoring. From this approach, it was possible to accurately record, in a short time period, the morphological responses of the sandy beaches to the coastal processes acting on the SCC insular margin, thus justifying its use in the face of the lack of in situ measurements of coastal process variables. However, such technology brings inherent limitations to the characteristics of each aircraft and data processing.

Issues such as weather conditions and the extent of flight area are determinant for the surveys success, requiring prior planning of field activities;

- iii. Considering each sector's geographic location, the seasonality of the waves and winds energetic patterns, and the tidal currents flow and direction, sedimentary input was observed between the second half of summer and the first half of winter, and the sediments output were noted between the second half of winter and the first half of summer. The data presented and discussed in this study demonstrated, in spite of *Sector I* accretion tendency, a dominant erosive process acting on the Itamaracá Island southeastern sandy beaches; and
- iv. The dynamic mechanism governing migration and sediment budget on the SCC beaches has not yet been fully understood, making it necessary to conduct continuous research with a view to monitor and ensure a safe coexistence with the existing erosive process.

More detailed studies (*e.g.*, a numerical modeling approach) on the location and dynamics of the sedimentary stocks at this mouth are needed and can explain (*i*) accommodation of large volumes of sediment in the main channel bed (submerged dune fields); and (*ii*) whether the erosive process acting on the north margin is a sign of migration from the main channel mouth in this direction.

REFERENCES

- Almeida, T.L.M., Manso, V.A.V., 2011. Sedimentologia da Plataforma Interna Adjacente a Ilha de Itamaracá – PE. *Estudos Geológicos*. 21 (1), 135–152 (ISSN: 1980–8208).
- Almeida, L.P., Almar, R., Bergsma, E.W.J., Berthier, E., Baptista, P., Garel, E., Dada, O.A., Alves, B., 2019. Deriving High Spatial–Resolution Coastal Topography from Sub–meter Satellite Stereo Imagery. *Remote Sens.* 11, 590.
<https://doi.org/10.3390/rs11050590>.
- Bañón, L., Pag´an, J.I., L´opez, I., Banon, C., Aragon´es, L., 2019. Validating UAS–based photogrammetry with traditional topographic methods for surveying dune ecosystems in the Spanish mediterranean coast. *J. Mar. Sci. Eng.* 7 (9), 297.
<https://doi.org/10.3390/jmse7090297>.
- Barros, L.C., Valença, L.M.M., Manso, V.D.A.V., Madruga Filho, J.D., Oliveira, J.A.R., 2007. Textura, composição e arredondamento dos sedimentos da plataforma continental interna adjacente `as desembocaduras sul do canal de Santa Cruz e do Rio Timbó, norte do Estado de Pernambuco. *Estudos Geológicos* 17 (1), 58–70.

- Casella, E., Rovere, A., Pedroncini, A., Mucerino, L., Casella, M., Cusati, L.A., Vacchi, M., Ferrari, M., Firpo, M., 2014. Study of wave runup using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: a tool for coastal management. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 149, 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.012>.
- Casella, E., Rovere, A., Pedroncini, A., Stark, C.P., Casella, M., Ferrari, M., Firpo, M., 2016. Drones as tools for monitoring beach topography changes in the Ligurian Seaet (NW Mediterranean). *Geo-Mar. Lett.* 36, 151–163. <https://doi.org/10.1007/s00367-016-0435-9>.
- Casella, E., Drechsel, J., Winter, C., Benninghoff, M., Rovere, A., 2020. Accuracy of sand beach topography surveying by drones and photogrammetry. *Geo-Mar. Lett.* 40, 255–268. <https://doi.org/10.1007/s00367-020-00638-8>.
- Chen, W.-W., Chang, H.-K., 2009. Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 84, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.06.002>.
- Chen, C.A., Gao, X., Ishizaka, J., Lebel, L., 2015. Editorial: Coastal seas in a changing world: Anthropogenic impact and environmental responses. *Cont. Shelf Res.* 111, 109–111. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.11.007>.
- Clapuyt, F., Vanacker, V., Oost, K.V., 2016. Reproducibility of RPA-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology*. 260, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.011>.
- Como, S., Meas, P., Stergiou, K., Williams, J., 2015. *Ocean Wave Energy Harvesting: Off-Shore Overtopping Design*. Worcester Polytechnic Institute (60 pp).
- Cullen, N.D., Verma, A.K., Bourke, M.C., 2018. A comparison of structure from motion photogrammetry and the traversing micro-erosion meter for measuring erosion on shore platforms. *Earth Surf. Dynam.* 6, 1023–1039. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-1023-2018>.
- Dataset, Araújo, R., Pereira, P., 2021. Itamaraca_Island_SCC_SM, Mendeley Data, v1. <https://doi.org/10.17632/bwxyjy9s74.1>.
- Dee, D.P., et al., 2011. The ERA–Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137, 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
- Ferreira, E., Chandler, J., Wackrow, R., Shiono, K., 2017. Automated extraction of free surface topography using SfM–MVS photogrammetry. *Flow Meas. Instrum.* 54, 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.02.001>.
- Fitzgerald, D.M., 1984. Interaction between the ebb-tidal delta and landward shoreline: price inlet, South Carolina. *Journal of Sedimentary Petrology* 54 (4), 1303–1318.
- Ford, M.R., Dickson, M.E., 2018. Detecting ebb tidal delta migration using Landsat imagery. *Mar. Geol.* 405, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.08.002>.

Genchi, S.A., Vitale, A.J., Perillo, G.M.E., Seitz, C., Delrieux, C.A., 2020. Mapping Topobathymetry in a Shallow Tidal Environment using Low-cost Technology. *Remote Sens.* 12, 1394. <https://doi.org/10.3390/rs12091394>.

Gonçalves, J.A., Henriques, R., 2015. RPA photogrammetry for monitoring of coastal areas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 104, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>.

Gonçalves, R.M., Saleem, A., Queiroz, H.A.A., Awange, J.L., 2019. A fuzzy model integrating shoreline changes, NDVI and settlement influences for coastal zone human impact classification. *Appl. Geogr.* 113, 102093. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102093>.

Harrison, S.H., Bryan, K.R., Mullarney, J.C., 2017. Observations of morphological change at an ebb tidal delta. *Mar. Geol.* 385, 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.12.010>.

Holanda, T.F., Gonçalves, R.M., Lino, A.P., Pereira, P.S., Sousa, P.H.G.O., 2020. Morphodynamic classification, variations and coastal processes of Paiva beache, PE, Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 21 (2), 235–251.

Humberston, J., Lippmann, T., McNinch, J., 2019. Observations of wave influence on alongshore ebb tidal delta morphodynamics at Oregon Inlet, NC. *Mar. Geol.* 418, 106040. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106040>.

James, M.R., Robson, S., Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U., 2017. Optimising RPA topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology* 280, 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>.

Janssen, P.A.E.M., 2004. *The Interaction of Ocean Waves and Wind*. Cambridge University Press.

Janssen, P.A.E.M., 2008. Progress in ocean wave forecasting. *J. Comput. Phys.* 227, 3572–3594. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.04.029>.

Janssen, P.A.E.M., Bidlot, J.R., Abdalla, S., Hersbach, H., 2005. Progress in ocean wave forecasting at ECMWF. *ECMWF Tech. Memo.* 478 (27 pp).

Laporte-Fauret, Q., Marieu, V., Castelle, B., Michalet, R., Bujan, S., Rosebery, D., 2019. Low-cost RPA for High-Resolution and Large-Scale Coastal Dune Change monitoring using Photogrammetry. *J. Mar. Sci. Eng.* 7, 63. <https://doi.org/10.3390/jmse7030063>.

Long, N., Millescamp, B., Guillot, B., Pouget, F., Bertin, X., 2016. Monitoring the topography of a dynamic tidal inlet using RPA imagery. *Remote Sens.* 8, 387. <https://doi.org/10.3390/rs8050387>.

Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., Aarninkhof, S., 2018. The State of the World's Beaches. *Nat. Sci. Rep.* 8, 6641.

<https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>.

Marques, H.A., Gonçalves, R.M., Araujo, A.S., Pereira, P.S., Queiroz, H.A.A., 2019. Shoreline monitoring by GNSS–PPP Aiming to Attendance the Law 14.258/2010 from Pernambuco State, Brazil. *Bulletin of Geodetic Sciences.* 25, 1–19.

<https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000200012>.

Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F.J., García-Ferrer, A., Pérez-Porras, F.J., 2018. Assessment of RPA–photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 72, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>.

Medeiros, C., Kjerfve, B., 1993. Hydrology of a Tropical Estuarine System: Itamaracá, Brasil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 36, 495–515.

Melo, M.C.S.S., Barcellos, R., Oliveira, L.E.E., Manso, V.A.V., 2019. Aspectos Sedimentológicos e Batimétricos da Plataforma Continental Norte de Pernambuco – Brasil. *Estudos Geológicos* 29, 17–30. <https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v29n2p17-30>.

Mendonça, F.J.B., Medeiros, C., Rollnic, M., 2006. Morphogenesis of the Coroa do Avião a Sand Bank/Barrier Islet at Northeastern–Brazil. *J. Coast. Res.* 39, 290–293 (ISSN 0749-0208).

Micheletti, N., Chandler, J.H., Lane, S.N., 2015. Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *British Society for Geomorphology.* 2, 1–12 (ISSN 2047-0371).

Mitchell, S.B., Jennerjahn, T.C., Vizzini, S., Zhang, W., 2015. Changes to processes in estuaries and coastal waters due to intense multiple pressures – an introduction and synthesis. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 156, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.12.027>.

Mury, A., Collin, A., James, D., 2019. Morpho–sedimentary monitoring in a coastal area, from 1D to 2.5D, using airborne drone imagery. *Drones.* 3, 1–15. <https://doi.org/10.3390/drones3030062>.

Nahon, A., Molina, P., Blázquez, M., Simeon, J., Capo, S., Ferrero, C., 2019. Corridor Mapping of Sandy Coastal Foredunes with UAS Photogrammetry and Mobile Laser Scanning. *Remote Sens.* 11, 1–14. <https://doi.org/10.3390/rs11111352>.

Papakonstantinou, A., Topouzelis, K., Pavlogeorgatos, G., 2016. Coastline zones identification and 3D coastal mapping using UAV spatial data. *International Journal of Geo–Information.* 5, 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijgi5060075>.

Pereira, P.S., Araújo, T.C., Manso, V.A.V., 2017. Tropical Sandy beaches of Pernambuco state. In: Short, A.D., Klein, A.H.F. (Eds.), *Brazilian Beaches Systems*. Springer, pp. 251–279. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9_10.

- Scarelli, F.M., Sistilli, F., Fabbri, S., Cantelli, L., Barboza, E.G., Gabbianelli, G., 2017. Seasonal dune and beach monitoring using photogrammetry from UAV surveys to apply in the ICZM on the Ravenna coast (Emilia–Romagna, Italy). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 7, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.06.003>.
- Turner, I.L., Harley, M.D., Drummond, C.D., 2016. UAVs for coastal surveying. *Coast. Eng.* 114, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.03.011>.
- Valentini, N., Saponieri, A., Danisi, A., Pratola, L., Damiani, L., 2019. Exploiting remote imagery in an embayed sandy beach for the validation of runup model framework. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 225, 106244. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106244>.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. ‘Structure–from–Motion’ photogrammetry: a low–cost, effective tool for geoscience application. *Geomorphology*. 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E., Sear, D.A., 2010. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surf. Process. Landforms*. 35, 136–156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>.
- Wiggins, M., Scott, T., Masselink, G., Russell, P., McCarroll, R.J., 2019. Coastal embayment rotation: Response to extreme events and climate control, using full embayment surveys. *Geomorphology*. 327, 385–403. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.11.014>.
- Zhang, R., Chen, L., Liu, S., Zhang, H., Gong, W., Lin, G., 2019. Shoreline evolution in an embayed beach adjacent to tidal inlet: the impact of anthropogenic activities. *Geomorphology*. 346, 106856. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106856>.
- Zhou, M., Wu, M., Zhang, G., Zhao, L., Hou, X., Yang, Y., 2019. Analysis of Coastal Zone Data of Northern Yantai Collected by Remote Sensing from 1990 to 2018. *Appl. Sci.* 9 (20), 4466. <https://doi.org/10.3390/app9204466>.

3 VARIABILIDADE DA LINHA COSTA EM PRAIAS ARENOSAS TROPICAIS DO ATLÂNTICO SUL EM RELAÇÃO À POTÊNCIA DE ONDA E TELECONEXÕES GLOBAIS (1984-2020)

3.1 INTRODUÇÃO

A intensificação da pressão antrópica sobre os ambientes costeiros tem interferido nos processos físicos responsáveis pelo equilíbrio e variabilidade naturais desses ambientes (Chen et al., 2015; Voudoukas et al., 2020; Almar et al., 2022). Dessa forma, problemas relacionados à erosão costeira estão se tornando mais evidentes e perceptíveis às populações que habitam estas áreas (Luijendijk et al., 2018; Williams et al., 2018; Almar et al., 2022). De comparável importância aos processos e fenômenos costeiros, os padrões de uso e ocupação do litoral, dentro de uma variação espaço-temporal em diferentes escalas, interferem na estabilidade e na morfologia da planície costeira e de suas praias, assumindo um importante papel na evolução e na exposição da costa ao risco de erosão (Dallas & Barnard, 2011; Aiello et al., 2013; Davis & Fitzgerald, 2004; Gomes & Silva, 2014).

Para entender os efeitos das variações espaciais e temporais dos processos costeiros atuantes sobre os estoques sedimentares e suas feições arenosas (*i.e.*, praias, bancos, barras, pontais, linha de costa), associados aos padrões de uso e ocupação do litoral, é necessário a existência e a manutenção de programas de monitoramento costeiro de longo prazo (Mazzer et al., 2009; Chen et al., 2015; Silva et al., 2016; Williams et al., 2018; Vos et al., 2019c; Almar et al., 2022). Porém, tais programas são escassos e, de várias formas, limitados (*e.g.*, geograficamente, financeiramente e politicamente) (Vos et al., 2019c; Silva et al., 2021; Almar et al., 2022). Contudo, o crescimento da disponibilidade de dados públicos de satélites, assim como o desenvolvimento de modelos numéricos de previsão e detecção automática de feições (*e.g.*, praias arenosas) e processos (*e.g.*, erosão), vem tornando possível, por exemplo, a análise de mais de 30 anos de imagens em escala global (Sutikno et al., 2015; Luijendijk et al., 2018; Toure et al., 2019; Vos et al., 2019a, 2019b e 2019c; Almeida et al., 2021; Almar et al., 2022; Queiroz et al., 2022).

Através do uso de imagens ópticas de satélite publicamente disponíveis, Luijendijk et al. (2018) desenvolveram métodos de análise e apresentam uma avaliação

em escala global da ocorrência de praias arenosas e suas taxas de variação da linha de costa, realizando a classificação supervisionada *pixel-a-pixel* do contraste correspondente a esta feição (detecção da interface água/areia). Seguindo a mesma tendência, utilizando imagens públicas de sensoriamento remoto óptico (banco público de dados do *Google Earth Engine* – GEE, <https://earthengine.google.com/>), Almeida et al. (2021) desenvolveram uma ferramenta web, criada em código aberto, para o mapeamento e a análise automática da linha de costa (CASSIE). Por meio de imagens orbitais Landsat e Sentinel-2, a ferramenta desenvolvida por estes autores executa a identificação automática da linha de costa e realiza análises estatísticas a partir dos dados extraídos (cassiengine.org).

De forma semelhante, porém com melhoramentos relacionados ao método de extração da linha de costa, Vos et al. (2019a) desenvolveram um software de código aberto (*CoastSat*) que obtém séries temporais de 30 anos de posições da linha de costa (a cada ~15 dias), com precisão horizontal de ~10m, em qualquer litoral arenoso, em escala global (banco público de dados do GEE).

Em estudos posteriores, o software *CoastSat* foi empregado na extração de séries temporais de linhas de costa em praias australianas, caracterizando uma resposta em escala regional e investigando a coerência espacial com a Oscilação Sul do El Niño (ENSO), em escalas interanuais (Vos et al., 2019b). Vos et al. (2019c) utilizaram a mesma ferramenta computacional para analisar em escalas interanuais e multidecadais a variabilidade e tendências na posição da linha de costa de cinco praias arenosas, distribuídas em três continentes diferentes.

Além dos aspectos geomorfológicos, recentes estudos alertam para os possíveis efeitos da combinação entre a pressão antrópica e as mudanças climáticas, expondo a fragilidade da zona costeira e interferindo na dinâmica de seus complexos sistemas (Wiggins et al., 2019; Vousedoukas et al., 2020; Harley et al., 2021; Silva et al., 2021; Almar et al., 2022). O Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC), estimou uma tendência de aquecimento da temperatura da superfície global de 0,87°C entre 2006-2015, estando acima da média calculada para o período 1850-1900. Caso essa taxa de aumento mantenha-se inalterada, é esperado que o aquecimento global atinja ~1,5°C entre 2030-2052, considerando a influência antrópica que induz uma taxa de aumento de ~0,2°C por década (Masson-Delmotte et al., 2018).

Estudos mais atuais que investigam o aumento da vulnerabilidade costeira associada às mudanças climáticas (*e.g.*, Vos et al., 2019b; Vousdoukas et al., 2020; Harley et al., 2021; Almar et al., 2022) e influenciadas pela incidência de ondas (*e.g.*, Wiggins et al., 2019; Araújo et al., 2021; Almar et al., 2022) estabelecem uma relação causa e efeito entre os eventos oceano-atmosfera mais energéticos (devido ao aumento da temperatura superficial do mar – SST) e as respostas morfológicas da linha de costa (*e.g.*, retração e perda sedimentar).

Através da posição de linhas de costa derivadas de imagens globais de satélites, entre 2000-2017, associada a uma variedade de dados de reanálise (ERA-5) e um modelo global conceitual de mudanças anuais na linha de costa que integra a influência climática global (teleconexões globais), Almar et al. (2022) demonstram que, globalmente, os litorais estão sob a influência do nível do mar, das ondas oceânicas e dos aportes fluviais; estabelecendo que esses fatores ambientais são todos substancialmente influenciados pelo ENSO em escalas de tempo interanuais.

Analizando a variação sazonal no estoque sedimentar de praias arenosas em uma entrada de maré no Atlântico Sul tropical, Araújo et al. (2021) consideraram uma relação direta entre valores mais altos de potência de onda com grandes perdas no volume sedimentar para o período de inverno, quando eventos mais energéticos são esperados para a região investigada por estes autores. Em outro estudo (Wiggins et al., 2019), a variabilidade morfológica em praias de cascalho (Devon, UK) foi correlacionada à sazonalidade da direção das ondas, impulsionadas pelas oscilações atmosféricas.

Apesar do exposto, os principais fatores ambientais que impulsionam as mudanças na zona costeira, em uma escala regional, e a sua relação com as teleconexões globais (*e.g.*, ENSO) ainda permanecem pouco quantificadas e investigadas (Almar et al., 2022). Neste contexto, o presente estudo, aborda essa lacuna de conhecimento existente entre a variabilidade espaço-temporal da linha de costa, em praias tropicais do nordeste brasileiro, e a sua relação com a potência de onda e a índices de teleconexão global. Para entender como estas contribuições globais impulsionam mudanças regionais, nossa investigação combinou conjuntos de dados globais de sensoriamento remoto (publicamente acessíveis), de séries temporais de linhas de costa (extraídas e processadas automaticamente), de reanálises (ERA-5) e de índices climáticos oceano-atmosfera, abrangendo um período de 36 anos, entre 1984 e 2020.

Entender os efeitos das variações espaciais e temporais nos ambientes costeiros, se faz necessário para uma eficiente gestão dos diversos interesses de uso e ocupação do litoral, sobretudo em áreas urbanas e de alta especulação imobiliária (Briele, 2014; Chen et al., 2015; Silva et al., 2016; Williams et al., 2018; Queiroz et al., 2022).

Neste sentido, a compreensão da variabilidade espaço-temporal da linha de costa, em escalas de tempo interanual e multidecadal, poderá fundamentar decisões e políticas públicas adequadas à dinâmica dessas áreas costeiras (Luijendijk et al., 2018; Vos et al., 2019a, 2019b e 2019c; Almeida et al., 2021; Almar et al., 2022).

3.2 ÁREA DE ESTUDO

3.2.1 Localização

A área de estudo está localizada no pontal sul da Ilha de Itamaracá (litoral norte do estado de Pernambuco, no Nordeste do Brasil), com extensão de ~3000m de praias arenosas, na margem insular da desembocadura sul do Canal de Santa Cruz (CSC-Sul). O canal de Santa Cruz possui ~20km de comprimento, em forma de “U”, e isola o bloco de terra da ilha do continente (Medeiros & Kjerfve, 1993; Almeida & Manso, 2011) (Figuras 1a e 1b).

A desembocadura do CSC-Sul está limitada ao sul pela Ilhota da Coroa do Avião e a Leste por linhas paralelas descontínuas de recifes submersos, presentes na plataforma interna da região (Medeiros & Kjerfve, 1993; Mendonça et al., 2006; Almeida & Manso, 2011; Pereira et al., 2017) (Figura 1b e 1c).

A área de estudo foi subdividida em dois setores com aproximadamente a mesma extensão (~1500m): o *Setor 1*, com orientação aproximada de SW–NE (49 transectos em laranja); e o *Setor 2*, com orientação S–N (49 transectos em azul).

Para um melhor entendimento e localização, tornando possível identificar e relacionar o comportamento da linha de costa à faixa de praia correspondente, os *Setores 1* e *2* foram subdivididos da seguinte forma (Figura 1c): (i) Praias do *Setor 1* – Praia do Pontal; Praia do Polo Comercial/Turístico; Praia do Forte; e Praia do ICMBio/CMA; e (ii) Praias do *Setor 2* – Praia dos Bancos de Areia e Praia do Loteamento São Paulo.

Figura 1. Localização da área de estudo: **a)** Estado de Pernambuco, Brasil, NE; **b)** Ilha de Itamaracá, litoral norte de Pernambuco; e **c)** Praias do pontal sul da Ilha de Itamaracá.



Fonte: *ESRI Satellite* (2017); e o autor (2022).

3.2.2 Geologia e geomorfologia

O estuário do canal de Santa Cruz originou-se no início do Holoceno, começando com a entrada da água do mar inundando uma falha paralela à costa (Medeiros & Kjerfve, 1993). A desembocadura do CSC-Sul abastece a área de estudo com sedimentos terrestres, predominando a classe textural areia (0,062 a 2,0mm) e quase homogeneidade na variação do Diâmetro do Grão Médio, variando de Areia Fina (0,125 a 0,25mm) a Média (0,25 para 0,5mm) (Almeida & Manso, 2011). O sedimento de suas praias apresenta teor de Matéria Orgânica Total de 0,43%, entre 3,3-10% de carbonato,

dominância de grãos de quartzo, mesocúrtica e aproximadamente simétrica (característica de ambientes com níveis de energia intermediários) (UFPE, 2019).

Com ~515m de largura e uma profundidade média de ~7m (variando de 2 a 10m), a desembocadura do CSC-Sul tem um relevo de fundo com topografia irregular (estruturas de recife, beachrocks, canais e características arenosas) e declive suave em direção ao mar até encontrar a linha descontínua de recifes submersos (Barros et al., 2007; Pereira et al., 2017; Melo et al., 2019). Estes recifes são constituídos por areia cimentada (arenito e geologicamente jovem) com 20-80% de quartzo e o restante sendo detritos biogênicos (fragmentos de algas calcárias, conchas, ouriços do mar e esponjas calcárias) (Medeiros & Kjerfve, 1993). Sua presença proporciona um ambiente favorável à deposição de sedimentos terrígenos carregados pelo CSC-Sul e sedimentos carbonáticos (oriundos dos próprios recifes), formando extensos bancos de areia contíguos a terraços de maré baixa (Almeida & Manso, 2011; Pereira et al., 2017) (Figura 1b e 1c).

A presença dos recifes submersos e dos bancos de areia promovem um efeito de modulação na altura da onda e uma mudança em sua direção incidente, causada por refração e difração (Pereira et al., 2015 e 2017). Dessa forma, são gerados gradientes no ângulo de aproximação e na energia das ondas, promovendo zonas de convergência e divergência, e áreas de erosão e/ou deposição de sedimentos ao longo da linha de costa aqui analisada. O relevo raso e irregular da plataforma interna meridional da Ilha de Itamaracá também interfere na força e na propagação das ondas que incidem em suas praias arenosas (Medeiros & Kjerfve, 1993; Pereira et al., 2015 e 2017).

Pernambuco não possui grandes e caudalosos rios desaguardo em sua costa. Sendo assim, naturalmente, o aporte sedimentar ao seu litoral é baixo (Araújo et al., 2007). Além disso, sua plataforma continental é estreita e marcada pela presença característica de conjuntos de longas linhas de recifes de arenito submersos, paralelas entre si e ao litoral adjacente, o que dificulta a remobilização do estoque sedimentar que possui (Medeiros & Kjerfve, 1993; Araújo et al., 2007; Pereira et al., 2015 e 2017).

Adicionalmente, seu padrão de uso e ocupação do litoral permitiu a urbanização e instalação dos mais diversos tipos de estruturas sobre áreas de dunas, de vegetação de restinga e do pós-praia, interferindo assim na disponibilidade natural dos sedimentos no sistema praial (Araújo et al., 2007; Martins et al., 2016; Pereira et al., 2015 e 2017).

3.2.3 Clima e oceanografia

O litoral pernambucano possui clima tropical atlântico, com distintos períodos de seca e chuva, caracterizados por um padrão bimodal com uma estação seca (verão) de outubro a março e uma estação chuvosa (inverno) de abril a setembro (Pereira et al., 2015 e 2017). Segundo Medeiros & Kjerfve (1993), na região da Ilha de Itamaracá os principais ventos sopram de sudeste a uma velocidade média de 3,2m/s. A estação seca apresenta ventos fracos (média de 2,6m/s, de NE) e os ventos mais fortes sopram de SE durante a estação chuvosa (média de 4,0m/s).

As marés são basicamente controladas por fontes astronômicas com baixa interferência meteorológica (apenas o suficiente para causar pequenas ondas de tempestades) (Pereira et al., 2015 e 2017). O Diretório de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil fornece previsão regular de marés para o porto do Recife (geograficamente, ~27km da área de estudo), classificando-as como do tipo mesotidal, dominadas por ondas, com variação de 2 a 4m, e semidiurna ($F = 0,09$ e período de 12,42h) atingindo variação máxima de amplitude de ~1,8m, com duas preamares e duas baixa-mares por dia lunar (com pequena desigualdade diurna), tendo altura média de 1,67m, podendo atingir 2,7m nas marés de sizígia (Barros et al., 2007; Almeida & Manso, 2011; Pereira et al., 2015 e 2017; Melo et al., 2019).

Na região oceânica adjacente à área de estudo, durante a estação chuvosa, Araújo et al. (2021) encontraram valores médios de altura significativa de onda (H_s) de ~1,84m (pico de 2,6m), período de onda (T_p) de ~7,6s (pico de ~9,9s) e ondas predominantes de SE (128°). Para os períodos de estação seca, foram registrados valores médios de H_s entre 1,5-1,68m (picos de 2,02-2,49m), T_p entre 7,8-7,9s (picos de 10-11,7s) e ondas predominantes de L-SE ($84,4$ - $111,5^\circ$). Segundo estes mesmos autores, a potência média de onda da região registrou valores de 26kW/m (picos entre 57-65,3kW/m), durante o inverno e entre 18-22,1kW/m (picos de 46,5-51,8kW/m), durante o verão.

Sendo assim, registrando uma tendência sazonal de aumento energético nestas variáveis durante a estação chuvosa. De acordo com Medeiros & Kjerfve (1993) e Pereira et al. (2015 e 2017), ondas mais baixas, períodos mais longos e ventos mais fracos são esperados para a estação seca. Análises de dados de correntes, realizadas por Medeiros & Kjerfve (1993), encontraram uma dominância dos fluxos de maré no CSC-Sul,

evidenciando que esta desembocadura, na verdade, configura-se como uma entrada dominada por correntes de maré (*i.e.*, uma entrada de maré). No mesmo estudo, estes autores também observaram um aumento de ~40% nas velocidades de pico das correntes de maré de enchente nesta desembocadura, durante a estação chuvosa.

3.2.4 Regionalidades

A Ilha de Itamaracá está localizada em uma área de proteção ambiental (APA Santa Cruz), caracterizando-se como um dos destinos turísticos mais procurados do litoral norte pernambucano; com praias bem frequentadas o ano todo e expostas a forte influência antrópica. Dentro da área de estudo encontram-se um marco histórico nacional (a Fortaleza de Santa Cruz ou, como é popularmente mais conhecido, o Forte Orange, 1631) e a sede regional do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade / Centro de Mamíferos Marinheiros (ICMBio/CMA; Projeto Peixe-boi) (Figura 1c), ambos expostos a uma alta vulnerabilidade à erosão costeira (Gonçalves et al., 2019).

Ao longo da Ilha de Itamaracá são comumente encontradas estruturas de proteção para evitar o agravamento da erosão costeira. Na maioria dos casos, consistem em muros de alvenaria, enrocamentos graníticos ou blocos de concreto instalados (de forma pontual e individual) pelos proprietários das áreas ou imóveis afetados ou pela administração pública (municipal ou estadual). Em ambos os casos (na maioria das vezes), sem o suporte técnico adequado (Araújo et al., 2021).

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.3.1 Módulo de gerenciamento da linha de costa – CASSIE

Segundo Almeida et al. (2021), o *Coastal Analyst System from Space Imagery Engine* – CASSIE, é uma ferramenta *web*, criada em código aberto, para mapeamento e análise automática da linha de costa utilizando imagens de satélite. Essa ferramenta foi desenvolvida em *JavaScript*, usando a API (*Application Programming Interface*) do *Google Earth Engine* (GEE), podendo ser aplicada a qualquer região costeira, em escala global, onde uma fronteira entre água e terra possa ser caracterizada (*e.g.*, contraste água/areia). Por meio das imagens de satélites Landsat e Sentinel-2, disponíveis gratuitamente no GEE, o CASSIE executa a identificação automática da linha de costa

através do índice de diferença normalizada da água (NDWI) e do algoritmo de segmentação de imagem de Otsu (Otsu, 1979).

As linhas de costa extraídas das imagens de satélite são analisadas através do estabelecimento de um conjunto de transectos transversais, definidos pelo usuário, ao qual fornece dados para realização automática de análises estatísticas processadas pela própria ferramenta.

A interface do usuário do CASSIE é amigável e intuitiva. Acessando o sítio na internet cassiengine.org (após a identificação do usuário, o Google permite o acesso ao uso do Earth Engine), o usuário é direcionado através das seguintes etapas para seleção das imagens: (i) definição da missão (coleção dos satélites Landsat ou Sentinel-2); (ii) escolha da área de interesse (AOI – *area of interest*); (iii) definição da janela temporal e percentual da cobertura de nuvens; e (iv) checagem das imagens que serão processadas (ou descartadas).

Esta última etapa da aquisição de imagens tem especial importância, pois a versão atual do CASSIE não realiza a correção da maré (até o momento, a plataforma GEE não dispõe de nenhum modelo ou conjunto de dados relacionados à maré). Este aspecto pode representar uma fonte importante de erros na análise da variação da linha de costa (*e.g.*, taxas de mudanças) em regiões costeiras com amplitudes macrotidais, onde a diferença entre a baixa e a preamar pode implicar em centenas de metros na posição da linha de costa. Sendo assim, para superar tal limitação, é dada ao usuário a opção de remover manualmente algumas das imagens pré-selecionadas, permitindo assim processar apenas as imagens que foram adquiridas com, aproximadamente, o mesmo nível de maré (Almeida et al., 2021).

Cumprida a seleção das imagens, o usuário passa à etapa de análises que consiste em investigar as imagens selecionadas, seja pelo carregamento destas no mapa e aplicação da operação com bandas, ou pela análise temporal das linhas de costa e o posicionamento de uma linha de base. Na finalização desta etapa, o usuário é solicitado a fornecer os parâmetros de análise, informando o espaçamento (m) entre os transectos e a extensão (m) de cada um destes, além do coeficiente de limiarização (0 ou 1). Almeida et al. (2021) explicam que, caso o usuário opte por “0”, a análise será realizada utilizando-se a divisão em duas classes do algoritmo de segmentação de Otsu (terra/água); escolhendo “1”, será

realizada uma divisão multinível de três classes (terra/característica intertidal/água; geralmente necessária para ambientes estuarinos).

No presente estudo, os seguintes parâmetros para as etapas de aquisição de imagem e de análise foram utilizados:

- i. Coleção de imagens da missão Landsat;
- ii. Janela temporal: 1984 a 2020 (multidecadal); 1984 a 2002 e 2002 a 2020 (interdecadal); e 1984 a 1993, 1993 a 2002, 2002 a 2011 e 2011 a 2020 (interanual);
- iii. Checagem das imagens: foram selecionadas para o processamento apenas as imagens que capturaram a AOI no momento de maré cheia (Almeida et al., 2021), sem a presença dos bancos de areia ou terraços de baixa-mar;
- iv. Cobertura de nuvens: 0%;
- v. Espaçamento entre os transectos: 30m;
- vi. Extensão dos transectos: 1600m;
- vii. Coeficiente de Limiarização: 0;
- viii. A linha de base foi posicionada em terra a ~200m de distância da linha de costa atual, observada na imagem do mapa base do GEE.

Após a extração automática da linha de costa de cada imagem selecionada, o CASSIE calcula um conjunto de análises estatísticas, de forma individual, para cada transecto posicionado (e.g., Thieler et al., 2017; Almeida et al., 2021; Natarajan et al., 2021). Sendo os seguintes:

- i. *Shoreline Change Envelope* (SCE) – distância (m) entre a linha de costa mais distante e a mais próxima da linha de base em cada transecto;
- ii. *Net Shoreline Movement* (NSM) – distância (m) entre as linhas de costa mais antigas e mais novas para cada transecto;
- iii. *End Point Rate* (EPR) – taxa de mudança da linha de costa (m/ano), calculada dividindo NSM pelo tempo decorrido entre a linha de costa mais antiga e a mais recente (i.e., $\text{Tempo}_{\text{Final}} - \text{Tempo}_{\text{Inicial}}$); e
- iv. *Linear Regression Rate* (LRR) – taxa de mudança da linha de costa (m/ano), com base na inclinação da linha de regressão linear e calculada pelo ajuste de uma linha

de regressão de mínimos quadrados (equação da reta) a todos os pontos da linha de costa e transectos.

O resultado obtido na LRR é a base para a classificação do status de mudança da linha de costa registrado por cada um dos transectos (Almeida et al., 2021). A tabela 1 resume esta classificação.

Tabela 1. Classificação do status da linha de costa baseada nos resultados da LRR.

Status da Linha de Costa	Resultado LRR
Acrescida	>0,5m/ano
Estável	-0,5 a 0,5m/ano
Erodida	-1,0 a 0,5m/ano
Criticamente erodida	<-1,0m/ano

Fonte: o autor (2022).

Após a finalização dos cálculos estatísticos, é gerado, em forma de tabela, um relatório contendo todos os resultados. Informações adicionais, incluindo as coordenadas geográficas (no sistema WGS84) dos transectos, ou os parâmetros estatísticos que descrevem a qualidade do ajuste (coeficiente de determinação – R^2 ; coeficiente de correlação – r ; raiz do erro quadrático médio – RMSE; e declividade) também são fornecidas e, junto com as linhas de costa, os transectos e as linhas de base, podem ser exportadas nos seguintes formatos: ESRI *shapefile* (.shp); *JavaScript Object Notation* (.json); ou *comma-separated-values* (.csv) (Almeida et al., 2021).

Segundo os seus desenvolvedores (Almeida et al., 2021), os produtos gerados pelo CASSIE possuem uma precisão sub-pixel. Ou seja, todas as diferenças observadas entre a posição da linha de costa extraída através do CASSIE (imagem Landsat 8, sensor OLI) versus levantamentos *in-situ* realizados por um sistema RTK-GPS, foram encontradas abaixo do valor da resolução espacial (pixel) da imagem Landsat 8 (<30m; R^2 0,95 e RMSE de 8,84m).

Também foi observada uma tendência de deslocamento da linha de costa em direção ao mar de 8,3m (em média), quando comparado ao levantamento *in-situ* realizado com o sistema RTK-GPS. Comparando o LRR calculado pelo CASSIE com estudos similares (Luijendijk et al., 2018), os resultados também sugerem, de forma geral, uma boa concordância, apresentando coeficiente de correlação de 0,85 e RMSE de 2,41m/ano (Almeida et al., 2021).

3.3.2 Análises multidecadais, interdecadais e interanuais

O processamento estatístico do CASSIE calcula a distância entre as posições da linha de costa (extraída de cada imagem) relativas a cada período aqui analisado (*i.e.*, multidecadal, interdecadal e interanual) tomando a linha de base, estabelecida pelo usuário, como referência (Almeida et al., 2021). Sendo assim, um ponto fixo é fornecido para referenciar os pontos de interseção (ao longo dos transectos) entre as séries temporais da linha de costa, possibilitando assim o cálculo da distância entre estes pontos (*e.g.*, Mazzer et al., 2009; Oyedotun, 2014; Almeida et al., 2021).

Devido à descontinuidade na série temporal das linhas de costa extraídas, estes indicadores (*i.e.*, pontos) foram interpolados (método de interpolação linear) de tal forma que, tanto para o *Setor 1* (variável S1) quanto para o *Setor 2* (variável S2), cada um dos seus respectivos transectos passou a ter um dado de distância para cada ano analisado, entre 1984 e 2020 (*i.e.*, 37 dados por transecto).

Nas análises multidecadal e interanual os dados (*i.e.*, as distâncias em relação à linha de base) foram analisados pelo método dos mínimos quadrados, realizando o ajuste de uma reta de regressão linear, através do cálculo da média ponderada de uma sequência de iterações, onde de cada iteração foi retirada uma série representativa. Assim, o valor da inclinação da reta foi usado como peso na estimativa da tendência (status da linha de costa) dentro das respectivas janelas temporais (Mazzer et al., 2009).

Os dados interpolados também foram utilizados para construção de diagramas de Hovmöller (Hovmöller, 1949), permitindo assim a observação das mudanças ao longo do tempo e do espaço para cada transecto (comparando uma posição anômala com a média em cada transecto) (Silva et al., 2021). Os resultados e os dados da análise interdecadal (1984 a 2002 e 2002 a 2020) foram expressos através do posicionamento das linhas de costa e dos transectos ao longo dos *Setores 1* e *2*, utilizando-se escalas de cores para classificação da sua variação espaço-temporal e do seu status (ver tabela 1) em cada trecho de praia analisado.

3.3.3 Dados e potência de onda

Para o cálculo da variável potência de onda (variável WP) foi utilizado o conjunto de dados públicos da quinta geração de reanálise global para clima e tempo (ERA-5,

<https://cds.climate.copernicus.eu/>) do *European Centre for Medium Range Weather Forecasts* (ECMWF, <https://apps.ecmwf.int/datasets/>). Os dados de reanálise do ERA-5 foram calculados a partir de um modelo acoplado de ondas e ventos oceânicos e atmosféricos, já amplamente utilizado e validado na literatura (Hersbach et al., 2020; Almar et al., 2022).

A potência de onda (P) foi calculada utilizando-se as variáveis ERA-5 do período médio de onda (T_p) e da altura significativa de onda (H_s – combinação de ondas de vento e *swell*), através da equação (Como et al., 2015):

$$P = 0,98 h^2 T \quad (1)$$

onde, h é a altura da onda (H_s) e T é o período da onda (T_p), sendo os resultados expressos em kW/m. Os dados de reanálise global de ondas ERA-5, com resolução horizontal de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, corresponderam (como referência padrão) ao ponto de águas oceânicas mais próximo possível à região costeira da área de estudo ($7,81^\circ\text{S}$ e $34,81^\circ\text{W}$); dados de direção de onda (WD) também foram extraídos desse ponto.

Hersbach et al. (2020) descrevem a configuração geral do ERA-5, apresentando uma avaliação básica de suas características e desempenho, partindo de um conjunto de dados de 1979. Estes mesmos autores avaliam que a incerteza da reanálise ERA-5 reflete a evolução dos sistemas de observação utilizados e sua resolução temporal e espacial permite a evolução detalhada dos sistemas climáticos.

O ERA-5 substituiu a reanálise ERA-Interim e está baseado no Sistema de Previsão Integrado (IFS) Cy41r2, beneficiando-se de desenvolvimentos em física de modelos, dinâmica central e assimilação de dados. Uma comparação com dados de bóias independentes mostra um ajuste adequado para a altura das ondas oceânicas (Hersbach et al., 2020; <https://cds.climate.copernicus.eu/>).

3.3.4 Teleconexões globais

O termo teleconexão (conexão a distância) se refere à ligação entre anomalias climáticas locais e forçantes localizadas, geralmente, a grandes distâncias e aparentemente não relacionadas (Liu e Alexander, 2007; Ambrizzi et al., 2014; Rebiota e Santos, 2014). Essas ligações são causadas pelo transporte de energia e propagação de

ondas na atmosfera e no oceano, permitindo assim que a atmosfera sirva como uma "ponte" entre as diferentes partes do oceano e que este funcione como um "túnel" ligando diferentes regiões atmosféricas (Liu e Alexander, 2007).

Os padrões de teleconexão são reconhecidos como uma variabilidade atmosférica, porém apenas alguns são associados à SST (Ambrizzi et al., 2014). Neste contexto, o presente estudo utilizou os seguintes índices oceano-atmosfera para representar as teleconexões globais: (i) ENSO (MEI e BEST); (ii) SST do Pacífico (ONI e Niño 3); e (iii) SST do Atlântico (TNA e TSA), obtidos através do banco de dados, publicamente acessível, da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica do Estados Unidos da América (NOAA / EUA) (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>).

O ENSO é um estado anômalo (SST) de ocorrência natural das condições oceano-atmosfera do Pacífico tropical, sendo o principal preditor de perturbações climáticas globais. As fases quente e fria do ENSO são conhecidas por eventos de El Niño e La Niña, respectivamente. Durante períodos de El Niño, há uma anomalia positiva nos valores de SST ao longo da costa do Peru e valores negativos perto da costa da Austrália; períodos de La Niña são caracterizados pela situação oposta (Rasmusson e Carpenter, 1982; Trenberth, 1997; Nascimento et al., 2020; <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>).

O índice multivariado de ENSO bimensal (MEI.v2), combina variáveis oceânicas e atmosféricas, facilitando em um único índice uma avaliação do ENOS; é a série temporal da função ortogonal empírica (EOF) das variáveis (i) pressão ao nível do mar (SLP), (ii) SST, (iii) componentes zonais e (iv) meridionais do vento de superfície e (v) radiação de ondas longas (OLR) sobre a bacia tropical do Pacífico (30°S-30°N e 100°E-70°W). Em sua fase positiva (negativa), o índice representa condições de El Niño (La Niña) (Souza e Rebiota, 2021; <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>).

A Série temporal bivariada ENSO (BEST) foi projetada para ser simples de calcular e fornecer um índice ENSO de longo prazo para fins de pesquisa. Esta série temporal é baseada na combinação de um componente atmosférico ENSO, o Índice de Oscilação Sul (SOI), com um índice oceânico de SST do Pacífico, o Niño 3.4 (SST médio na região 5°N-5°S e 170°W-120°W). Os valores médios de SST e SOI resultantes são calculados para cada mês da série temporal. Eventos El Niño (La Niña) podem ser

reconhecidos a partir de valores altos (baixos) de BEST (<https://psl.noaa.gov/people/cathy.smith/best/>).

O Índice Niño Oceânico (ONI) é o principal indicador de monitoramento para El Niño e La Niña. Considera-se que períodos de El Niño (La Niña) estão presentes quando o ONI é $+0,5$ ($-0,5$) ou superior (inferior), indicando que o Pacífico tropical leste-central está significativamente mais quente (frio) que o normal. Este índice rastreia a SST do Pacífico leste-central durante três meses, mesmo domínio do índice Niño 3.4, 170°W - 120°W (Souza e Rebiota, 2021).

Existem vários índices usados para monitorar o Pacífico tropical, todos baseados em anomalias da SST calculadas em uma determinada região. O índice Niño 3 (variável N3) (5°N - 5°S , 150°W - 90°W) é usado para caracterizar a natureza única de cada evento de El Niño e La Niña, junto com os índices Niño 3.4 e ONI (Trenberth, 1997; Rasmusson e Carpenter, 1982; Trenberth e Stepaniak, 2001).

O índice do Atlântico Norte Tropical (TNA) é um indicador da variabilidade da SST no leste do Oceano Atlântico Norte tropical, caracterizada por anomalias quentes ou frias calculadas entre $5,5^{\circ}\text{N}$ - $23,5^{\circ}\text{N}$ e $57,5^{\circ}\text{W}$ - 15°W , estando ligada a variações da precipitação média no Nordeste brasileiro. Valores positivos (negativos) do TNA indicam que a SST está anormalmente quente (fria) no Oceano Atlântico Norte tropical (Uvo et al., 1998; Enfield et al., 1999; Nascimento et al., 2020; Souza e Rebiota, 2021).

O índice do Atlântico Sul Tropical (TSA) é um indicador da SST no oeste do Oceano Atlântico Sul tropical, caracterizando-se por anomalias quentes ou frias entre 0° - 20°S e 30°W - 10°E . Valores positivos (negativos) do TSA indicam que a SST é anormalmente quente (fria) no oceano Atlântico Sul Tropical (Enfield et al., 1999; Nascimento et al., 2020; Souza e Rebiota, 2021).

3.3.5 Análises e estatística complementares

Além das análises realizadas pelo CASSIE (subitem 3.1) e as análises multi e interdecadais e interanuais da variação espaço-temporal da linha de costa (subitem 3.2), foram realizadas análises e cálculos estatísticos complementares. Para a apresentação dos dados ERA-5 (H_s , T_p , WP e WD) e índices climáticos (MEI, BEST, ONI, N3, TNA e TSA) foram realizadas análises univariadas e seus resultados foram expressos na forma

gráficos de dispersão x,y (ERA-5) e de anomalias (WP e teleconexões). As tendências dos dados de WP, MEI, BEST, ONI, N3, TNA e TSA foram investigadas através da série temporal de anomalias mensais.

As anomalias foram derivadas da subtração dos ciclos sazonais da série temporal mensal e a remoção da variabilidade da sazonalidade (Nascimento et al., 2020). Uma análise de correlação foi realizada entre todas as variáveis (MEI, BEST, ONI, N3, TNA, TSA, WP, S1 e S2) através do cálculo do Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e do teste de significância estatística do valor de p (nível de confiança $\alpha = 0,05$), sendo seus resultados apresentados em forma de tabela. Para o estudo das relações entre os índices das teleconexões globais e a potência de onda, com o objetivo de determinar as oscilações coerentes e o atraso nos dados climáticos, foram realizadas análises de coerência de ondeleta e diferença de fase (Torrence e Compo, 1998; Torrence e Webster, 1999; Grinsted et. al., 2004; Vale et al., 2020; Nóbrega et. al., 2021).

Neste trabalho aplicou-se a técnica de análise de sinais “Coerência de Ondeleta”, como uma ferramenta de análise bivariada usada para estudar a interação entre diferentes séries temporais e sua co-evolução ou co-movimento no domínio de tempo e frequência. Segundo Torrence & Compo (1998) a coerência de ondeleta ou “*Wavelet Transform Coherence* (WTC)” é definida como o quadrado do espectro cruzado normalizado pelos espectros de potência individuais. Ou seja, coerência de ondeleta é a correlação entre dois espectros de potência de séries não estacionárias no espaço de tempo-frequência (Cazelles et al., 2008). Este espectro dá uma quantidade entre 0 e 1, e mede a correlação cruzada entre duas séries temporais em função da frequência e tempo.

Por fim, foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) para a escolha dos principais componentes que explicam o maior percentual de variância entre os índices climáticos e a potência de onda (Gotelli e Ellison, 2011; Jolliffe e Cadima, 2016; Nascimento et al., 2020; Queiroz et al., 2022).

O banco de dados de reanálise ERA-5 fornece dados horários em nível único desde 1979 até o presente. Neste estudo, foram utilizados dados diários, selecionados a cada seis horas, para todos os meses de cada ano, a partir de 1984 até 2020 (expressos nos gráficos de dispersão x,y). Após o cálculo da variável WP (Eq. 1), foram calculadas suas médias mensais (gráficos de anomalias e coerência de ondeleta) e anuais (cálculos

de correlação e PCA). O banco de dados NOAA fornece dados mensais de índices climáticos oceano-atmosfera desde ~1950 até os dias atuais. Para cada variável representativa das teleconexões globais (MEI, BEST, ONI, N3, TNA e TSA) foi calculada uma matriz de dados mensais (gráficos de anomalias e coerência de ondeleta) e outra com dados de médias anuais (cálculos de correlação e PCA).

A partir dos dados interpolados das variáveis S1 e S2, utilizados no diagrama de Hovmöller, foram calculadas matrizes para as posições médias anuais da linha de costa (em relação à linha de base) para cada ano em cada setor. Os valores das médias anuais foram utilizados nos cálculos de correlação e nos gráficos comparativos entre as anomalias dos índices oceano-atmosfera e a variabilidade média da linha de costa. Devido à descontinuidade na série temporal (resolução temporal) das linhas de costa extraídas não foi possível o cálculo de uma matriz com valores da média mensal para as variáveis S1 e S2.

No intuito de controlar as diferenças entre as variáveis (as unidades e as magnitudes dos valores) da matriz de dados com os valores médios, foi realizada uma padronização (Z-escore; Z_{ij}) para transformação de cada variável. Dessa forma, cada variável (X_{ij}) foi subtraída de sua média (X_j) e dividida pelo desvio padrão (S_j) das n observações da variável j (Gotelli e Ellison, 2011; Jolliffe e Cadima, 2016):

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_j}{S_j} \quad (2)$$

A construção das matrizes de dados; os cálculos estatísticos; a construção dos gráficos de regressão linear, de dispersão (x,y) e anomalias; e o diagrama de Hovmöller, foram realizados em ambiente MATLAB R2018b. Por meio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG; *software* QGIS 3.10.12, versão *A Coruña*) foram gerados os mapas de localização e as imagens auxiliares com arquivos vetoriais e *raster*.

3.4 RESULTADOS

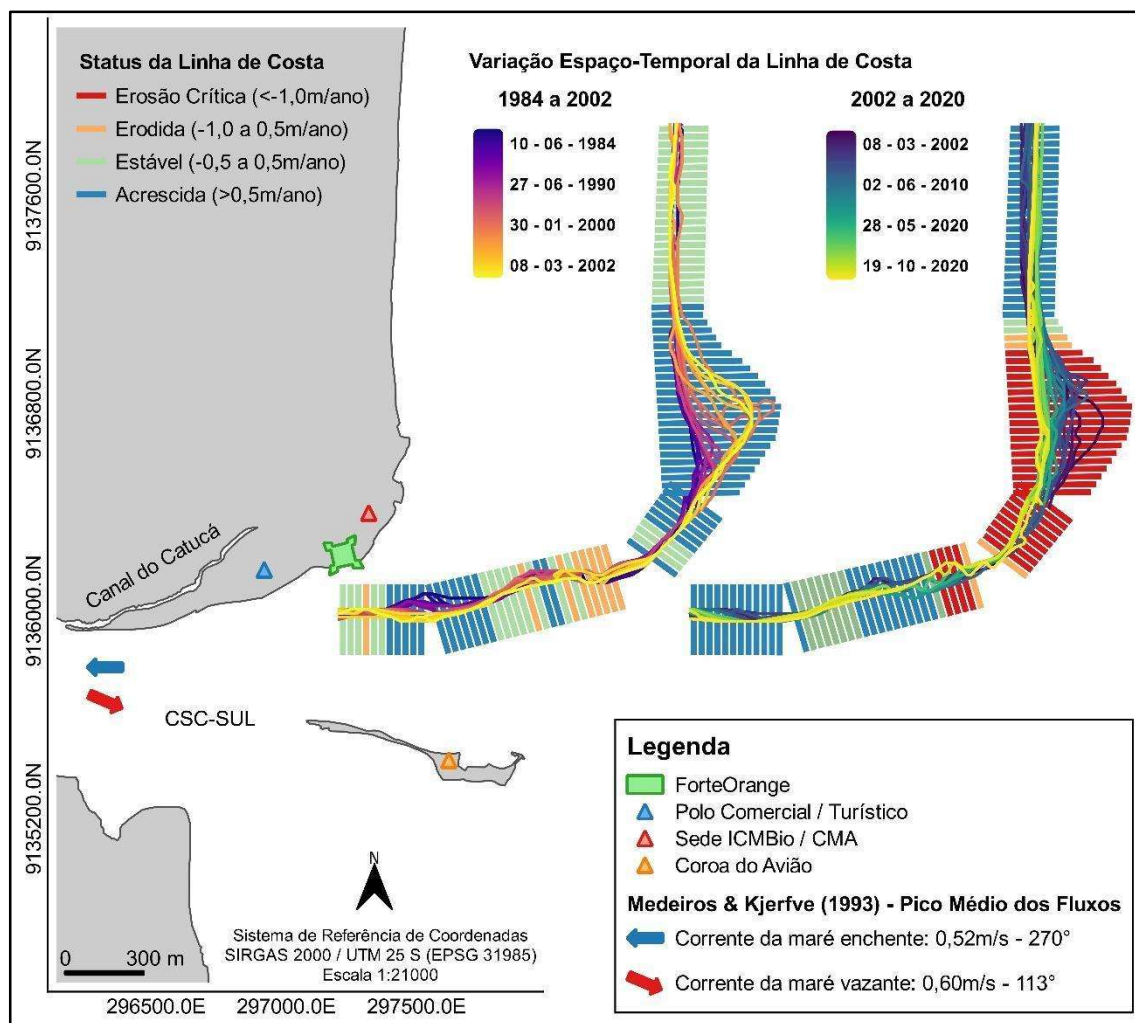
3.4.1 Extração e variação interdecadal da linha de costa

Foram extraídas 70 linhas de costa para o *Setor 1* e 64 linhas de costa para o *Setor 2*, distribuídas entre os anos de 1984 e 2020. Devido aos parâmetros de aquisição

estabelecidos (e.g., AOI com cobertura de nuvens de 0% e na de maré cheia), não foi possível obter uma série temporal contínua de imagens *Landsat* para a extração das linhas de costa em ambos os setores.

A Figura 2 apresenta os resultados das análises para janela de tempo interdecadal (1984 a 2002 e 2002 a 2020), bem como ilustra o posicionamento das linhas de costa e respectivos transectos utilizados ao longo do *Setores 1 e 2*.

Figura 2. Resultados da extração das linhas de costa: classificação qualitativa do status e variação espaço-temporal interdecadal.



Fonte: o autor (2022).

Os primeiros 18 anos (de 1984 a 2002) de linhas de costa extraídas e processadas evidenciaram a primeira praia do *Setor 1*, a Praia do Pontal, em relativa estabilidade em seu limite oeste e em acreção entre a sua porção central até o seu limite leste com a praia seguinte. A segunda praia deste setor, a Praia do Polo Comercial/Turístico, foi

classificada como estável em praticamente toda a sua extensão. Seguindo a leste, a terceira praia, a Praia do Forte, foi a única a ser classificada como erodida em todo o seu trecho. A quarta e última praia deste setor, a Praia do ICMBio/CMA, foi classificada como estável, em sua primeira metade (SW) e em acreção, em sua segunda metade (NE), limite com o *Setor 2*. Entre 1984-2002, as praias do *Setor 2* (com orientação Sul–Norte), Praia dos Bancos de Areia e Praia do Loteamento São Paulo, foram classificadas como acrescida e estável, respectivamente (Figura 2).

No segundo período interdecadal analisado (de 2002 a 2020), a Praia do Pontal foi classificada como acrescida, em sua primeira metade e como estável, em seu trecho seguinte, até o seu limite a leste com a do Praia do Polo Comercial/Turístico; a qual foi classificada como acrescida em quase toda a sua extensão.

As outras duas praias do *Setor 1*, do Forte e do ICMBio/CMA, apresentaram um agravo no processo erosivo, sendo ambas classificadas como em erosão crítica, entre 2002-2020. As praias do *Setor 2*, dos Bancos de Areia e do Loteamento São Paulo, foram classificadas como em erosão crítica e em acreção, respectivamente, porém apresentando uma “zona de transição” erosão/estável, entre si (Figura 2).

3.4.2 Variações multidecadal e interanual da linha de costa

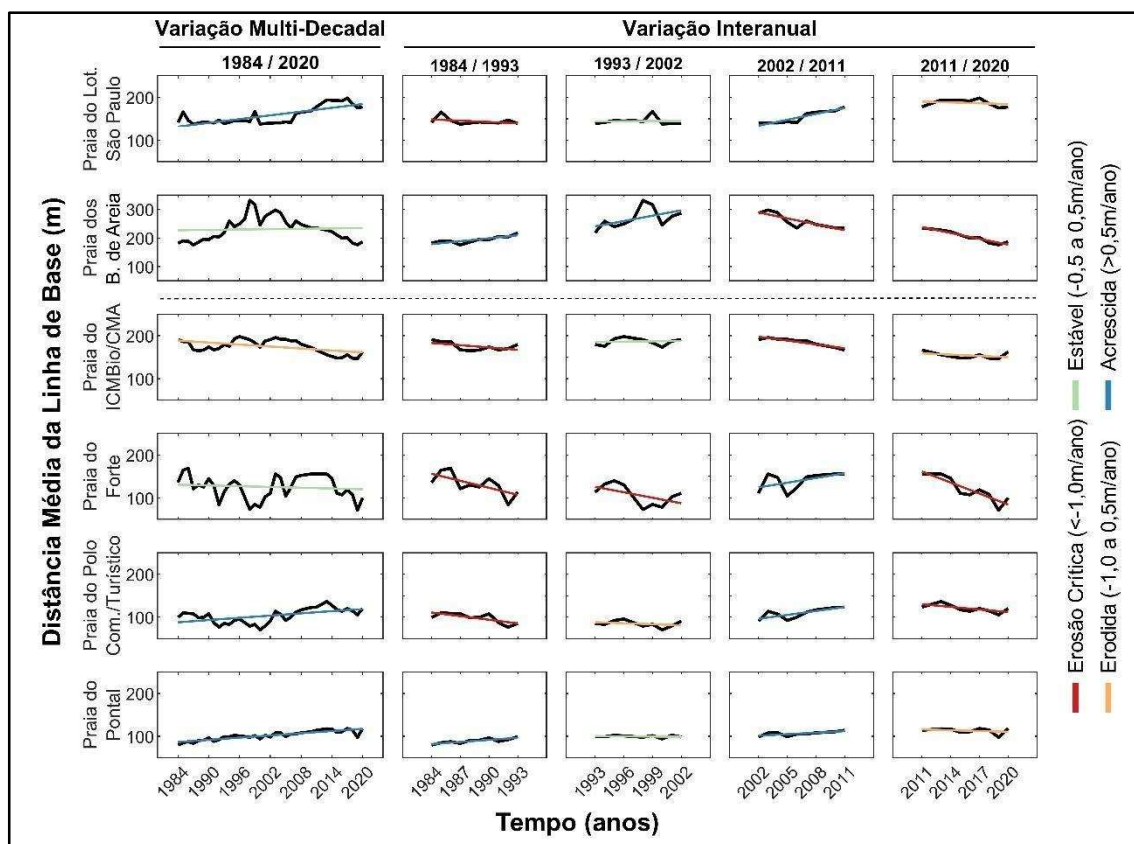
As mudanças no posicionamento da linha de costa podem ocorrer dentro de diferentes escalas temporais, apresentando diferentes tendências, a depender do período observado. A Figura 3 ilustra as tendências encontradas para as escalas multidecadal (36 anos) e interanuais (de 9 em 9 anos), enquanto a tabela 4 resume os resultados dos cálculos estatísticos que apoiam essas tendências.

Dentro da escala multidecadal, no *Setor 1*, foi possível observar uma tendência de acreção para as praias do Pontal (LRR 0,85m/ano) e do Polo Comercial/Turístico (LRR 0,87m/ano), de estabilidade na Praia do Forte (LRR -0,29m/ano) e de erosão na Praia do ICMBio/CMA (LRR -0,77m/ano). No *Setor 2*, a praia dos Bancos de Areia apresentou tendência à estabilidade (LRR 0,20m/ano) e a Praia do Loteamento São Paulo à acreção (LRR 1,46m/ano) (Figura 3 e Tabela 2).

A primeira série amostral das variações interanuais (1984 a 1993) apresentou as praias do Pontal (*Setor 1*) e dos Bancos de Areia (*Setor 2*) classificadas em acreção (LRR

1,63 e 3,46m/ano, respectivamente). As demais praias foram todas classificadas em erosão crítica (*i.e.*, $LRR < -1,0\text{m/ano}$) (Figura 3 e Tabela 2).

Figura 3. Gráficos de tendência da variação espacial da linha de costa nas escalas multidecadal e interanual, para cada uma das praias dos setores analisados. Declive da reta de tendência: erosão crítica, em vermelho; erosão, em laranja; estável, em verde; e acrescida, em azul. A linha tracejada marca a separação entre as praias dos *Setores 1* e 2: da praia do Pontal à do ICMBio/CMA, *Setor 1*; e praias dos Bancos de Areia e do Loteamento São Paulo, *Setor 2*.



Fonte: o autor (2022).

A série interanual seguinte, de 1993 a 2002, apresentou resultados mais heterogêneos (Figura 3). No *Setor 1*, apenas a Praia do Forte manteve a classificação anterior, erosão crítica ($LRR -4,28\text{m/ano}$). As praias do Pontal e do ICMBio/CMA foram reclassificadas como estáveis ($LRR -0,14$ e $0,24\text{m/ano}$, respectivamente), enquanto a Praia do Polo Comercial/Turístico, como em erosão ($LRR -0,79\text{m/ano}$). No *Setor 2*, a Praia dos Bancos de Areia manteve a classificação anterior, acreção ($LRR 6,25\text{m/ano}$), enquanto a Praia do Loteamento São Paulo foi reclassificada para estável ($LRR 0,07\text{m/ano}$) (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados dos parâmetros estatísticos calculados.

Setores	Praias	Análises Estatísticas	Variação Multi-decadal	Variações Interanuais			
			1984 / 2020	1984 / 1993	1993 / 2002	2002 / 2011	2011 / 2020
Setor 1	Praia do Pontal	SCE	38.61m	19.53m	8.70m	15.67m	20.73m
		NSM	38.61m	19.53m	-0.77m	15.67m	4.18m
		EPR	1.07m/ano	2.17m/ano	-0.09m/ano	1.74m/ano	0.46m/ano
		LRR	0.85m/ano	1.63m/ano	-0.14m/ano	1.18m/ano	-0.60m/ano
		Tendência	Acresção	Acresção	Estabilidade	Acresção	Erosão
		r	0.88	0.84	-0.16	0.73	-0.29
		R ²	0.77	0.70	0.03	0.54	0.08
	Praia do Polo Turístico	SCE	66.26m	33.48m	25.51m	32.40m	31.01m
		NSM	20.96m	-13.64m	5.29m	32.40m	-3.08m
		EPR	0.58m/ano	-1.52m/ano	0.59m/ano	3.60m/ano	-0.34m/ano
		LRR	0.87m/ano	-2.82m/ano	-0.79m/ano	3.05m/ano	-2.03m/ano
		Tendência	Acresção	Erosão Crítica	Erosão	Acresção	Erosão Crítica
		r	0.56	-0.74	-0.32	0.77	-0.69
		R ²	0.32	0.55	0.10	0.60	0.47
	Praia do Forte	SCE	97.76m	84.95m	66.93m	51.36m	84.44m
		NSM	-35.65m	-22.14m	-2.86m	44.84m	-55.49m
		EPR	-0.99m/ano	-2.46m/ano	-0.32m/ano	4.98m/ano	-6.17m/ano
		LRR	-0.29m/ano	-5.45m/ano	-4.28m/ano	3.67m/ano	-8.55m/ano
		Tendência	Estabilidade	Erosão Crítica	Erosão Crítica	Acresção	Erosão Crítica
		r	-0.12	-0.67	-0.52	0.56	-0.89
		R ²	0.01	0.45	0.31	0.31	0.88
	Praia do ICMBio	SCE	51.11m	23.03m	24.91m	29.11m	19.77m
		NSM	-28.44m	-11.39m	11.31m	-24.27m	-4.08m
		EPR	-0.79m/ano	-1.27m/ano	1.26m/ano	-2.70m/ano	-0.45m/ano
		LRR	-0.77m/ano	-1.76m/ano	0.24m/ano	-2.99m/ano	-1.00m/ano
		Tendência	Erosão	Erosão Crítica	Estabilidade	Erosão Crítica	Erosão
		r	-0.53	-0.55	0.09	-0.93	-0.43
		R ²	0.28	0.30	0.01	0.87	0.18
Setor 2	Praia dos Bancos	SCE	155.94m	42.31m	113.62m	62.75m	58.71m
		NSM	4.64m	35.81m	68.83m	-51.63m	-48.36m
		EPR	0.13m/ano	3.98m/ano	7.65m/ano	-5.74m/ano	-5.37m/ano
		LRR	0.20m/ano	3.46m/ano	6.25m/ano	-6.91m/ano	-6.78m/ano
		Tendência	Estabilidade	Acresção	Acresção	Erosão Crítica	Erosão Crítica
		r	0.05	0.84	0.54	-0.86	-0.96
		R ²	0.00	0.71	0.29	0.74	0.93
	Praia do Lot. São Paulo	SCE	60.75m	28.28m	28.91m	37.95m	22.92m
		NSM	36.17m	-2.36m	0.83m	37.95m	-0.24m
		EPR	1.00m/ano	-0.26m/ano	0.09m/ano	4.22m/ano	-0.03m/ano
		LRR	1.46m/ano	-1.02m/ano	0.07m/ano	4.60m/ano	-0.63m/ano
		Tendência	Acresção	Erosão Crítica	Estabilidade	Acresção	Erosão
		r	0.77	-0.38	0.02	0.94	-0.24
		R ²	0.60	0.14	0.00	0.88	0.06

Fonte: o autor (2022).

O terceiro período analisado (de 2002 a 2011), representou um novo momento de mudança nas tendências, com todas as praias sendo reclassificadas. No *Setor 1*, apenas a

Praia do ICMBio/CMA estava em erosão crítica (LRR -2,99m/ano). As praias do Pontal, do Polo Comercial/Turístico e do Forte foram classificadas em acreção (LRR 1,18; 3,05; e 3,67m/ano, respectivamente). No *Setor 2*, a Praia dos Bancos de Areia foi reclassificada para erosão crítica (LRR -6,91m/ano), enquanto a do Loteamento São Paulo, para acreção (LRR 4,60m/ano) (Figura 3 e Tabela 2).

O quarto e último período (de 2011 a 2020), dentro das janelas temporais aqui analisadas, no *Setor 1*, a Praia do Pontal é classificada em erosão (LRR -0,60m/ano); as praias do Polo Comercial/Turístico e do Forte voltaram a ao status de erosão crítica (LRR -2,03 e -8,55m/ano, respectivamente); e a Praia do ICMBio/CMA foi classificada em erosão (LRR -1,00m/ano). No *Setor 2*, a Praia dos Bancos de Areia permaneceu em tendência de erosão crítica (LRR -6,78m/ano) e a Praia do Loteamento São Paulo foi classificada em erosão (LRR -0,63m/ano) (Figura 3 e Tabela 2).

A análise da variabilidade de longo prazo da linha de costa também possibilitou a identificação de padrões de periodicidade (*i.e.*, ciclos acreção/erosão). A Figura 4 apresenta diagramas de Hovmöller (Hovmöller, 1949) que ilustram os resultados dos processos de mudança na posição da linha de costa ao longo do período estudado.

Na Praia do Pontal (*Setor 1a*, transectos 1-21), entre os transectos 8-16, destacou-se um longo e progressivo período de migração da linha de costa no sentido do mar (acreção), entre 1984-1999. Seguindo-se a este, foi observada uma relativa estabilidade entre 1999-2015. De 2015 a 2018, entre os transectos 6-14, destacou-se uma rápida migração da linha de costa no sentido do mar, seguida de um ciclo erosivo (migração no sentido da terra), entre 2018-2020.

Entre os transectos 18-21, três períodos de acreção (1989-1993, 1996-2002, e 2012-2020) foram antecidos por um período de relativa estabilidade (1984-1989) e interposto por dois ciclos erosivos (1993-1996 e 2002-2012) (Figura 4, *Setor 1a*).

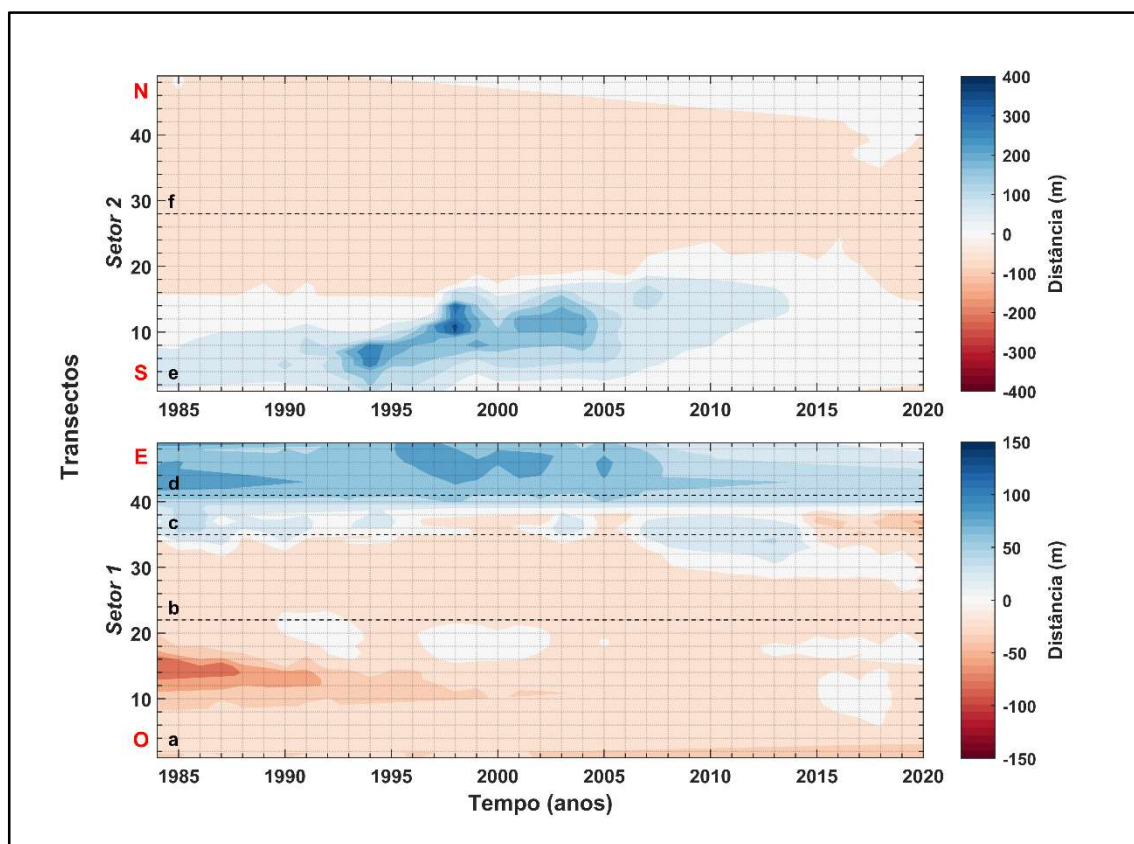
A variabilidade da linha de costa da Praia do Polo Comercial/Turístico (*Setor 1b*, transectos 22-34) permaneceu entre uma relativa estabilidade e uma lenta, porém progressiva, tendência erosiva. As variações de maior destaque aconteceram em seu limite leste, contíguo à Praia do Forte (*Setor 1c*), entre os transectos 30-34. De 1987 a

2006, ocorreu um longo e progressivo ciclo erosivo, seguido por dois ciclos consecutivos de acreção (2006-2014) e erosão (2014-2020) (Figura 4, *Setor 1b*).

A Praia do Forte (*Setor 1c*, transectos 35-40) apresentou ciclos curtos e intercalados de acreção (1984-1986, 1993-1995, 2002-2004, 2006-2014) e erosão (1986-1993, 1995-2002, 2004-2006 e 2014-2020) (Figura 4, *Setor 1c*).

Devido às estruturas do Forte Orange, os transectos 40 e 41, limite entre as praias do Forte e do ICMBio/CMA, respectivamente, foram separados por um espaçamento superior a 30m, dificultando assim a comunicação direta entre essas praias (ver Figura 2).

Figura 4. Variação temporal e espacial (*eixos x e y*, respectivamente) da linha de costa. As escalas de cores indicam a distância da posição média com valores positivos (negativos) demonstrando a migração no sentido do mar (da terra). As linhas tracejadas marcam os trechos de praia analisados: *Setor 1* (O–E), **a)** Praia do Pontal, **b)** Praia do Polo Comercial/Turístico, **c)** Praia do Forte e **d)** Praia do ICMBio/CMA; e *Setor 2* (S–N), **e)** Praia dos Bancos de Areia e **f)** Praia do Loteamento São Paulo.



Fonte: o autor (2022).

A última praia do *Setor 1*, a Praia do ICMBio/CMA (*Setor 1d*, transectos 41-49), possui seus limites marcados pela presença de estruturas artificiais: o Forte (a SW) e um muro de contenção (a NE). Sendo assim, os transectos 49 (*Setor 1d*) e 1 (*Setor 2e*) possuem um espaçamento superior a 30m (ver Figura 2).

De forma geral, este trecho de praia foi marcado por um período de acresção, entre os transectos 42-49, que durou de 1995 a 2002, caracterizando um pico de migração da linha de costa no sentido do mar, sendo seguido de um outro pequeno pico em 2005. Este ciclo de acresção foi precedido por um período de transição entre erosão e estabilidade (1984-1995) e, após o período de pico (1995-2002 e 2005), seguiu-se um gradual e progressivo ciclo de migração da linha de costa no sentido da terra (erosão), de 2007 a 2020 (Figura 4, *Setor 1d*).

No *Setor 2*, a Praia dos Bancos de Areia (*Setor 2e*, transectos 1-27), entre os transectos 1-18, apresentou um longo e consistente período de migração da linha de costa no sentido do mar que durou de 1987 até 2007. Neste período, foram observados dois picos de acresção bem destacados: o primeiro, no ano de 1994 e o segundo, no ano de 1998. A partir do ano de 2007, foi possível observar o início de um ciclo erosivo consistente que durou até o ano de 2020. Entre os transectos 19-27, de 1984 a 2005, a linha de costa migrou lenta e progressivamente no sentido da terra. De 2005 a 2016, foi evidenciado um ciclo de acresção, provavelmente resultado do deslocamento sedimentar da regressão da linha de costa ocorrida, no mesmo período, no trecho mais ao sul desta praia (transectos 1-18). Entre 2016 e 2020, foi destacado o retorno do ciclo erosivo na metade norte da praia, entre os transectos 19-27 (Figura 4, *Setor 2e*).

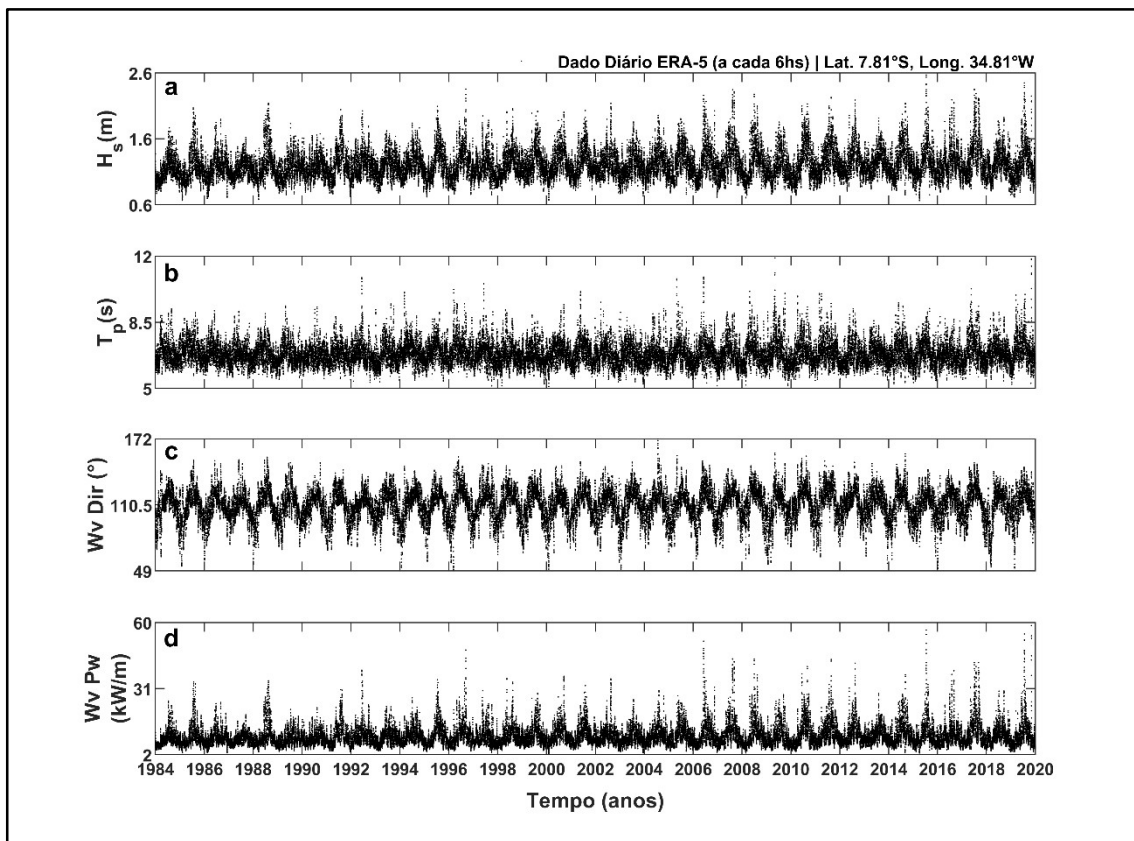
A Praia do Loteamento São Paulo (*Setor 2f*, transectos 28-49), em sua primeira metade (transectos 28-36), apresenta-se como um trecho onde a variabilidade da migração da linha de costa permaneceu estável, entre 1984-1990; entrou em um longo ciclo erosivo de 1990 a 2010; e, entre 2010-2020, estabeleceu-se uma recuperação do ciclo erosivo com um lento período de migração da linha de costa no sentido do mar.

A segunda metade da praia (transectos 37-49), comportou-se de uma forma similar à sua primeira metade, porém apresentando uma recuperação mais acelerada e precoce, provavelmente, devido à acomodação de sedimentos migrados da movimentação da linha de costa ocorrida no trecho de praia ao sul, *Setor 2e* (Figura 4, *Setor 2f*).

3.4.3 Dados e potência de onda

Os dados de onda ERA-5 obtidos ao largo da plataforma interna da área de estudo (7,81°S e 34,81°W) e a potência de onda calculada (Eq. 1), permitiram caracterizar as condições predominantes para o clima de ondas na região da área de estudo (Figura 5).

Figura 5. Condições predominantes de onda: **a)** Altura significativa (H_s); **b)** Período (T_p); **c)** Direção (°); e **d)** Potência.



Fonte: o autor (2022)

Ao longo do período estudado, a altura significativa de onda (H_s , Figura 5a) apresentou valor médio de 1,204m (mínima de ~0,67m), amplitude de 1,904m e altura máxima de 2,567m (entre 2015-2016). Além disso, outros momentos de máxima de H_s foram destacados: 2,354m (1996-1997); 2,343m (2007-2008); e 2,446m (2019-2020).

O período de onda (T_p , Figura 5b) apresentou valores máximo e mínimo de 12 (2009-2010) e ~5,1s (1999-2000), respectivamente, e média de ~6,8s. Ao longo do período estudado, outros momentos de pico de T_p foram observados: 10,86s (1992-1993);

10,8s (2005-2006); 10,89s (2006-2007); e 11,84s (2019-2020). A direção de onda variou de ~ 50 - 172° , com direção média de 110° (Wv Dir $^\circ$, Figura 5c).

A potência de onda calculada (Wv Pw, Figura 5d) apresentou valores máximo e mínimo de 58,62 (2019-2020) e 2,52 kW/m, respectivamente, e 10,17 kW/m de média. Ao longo das décadas foram observados os seguintes picos de máxima (kW/m): 33,84 e 34,4 (1980); 39,07 e 47,92 (1990); 44,05 e 51,79 (2000); e 54,94, 56,68 e 58,62 (2010). Comparando os gráficos c e d (Figura 5), é possível observar uma provável relação entre a potência e a direção de onda, onde as ondas do quadrante SE estão associadas a períodos mais energéticos, enquanto as do quadrante NE a períodos de menor energia.

3.4.4 Correlação entre as variáveis

As combinações entre os índices ENSO e SST Pacífico apresentaram os mais representativos coeficientes de correlação positivos entre as variáveis (ONI/Niño 3, BEST/ONI e MEI/BEST; $r > 0,88$ e $p < 0,001$). Os pares TSA/BEST e TSA/MEI, apresentaram os mais representativos coeficientes de correlação negativos entre as variáveis dos índices SST Atlântico e ENSO ($r = -0,364$ | $p = 0,027$ e $r = -0,378$ | $p = 0,021$, respectivamente), representando uma relação linear inversa (Tabela 3).

Tabela 3. Matriz de Correlação de Pearson (r): combinação entre as variáveis utilizadas (médias anuais padronizadas, Z_{ij}). Os valores em destaque (*) possuem nível de significância inferior a α ($p < 0,05$).

Matriz de Correlação		Niño 3	ONI	BEST	MEI	TNA	TSA	WP	S1	S2
Niño 3	r de Pearson	1								
	Valor de p	1								
ONI	r de Pearson	0.935*	1							
	Valor de p	< 0.001	1							
BEST	r de Pearson	0.883*	0.965*	1						
	Valor de p	< 0.001	< 0.001	1						
MEI	r de Pearson	0.882*	0.947*	0.967*	1					
	Valor de p	< 0.001	< 0.001	< 0.001	1					
TNA	r de Pearson	0.084	-0.037	-0.130	-0.166	1				
	Valor de p	0.620	0.829	0.442	0.325	1				
TSA	r de Pearson	-0.257	-0.312	-0.364*	-0.378*	0.319	1			
	Valor de p	0.124	0.060	0.027	0.021	0.054	1			
WP	r de Pearson	-0.190	-0.280	-0.284	-0.367*	0.475*	0.082	1		
	Valor de p	0.260	0.094	0.088	0.025	0.003	0.628	1		
S1	r de Pearson	-0.143	-0.178	-0.271	-0.344*	0.449*	0.186	0.352*	1	
	Valor de p	0.397	0.293	0.105	0.037	0.005	0.270	0.033	1	
S2	r de Pearson	0.049	-0.128	-0.145	-0.223	0.511*	0.154	0.632*	0.506*	1
	Valor de p	0.775	0.451	0.392	0.185	0.001	0.364	< 0.001	0.001	1

Fonte: o autor (2022).

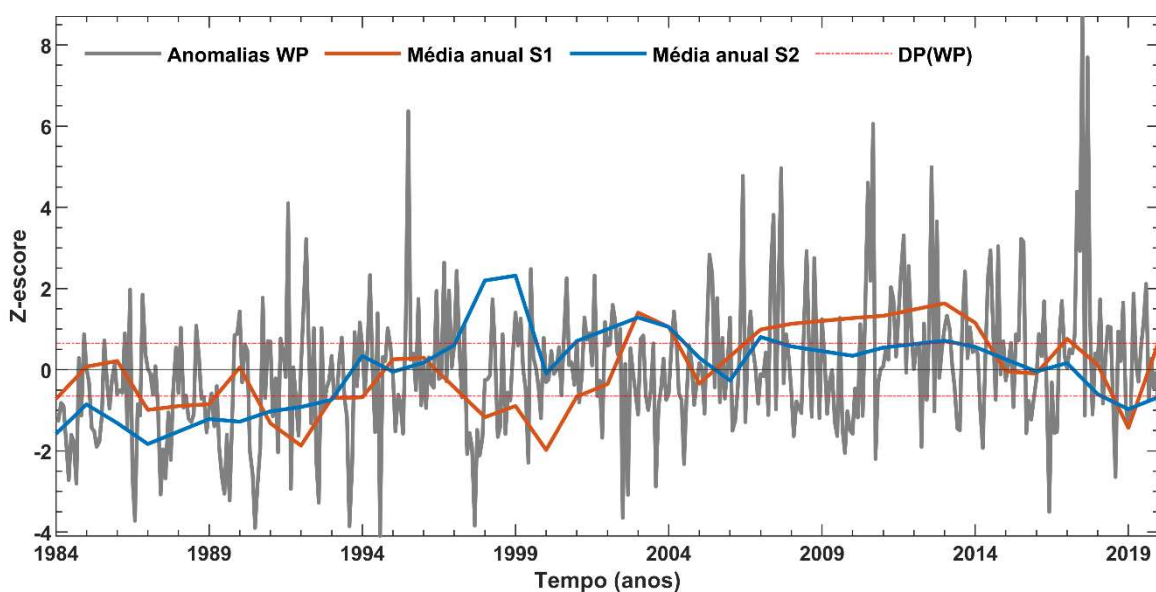
As combinações formadas entre os pares de variáveis WP/MEI ($r = -0,367 \mid p = 0,025$) e WP/TNA ($r = 0,475 \mid p = 0,003$), apresentando correlações negativa e positiva, respectivamente. Os pares formados pela variável S1 apresentaram correlações negativa (S1/MEI, $r = -0,344 \mid p = 0,037$) e positivas (S1/TNA, $r = 0,449 \mid p = 0,005$; e S1/WP, $r = 0,352 \mid p < 0,033$). As combinações formadas pela variável S2 apresentaram coeficientes de correlação positivos nos pares S2/TNA ($r = 0,511 \mid p = 0,001$), S2/WP ($r = 0,632 \mid p < 0,001$) e S2/S1 ($r = 0,506 \mid p = 0,001$) (Tabela 3).

Os pares onde o valor de p não foi menor que o nível de significância ($\alpha = 0.05$), *i.e.*, $p \geq 0,05$, não apresentaram evidências suficientes de uma relação significativa, pois o coeficiente de correlação para essas combinações não foi significativamente diferente de zero (Tabela 3).

3.4.5 Potência de onda vs. variabilidade da linha de costa

A influência da potência de onda na variabilidade da linha de costa pode ser observada no gráfico da Figura 6, onde a distribuição temporal das médias anuais dos Setores 1 e 2, e as médias mensais das anomalias de potência de onda, entre 1984-2020, foram apresentadas.

Figura 6. Distribuição temporal da média mensal das anomalias de potência de onda (WP) e da variação média anual da linha de costa dos Setores 1 e 2 (S1 e S2, respectivamente). DP: desvio padrão ($\pm 1,624$) para as anomalias de potência de onda.



Fonte: o autor (2022).

Nos anos de 1992 e 2000, a variação média anual da linha de costa no *Setor 1* (S1) apresentou valores máximos na retração da linha de costa (fase negativa). Em 2003 e 2013, o *Setor 1* apresentou seus valores máximos de acresção (fase positiva), seguido de mais um período de retração, entre 2013 e 2019. No final da série temporal, entre 2019-2020, foi registrado o início de um novo ciclo de acresção. O período entre 1998-1999 representou o momento de máxima acresção da linha de costa para o *Setor 2* (S2), seguido de um longo e progressivo período de retração que durou de 2003 (último pico de acresção) até o final da série temporal (Figura 6).

A distribuição temporal da média mensal das anomalias de WP, entre 1984-2005, apresentou uma predominância de valores (Z-escore) mais altos (picos) em fase negativa, evidenciando assim um período menos energético de potência de onda. Entre 2005-2020, foram observados picos predominantemente em fase positiva, representando assim um período de maior energia para potência de onda (Figura 6).

Os picos de fase negativa da média anual S1 (1992 e 2000) ocorreram durante o período de predominância de mesma fase para as anomalias de WP. Ao final do período de baixa energia para potência de onda, foi registrado o primeiro período de pico em fase positiva para a série S1 (2003). O segundo pico em fase positiva para esta série foi registrado em 2013, durante a predominância da fase positiva para as anomalias de WP, com valores mais altos para potência de onda (Figura 6).

A série S2 apresentou dois picos de fase positiva, 1998-1999 e 2003, ambos ao longo do período predominantemente menos energético para as anomalias de WP (fase negativa). Após o início da fase predominantemente positiva para esta série (2005), a média anual S2 apresentou uma tendência à retração, sustentada até o final da série temporal aqui analisada (Figura 6).

Observando o gráfico da figura 6, ainda é possível identificar indícios a respeito da diferença entre os ciclos dos picos de valores máximos das séries S1 e S2. O primeiro pico de máxima S1 ocorre simultâneo ao último pico de fase positiva de S2 (2003). Quando o último pico de fase positiva de S1 ocorre (2013), a série S2 apresenta indícios de uma retração progressiva da linha de costa. Isto posto, é possível entender que a série S1 responde mais tardiamente à influência da potência de onda do que a série S2.

3.4.6 Potência de onda vs. teleconexões globais

Os resultados apresentados na matriz de Correlação de Pearson (Tabela 3) demonstraram a existência de uma correlação negativa para combinação MEI/WP. Os gráficos apresentados na Figura 7 ilustram esta e outras relações lineares encontradas entre os pares de combinação WP vs. teleconexões globais.

Os resultados entre essas combinações, mesmo as que não apresentaram evidências suficientes de uma relação significativa a partir do coeficiente r e valores de p , quando analisadas por meio das séries temporais de suas anomalias (*i.e.*, WP vs. teleconexões globais), mostraram possíveis interações ao longo de sua distribuição temporal.

3.4.6.1 Distribuição temporal das anomalias.

Os gráficos das séries BEST/WP e MEI/WP (Figura 7) mostraram a mesma relação inversa (correlação negativa). Contudo, apenas a combinação MEI/WP (Tabela 5) foi considerada uma relação significativa. Através da análise dos gráficos das séries temporais das anomalias dos índices ENSO, foi observado que a fase predominantemente negativa de WP (*i.e.*, período de baixa potência de onda), entre os anos de 1984 e 1998, ocorreu durante um período de prevalência de eventos de El Niño (*i.e.*, fase positiva com maior intensidade). Entre 1998-2018, para os índices ENSO, houve a predominância da fase negativa, prevalecendo os eventos de La Niña. Neste mesmo período, as anomalias de WP apresentaram a predominância da fase positiva (*i.e.*, alta potência de onda).

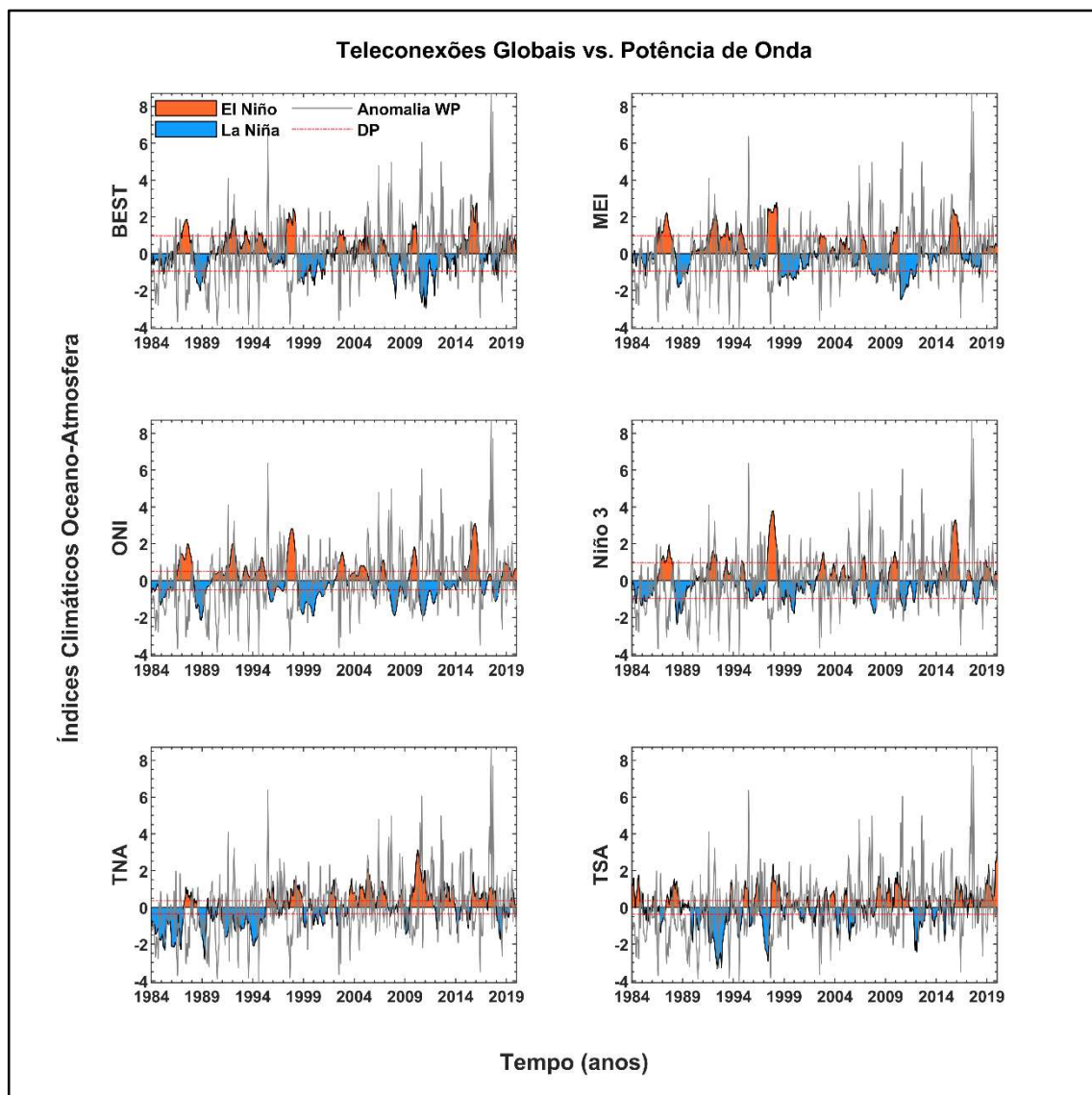
Assim com os índices ENSO, as anomalias das séries temporais para os índices ONI e Niño 3 (SST do Pacífico) apresentaram a ocorrência de suas fases em uma relação inversa às anomalias de WP (Figura 7). Porém, de acordo com o coeficiente r e os valores de p (Tabela 3), as combinações formadas por estas variáveis (ONI/WP e Niño 3/WP) não apresentaram evidências suficientes de uma relação significativa.

Com relação aos índices SST do Atlântico, TNA e TSA, os resultados apresentados nos gráficos da Figura 7 ilustram a relação significativa observada entre TNA e WP (correlação positiva, Tabela 3), onde as fases predominantemente negativas de suas séries ocorreram acopladas entre 1984 e 1995. Entre 1995 e 2004, a fase negativa

predominou apenas para as anomalias de WP. Entre 2004 e 2020, a fase positiva foi predominante tanto para TNA quanto para WP.

A distribuição temporal das anomalias entre as séries TSA e WP (Figura 7) apresentou uma correlação positiva, porém sem evidências suficientes de uma relação significativa (Tabela 3). A série TSA apresentou prevalência de sua fase negativa entre 1989-2006 e positiva, entre 2006-2020. De 1984 até 1989, as anomalias TSA/WP ocorreram em prevalência de fase oposta (*i.e.*, positiva/negativa, respectivamente).

Figura 7. Distribuição temporal das anomalias (positiva como vermelho e negativa como azul) dos índices de teleconexão globais e da potência (linha cinza) de onda (WP) entre 1984 e 2020.



Fonte: o autor (2022).

3.4.6.2 Coerência de ondeleta e diferença de fase.

A análise de Correlação de Pearson (r) e valores de p (Tabela 3) e a distribuição temporal das anomalias (Figura 7) apresentaram as correlações existentes entre as combinações teleconexões vs. WP. A coerência de ondeleta e a diferença de fase (Figura 8) revelam quanto a variabilidade de uma série é explicada por uma outra, ou a medida do seu coeficiente de correlação, em um domínio tempo-frequência.

Nas análises de coerência de ondeleta, os vetores sobrepostos ao espectro representam a fase de oscilação entre as duas séries. Vetores apontando para a direita significam que as séries estão em fase e vetores apontando para a esquerda significa que as séries estão em anti-fase. Vetores apontando para cima significam que a primeira série temporal lidera a segunda por um ângulo de 90° , enquanto as setas apontando para baixo indicam que a segunda série temporal lidera a primeira por 90° . Uma seta apontando para cima e inclinada para a direita significa que as séries temporais estão com alguma defasagem, mas com a primeira série temporal liderando a segunda.

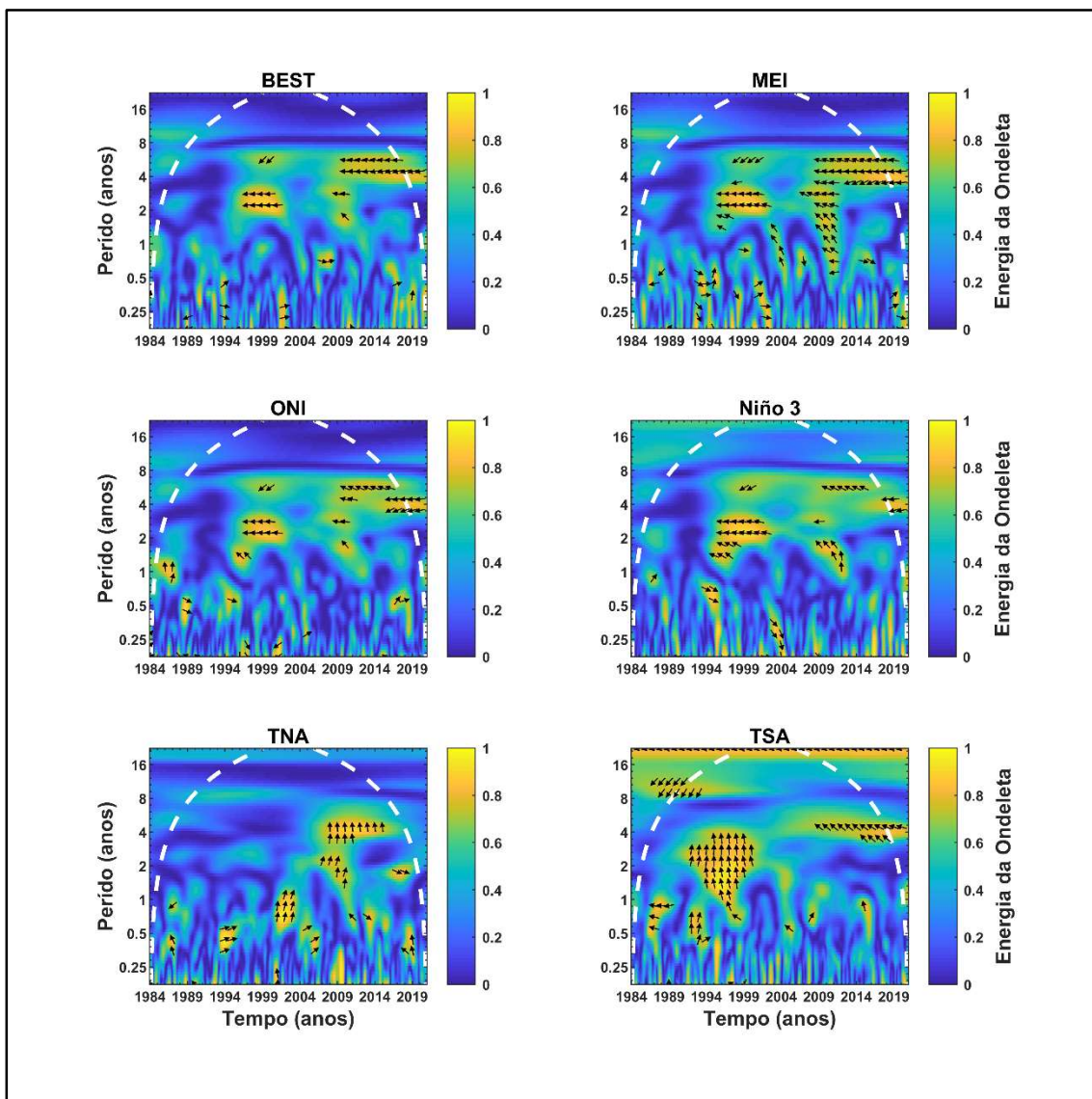
A Figura 8, coerência de ondeleta do índice BEST, apresentou dois ciclos principais estatisticamente coerentes (forte correlação e covariabilidade, 0,8–1) entre BEST e WP. O primeiro, com período de 2 a 3 anos, entre 1996 e 2001; e o segundo, com período de 4 a 7 anos, entre 2009 e 2018, ambos predominantemente em anti-fase, com os vetores em ângulo de fase igual a 180° . Ou seja, essa configuração indica que as variabilidades oscilatórias da série BEST (máximos/mínimos) estão em fase completamente oposta às da série WP (mínimos/máximos).

Outras pequenas coerências significativas foram observadas dispersas no período de menos de 1 ano e entre 1989 e 2019. Além destas, destacou-se uma região com periodicidade de 4 anos e entre os anos de 2019-2020, fora da área do CI, não representando assim uma indicação confiável de causalidade.

O diagrama MEI (Figura 8) apresentou dois ciclos principais estatisticamente coerentes entre MEI e WP, majoritariamente em anti-fase. O primeiro, com período de 2 a 3 anos e energia mais intensa entre 1995 e 2002; o segundo, com período de 4 a 7 anos e entre 2008 e 2018. Foi observado um terceiro ciclo de oscilação com período de 1 a 3 anos entre 2008 e 2011. Este ciclo apresentou vetores orientados à esquerda em ângulos de fase de 45° e 180° , indicando assim que os máximos/mínimos de WP estavam

avanzados em relação aos de MEI, até se tornarem de anti-fase. Além destes, foram observadas pequenas coerências significativas majoritariamente em fase (periodicidade de 3 a 6 meses, entre 1986-2019) e uma região fora do CI (período de 4 anos, entre 2019-2020). Ressalta-se que, apenas as oscilações observadas dentro do CI apresentam confiança estatística de 95%.

Figura 8. Coerência de ondeleta e fase entre as anomalias dos índices padronizados de teleconexão global (BEST, MEI, ONI, Niño 3, TNA e TSA) e a potência de onda (WP). O Cone de Influência (CI), onde os efeitos de borda podem causar distorção nos dados, está destacado pela linha pontilhada branca. Os vetores indicam o nível de significância estatística de 5% contra o ruído vermelho e a relação de fase, indicada pela sua orientação, com anti-fase (180°) à esquerda e fase (0°) à direita.



Fonte: o autor (2022).

Os diagramas ONI e Niño 3 (Figura 8), apresentaram oscilações com forte correlação e covariabilidade (0,8–1) com periodicidade entre 1 e 3 anos entre 1994 e 2003, majoritariamente em anti-fase. Além de pequenas e dispersas coerências, em fases variadas, e uma região fora do CI (período de 4 anos, entre 2019-2020) observadas em ambos os diagramas ONI e Niño 3; neste último, uma pequena oscilação ocorrida no período de 1 a 2 anos e entre 2009-2013, apresentou vetores orientados à esquerda em ângulo de fase de 45° , indicando que os máximos/mínimos de WP estavam avançados em relação aos de Niño 3.

As oscilações apresentadas no diagrama TNA (Figura 8) indicaram, majoritariamente, uma defasagem de 90° da série WP em relação à TNA e forte correlação e covariabilidade (0,8–1) entre estas séries. O primeiro ciclo, apresentou uma periodicidade de 6 meses a 1 ano, entre 2000-2003 e o segundo, uma periodicidade de 4 anos, entre 2005-2015.

Também foi observado um pequeno ciclo oscilatório sazonal (período de 6 meses) em fase e com energia de ondeleta mais intensa (0,8–1) entre 1993-1995. Outros ciclos menores e dispersos, com fases variadas e periodicidade inferior a 2 anos, foram observados entre 1986-2019.

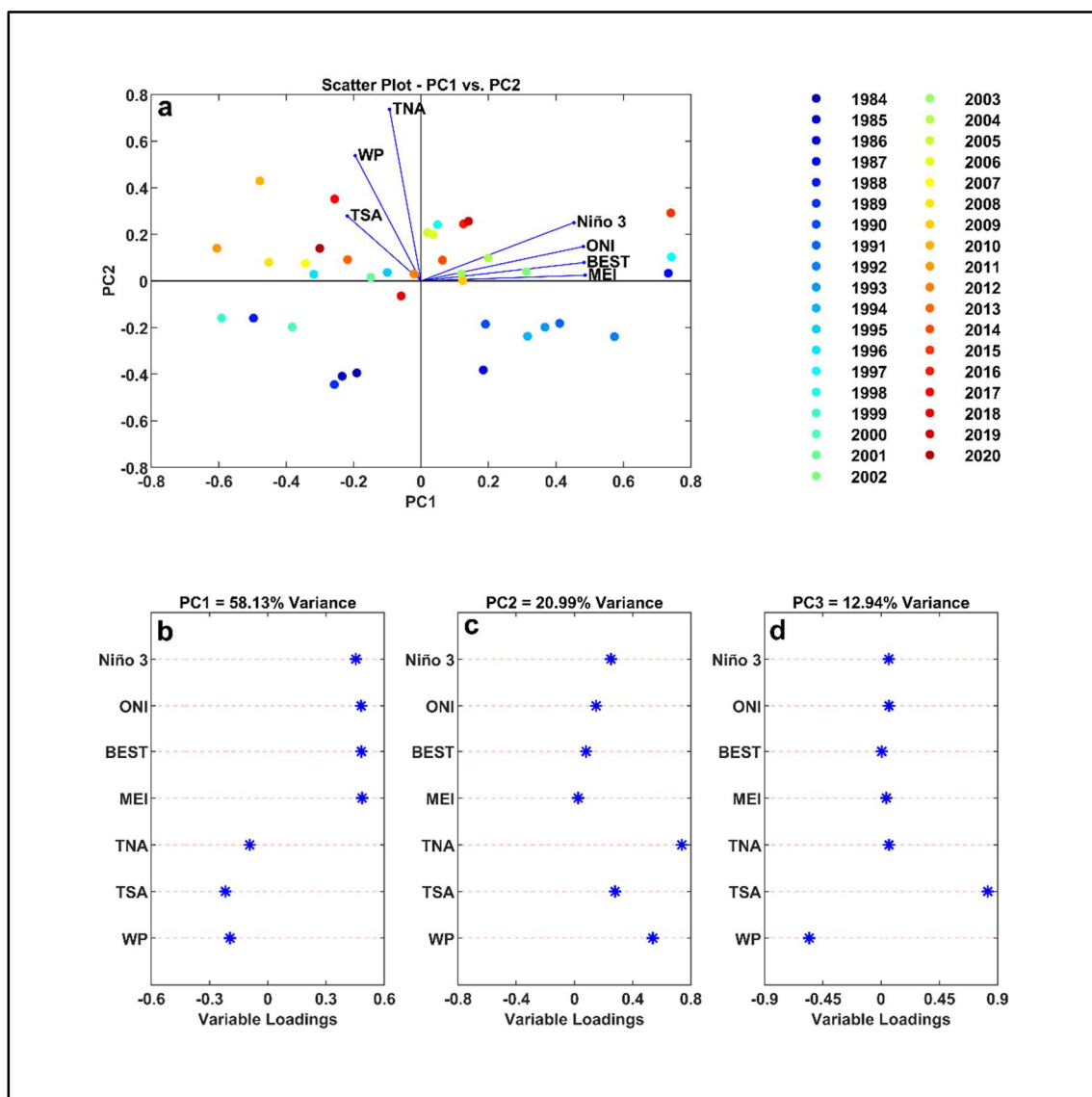
No diagrama TSA (Figura 8) destacou-se uma forte oscilação (correlação e covariabilidade de 0,8–1), com período de 1 a 4 anos entre 1990-2000, que indicou uma defasagem de 90° da série WP em relação à TSA. Ciclos menores (porém, significativos) foram observados com periodicidade sazonal (de 6 meses a 1 ano) em anti-fase, entre 1985-1989 e em defasagem de 90° de WP/TSA, entre 1991-1994. Ciclos dispersos, onde os efeitos de borda do CI podem causar distorção nos dados, foram observados entre 1985-1993, com periodicidade de ~ 8 anos (energia da ondeleta $> 0,7$) e entre 2014-2020, com periodicidade de ~ 4 anos (energia da ondeleta $> 0,7$).

3.4.6.3 *Análise de componentes principais – PCA.*

Para analisar as possíveis e múltiplas interações entre as variáveis (teleconexões vs. potência de onda) e seus diversos níveis de relação junto à distribuição temporal, foi realizada uma PCA. O uso desta ferramenta estatística permitiu reduzir a dimensionalidade dos dados preservando a sua variabilidade.

Os três primeiros componentes principais (PCs), estatisticamente independentes, aqui utilizados representam o comportamento da variabilidade ao longo da série temporal. O primeiro componente (PC1) foi responsável pela maior variância em relação ao segundo (PC2) e ao terceiro componente (PC3), com 58,13%, 20,99% e 12,94%, respectivamente, explicando 92,06% da variância total (Figura 9).

Figura 9. Escores, variâncias e pesos da PCA realizada: **a)** (*Scatter Plot*) Gráfico bidimensional da matriz de correlação (escores) dos componentes principais PC1 (*eixo x*) e PC2 (*eixo y*), dispersão das réplicas (em escala colorida, cada ponto representa um ano específico) e das variáveis (setas azuis); **b), c)** e **d)** Peso de cada variável (*Variable Loadings*) para o percentual de variância (*Variance*) explicado pelos respectivos componentes principais (PC1, PC2 e PC3).



Fonte: o autor (2022).

As variáveis Niño 3, ONI, BEST e MEI apresentaram os maiores valores positivos e representativos para PC1 (*eixo x*), enquanto TNA, TSA e WP representaram os elementos com valores negativos mais altos (Figura 9a e 9b). Apesar de suas cargas negativas, estas variáveis agregam informações sobre sua relação em PC1 (Figura 9).

O segundo componente principal (PC2, *eixo y*), que representa 20,99% da variância total, fornece menos informações sobre a correlação entre as teleconexões globais e a potência de onda do que PC1 (Figura 9a e 9c). As variáveis TNA, TSA e WP apresentaram os maiores valores positivos e representativos para PC2.

O terceiro componente (PC3) responde por 12,94% da variância total, sendo o componente que agregou menos informações acerca da correlação entre as teleconexões globais e a potência de onda (figura 9d). Em PC3, a variável TSA apresentou o maior valor positivo, enquanto a WP representou o oposto.

A Figura 9a ilustra um gráfico bidimensional da matriz de correlação das variáveis das teleconexões globais e da potência de onda. Neste gráfico, as variáveis foram destacadas por vetores azuis e as réplicas (anos) por pontos em uma escala colorida.

O grupo formado pelas variáveis Niño 3, ONI, BEST e MEI (*quadrante x,y*) sugere uma alta correlação entre si e uma forte correlação com PC1 (*eixo x*), ou seja, com os anos de 2005, 2006, 1998, 2014, 2003, 2009, 2016, 2019, 2004, 2002, 1987, 2015 e 1997 (no sentido do *eixo x* de 0 a 0,8). De acordo com a análise da distribuição temporal das anomalias os anos reunidos no *quadrante x,y* são representativos de períodos de El Niño (anomalias positivas).

Ainda na Figura 9a, o grupo formado por TNA, WP e TSA (*quadrante -x,y*) sugere uma alta correlação entre estas variáveis e uma forte correlação com PC2 (*eixo y*) e os anos de 2012, 1995, 2001, 2013, 2017, 2020, 1996, 2007, 2008, 2010 e 2011 (no sentido do *eixo x* de 0 a -0,8) reunidos neste quadrante, que são representativos de períodos de La Niña (anomalias negativas).

Os *quadrantes x,-y* (1986, 1990, 1994, 1993, 1991 e 1992 – *eixo x*, de 0 a 0,8) e *-x,-y* (2019, 1984, 1985, 1989, 2000, 1988 e 1999 – *eixo x*, de 0 a -0,8) foram representativos de períodos de El Niño e La Niña, respectivamente (Figura 9a).

3.5 DISCUSSÃO

3.5.1 Comportamento multidecadal da linha de costa

Desembocaduras de rios, entradas de maré ou deltas de maré vazante são caracterizados pela presença de extensas áreas de acúmulo sedimentar (Fitzgerald, 1984; Harrison et al., 2017; Ford e Dickson, 2018; Humberston et al., 2019) e desempenham um importante papel nos padrões de transporte e redistribuição dos estoques sedimentares, estando sujeitas a variações morfológicas em diferentes escalas temporais (de curto a longo prazo) (Mitchell et al., 2015; Long et al., 2016; Ford e Dickson, 2018; Vos et al., 2019c; Genchi et al., 2020).

Os resultados obtidos no presente trabalho demonstraram que o CSC-Sul está sujeito a ciclos de deposição e erosão em diferentes escalas temporais. A observação e a quantificação dessas mudanças nas feições costeiras (*e.g.*, linha de costa), submetidas às alternâncias de suas condições ambientais, marcam as tendências e os padrões de distribuição sedimentar nessas diferentes escalas (Vos et al., 2019c). Contudo, o estudo da variabilidade temporal das feições morfológicas (*i.e.*, pulsos ou ciclos de chegada ou saída de areia) requer um monitoramento contínuo e de longo prazo das praias, o que geralmente é difícil de se manter (Vos et al., 2019c; Silva et al., 2021; Almar et al., 2022).

No presente estudo, na análise multidecadal (36 anos) o trecho de praia do ICMBio/CMA (*Setor 1*; Figuras 1 e 3; e Tabela 2) foi o único ser classificado com tendência erosiva, apresentando uma regressão da linha de costa de -28,44m entre 1984-2020. Porém, na análise interdecadal (18 anos), entre os períodos de 1984-2002 e 2002-2020 (Figura 2), a praia do ICMBio/CMA foi classificada em estável/acrescida e em erosão crítica, respectivamente.

Em seus estudos, Fellowes et al. (2021) quantificaram e compararam o comportamento decadal da linha de costa em praias arenosas estuarinas (Sydney, Austrália). Estes autores identificaram que praias progradativas estão, tipicamente, localizadas longe das entradas de estuários, protegidas da ação direta das ondas, e controladas pelo transporte sedimentar conduzido pelo fluxo das marés.

No presente estudo, as praias do Pontal (*Setor 1*, limite oeste) e do Loteamento São Paulo (*Setor 2*, limite norte) foram as praias localizadas mais afastadas do CSC-Sul

e ambas classificadas como acrescidas (Figura 3 e Tabela 2) entre 1984-2020. Estas mesmas praias, entre os períodos de 1984-2002 e 2002-2020, foram classificadas como estável/acrescida e estável, respectivamente.

Fellowes et al. (2021) também concluíram que a linha de costa das praias estuarinas localizadas adjacentes ao delta de inundação pode apresentar um comportamento de quase estabilidade e de retração, a depender se este está agindo como fonte ou sumidouro de sedimento. Estes autores afirmam que o comportamento decadal da linha de costa é mais variável em praias estuarinas expostas à interação de processos fluviais e marinhos, transporte longitudinal de sedimentos e intervenção antrópica.

Na presente pesquisa, as praias do Forte (*Setor 1*), do ICMBio/CMA (*Setor 1*) e do Bancos de Areia (*Setor 2*), as mais próximas à desembocadura do CSC-Sul, apresentaram, respectivamente, estabilidade, erosão e estabilidade entre 1984-2020. Na análise interdecadal, para o período de 1984-2002, foram classificadas como erodida, estável/acrescida e acrescida; e para o período de 2002-2020, todas foram classificadas em erosão crítica.

Segundo discutem Araújo et al. (2021), a área de estudo do presente trabalho, encontra-se naturalmente protegida da ação direta das ondas oceânicas pela presença de uma linha descontínua de recifes submersos adjacentes e paralelos à costa. O CSC-Sul funciona como a principal fonte de sedimentos para o local (Almeida e Manso, 2011).

Contudo, segundo Melo et al. (2019), ambientes com a complexidade morfológica do relevo de fundo da desembocadura do CSC-Sul (*i.e.*, plataforma interna rasa, bancos de areia, recifes e canais submersos) podem promover a existência de depósitos submersos, controlando assim a periodicidade e a disponibilidade destes sedimentos às praias adjacentes.

Medeiros e Kjerfve (1993) classificam a desembocadura do CSC-Sul como uma entrada de maré, onde existe um aumento na velocidade da corrente de maré enchente durante o período chuvoso, e Pereira et al. (2015 e 2017) discutem que as marés no litoral de Pernambuco são basicamente controladas por fontes astronômicas, com baixa interferência meteorológica. Araújo et al. (2021) ponderam que os principais fatores que podem controlar a periodicidade e a distribuição sedimentar nas praias de margem insular

da desembocadura do CSC-Sul são a sazonalidade (períodos secos e chuvosos) dos padrões de energia das ondas e dos ventos, as correntes de maré, e a orientação e a localização da faixa de praia em relação a esta desembocadura.

Os resultados obtidos por Mazzer et al. (2009) demonstraram que as variações da linha de costa em escala interdecadal podem estar ligadas à influência da configuração espacial (*i.e.*, orientação e exposição da costa) e aos aspectos morfodinâmicos de médio prazo (*i.e.*, estágio morfodinâmico e rotação praial).

Segundo Mazzer et al. (2009), o comportamento da linha de costa pode contribuir com subsídios relevantes para o planejamento da ocupação da orla em horizontes temporais superiores a 20 anos. As análises multi e interdecadais aqui realizadas, considerando a ausência de fenômenos meteorológicos sazonais significativos, evidenciaram um comportamento da linha de costa, ao longo das praias dos *Setores 1* e *2*, onde foi possível observar trechos com ciclos de acreção de longo prazo (> 20 anos), como as praias do Pontal e do Polo Comercial/Turístico, no *Setor 1*, e a praia do Loteamento São Paulo, no *Setor 2* (Figuras 2, 3 e Tabela 2). As praias do ICMBio/CMA (*Setor 1*) e dos Bancos de Areia (*Setor 2*) apresentaram dois ciclos distintos de acreção e erosão, com ~18 anos de duração cada. A praia do Forte apresentou um longo ciclo erosivo (> 20 anos) com agravo entre 2002-2020.

De forma geral, foi observada uma tendência de acreção nas praias mais afastadas da desembocadura do CSC-Sul e um comportamento mais heterogêneo nas praias centrais a esta área. Observando o modelo da variação e do transporte sedimentar apresentado e discutido em Araújo et al. (2021), onde o deslocamento sedimentar ocorre de L–O, nas praias do *Setor 1*, e de S–N, nas praias do *Setor 2*, os resultados das variações multi e interdecadal aqui apresentados corroboram com o padrão de deslocamento e estoque sedimentar defendido por estes autores. Sendo assim, é possível entender que será necessário desenvolver diferentes estratégias de gestão e planejamento para o uso sustentável (*i.e.*, compatibilidade de usos) para os trechos de praia aqui analisados.

3.5.2 Comportamento interanual da linha de costa

Embora as medições de longo prazo da linha de costa, baseadas em sensoriamento remoto, sejam valiosas para investigar a frequência da variabilidade, sequências de curto

a médio prazo são importantes para compreensão da magnitude desses ciclos (Silva et al., 2021). Segundo Mazzer et al. (2009), cada intervalo (*i.e.*, ciclo, sequência ou escala de tempo) representa uma resposta a processos costeiros, que ocorrem em diferentes frequências, podendo a variação da linha de costa em escala interanual refletir respostas aos processos ligados a eventos de alta energia e variações sazonais e interanuais nas condições hidrodinâmicas e meteorológicas.

Segundo Vos et al. (2019c), as linhas de costa derivadas de imagens de satélite são capazes de detectar a variabilidade espacial em escalas de tempo superior a seis meses. Entretanto, segundo estes autores, a exceção ocorre para as regiões costeiras arenosas onde a variação interanual da linha de costa é mínima, onde apenas a variabilidade decadal poderia ser capturada de forma realística.

No presente estudo, as variações interanuais (9 anos) analisadas demonstraram diferentes padrões de respostas ao longo dos períodos e das praias estudadas. Neste sentido, o primeiro período analisado (1984-1993) apresentou um ciclo de acresção para as praias do Pontal (*Setor 1*) e dos Bancos de Areia (*Setor 2*), concomitante a um ciclo erosivo crítico nas demais praias destes setores (Figura 3).

O segundo período analisado (1993-2002) apresentou classificações mais heterogêneas para as praias dos *Setores 1* e 2. Contudo, as praias do Forte (*Setor 1*) e dos Bancos de Areia (*Setor 2*) não demonstraram alteração em seus ciclos em relação ao período anterior (*i.e.*, 1984-1993), permanecendo em erosão crítica e acresção, respectivamente. Este período também representou uma fase de estabilidade às praias do Pontal e do ICMBio/CMA, no *Setor 1*, e do Loteamento São Paulo, no *Setor 2*. Para o período 1993-2002, a praia do Polo Comercial/Turístico apresentou uma atenuação em seu estado de erosão crítica, passando a ser classificada em erosão.

Entre 2002-2011, enquanto as praias do ICMBio/CMA (*Setor 1*) e dos Bancos de Areia (*Setor 2*) apresentavam-se em estado de erosão crítica, as demais praias entraram em um ciclo de acresção. Entende-se que pela proximidade e contiguidade entre as praias do ICMBio/CMA e dos Bancos de Areia, provavelmente, estas encontravam-se sob a influência da mesma dinâmica. Entretanto, esta similaridade na variação da linha de costa foi observada com mais clareza entre as praias do Polo Comercial/Turístico e do Forte (*Setor 1*) e as praias do Pontal (*Setor 1*) do Loteamento São Paulo (*Setor 2*). Segundo

ponderam Tebbens et al. (2002), a variação da linha de costa em um dado trecho de praia pode afetar tanto locais próximos quanto aqueles mais distantes.

O período seguinte, 2011-2020, representou uma fase mais homogênea na variação da linha de costa dentro dos setores estudados, apresentando todas as praias analisadas sob a dominância de ciclos erosivos (*i.e.*, classificadas em erosão ou erosão crítica). Entretanto, para as praias do ICMBio/CMA e dos Bancos de Areia a tendência erosiva iniciou-se no período anterior (*i.e.*, 2002-2011). Corroborando com estes resultados, Araújo et al. (2021), estudando a variabilidade dos estoques sedimentares das praias do CSC-Sul entre 2017-2018, observaram a predominância do processo erosivo nas praias da desembocadura do CSC-Sul (exceto a praia do Pontal), relacionando o aumento energético sazonal da potência de onda à esta perda de sedimentos.

Autores como Tebbens et al., 2002, Mazzer et al., 2009, Vos et al., 2019c, Fellowes et al., 2021 e Silva et al., 2021 destacam que a variabilidade interanual da linha de costa pode refletir respostas ligadas a eventos energéticos e variações sazonais nas condições hidrodinâmicas, meteorológicas e oceanográficas. As tendências de longo prazo proporcionam cenários futuros e a delimitação de recuos para a ocupação da faixa litorânea, enquanto as variações interanuais permitem avaliar a amplitude da extensão retrabalhada em curto prazo. Dessa forma, indicando a necessidade da existência de termos e condições para o uso e a ocupação de áreas contíguas à linha de costa, por apresentarem instabilidade morfodinâmica, mesmo quando essas áreas se recuperam em períodos posteriores, como parte da ciclicidade de processos morfodinâmicos.

3.5.3 Variação da linha de costa vs. potência de onda

Em suas discussões, Fellowes et al. (2021) ponderam sobre a considerável erosão causada por ondas oceânicas que, durante os eventos de tempestade, se propagam através das entradas de estuários semifechados e como, em condições de ondas de baixa energia, os estoques sedimentares retornam às praias de forma lenta, podendo levar anos essa recuperação. A desembocadura do CSC-Sul não forma um estuário semifechado, porém, como descrevem Medeiros e Kjerfve (1993), Pereira et al. (2015 e 2017) e Araújo et al. (2021), esta apresenta-se como uma entrada de maré protegida da ação direta das ondas oceânicas pelo seu complexo relevo de fundo (*i.e.*, canais submersos, extensos bancos de

areia contíguos a terraços holocênicos de baixa-mar, linhas de recifes submersos, beachrocks).

Pereira et al. (2015 e 2017) destacam que o litoral pernambucano é basicamente controlado por marés astronômicas com a incidência de pequenas ondas de tempestades. Através dos nossos resultados, não foi possível observar a variação da linha de costa como resposta a pontuais eventos de tempestade (regionalmente conhecidos como ressacas). Entretanto, como já descrito em Araújo et al. (2021), existem evidências da variabilidade dos estoques sedimentares das praias aqui estudadas em relação à variação sazonal da potência de onda. No presente estudo, foi possível reconhecer correlações positivas e significativas entre as médias anuais da potência de onda e da variação da linha de costa nos *Setores 1 e 2* (Tabela 3). Entretanto, o comportamento da linha de costa dentro de cada setor, apesar da correlação entre estes ($S1/S2$: $r = 0,506$ e $p = 0,001$, Tabela 3), apresentou respostas em tempos diferentes em relação à potência de onda (Figura 6).

A potência de onda entre 1984-2005 apresentou predominância de fase negativa (Figura 6), evidenciando assim um período menos energético e com picos máximos (positivos) de potência se destacando apenas entre 1991-1996 (39,07-47,92 kW/m, Figura 5). De forma geral, ao longo deste período, os *Setores 1 e 2* alcançaram máximos (positivos) progradativos da linha de costa. Entretanto, estes aconteceram em momentos diferentes e ambos após os picos de energia máxima (positiva) de potência de onda.

No *Setor 1*, aproximadamente cinco anos após o último pico de máxima para a potência de onda na década de 1990 (1995-1996), foi registrado um máximo (negativo) na retração da linha de costa em 2000. A partir daí, a linha de costa no *Setor 1* iniciou um ciclo de recuperação alcançando seu pico em 2003 (Figura 6). No *Setor 2*, o máximo progradativo alcançado pela linha de costa, em toda a série amostral, ocorreu em 1999, aproximadamente quatro anos após o pico máximo (positivo) de potência de onda. Logo em seguida, em 2000, a linha de costa sofreu uma rápida retração. Deste ponto, a linha de costa do *Setor 2*, semelhante à do *Setor 1*, passa a migrar no sentido do mar (acresção) até o ano de 2003 (Figura 4).

A partir de 2005, a potência de onda passou a apresentar predominância de fase positiva (Figura 6), com picos máximos (positivos) mais energéticos ao longo das décadas de 2000 (44,05 e 51,79 kW/m) e 2010 (54,94, 56,68 e 58, 62 kW/m) (Figuras 5 e 6). De

forma geral, no *Setor 1*, após a linha de costa retroceder em direção à terra entre 2003-2005, estabeleceu-se um período de acresção que acompanhou as anomalias positivas de potência de onda até meados de 2013, quando passou a retroceder novamente até 2019. Entre 2019-2020, aproximadamente dois anos após o último pico de potência de onda para a série amostral, entre 2017-2018, foi observado o último ciclo de recuperação da linha de costa no *Setor 1* (Figura 6). No *Setor 2*, entre 2003-2020, a variabilidade linha de costa apresentou uma tendência de retração até o final da série amostral (Figura 6).

Segundo Masson-Delmotte et al. (2018), foi estimada uma tendência de aquecimento da temperatura da superfície global de $0,87^{\circ}\text{C}$, entre 2006-2015. Os dados de potência de onda aqui apresentados indicaram uma tendência de aumento energético a partir de 2005-2006, exibindo um pico máximo (positivo) entre 2017-2018 (Figura 6).

Apesar das diferenças (atrasos e avanços) entre os *Setores 1* e *2*, de forma geral, foi possível observar que a linha de costa migrou em direção ao mar (acresção), durante a predominância do período menos energético para potência de onda (~ 1984 -2005), e, durante o período mais energético (~ 2005 -2020), a tendência foi migrar em direção à terra (erosão). Segundo Fellowes et al. (2021), praias arenosas localizadas próximas à entrada de estuários podem recuperar seus estoques de sedimentos, erodidos durante eventos ou períodos mais energéticos, em até três anos. Entre os setores aqui analisados, uma taxa de recuperação similar também pode ser observada: (i) entre 1992-1995 e (ii) entre 2000-2003, no *Setor 1*, e (iii) entre 2000-2003, no *Setor 2* (Figuras 4 e 6).

Wiggins et al. (2019) concluíram que, em escalas de tempo multianuais, as mudanças morfológicas estão correlacionadas com o balanço da direção predominante da potência de onda. Neste contexto, nossos resultados apresentaram uma provável relação entre a potência e a direção de onda, onde ondas do quadrante SE estariam associadas a períodos mais energéticos, enquanto as do quadrante NE a períodos de menor energia.

Contudo, a resolução mínima encontrada para a linha de costa foi anual, não sendo possível destacar observações sazonais. Segundo Wiggins et al. (2019), a direção das ondas pode estar relacionada a índices climáticos distintos, sugerindo que as oscilações atmosféricas explicariam a periodicidade e as alterações morfológicas. O estudo de Almar et al. (2022) encontrou uma forte influência do El Niño nos principais fatores de anomalias da linha de costa nas últimas duas décadas, sugerindo assim que o ENSO

representa o controle climático dominante na variabilidade da linha de costa em escalas de tempo interanuais.

3.5.4 Influência das teleconexões globais na potência de onda

Os resultados aqui encontrados indicaram uma relação significativa, porém inversa ($r = -0,367$ e $p = 0,025$), entre a potência de onda e o índice multivariado de ENSO bimensal (WP/MEI; Tabela 3). Ou seja, na predominância de eventos de El Niño (La Niña) foi observado um período paralelo de baixa (alta) energia de WP (Figuras 7 e 8).

Entre 1984-1998, predominaram eventos de El Niño acompanhados por períodos de baixa potência de WP. Entre 1998-2000 e 2010-2012, foram registrados períodos predominantes de eventos de La Niña acompanhados por alta energia de WP, registrando maior frequência e intensidade dos picos de potência entre 2005-2019 (Figura 7 e 8). Dessa forma, evidenciando que a diminuição (aumento) da potência de onda está associada às anomalias positivas (negativas) de MEI.

Atualmente, Vos et al. (2019) e Souza e Rebiota (2021) consideram o índice MEI.V2 o mais abrangente para monitorar a amplitude das fases (El Niño/La Niña) ENSO. Em suas discussões Vos et al. (2019) e Silva et al. (2021), estudando os efeitos ENSO na variabilidade interanual da linha de costa no litoral leste australiano, correlacionaram as fases de La Niña com taxas mais altas de erosão, como resultado de eventos de maior duração e energia de onda e predominância da incidência de ondas de leste. Wiggins et al. (2019), estudando praias de cascalho em South Devon, Reino Unido, também relacionam a direção e a energia de onda a efeitos de índices climáticos.

Aqui a direção de onda variou de ~ 50 - 172° , com direção média ESSE (110°). Além disso, nossos resultados indicaram uma provável relação entre a potência e a direção de onda, onde ondas de SE seriam mais energéticas do que as de NE (Figura 5).

Segundo Rebiota e Santos (2014), em eventos de El Niño (La Niña) é esperado um enfraquecimento (fortalecimento) dos ventos alísios, quando comparado ao padrão climatológico. Em sua revisão bibliográfica, estes autores pontuam que na ocorrência de eventos de El Niño (La Niña) existe uma deficiência (abundância) de precipitação na estação chuvosa das regiões Norte e Nordeste do Brasil.

Araújo et al. (2021) evidenciaram que, tanto para estação seca quanto para chuvosa, os ventos predominantes na região da área de estudo são do quadrante SE. Entretanto, estes autores explicam que o relevo raso e irregular da plataforma interna sul da Ilha de Itamaracá interfere na potência e na propagação das ondas, dissipando sua energia e tornando sua incidência predominante de leste. A combinação WP/TNA apresentou uma correlação positiva ($r = 0,475$ e $p = 0,003$), além de uma forte correlação e covariabilidade (0,8–1) entre as duas séries (Figuras 7 e 8), desde a escala de tempo sazonal a interanual. Sendo assim, suas fases oscilatórias foram acompanhadas pela predominância de eventos de TNA positivos (negativos) a períodos de alta (baixa) energia de WP, evidenciando que o aumento (diminuição) da potência de onda está associado às anomalias positivas (negativas) de TNA.

Outros estudos (*e.g.*, Torrence e Webster (1999), Grinsted et al. (2004) e Vale et al. (2020)), explicam que a análise de Coerência de Ondeleta, por sua semelhança ao Coeficiente de Correlação de Pearson, permite entendê-la como sendo a medida do coeficiente de correlação localizado no tempo-frequência.

Sendo assim, mesmo as combinações entre WP e os demais índices aqui testados (*i.e.*, BEST, ONI, Niño 3 e TSA) não apresentando evidências suficientes de uma relação significativa (*i.e.*, $p \geq 0,05$) na matriz de correlação calculada (Tabela 3), uma correlação tempo-frequência pode existir. Segundo Torrence e Webster (1999), Grinsted et al. (2004) e Vale et al. (2020), valores atribuídos às medidas de diferença de fase entre duas séries temporais (*i.e.*, correlação, covariabilidade e intensidade entre as oscilações), onde a diferença de fase varia como uma função da frequência, podem definir a não aleatoriedade entre as séries temporais.

De forma geral, as análises de coerência de ondeleta (Figura 8) BEST, MEI, ONI e Niño 3 vs. WP apresentaram, entre ~1995 e 2002, uma banda espectral de 2 a 3 anos de periodicidade com forte correlação e covariabilidade (energia de ondeleta entre 0,8–1), dentro de um nível de confiança de 95%, majoritariamente em anti-fase entre as séries temporais. Este resultado, sugerindo sugere que as anomalias positivas das oscilações dos índices BEST, MEI, ONI e Niño 3 estão associadas à diminuição da potência de onda para o período entre 1995-2002 com periodicidade de 2 a 3 anos. Da mesma forma, a combinação WP/TSA ($p \geq 0,05$), apresentou uma forte oscilação (correlação e covariabilidade de 0,8–1), com período de 1 a 4 anos entre 1990-2000 (Figura 8),

sugerindo uma associação do aumento da potência de onda em resposta às anomalias positivas de TSA.

Segundo Queiroz et. al. (2022), a avaliação de relações lineares solitárias usando coeficiente r , valor de p e gráficos de dispersão são limitadas, pois esses métodos não dão conta das múltiplas interações possíveis entre as variáveis no ambiente natural, em diversos níveis de relação junto à distribuição espacial. Sendo assim, uma análise de componentes principais (PCA) foi realizada no intuito de enriquecer a descrição dos resultados encontrados e uma melhor exploração e ordenação dos dados aqui analisados (Gotelli e Ellison, 2011; Jolliffe e Cadima, 2016; Nascimento et al., 2020).

A PCA realizada sugeriu que o grupo de índices Niño 3, ONI, BEST e MEI, com alta correlação entre si (PC1, *eixo x*), também apresentaram uma forte correlação a períodos (anos) de El Niño (Figuras 9a e 9b). Por outro lado, o grupo de índices TNA, WP e TSA, fortemente correlacionadas à PC2 (*eixo y*), foram ordenadas junto aos anos com forte correlação com períodos de La Niña (Figura 9a e 9c).

A PCA pode ser baseada na matriz de covariância ou na matriz de correlação. Como a matriz de covariância de um conjunto de dados padronizados corresponde à matriz de correlação do conjunto de dados original, então a PCA dos dados padronizados será uma matriz de correlação (Jolliffe e Cadima, 2016).

Além de explicar a relação linear inversa entre WP/MEI (Tabela 3) e a correlação com a sua fase negativa (La Niña), a análise PCA também nos permitiu inferir que as correlações (Tabela 3) S1/MEI ($r = -0,344$ e $p = 0,037$), S1/TNA ($r = 0,449$ e $p = 0,005$), S1/WP ($r = 0,352$ e $p < 0,033$), S2/TNA ($r = 0,511$ e $p = 0,001$), S2/WP ($r = 0,632$ e $p < 0,001$) e S2/S1 ($r = 0,506$ e $p = 0,001$), sejam indícios que tanto a potência de onda regional (7,81°S e 34,81°W) quanto a variabilidade da linha de costa nos *Setores 1 e 2* respondem à alternância das fases ENSO.

Sendo assim, de forma geral, os eventos de La Niña (El Niño) conduziram ao aumento (diminuição) da potência de onda e retração (estabilidade ou progradação) da linha de costa. Os índices TNA e TSA apresentaram uma relação linear direta, sendo assim suas fases positivas (negativas) conduziram ao aumento (diminuição) da potência de onda e progradação (retração) da linha de costa.

Gonçalves et al. (2019) observaram que o processo erosivo predominou nas praias do sudeste da Ilha de Itamaracá, entre 1989-1996, 1996-2005, 2005-2011 e 2011-2016. Entre 1989-1996 e 1996-2005, nossos resultados registraram a predominância de uma fase majoritariamente negativa para potência de onda, porém com picos positivos entre 1990-1995, após um evento de La Niña (1988-1989). Além disso, foram registrados um forte evento de El Niño (1997-1998), seguido de um La Niña (1998-2001), a predominância das fases negativas para TNA e TSA e os picos de progradação da linha de costa para os *Setores 1* (2003) e 2 (1999) (Figuras 6 e 7).

Entre 2005-2011 e 2011-2016, predominaram os picos e a fase positiva da potência de onda, os eventos de La Niña (2007-2008, 2010-2012 e 2017-2018), além das fases positivas de TNA e TSA. Após um período de lenta e progressiva acresção, no *Setor 1* e relativa estabilidade, no *Setor 2*, em 2013 iniciou-se um período consistente de retração da linha de costa (Figuras 6 e 7).

Segundo Enfield et al. (1999) e Rebiota e Santos (2014), a ocorrência dos eventos El Niño/La Niña podem interferir nos padrões climáticos na costa leste da América do Sul (e.g., Norte e Nordeste do Brasil). Entretanto, a influência das anomalias de SST do Atlântico Tropical (Norte e Sul) se acopla ao efeito das anomalias de SST do Pacífico Tropical, alterando ou fortalecendo o sinal das anomalias climáticas sobre a região.

3.6 CONCLUSÕES

Através do uso da ferramenta *web* CASSIE, este estudo apresentou a variabilidade espaço-temporal da linha de costa da margem insular da desembocadura do CSC-Sul. Além disso, as análises demonstraram a relação da linha de costa com a potência de onda e a influência dos índices MEI, TNA e TSA. Para tanto, foram utilizados dados globais de sensoriamento remoto (publicamente acessíveis), abrangendo um período de 36 anos (1984-2020). O presente estudo revelou que (i) dados globais públicos de satélite e a ferramenta *web* CASSIE podem ser utilizados de forma segura para avaliar a variabilidade espaço-temporal da linha de costa na escala espacial local e nas escalas temporais interanual e decadal; (ii) as praias arenosas localizadas na área de estudo estão sujeitas a ciclos de deposição e erosão em diferentes escalas temporais, apresentando diferentes tendências a médio e longo prazo; e (iii) foram observadas correlações que

indicaram a influência das oscilações das fases ENSO na potência de onda e na variabilidade da linha de costa na escala de tempo interanual.

Frente à dificuldade em se obter séries temporais *in situ* contínuas e de longo prazo, o uso de ferramentas computacionais de automação, que se utilizam de bancos de dados de imagens orbitais públicas, ajudam a resolver parte do problema da falta de medições em campo, permitindo assim a realização de estudos sobre a frequência da variabilidade da linha de costa e sua interação com os processos atmosféricos-oceânicos.

Foi possível identificar a tendência multidecadal de cada praia estudada e ainda descrever a atual tendência (interanual) erosiva, a qual as praias do pontal sul da Ilha de Itamaracá estão expostas. A fase predominantemente negativa da potência de onda (baixa energia), 1984-2005, foi acompanhada por uma tendência progradativa da linha de costa, onde foram observados picos positivos em 1999 (*Setor 2*) e 2003 (*Setor 1*). A fase predominantemente positiva da potência de onda (alta energia), entre 2005-2020, foi acompanhada por uma tendência de estabilidade da linha de costa (2006-2013), seguida por um ciclo erosivo (2013-2019).

De forma geral, foi observado que os períodos de La Niña (El Niño) estão ligados ao aumento (diminuição) da potência de onda e à tendência erosiva (estável ou progradativa) da linha de costa. As praias localizadas no *Setor 1*, mais protegidas da ação direta das ondas propagadas ao longo da plataforma interna local, apresentam uma defasagem no comportamento da linha de costa em relação às praias localizadas no *Setor 2*, mais expostas às dinâmicas costeiras.

A relação entre as respostas da linha de costa a processos costeiros em diferentes escalas ainda precisa ser melhor entendida, necessitando de maiores investigações sobre a influência que uma escala exerce sobre a outra. Além disso, é necessário um melhor entendimento sobre efeito combinado das anomalias de SST dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical (Norte e Sul), que alteram os sinais das anomalias climáticas das regiões Norte e Nordeste do Brasil. De forma geral, a avaliação da variação temporal da linha de costa constitui-se em uma ferramenta de grande utilidade para fins de pesquisa e aplicações em gestão ambiental e costeira, sendo desejável a avaliação de diferentes escalas temporais de forma separada, sendo posteriormente integradas na análise de um contexto temporal mais amplo.

REFERÊNCIAS

- Aiello, A.; Canora, F.; Pasquariello, G.; Spilotro, G. 2013. Shoreline variations and coastal dynamics: A space-time data analysis of the Jonian litoral, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 129, 124–135. DOI 10.1016/j.ecss.2013.06.012.
- Almar, R.; Graffin, M.; Boucharel, J.; Abessolo, G. O.; Thoumyre, G.; Papa, F.; Montano J.; Bergsma, E.; Baba, M. W.; Jin, F-F.; Ranasinghe, R. 2022. El Niño Controls the Evolution of Shorelines Worldwide. *Research Square*, article in review. DOI 10.21203/rs.3.rs-1283693/v1.
- Almeida, T. L. M.; Manso, V. A. V. 2011. Sedimentologia da Plataforma Interna Adjacente a Ilha de Itamaracá – PE. *Estudos Geológicos*. 21, 1, 135–152. ISSN: 1980 – 8208.
- Almeida, L. P.; Oliveira, I. E.; Lyra, R.; Dazzi, R. L. S.; Martins, V. G.; Klein, A. H. F. 2021. Coastal Analyst System from Space Imagery Engine (CASSIE): shoreline management module. *Environmental Modelling & Software*, 140, 105033. DOI 10.1016/j.envsoft.2021.105033
- Ambrizzi, T.; Sacco, M. A. L.; Ferraz, S. E. T. 2014. A importância das teleconexões para a Previsão Sazonal. *Ciência e Natura*, 36, 137–148. DOI 10.5902/2179460X13155.
- Araújo, M. C. B.; Souza, S. T.; Chagas, A. O.; Barbosa, S. C. T.; Costa, M. F. 2007. Análise da Ocupação Urbana das Praias de Pernambuco, Brasil. *J. Integr. Coast. Zone Manag.* 7, 2, 97–104. DOI: 10.5894/rgci17.
- Araújo, R. J. V.; Pereira, P. S.; Lino, A. P.; Araújo, T. C. M.; Gonçalves, R. M. 2021. Morphodynamic Study of Sandy Beaches in a Tropical Tidal Inlet Using RPAS. *Marine Geology*, 438, 106540. DOI 10.1016/j.margeo.2021.106540.
- Barros, L. C.; Valença, L. M. M.; Manso, V. D. A. V.; Madruga-Filho, J. D.; Oliveira, J. A. R. 2007. Textura, composição e arredondamento dos sedimentos da plataforma continental interna adjacente às desembocaduras sul do canal de Santa Cruz e do Rio Timbó, norte do Estado de Pernambuco. *Estudos Geológicos*, 17(1), 58–70.
- Briele, A. C. 2014. Assessment of The Application of Permeable Pile Groins as Coastal Protection. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Delft University of Technology, Delft, 115 p.
- Cazelles, B., Chavez, M., Berteaux, D., Ménard, F., Vik, J. O., Jenouvrier, S., & Stenseth, N. C. 2008. Wavelet analysis of ecological time series. *Oecologia*, 156(2), 287–304.
- Chen, C. A.; Gao, X.; Ishizaka, J.; Lebel, L. 2015. Editorial: Coastal seas in a changing world: Anthropogenic impact and environmental responses. *Continental Shelf Research*. 111, 109–111. DOI 10.1016/j.csr.2015.11.007.

- Como, S.; Meas, P.; Stergiou, K.; Williams J. 2015. Ocean Wave Energy Harvesting: Off-Shore Overtopping Design. *Worcester Polytechnic Institute*. 60 p.
- Dallas, K. L.; Barnard, P. L. 2011. Anthropogenic influences on shoreline and nearshore evolution in the San Francisco Bay coastal system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92, 194–204. DOI 10.1016/j.ecss.2010.12.031.
- Davis, A.; Fitzgerald, D. M. 2004. Beaches and Coasts. 1. ed. Massachusetts – USA. *Blackwell Publishing*. 419 p. ISBN-10 0632043083.
- Enfield, D. B.; Mestas-Nufiez, A. M.; Mayer, D. A.; Cid-Serrano, L. 1999. How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures? *Journal of Geophysical Research*, 104, C4, 7841–7848.
- Fellowes, T. E.; Vila-Concejo, A.; Gallop, S. L.; Schosberg, R.; Staercke, V.; Largier, J. 2021. Decadal shoreline erosion and recovery of beaches in modified and natural estuaries. *Geomorphology*, 390, 107884. DOI 10.1016/j.geomorph.2021.107884.
- Fitzgerald, D. M. 1984. Interaction between the ebb-tidal delta and landward shoreline: price inlet, South Carolina. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, 4, 1303–1318. DOI 10.1306/212F85C6-2B24-11D7-8648000102C1865D.
- Ford, M. R.; Dickson, M. E. 2018. Detecting ebb-tidal delta migration using Landsat imagery. *Marine Geology*, 405, 38–46. DOI 10.1016/j.margeo.2018.08.002.
- Genchi, S. A.; Vitale, A. J.; Perillo, G. M. E.; Seitz, C. Delrieux, C. A. 2020. Mapping Topobathymetry in a Shallow Tidal Environment Using Low-Cost Technology. *Remote Sensing*, 12, 1394. DOI 10.3390/rs12091394.
- Grinsted, A.; Moore, J. C.; Jevrejeva, S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561–566. SRef-ID 1607-7946/npg/2004-11-561.
- Gomes, G.; Silva, A. C. 2014. Coastal Erosion Case at Candeias Beach (NE-Brazil). *Journal of Coastal Research*, 71, 30–40. DOI 10.2112/SI71-004.1.
- Gonçalves, R. M.; Saleem, A.; Queiroz, H. A. A.; Awange, J. L. 2019. A fuzzy model integrating shoreline changes, NDVI and settlement influences for coastal zone human impact classification. *Applied Geography*. 113, 102093. DOI 10.1016/j.apgeog.2019.102093.
- Gotelli, N. J.; Ellison, A. M. 2011. Princípios de estatística em ecologia. Ed. *Artmed*, 683 p. ISBN 978-85-363-2469-2.
- Harley, M. D.; Masselink, G.; Alegría-Arzaburu, A. R.; Valiente, N. G.; Scott, T. 2022. Single Extreme Strong Sequence Can Offset Decades of Shoreline Retreat by Sea-level Rise. *Communications Earth & Environment*, 3, 112, 1–11. DOI 10.1038/s43247-022-00437-2.

- Harrison, S. H.; Bryan, K. R.; Mullarney, J. C. 2017. Observations of morphological change at an ebb-tidal delta. *Marine Geology*, 385, 131–145. DOI 10.1016/j.margeo.2016.12.010.
- Hersbach et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.*, 146, 1999–2049. DOI 10.1002/qj.3803.
- Hovmöller, E. 1949. The Trough-and-Ridge diagram. *Tellus*, 1, 2, 62–66. DOI 10.3402/tellusa.v1i2.8498.
- Humberston, J.; Lippmann, T.; McNinch, J. 2019. Observations of wave influence on alongshore ebb-tidal delta morphodynamics at Oregon Inlet, NC. *Marine Geology*, 418, 106040. DOI 10.1016/j.margeo.2019.106040.
- Jolliffe, I. T.; Cadima, J. 2016. Principal component analysis: a review and recent developments. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 374, 20150202, 1–16. DOI 10.1098/rsta.2015.0202.
- Liu, Z.; Alexander, M. 2007. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections. *Rev. Geophys.*, 45, RG2005, DOI 10.1029/2005RG000172.
- Long, N.; Millescamp, B.; Guillot, B.; Pouget, F.; Bertin, X. 2016. Monitoring the topography of a dynamic tidal inlet using RPA imagery. *Remote Sens.*, 8, 387. DOI 10.3390/rs8050387.
- Luijendijk, A.; Hagenaars, G.; Ranasinghe, R.; Baart, F.; Donchyts, G.; Aarninkhof, S. 2018. The State of the World's Beaches. *Nature: Scientific Reports*. 8, 6641. DOI:10.1038/s41598-018-24630-6.
- Martins, K. A.; Pereira, P. S.; Lino, A. P.; Gonçalves, R. M. 2016. Determinação da erosão costeira no Estado de Pernambuco através de geoindicadores. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17, 3. DOI 10.20502/rbg.v17i3.854.
- Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pörtner, H.O.; Roberts, D.; Skea, J.; Shukla, P.R. et al., 2018. IPCC, 2018: Global Warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of, vol. 1.
- Mazzer, A. M.; DILLENBURG, S. Variações temporais da linha de costa em praias arenosas dominadas por ondas do sudeste da Ilha de Santa Catarina (Florianópolis, SC, Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 36, 1, 117–135. ISSN 1518-2398.
- Medeiros, C.; Kjerfve, B. 1993. Hydrology of a Tropical Estuarine System: Itamaracá, Brasil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 36, 495–515. 0272-7714/93/050495.
- Mendonça, F. J. B.; Medeiros, C.; Rollnic, M. 2006. Morphogenesis of the Coroa do Avião, a Sand Bank/Barrier Islet at Northeastern–Brazil. *Journal of Coast Research*. 39, 290–293. ISSN 0749-0208.
- Melo, M. C. S. S.; Barcellos, R.; Oliveira, L. E. E.; Manso, V. A. V. 2019. Aspectos Sedimentológicos e Batimétricos da Plataforma Continental Norte de Pernambuco –

Brasil. *Estudos Geológicos*. 29, 17–30. DOI 10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v29n2p17-30.

Mitchell, S. B.; Jennerjahn, T. C.; Vizzini, S.; Zhang, W. 2015. Changes to processes in estuaries and coastal waters due to intense multiple pressures – An introduction and synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 156, 1–6. DOI 10.1016/J.ECSS.2014.12.027.

Nascimento, A. A.; Awange, J. L.; Gonçalves, R. M.; Khandu. 2020. South America's tropopause variability in relation to global teleconnection (2001–2017): A GNSS-radio occultation assessment. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 209, 105379. DOI 10.1016/j.jastp.2020.105379.

Natarajan, L.; Sivagnanam, N.; Usha, T.; Chokkalingam, L.; Sajimol Sundar, S.; Gowrappan, M.; Roy, P. D. 2021. Shoreline changes over last five decades and predictions for 2030 and 2040: a case study from Cuddalore, southeast coast of India. *Earth Science Informatics*, DOI 10.1007/s12145-021-00668-5.

Nóbrega et al. 2021. Estudos de Variabilidades Interanuais e Interdecenais da Precipitação Pluvial das Regiões Hidrográficas Tocantins-Araguaia e São Francisco no Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 2, 1116–1130.

Otsu, N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-9, 1.

Oyedotun, T. D. T. 2014. Shoreline Geometry: DSAS as a Tool for Historical Trend Analysis. *Geomorphological Techniques*, 3, 2.2. ISSN 2047-0371.

Pereira, P. S.; Martins, K. A.; Neto, A. V.; Lino, A. P.; Macaíba, M. B.; Olinto, A.; Fisher, A.; Araújo, R. J. V.; Schettini, C. A. F.; Araújo, T. C. M. 2015. Atlas da vulnerabilidade à erosão costeira e mudanças climáticas em Pernambuco. 1.ed. Recife: Editora Universitária – UFPE, 98 p. ISBN 978-85-415-0788-2.

Pereira, P. S.; Araújo, T. C.; Manso, V. A. V. 2017. Tropical Sandy beaches of Pernambuco state. In Short, A. D. & Klein, A. H. F. (Ed.). *Brazilian Beaches Systems*. Springer, 251–279. DOI 10.1007/978-3-319-30394-9_10.

Queiroz, H. A. A.; Gonçalves, R. M.; Mishra, M. 2022. Characterizing global satellite-based indicators for coastal vulnerability to erosion management as exemplified by a regional level analysis from Northeast Brazil. *Science of The Total Environment*, 817, 152849. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.152849.

Rasmusson, E. M.; Carpenter, T. H. 1982. Variation in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associate with the Southern Oscillation/El Niño. Climate Analysis Center, NMC, NWS, NOAA, 110, 20233.

Rebiota, M. S.; Santos, I. A. 2014. Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no norte e nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 15, 28–48. ISSN 2237-8642.

Silva, G. V.; Muler, M.; Prado, M. F. V.; Short, A. D.; Klein, A. H. F.; Toldo Jr., E. E. 2016. Shoreline Change Analysis and Insight into the Sediment Transport Path along Santa Catarina Island North Shore, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 32, 4, 863–874. DOI 10.2112/JCOASTRES-D-15-00164.1.

Silva; A. P.; Silva, G. V.; Strauss, D.; Murray, T.; Woortmann, L. G.; Taber, J.; Cartwright, N.; Tomlinson, R. 2021. Headland bypassing timescales: Processes and driving forces. *Science of the Total Environment*, 793, 148591. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.148591.

Souza, C. A.; Rebiota, M. S. 2021. Ferramenta para o monitoramento dos padrões de teleconexão na América do Sul. *Terrae Didática*, 17, 1–13, DOI 10.20396/td.v17i0.8663474.

Sutikno, S.; Murakami, K.; Handoyo, D. P.; Fauzi, M. 2015. Calibration of Numerical Model for Shoreline Change Prediction Using Satellite Imagery Data. *Makara J. Technol.*, 19, 3, 113–119. DOI 10.7454/mst.v19i3.3042.

Thieler, E. R.; Himmelstoss, E. A.; Zichichi, J. L.; Ergul, A. 2017. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 – An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. ver. 4.4, U.S. Geological Survey Open-File. Report 2008-1278.

Torrence, C.; Compo, G. P. 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 1, 61–78.

Torrence, C.; Webster, P. J. 1999 Interdecadal Changes in the ENSO–Monsoon System. *American Meteorological Society*, 12, 2679–2690.

Toure, S.; Diop, O.; Kpalma, K.; Maiga, A. S. 2019. Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 8, 75, 1–21. DOI 10.3390/ijgi8020075.

Trenberth, K. E. 1997. The Definition of El Nino. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 12, 2771–2778.

Trenberth, K. E.; Stepaniak, D. P. 2001. LETTERS: Indices of El Niño Evolution. *American Meteorological Society*, 14, 1697–1701.

Uvo, C. B.; Repelli, C. A.; Zebiak, S. E.; Kushnir, Y. 1998. The Relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly Precipitation. *American Meteorological Society*, 11, 551–562.

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco. 2019. Guia sedimentológico das praias de Pernambuco. Ed. UFPE, 102 p. ISBN 978-85-415-1140-7.

Vale, R. S.; Santana, R. A.; Dias-Júnio, C. Q. 2020. Análise de Dados Climáticos Usando Transformada em Ondeletras Cruzada e Coerência. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 2, 641–647.

Vousdoukas et al. 2020. LETTERS: Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10, 260–263. DOI 10.1038/s41558-020-0697-0.

Vos, K.; Splinter, K. D.; Harley, M. D.; Simmons, J. A.; Ian L. Turner, I. L. 2019a. CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, 122, 104528. DOI 10.1016/j.envsoft.2019.104528.

Vos K.; Harley M. D.; Splinter K. D.; Turner I. L. 2019b. Satellite-derived shorelines along the east coast of Australia between 1987 and 2019. *Australasian Coasts & Ports 2019 Conference – Hobart, 10-13 September 2019*.

Vos K.; Harley M. D.; Splinter K. D.; Simmons, J. A.; Turner I. L. 2019c. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, 150, 160–174. DOI 10.1016/j.coastaleng.2019.04.004.

Wiggins, M.; Scott, T.; Masselink, G.; Russell, P.; Mccarroll, R. J. Coastal embayment rotation: Response to extreme events and climate control, using full embayment surveys. *Geomorphology*. 2019, 327, 385–403. DOI 10.1016/j.geomorph.2018.11.014.

Williams, A.T., Rangel-Buitrago, N., Pranzini, E., Anfuso, G., 2018. The management of coastal erosion. *Ocean & Coastal Management*. 156, 4–20.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.03.022>.

4 GESTÃO DO AMBIENTE COSTEIRO: EXPOSIÇÃO E ADAPTAÇÃO À EROSÃO COSTEIRA EM PRAIAS ARENOSAS DE UM SISTEMA ESTUARINO TROPICAL

4.1 INTRODUÇÃO

Praias arenosas possuem características naturais intrínsecas que as tornam indispensáveis à preservação da biodiversidade, do clima, da fertilidade e da acessibilidade, consistindo em um ecossistema que fornece serviços ambientais cruciais à sobrevivência de diversas comunidades costeiras (Lucrezi et al., 2016; Lima et al., 2017; Silva et al., 2019). Entretanto, atividades humanas (extrativistas ou não) vêm superexplorando este ambiente e ameaçando a sustentabilidade de seus serviços ecossistêmicos (Constanza et al., 1997; Esteves, 2014; Martins, 2020), responsáveis pela manutenção dos seus recursos econômicos, recreativos, naturais e cênicos (Ariza et al., 2010; Botero et al., 2015; Lucrezi et al., 2016; Lima et al., 2017; Silva et al., 2019). Neste contexto, Segundo Araújo e Costa (2008), mundialmente, existe uma ênfase crescente na conservação de um ambiente costeiro saudável, principalmente através de ações de proteção dos habitats naturais e redução dos níveis de poluição.

Por vezes, gestores costeiros tendem a priorizar abordagens rápidas e pontuais que podem representar, a longo prazo, consequentes danos à possibilidade de uso sustentável das praias. A tendência a uma gestão desequilibrada no uso do ambiente praias é comumente observada em praias atrativas, ou com este potencial, ao turismo e à especulação imobiliária (Pereira et al., 2003; Botero et al., 2015; Lucrezi et al., 2016; Gonçalves et al., 2021). Sendo assim, é fundamental e necessário que os instrumentos de gestão para este ambiente sejam desenvolvidos através de uma abordagem integrada, levando em consideração suas características naturais, ecológicas, sociais e vocacionais ao uso sustentável (Casarín et al., 2014; Nel et al., 2014; Kosyan e Velikova, 2015; Lucrezi et al., 2016; Lima et al., 2017; Gonçalves et al., 2021; Nicolodi e Gruber, 2020; Nicolodi et al., 2021).

Entretanto, especialmente no Brasil, observa-se uma consolidação tardia dos instrumentos para gestão integrada da zona costeira (GIZC) e que as políticas de planejamento e de ordenamento territorial, por vezes, não são capazes de evitar o desperdício de recursos do erário com a execução de intervenções inadequadas ao

ambiente costeiro (Souza, 2009; Nicolodi et al., 2021). Estudos recentes (*e.g.*, Casarín et al., 2014; Kosyan e Velikova, 2015; Lima et al., 2017; Nicolodi et al., 2021) discutem sobre a necessidade de informações e subsídios científicos prestando apoio à elaboração de instrumentos normativos, de licenciamentos e de regulamentação para a execução de obras e o uso sustentável do ambiente costeiro. Dessa forma, estabelecendo a conexão entre os potenciais problemas ambientais e suas respectivas medidas políticas em resposta (*e.g.*, Souza, 2009; Kosyan e Velikova, 2015).

Diante do exposto, destaca-se a necessidade de o poder público melhorar suas ações e diretrizes voltadas às políticas de gestão para a zona costeira, considerando aspectos socioeconômicos e ambientais, corrigindo as assimetrias ao longo da costa brasileira e implementando a nível nacional e regional a GIZC (Lima et al., 2017; Nicolodi et al., 2021).

Historicamente, o padrão de uso e povoamento do litoral brasileiro se deu de forma descontínua e por bolsões de adensamento urbano, não planejado e com pouca infraestrutura, principalmente no entorno de áreas estuarinas, favorecendo a degradação e a ocupação desordenada do ambiente natural (Araújo et al., 2007; Souza, 2009). De forma geral, as áreas estuarinas e suas adjacências possuem uma localização natural e estratégica que favorecem a instalação e o crescimento de grandes centros urbanos e o desenvolvimento de áreas portuárias, além das atividades e dos serviços a estes ligados. Neste contexto, os estuários estão susceptíveis aos impactos da ação sinérgica entre os processos naturais e as ações antrópicas (Lisboa e Fernandes, 2015).

Segundo Medeiros e Kjerfve (1993), os estuários foram formados pela intrusão e inundação de vales fluviais e áreas baixas por águas oceânicas durante a elevação holocênica do nível do mar e o subsequente aporte sedimentar. Trata-se de um ecossistema geologicamente jovem que, devido a sua natureza, em constante estado de mudança, influencia os padrões de transporte e movimentação sedimentar, redistribuindo seus estoques e modelando suas feições arenosas (*e.g.*, praias, pontais, barras e bancos) e adjacências (Mitchell et al., 2015; Long et al., 2016; Ford e Dickson, 2018; Genchi et al., 2020). Neste contexto, o manejo adequado dos sistemas estuarinos, como qualquer outro ecossistema costeiro, exigirá a avaliação e a priorização dos diversos conflitos relacionados aos usos e às atividades, entendendo os processos ambientais dominantes,

assim como suas condições e restrições socioeconômicas e políticas (Medeiros e Kjerfve, 1993; MMA, 2008; Brasil, 2018; Nicolodi e Gruber, 2020).

O litoral norte da costa pernambucana foi um dos primeiros adensamentos populacionais do Brasil (Santos & Oliveira, 2015). Oliveira & Santos (2014) relatam que, nos primeiros séculos da colonização, as principais vilas e cidades portuguesas, geralmente, estavam situadas na zona costeira pernambucana; à época, o interesse maior era defender o litoral (no caso, a costa da América Portuguesa) da ameaça estrangeira (francesa e holandesa, especificamente), através, principalmente, da construção de fortificações e fundação de vilas em pontos prioritários ao longo do litoral. A ótica urbanística colonial portuguesa adotava a prerrogativa de fundar seus principais sítios ao alcance do mar, ou próximo a ele (Oliveira & Santos, 2014; Santos & Oliveira, 2015). Segundo Barthel (2007), outro registro histórico do período colonial revelou que, em 1698, o Rei de Portugal ordenou que toda pedra que viesse nos navios como lastro fosse enviada à Ilha de Itamaracá, para as obras de contenção do mar junto à nova muralha de alvenaria de pedra e cal da Fortaleza de Santa Cruz.

Esse breve relato da história pernambucana evidencia o modo como ocorreu o início de sua ocupação e a forma de convivência com o seu litoral. De comparável importância aos processos e fenômenos costeiros, os padrões de uso e ocupação do litoral, dentro de uma escala espaço-temporal histórica e contemporânea, interferem na estabilidade e na morfologia da planície costeira e de suas praias, assumindo um importante papel na evolução e na exposição da costa ao risco de erosão (Dallas & Barnard, 2011; Aiello et al., 2013; Davis & Fitzgerald, 2004; Gomes & Silva, 2014).

Pernambuco não possui grandes e caudalosos rios desaguando em sua costa. Sendo assim, naturalmente, o aporte sedimentar ao seu litoral é baixo (Araújo et al., 2007). Além disso, sua plataforma continental é estreita e marcada pela presença característica de conjuntos de longas linhas de recifes de arenito submersos, paralelas entre si e ao litoral adjacente, o que dificulta a remobilização do estoque sedimentar que possui (Medeiros & Kjerfve, 1993; Araújo et al., 2007; Almeida e Manso, 2011; Pereira et al., 2015 e 2017). Adicionalmente, os padrões de uso e ocupação do seu litoral permitiram a urbanização e a instalação dos mais diversos tipos de estruturas sobre áreas de dunas, de vegetação de restinga e do pós-praia, interferindo assim na disponibilidade natural dos sedimentos no sistema praial (Martins et al., 2016).

Entender os efeitos das variações espaciais e temporais nos ambientes costeiros se faz necessário para uma eficiente gestão dos diversos interesses de uso e de ocupação do litoral, sobretudo em áreas urbanas, turísticas e de alta especulação imobiliária.

Neste sentido, e baseado em diretrizes e instrumentos da Gestão integrada da Zona Costeira (Brasil, 2018), em mapas topo-batimétricos (Wiggins et al., 2019; Araújo et al., 2021; Silva et al., 2021) e em imagens e documentos históricos (*e.g.*, fotografias, sensoriamento remoto, iconografias e plantas), o presente estudo buscou:

- i. Descrever a variação altimétrica e o transporte sazonal dos estoques sedimentares da área de estudo;
- ii. Analisar a exposição do ambiente praial analisado à erosão costeira;
- iii. Avaliar a exposição do patrimônio público, privado, histórico e cultural à dinâmica e aos processos costeiros atuantes, considerando a área do sítio arqueológico do Forte Orange como um registro histórico das alterações ambientais e dos padrões de uso e ocupação deste litoral; e
- iv. Apresentar estratégias compatíveis à gestão e ao uso sustentável do ambiente costeiro, harmônicas à realidade municipal, compatíveis à vocação natural e ao uso tradicional, para as praias arenosas do pontal sul da Ilha de Itamaracá;

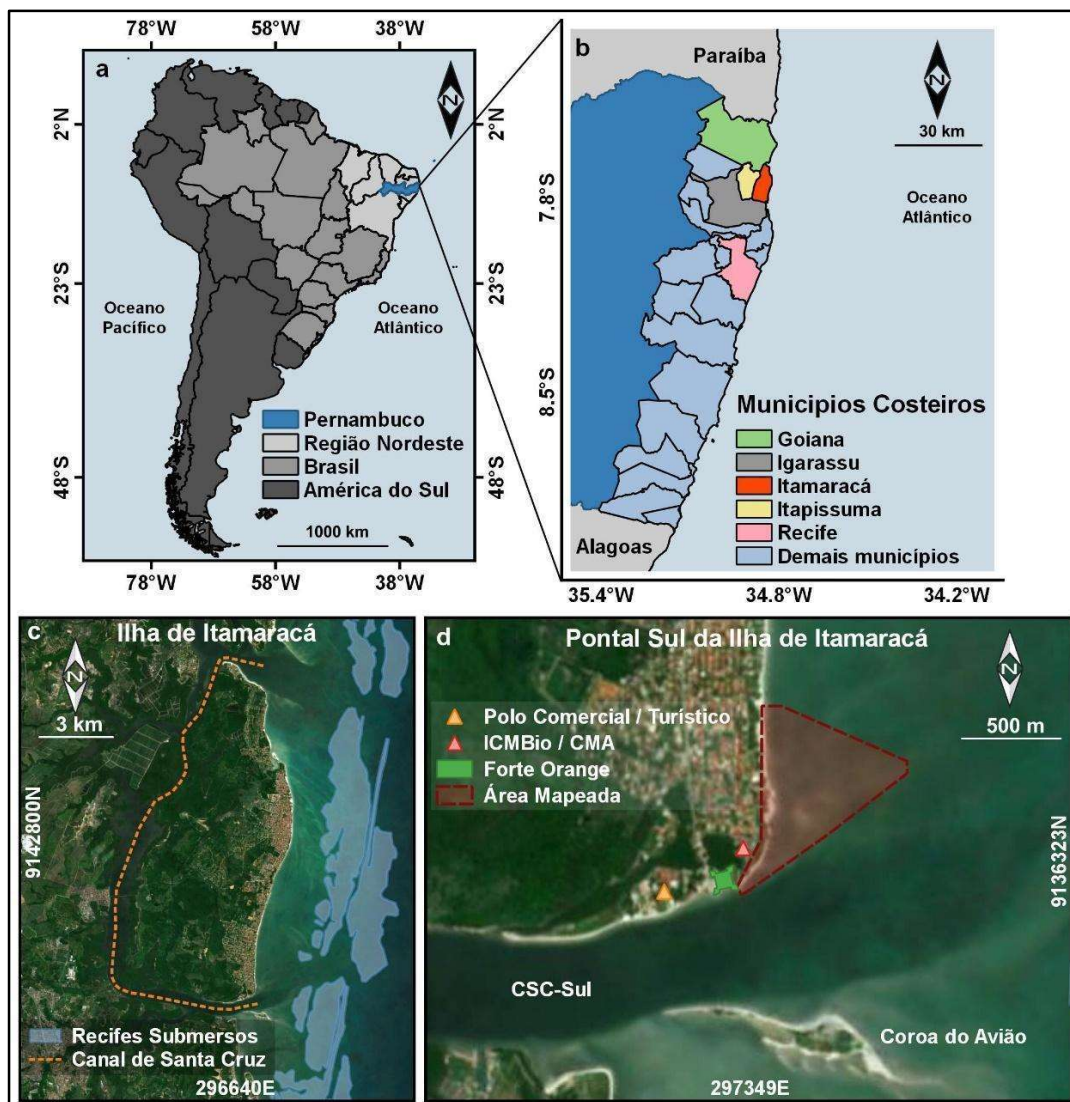
4.2 ÁREA DE ESTUDO

4.2.1 Localização

A Ilha de Itamaracá é um município situado no litoral norte do Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil (Figura 1a), e inserido na região metropolitana da cidade do Recife, capital do Estado (~45km de distância; Figura 1b). O município encontra-se separado do continente pelo canal de Santa Cruz (com ~20km de extensão), que se comunica ao oceano Atlântico por meio de duas desembocaduras, uma a norte e outra a sul (Figura 1c). No presente estudo, foram analisados *(i)* a faixa de praia arenosa localizada na margem insular de face leste, ao norte da desembocadura sul do canal de Santa Cruz (CSC-Sul), pontal sul da Ilha de Itamaracá (PSII); *(ii)* os bancos de areia, emersos apenas nos períodos de maré baixa e contíguos à faixa de praia por meio de um extenso terraço de baixa-mar; e *(iii)* as imediações do sítio arqueológico do Forte Orange, situado na margem insular de face S-SE do CSC-Sul (Figura 1d).

A área de estudo está limitada pela ilhota da Coroa do Avião, a sul, e por linhas descontínuas e paralelas à costa de recifes submersos, a leste (Figuras 1c e 1d).

Figura 1. Localização da área de estudo: **a)** Pernambuco, NE – Brasil; **b)** Litoral norte de Pernambuco; **c)** Ilha de Itamaracá, canal de Santa Cruz e linha de recifes submersos; e **d)** Pontal Sul da Ilha de Itamaracá e área das feições arenosas mapeadas.



Fonte: o autor (2022).

4.2.2 Regionalidades

O município da Ilha de Itamaracá faz fronteira com os municípios de Goiana, a norte, de Itapissuma, a oeste, e de Igarassu, a sul (Figura 1b). Como descrito por Araújo et al. (2021), toda extensão territorial da Ilha de Itamaracá está inserida em uma área de proteção ambiental (APA Santa Cruz) e suas praias são bem frequentadas,

independentemente da estação do ano (chuvosa ou seca), caracterizando-se como um dos destinos turísticos mais procurados do litoral norte pernambucano.

A Ilha de Itamaracá abriga uma população flutuante significativa, devido à quantidade de residências destinadas ao veraneio (Lima et al., 2017). No PSII está instalada a sede regional do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade/Centro de Mamíferos Marinhos (ICMBio/CMA; Projeto Peixe-boi), além das estruturas remanescentes do Forte Orange (monumento histórico), ambos expostos a uma alta vulnerabilidade à erosão costeira (Gonçalves et al., 2019).

4.2.2.1 Geografia, clima e meio ambiente

Segundo Lima et al. (2017) e Gonçalves et al. (2019), o município da Ilha de Itamaracá está inserido na unidade geoambiental da Baixada Litorânea, com relevo formado pelas Áreas Arenosas Litorâneas, onde se incluem as restingas, as dunas, os mangues e os apicuns (regionalmente conhecidos como salgados).

A vegetação é basicamente formada por Florestas Perenifólia de Restinga e possui clima Tropical Chuvoso com precipitação média anual de ~1,867 mm. Segundo Pereira et al. (2017), a costa pernambucana possui clima Tropical Atlântico, com períodos seco e úmido distintos, caracterizada por um padrão bimodal com estações seca (verão), de outubro a março, e chuvosa (inverno), de abril a setembro. Medeiros e Kjerfve (1993) e Araújo et al. (2021), observaram que a região costeira da Ilha de Itamaracá recebe ventos predominantes de SE, com ocorrência de ventos fracos de NE, no verão, e predominância de ventos fortes de SE, no inverno.

A Ilha de Itamaracá insere-se no escopo de pequenas bacias hidrográficas costeiras, sendo seus principais afluentes os rios perenes Paripe e Jaguaribe (Gonçalves et al., 2019). A pressão antrópica sobre seus recursos naturais tem implicações econômicas, sociais e ambientais, justificando assim a necessidade de ações de planejamento e gestão, que são escassas, entre outros, devido à indisponibilidade de dados e às dificuldades de aquisição de informações atualizadas (Gonçalves et al., 2019).

4.2.2.2 Desenvolvimento urbano

Até meados da década de 1970, a exploração turística e imobiliária na Ilha de Itamaracá era incipiente e localizada nas praias mais ao centro da ilha. Nessa época, o

pontal sul da ilha era praticamente inabitado. Porém, esse cenário muda de forma significativa entre as décadas de 1980 e 1990, com a Ilha de Itamaracá se tornando um dos principais destinos do turismo de veraneio do estado de Pernambuco. Com isso, as praias do PSII passam a dar espaço a grandes loteamentos, empreendimentos hoteleiros (um grande hotel e várias pousadas), um polo comercial e turístico, e o Forte Orange passa a receber destaque neste contexto como atrativo turístico, cultural e histórico.

O interesse imobiliário e turístico começou a desacelerar e a estabilizar ao longo da primeira década dos anos 2000. Dessa forma, a Ilha de Itamaracá passou a apresentar um aumento da população permanente e o crescimento de bairros de primeira moradia. Consequentemente, impulsionou o comércio e toda a cadeia de infraestrutura urbana necessária para atender às demandas deste novo contingente populacional. Sendo assim, o pontal sul da Ilha de Itamaracá, antes desabitado, passou a sofrer com os efeitos de uma urbanização pouco planejada.

4.2.2.3 Sítio arqueológico do Forte Orange

Inicialmente, erguido de forma precária (~1631) para abrigar e guarnecer (*i.e.*, na terminologia militar, estabelecer uma “cabeça-de-ponte”) as tropas holandesas que investiam contra a então sede administrativa da capitania hereditária de Itamaracá (a Vila de Nossa Senhora da Conceição, atual Vila Velha), foi adequado aos padrões de arquitetura militar do exército invasor logo que consolidado o período de ocupação holandesa em Pernambuco (~1633) (Oliveira & Santos, 2014). Dessa forma, o Forte Orange passa a contar com quatro baluartes, fosso seco, quartéis internos, um poço de água potável e uma praça d’armas (Albuquerque et al., 1999; Albuquerque, 2010a; Albuquerque, 2010b).

Ao final do período de domínio holandês em Pernambuco (~1654), o Forte Orange foi tomado pelas tropas luso-brasileiras e ficou sob o comando da coroa portuguesa, passando a se chamar Fortaleza de Santa Cruz (Albuquerque *et al.*, 1999; Barthel, 2007; Albuquerque, 2010b). Após uma alternância entre diversos e longos períodos de readequação da arquitetura militar, de abandono e de reconstrução, a fortaleza luso-brasileira foi estabelecida definitivamente em meados da primeira metade do século XVIII (Barthel, 2007). Contudo, segundo Albuquerque et al. (1999), provavelmente, não chegou a ser concluída aos moldes previstos pelo projeto português.

Popularmente (turisticamente) mais conhecido pelo nome holandês, as estruturas remanescentes do Forte Orange, na verdade, são da Fortaleza de Santa Cruz (Albuquerque *et al.*, 1999; Albuquerque, 2009; Albuquerque, 2010a; Albuquerque, 2010b; Oliveira & Santos, 2014; Albuquerque & Albuquerque, 2018). Apesar de apresentarem morfologia externa muito semelhante, foram dois fortes distintos. As últimas escavações e estudos arqueológicos indicaram que o reduto holandês está abaixo e circunscrito pelas atuais estruturas luso-brasileiras (Barthel, 2007; Albuquerque, 2009; Albuquerque, 2010a; Albuquerque, 2010b; Albuquerque & Albuquerque, 2018).

Ainda no século XIX, a fortificação foi importante no contexto da Revolução Pernambucana de 1817 (Albuquerque *et al.*, 1999). Contudo, progressivamente, o forte foi perdendo sua importância militar/estratégica, tornando-se secundária a manutenção de sua estrutura. Na primeira metade do século XX o forte estava em ruínas, somente voltando a passar por novas restaurações entre as décadas de 1970 e 1980, executadas pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN e pelo Exército Brasileiro, respectivamente (Barthel, 2007).

Ao longo da primeira década do século XXI, as estruturas do Forte Orange (Fortaleza de Santa Cruz) passaram por escavações e estudos arqueológicos, coordenados pela equipe do Laboratório de Arqueologia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), que subsidiaram um novo ciclo de restaurações, reformas e adequações de acessibilidade (Barthel, 2007; Albuquerque, 2009; Albuquerque, 2010a; Albuquerque, 2010b; Albuquerque & Albuquerque, 2018).

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

4.3.1 Mapeamento topo-batimétrico das feições arenosas

Para dar suporte (i) à análise de exposição do ambiente praial à erosão costeira, (ii) à avaliação da exposição do patrimônio e (iii) à apresentação de estratégias para mitigação e adaptação, foram gerados modelos digitais do terreno (MDTs), *i.e.*, mapas topo-batimétricos (Wiggins *et al.*, 2019; Araújo *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2021), da área correspondente à faixa de praia (topográfico), ao terraço de baixa-mar e aos bancos de areia (batimétricos) localizados na margem insular de face leste, ao norte do CSC-Sul (Figura 1d). Estes modelos serviram como base para as análises das variações

morfológicas (altimétricas) da área mapeada e foram gerados a partir da interpolação de pontos geodésicos tridimensionais ($3D_{GNSS}$), coletados por meio de um Sistema de Navegação Global por Satélite – Cinemático Pós-Processado (GNSS–PPK; Figura 2a).

4.3.1.1 Levantamento GNSS–PPK

A coleta dos pontos $3D_{GNSS}$ foi realizada por caminhamento (Figura 2d), perfilando, perpendicularmente à orientação das praias de face leste, toda a extensão da área mapeada (pós-praia, terraços de baixa-mar e bancos arenosos).

Foram utilizados dois receptores geodésicos, Sistema GNSS *Trimble®* R4 (Holanda et al., 2020; Araújo et al., 2021):

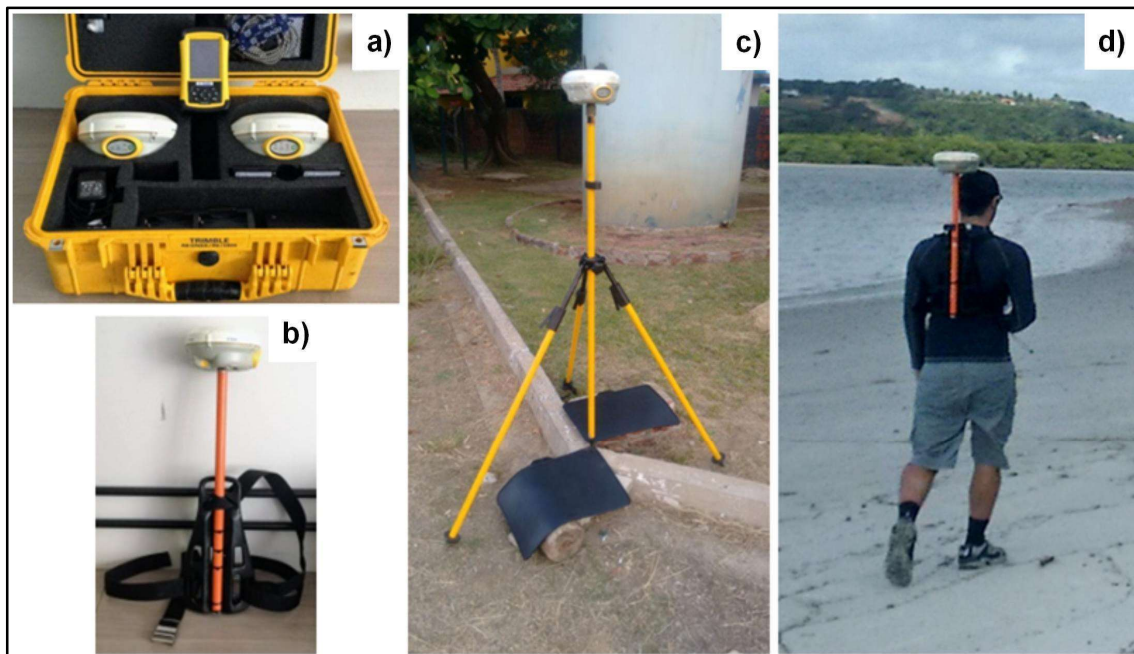
- i. *Receptor fixo* (Figura 2c): estação base instalada na sede do ICMBio/CMA e configurada para taxa de gravação de 5s. Sendo previamente determinada e estabelecida por coordenadas precisas ($7^{\circ}48'30,511''S$ e $34^{\circ}50'16,712''W$; $H = 3.148m$), forneceu a linha de base para correção no modo de pós-processamento dos pontos coletados pelo receptor móvel; e
- ii. *Receptor móvel* (Figura 2b): acoplado a uma mochila-suporte e configurado para captação cinemática contínua com taxa de gravação de 5s, sendo utilizado para determinação da trajetória percorrida para aquisição dos pontos $3D_{GNSS}$.

Os pontos $3D_{GNSS}$ foram coletados em coordenadas planimétricas no sistema UTM (N , E e altitudes ortométricas H) e pós-processados no *software* TBC (*Trimble® Business Center*), onde foram transformados para o formato padrão GNSS e referenciados para o *Datum* horizontal SIRGAS 2000 (oficial brasileiro) e coordenadas planas UTM 25S. Alguns critérios de aceitação foram estabelecidos para garantir a precisão horizontal e vertical de cada ponto medido, sendo aprovados quando: horizontal $> 0,10$ m e vertical $> 0,10m$, com nível de significância de 95% (Araújo et al., 2021).

Os levantamentos ocorreram nos meses de abril, setembro e novembro de 2017 (respectivamente, Abr.2017, Set.2017 e Nov.2017) e abril, setembro e dezembro de 2018 (respectivamente, Abr.2018, Set.2018 e Dez.2018), abrangendo assim o início e o fim da estação chuvosa. Os caminhamentos sempre foram realizados nos períodos de baixa-mar das marés de sizígia, *i.e.*, 0,0–0,2m, segundo as previsões de maré da Diretoria de

Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, para o Porto do Recife (geograficamente, a ~27km da área de estudo).

Figura 2. Sistema GNSS *Trimble® R4*: **a)** Receptores GNSS e controladora; **b)** Receptor móvel acoplado à mochila-suporte; **c)** Receptor na estação base; e **d)** Caminhamento com o receptor móvel.



Fontes: **a), b) e c)** o autor (2018); e **d)** Sidney Vieira – SEMAS/PE (2018).

4.3.1.2 Processamento em SIG

Os mapas topo-batimétricos foram gerados e analisados através de um Sistema de Informação Geográfica (SIG – *software* QGIS 3.10, versão *A Coruña*):

- i. Os pontos $3D_{GNSS}$ foram interpolados pelo algoritmo de *Triangulação de Delaunay* (*Triangulated Irregular Network* – TIN);
- ii. Estas interpolações geraram MDTs com resolução espacial de $5m^2/pixel$, para cada mês amostrado; e
- iii. Para garantir mapas com as mesmas dimensões *XY*, os limites de área para cada MDT foram delimitados pela utilização de uma única camada poligonal de corte.

Dessa forma, foi possível comparar *pixel a pixel*, na mesma coordenada geográfica, os valores altimétricos entre os diferentes mapas dos meses analisados, utilizando o método da diferença entre modelos de elevação (*DEM of Difference* – DoD) (Wiggins et al., 2019; Araújo et al., 2021; Silva et al., 2021).

4.3.2 Estratégias para gestão e uso sustentável do ambiente costeiro

Observando os conceitos e as propostas apresentadas pelo Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira (Brasil, 2018), foram avaliadas as alternativas e as estratégias mais adequadas para o gerenciamento do ambiente e da erosão costeira nas praias arenosas do PSII. Além deste, outras obras e instrumentos para a GIZC (*e.g.*, MMA, 2008; Esteves, 2014; Mangor et al., 2017; ME, 2022), incluindo dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foram utilizados para avaliar as estratégias mais sustentáveis e compatíveis tanto aos usos tradicionais e vocacionais (potenciais ambientais, culturais e turísticos) das praias do PSII, quanto à realidade político-administrativa e financeira municipal da ilha.

O IBGE consiste no principal provedor de dados e informações do Brasil, cumprindo o papel de identificar e analisar o seu território, contar a sua população e gerar informações acerca de sua economia e das condições de vida, trabalho e produção de sua população (<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/ilha-de-itamaraca.html>).

O Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira (Brasil, 2018) foi uma iniciativa apresentada pelo Subgrupo de Trabalho de Gestão de Riscos e Obras de Proteção Costeira (SgT-GROPC), criado no âmbito do Grupo de Integração do Gerenciamento Costeiro (GI-GERCO), e aprovado pela Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM) – Marinha do Brasil.

Este guia apresenta como principais objetivos *(i)* orientar tecnicamente, a partir de diretrizes mínimas as obras de proteção e prevenção à erosão costeira; e *(ii)* contribuir para a otimização dos recursos públicos investidos na zona costeira, através de ações integradas entre os órgãos que os disponibilizam às obras costeiras, bem como as demais instituições com função regulatória às intervenções realizadas na zona costeira.

O presente estudo não se propôs a esgotar toda discussão acerca das possíveis abordagens (científica, metodológica, técnica, gerencial etc.) a respeito das alternativas e estratégias para gestão do ambiente costeiro, mitigação ou adaptação aos efeitos da erosão costeira atuante nas praias do PSII. Contudo, buscou apresentar sugestões que possam integrar proteção, prevenção e recuperação costeira a medidas sustentáveis de reordenamento e planejamento do uso e da ocupação da orla. Outrossim, buscou discutir

propostas alinhadas ao GIZC como uma alternativa às soluções prontas, genéricas e pontuais, frequentemente instaladas ao longo do litoral pernambucano, resultantes de uma gestão equivocada do ambiente costeiro.

4.3.3 Exposição do patrimônio à dinâmica costeira

A avaliação da exposição do patrimônio (público, privado, histórico e cultural) à dinâmica e aos processos costeiros atuantes foram baseadas (i) no estudo das variações morfológicas sazonais das feições arenosas mapeadas; (ii) na análise de imagens de sensoriamento remoto (*e.g.*, visitas de campo, aerolevantamentos e satélites); e (iii) na pesquisa por imagens e documentos históricos (*e.g.*, fotografias, mapas, plantas, iconografias) em bancos de dados de acervos públicos nacionais e internacionais.

Além disso, estudos sobre a dinâmica sedimentar (*e.g.*, Araújo et al., 2021), a hidrodinâmica (*e.g.*, Medeiros e Kjerfve, 1993); e o sítio arqueológico do Forte Orange (*e.g.*, Barthel, 2007), deram suporte a esta etapa.

4.3.3.1 Imagens de sensoriamento remoto

Foram utilizadas imagens modernas de (i) aerolevantamentos (1975 e 1989), pertencentes ao acervo institucional da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade de Pernambuco (SEMAS/PE); (ii) imagem orbital pancromática (2018) com resolução espacial de $5\text{m}^2/\text{pixel}$, da missão sino-brasileira CEBERS 4 PAN 5M (*China-Brazil Earth Resources Satellite 4*); e (iii) imagens aéreas de registro de campo (2017–2019), capturadas por um quadricóptero equipado com câmera fotográfica.

Estas imagens, assim como os mapas topo-batimétricos, deram suporte (i) às estratégias apresentadas para a gestão das praias do PSII; (ii) às análises da variação espaço-temporal (*i.e.*, sazonalidade) dos estoques sedimentares da área mapeada e das principais feições arenosas encontradas no PSII; e (iii) aos registros da evolução urbana no PSII e da condição atual de exposição ao processo erosivo do sítio arqueológico do Forte Orange e suas adjacências (*i.e.*, referencial histórico-contemporâneo).

4.3.3.2 Imagens e documentos históricos

Nesta etapa, foram pesquisadas (i) imagens históricas (*e.g.*, fotografias, plantas, iconografias e mapas) no Arquivo Nacional Holandês (<http://www.atlasofmutualheritage.nl>) e no acervo público digital do Instituto do

Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN (<http://portal.iphan.gov.br/>); e (ii) imagens publicadas em periódicos científicos (e.g., Laboratório de Arqueologia da UFPE; Albuquerque, 2009).

Associadas às imagens modernas, as fotografias, as plantas, as iconografias e os mapas históricos e antigos serviram para (i) documentar os primeiros danos ocasionados às estruturas remanescentes do Forte Orange e às imediações do seu sítio histórico, provocados pela dinâmica costeira e ação hidráulica do CSC-Sul no PSII; (ii) registrar o histórico das ações de intervenção e obras de recuperação contra os efeitos do processo erosivo; e (iii) utilizar o Forte Orange como um ponto referencial para o PSII.

4.4 RESULTADOS

4.4.1 Mapeamento topo-batimétrico

A figura 3 resume os resultados para o mapeamento da área correspondente à (i) faixa de praia, ao (ii) terraço de baixa-mar e aos (iii) bancos de areia localizados na margem insular de face leste, ao norte do CSC-Sul.

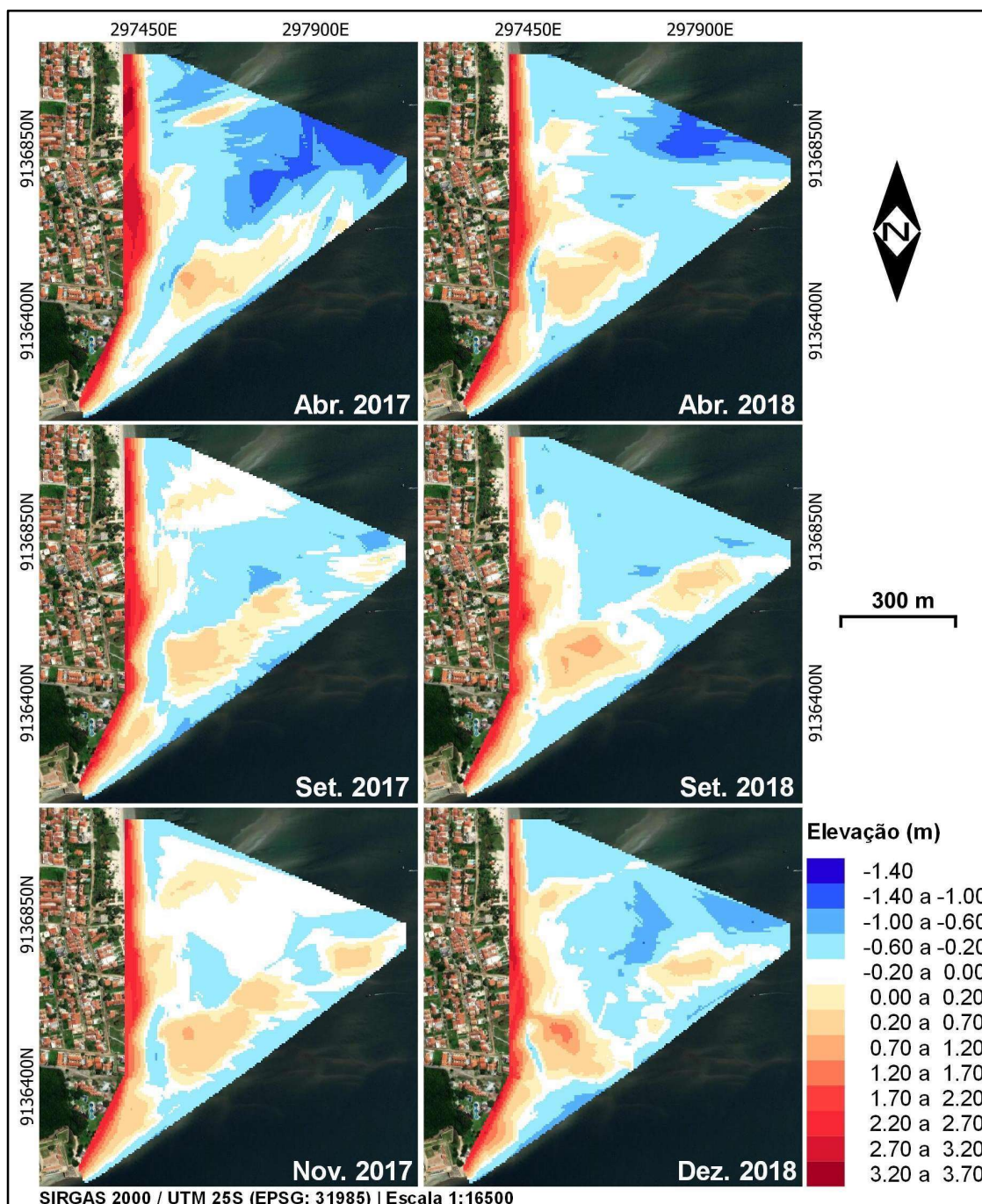
O mês de Abr.2017 (Figura 3) representou o período com as maiores cotas altimétricas para faixa de praia analisada (máximo de ~3.70m, próximo ao seu limite norte). Neste mês, foram observados dois bancos de areia bem destacados: (i) o maior, em orientação NE, oblíquo à margem leste, no limite sul da área mapeada; e (ii) o menor, junto ao seu limite norte, com orientação NE-E, quase perpendicular à faixa de praia.

Sua cota mais baixa foi de ~-1.28m, na depressão marcada no limite NE da área mapeada. Estes valores são correspondentes aos padrões morfológicos de distribuição dos estoques sedimentares para o período de início do inverno e fim do verão. Ou seja, o final, ou o máximo, da tendência de acúmulo sedimentar entre as zonas do pós-praia e do estirâncio (Souza et al., 2005), devido às condições meteoceanográficas de verão (i.e., perfil de calmaria).

Em Set.2017 (Figura 3) as cotas altimétricas máxima e mínima foram, respectivamente, ~3.10 e -1.00m. Indicando assim, uma remobilização dos estoques sedimentares na área mapeada. Para a área de estudo, caracteriza o final do período chuvoso (inverno), quando condições meteoceanográficas mais energéticas (i.e., ventos,

ondas e correntes mais fortes) mobilizaram os sedimentos estocados nas praias (ao longo do verão), acumulando-os entre as zonas do estirâncio e da face litorânea (Souza et al., 2005), na forma de extensos terraços de baixa-mar e bancos de areia (*i.e.*, perfil de tempestade). Nota-se o aumento das áreas e das cotas altimétricas correspondentes aos bancos de areia e ao terraço de baixa-mar localizado na porção central.

Figura 3. Mapeamento do relevo das feições arenosas da margem leste do PSII.



Fonte: o autor (2022).

O mês de Nov.2017 (Figura 3), registou cotas altimétricas de ~ 3.00 e -0.70m . Indicando assim, um possível atraso entre o início do período seco (verão) e a mudança para condições meteoceanográficas menos energéticas, que iniciariam um novo ciclo de aporte sedimentar às praias. Nota-se a continuidade da expansão em área e cota altimétrica dos bancos de areia, com a presença de uma nova porção destacada do banco maior, localizada no limite leste da área mapeada. Os bancos estão agora contíguos aos terraços de baixa-mar, com destaque para as porções sul, adjacente à sede do ICMBio/CMA, e central.

Em Abr.2018 (Figura 3), início da estação chuvosa seguinte, observa-se o padrão morfológico esperado para este período, registrando costas altimétricas máxima e mínima de, respectivamente, ~ 2.90 e -1.40m . Nota-se, no limite NE-E da área mapeada, (i) uma depressão na cota altimétrica do relevo submarino e a (ii) permanência da porção destacada do banco de areia, observada em Nov.2017. Além disso, observa-se os bancos de areia quase unidos na porção central da área mapeada, sendo contíguos aos terraços de baixa-mar localizados a sul e ao centro.

O mês de Set.2018 (Figura 3), final da estação chuvosa, seguiu o padrão morfológico esperado para o final do inverno. Apresentou cotas altimétricas entre ~ 3.00 e -0.80m , além do aumento em valores horizontais e verticais do banco de areia maior, destacando a sua separação, formando uma nova porção localizada próximo ao limite leste da área mapeada. Além disso, foi observado que o estoque sedimentar acomodou-se mais próximo à linha de costa e localizado mais ao centro da área mapeada, formando uma contiguidade em extensão desde o terraço de baixa-mar, a sul (imediações do ICMBio/CMA), até a porção central.

No mês de Dez.2018 (Figura 3), final da primeira metade do período seco, observou-se a característica distribuição dos estoques sedimentares para o verão, com indicação da migração dos sedimentos em direção à linha de costa. Ao norte do trecho de praia adjacente à sede do ICMBio/CMA, próximo à porção central da faixa de praia mapeada, foi registrada a formação de uma conexão entre o banco de areia e a praia adjacente. Além disso, foi observado a migração e o acúmulo sedimentar formando uma extensão contígua entre os bancos de areia e as áreas de terraços de baixa-mar na porção central da área mapeada. Neste mês, as cotas altimétricas máxima e mínima foram, respectivamente, ~ 3.20 e -1.00m .

4.4.1.1 Diferenças entre modelos de elevação

A Figura 4 apresenta os resultados da utilização do método DoD. Adaptando a metodologia para o cálculo da incerteza vertical (ou erro vertical), apresentada por Wiggins et al. (2019), o nível mínimo de detecção das diferenças entre cada mapa topográfico gerado foi de $\sim 0.10\text{m}$. Ou seja: (i) variações inferiores a $\pm 0.10\text{m}$, não foram consideradas significativas (*i.e.*, o método não foi capaz de diferenciar esta variação de um erro de medição ou amostragem); e (ii) superiores a $\pm 0.10\text{m}$, foram considerados perda ou ganho significativo (*i.e.*, o método foi capaz de detectar uma variação real). Por conveniência, para auxiliar na melhor visualização dos resultados, a escala de cor utilizada destacou apenas valores de variações superiores a $\pm 0.20\text{m}$.

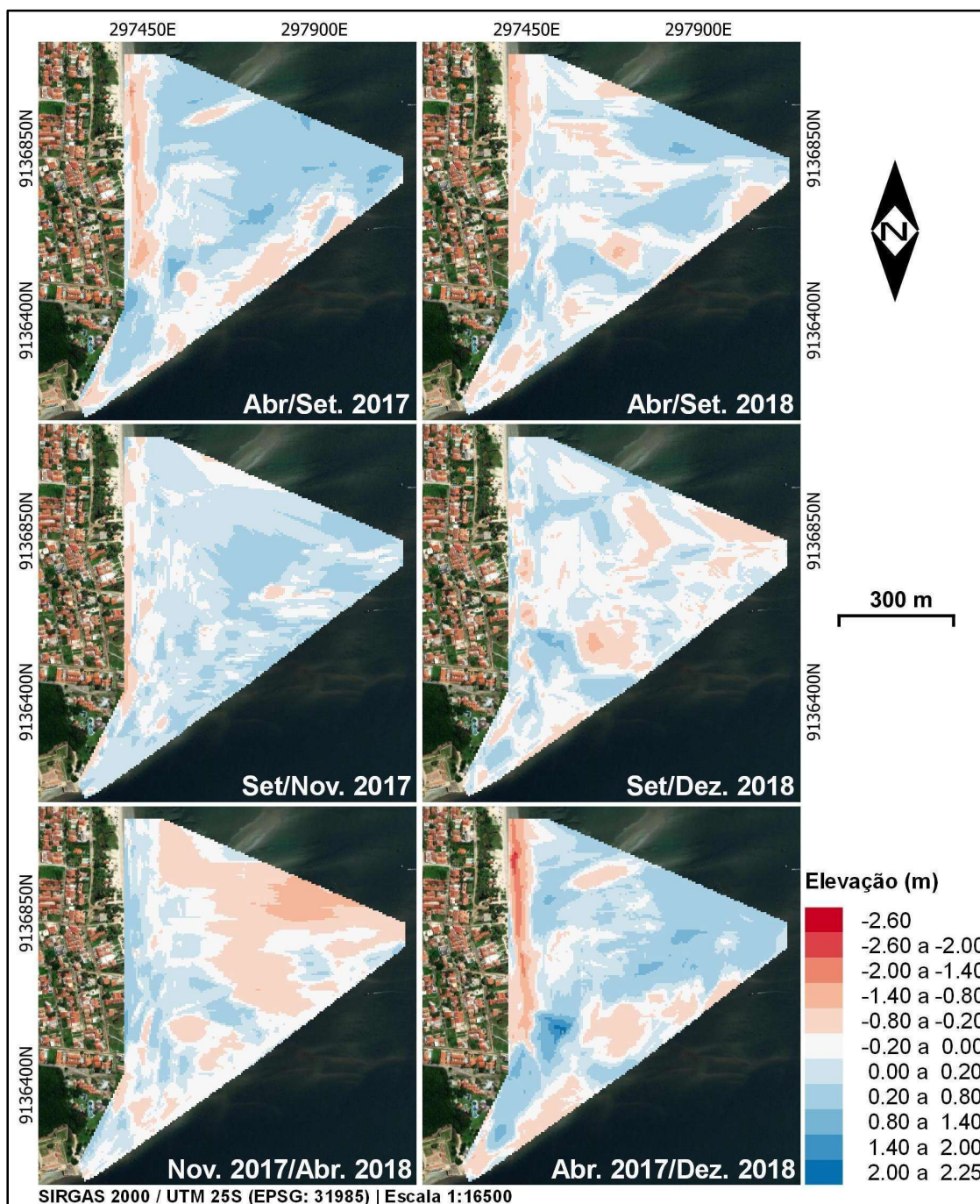
A diferença entre os modelos de elevação enriqueceu o entendimento da movimentação espaço-temporal dos estoques sedimentares na área mapeada. Entre Abr./Set.2017 (Figura 4) foram observadas (i) perdas de até $\sim 1.70\text{m}$, localizadas paralelamente à faixa de praia que se estende entre a porção central e a norte, e no limite junto ao baluarte SE do Forte Orange, seguindo a orientação NE do banco de areia maior; e (ii) ganhos verticais de até 1.30m , distribuídos ao longo das extensões dos terraços de baixa-mar e bancos de areia. Dessa forma, evidenciando o padrão morfológico esperado para o período de inverno das praias analisadas (*i.e.*, movimentação dos estoques sedimentares em direção aos terraços de baixa-mar e bancos de areia), além da variação espacial dos bancos de areia.

Entre Set./Nov. 2017 (Figura 4) foram observados ganhos verticais de até $\sim 0.70\text{m}$, distribuídos entre o estirâncio e a face litorânea (Souza et al., 2005), e perdas de até $\sim 1.07\text{m}$, observadas em uma estreita faixa paralela à orientação das praias. Estes resultados condizem com a possibilidade da permanência do padrão morfológico de inverno ao longo dos primeiros meses de verão (Figura 3, Nov.2017), reforçando assim o entendimento da existência de um possível atraso entre a chegada do verão e o estabelecimento do padrão morfológico esperado para este período (*i.e.*, um novo ciclo de sedimentos chegando às praias).

A diferença entre os meses de Nov.2017 e Abr.2018 (verão), registrou o padrão esperado para este período, concentrando as perdas altimétricas na face litorânea (Souza et al., 2005), chegando a $\sim 1.20\text{m}$ no limite NE; e os ganhos ($\sim 1.00\text{m}$) concentrados entre o estirâncio e o pós-praia (face da praia). Destacam-se também as variações altimétricas

que indicam a movimentação dos bancos de areia em direção à faixa de praia da porção central da área de estudo (Figura 4; Nov.2017/Abr.2018).

Figura 4. Diferenças entre os modelos de elevação: variações altimétricas do relevo mapeado e movimentação dos estoques de sedimento, expresso em termos de ganho (azul) e perda (vermelho).



Fonte: o autor (2022).

Entre os meses do inverno seguinte (Figura 4, Abr/Set.2018), observou-se o padrão esperado para o período, com perdas concentradas junto à faixa de praia (~1.40m) e os ganhos junto aos bancos de areia (~1.20m). O período de verão subsequente (figura 4, Set/Dez.2018) apresentou valores de perdas e ganhos de $\pm 1.15\text{m}$, distribuídos quase homogeneamente ao longo da área de estudo, porém com destaque para movimentação do estoque sedimentar que deu origem à conexão entre o banco de areia maior e a praia.

O método utilizado permitiu registrar as diferenças entre o início e o fim da série amostral dos mapas topo-batimétricos, localizando as principais regiões da área de estudo onde se concentraram as perdas e ganhos altimétricos (*i.e.*, o balanço altimétrico). A Figura 4 Abr.2017/Dez.2018 localiza as principais perdas para o período estudado (máx. ~-2.60m), de sul para norte, (i) adjacentes à praia entre o baluarte SE do Forte Orange e à sede do ICMBio/CMA; (ii) na movimentação do banco de areia maior que deu origem à conexão deste à praia; e (iii) paralela à faixa de praia que estende-se em orientação S–N até o limite norte da área mapeada. Os ganhos (máx. ~2.25m) concentraram-se (i) adjacentes à praia do ICMBio/CMA; (ii) na conexão entre o banco de areia e a praia adjacente; e (iii) na área mais afastada da face litorânea, junto ao limite NE.

4.4.2 Estratégias voltadas à gestão e uso ao sustentável do ambiente costeiro

Os dados disponibilizados pelo IBGE (até 2022) dão conta que o município da Ilha de Itamaracá, no ano de 2017, realizou uma receita total de R\$ 64.403.330,00 e empenhou despesas no valor de R\$ 60.174.330,00. Em 2019, alcançou um PIB *per capita* de R\$ 9.679,82 e uma população fixa estimada de 27.076 habitantes, em 2021. Sendo assim, estes dados apontam para uma dificuldade do município da Ilha de Itamaracá para realizar investimentos anuais necessários, em projetos e obras de engenharia, para conter, controlar ou mesmo recuperar o ambiente costeiro dos efeitos da erosão costeira nos pontos mais críticos do seu litoral.

Contudo, na última década, ações exitosas como a aprovação do Plano de Gestão Integrada da Orla Marítima de Itamaracá – PE (2010) e a criação do seu Comitê Gestor (Decreto Municipal nº 30/2012), buscou ordenar uma gestão participativa entre os representantes da sociedade civil local, dos entes federativos, da iniciativa privada e das demais organizações integrantes deste comitê paritário (ME, 2022). O referido plano de gestão tem por objetivo principal equilibrar o crescimento econômico e turístico da orla,

evitando assim a degradação e o dano ambiental. Baseadas no Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira (Brasil, 2018), as estratégias aqui apresentadas visaram compatibilizar o uso e a ocupação do ambiente costeiro do PSII com a sua dinâmica e processos naturais, apresentando medidas de prevenção, de mitigação, adaptativas e metodologias adequadas à gestão ambiental de suas praias.

No presente estudo, as estratégias para gestão sustentável do ambiente costeiro do PSII, entendidas como as mais adequadas à área de estudo, foram divididas em dois grupos: (i) ações não estruturais, as quais atuam preventivamente à erosão costeira por meio do planejamento de ações de ordenamento territorial e gerenciamento costeiro (e.g., Projeto Orla; ME, 2022), que dependem da compatibilização entre políticas públicas, sendo mais eficazes, menos onerosas e de longo prazo de duração; e (ii) ações estruturais, quando as ações preventivas não bastam ou não foram implementadas a tempo, são executadas obras de proteção e recuperação costeira utilizando estruturas fixas (e.g., muros de proteção, quebra-mares, espigões e aterro hidráulico). Contudo, obras na zona costeira desconectadas a metodologias adequadas e estudos oceanográficos prévios podem apresentar efeitos indesejados com altos custos financeiros e ambientais.

4.4.2.1 Ações não estruturais

Inicialmente, para implementação destas ações, o município da Ilha de Itamaracá pode contar com o arcabouço legal garantido pela legislação do Estado de Pernambuco, através (i) da Lei nº 14.258/2010, que instituiu a Política Estadual de Gerenciamento Costeiro (PEGC); (ii) do Decreto nº 42.010/2015, que institui a linha de costa da zona costeira de Pernambuco; (iii) da Lei nº 17.429/2021, que dispõe sobre o licenciamento ambiental, infrações e sanções administrativas ao meio ambiente; pela legislação Federal, através (iv) da Lei nº 7.661/1988, que instituiu o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC); e (v) do Decreto nº 5300/2004, que regulamenta o PNGC. Além destes, a administração municipal implementou dois instrumentos baseados em GIZC: (vi) o Plano de Gestão Integrada da Orla Marítima de Itamaracá – PE (PGI Orla Itamaracá, 2010); e (vii) o Decreto Municipal nº 28/2012, que aprovou o Zoneamento Ambiental e Territorial das Atividades Náuticas da Ilha de Itamaracá – ZATAN Itamaracá.

Dessa forma, entre a legislação disponível e os planos de gestão e zoneamento do ambiente costeiro, ao todo, o município da Ilha de Itamaracá conta, ao menos, sete instrumentos normativos baseados na GIZC, condizentes à realidade e à capacidade

político-administrativa e financeira municipal. Outra ação não estrutural comumente observada ao longo do litoral da Ilha de Itamaracá é a retração (Brasil, 2018). Onde ocorre a realocação permanente da atividade, ou o abandono da infraestrutura, para a reacomodação em um novo local. Contudo, esta opção, geralmente, não é realizada de forma preventiva no PSII, mas somente após todos os recursos disponíveis terem sido gastos na tentativa de manutenção das estruturas afetadas pelo processo erosivo.

A última ação não estrutural a ser apresentada para a área de estudo é a opção de não interferir no processo costeiro atuante (erosão ou sedimentação), *i.e.*, não fazer nada (Brasil, 2018). Contudo, esta alternativa é polêmica e, por vezes, malvista pela população e pelos gestores municipais. Sendo assim, aconselha-se que esta opção seja indicada quando as ações não estruturais e estruturais sejam consideradas inviáveis, *e.g.*, por razões econômicas, de custo-benefício, ambientais, técnicas etc.

4.4.2.2 Ações estruturais

Como apresentado, o município da Ilha de Itamaracá pode apresentar dificuldades em dispor dos recursos financeiros necessários aos investimentos para custear projetos e obras de engenharia costeira em seu litoral. Sendo assim, o município teria de estabelecer parcerias, ou solicitar o apoio, com outros entes federativos (estadual e federal) para um eventual financiamento, ou execução, de ações estruturais para a mitigação e as adaptações necessárias para o uso sustentável e a gestão do seu ambiente costeiro.

Neste contexto, o Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira (Brasil, 2018) apresenta os projetos de alimentação praial (aterros hidráulicos) como sendo as melhores soluções para mitigar os efeitos da erosão costeira. Este tipo de obra recupera o espaço recreacional, restabelece a compartimentação morfológica e biológica, e é considerada a solução tecnológica menos intrusiva dentre as alternativas oferecidas pela engenharia costeira. Segundo o referido guia, a alimentação artificial da praia introduz artificialmente o sedimento ao sistema praial, restaurando a faixa de areia com impactos diretos mínimos às áreas adjacentes.

Entretanto, a alimentação artificial de uma praia requer um alto investimento tanto em estudos prévios e projeto quanto na execução da obra (*e.g.*, ITEP, 2012). Além disso, assim como toda obra pensada para o ambiente costeiro, requer atenção máxima à legislação pertinente e ao processo de licenciamento. Somado a isto, a alimentação

artificial de uma praia, obrigatoriamente, exigirá que um outro ambiente seja o doador de sedimentos, o que poderá implicar em novos licenciamentos e estudos específicos (ITEP, 2012; Brasil, 2018). Dessa forma, a regeneração artificial de uma praia pode representar um desafio tanto técnico quanto financeiro, tornando esta opção inviável em alguns casos.

Ações estruturais consistem em intervenções onerosas que exigem um cronograma de manutenção eficiente (também oneroso), por vezes custeados pelo erário. Assim sendo, estas obras devem atender à comunidade afetada como um todo e não apenas a interesses individuais, envolvendo as partes interessadas em um planejamento integrado junto aos órgãos competentes e entes federativos.

4.4.3 Evolução morfológica e urbana do PSII

No presente estudo, os registros mais antigos a respeito da ocupação do PSII foram encontrados no Arquivo Nacional Holandês: mapas e cartas marítimas da costa pernambucana (iconografias) do período holandês, da então capitania hereditária de Itamaracá, que localizavam o CSC-Sul e seus afluentes, o rio Igarassu, na margem sul (município de Igarassu), e o rio Paripe, na margem norte (município da Ilha de Itamaracá).

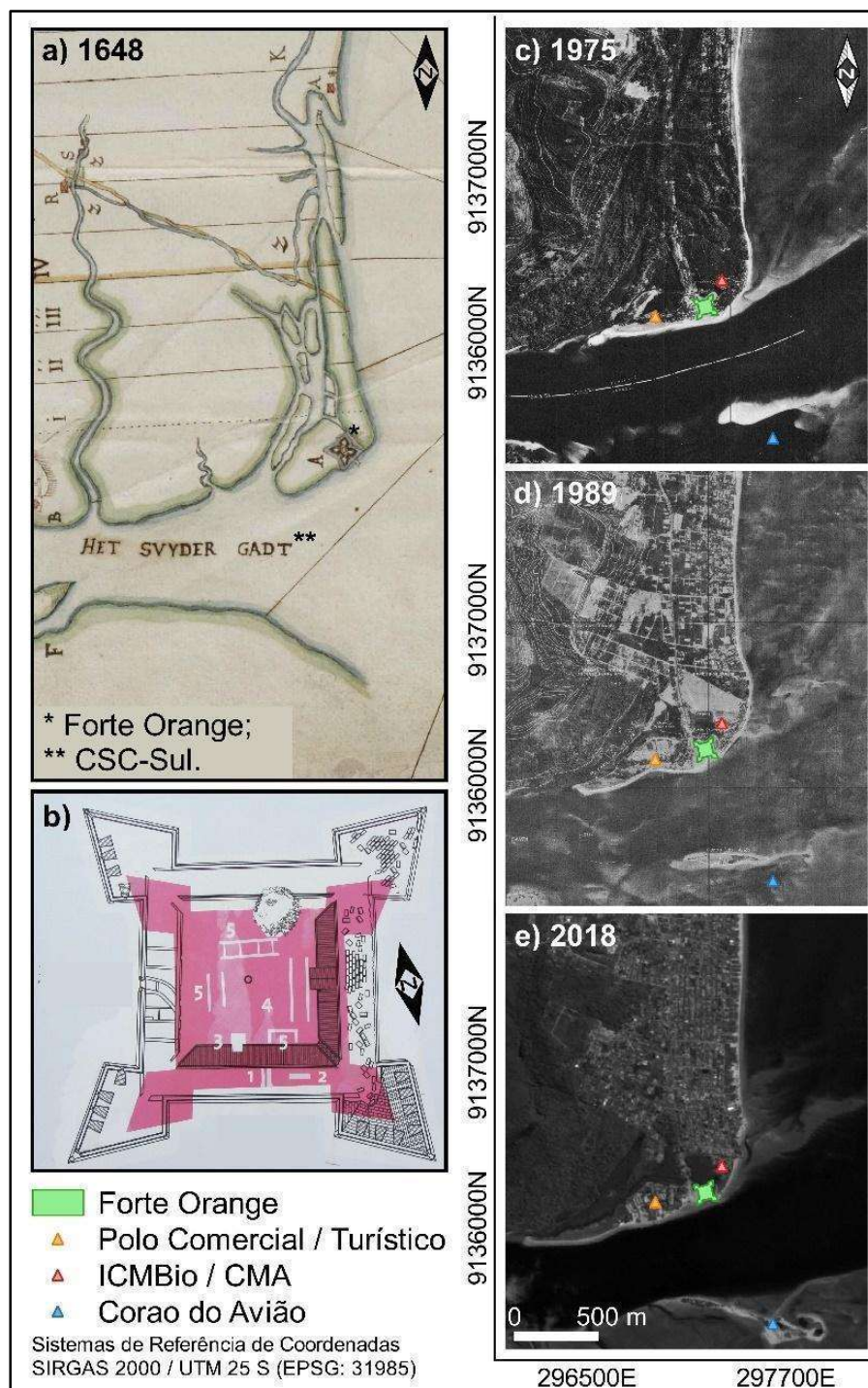
A Figura 5 ilustra a evolução morfológica das feições arenosas e do desenvolvimento urbano no PSII, assim como a localização dos vestígios arqueológicos do forte holandês em relação à fortaleza luso-brasileira. Os registros aqui analisados indicaram que o Forte Orange foi construído sobre uma ilha barreira, a qual era separada da massa de terra insular principal por uma angra (Figura 5a). A Figura 5b ilustra o desenho esquemático de uma planta baixa onde foi possível entender o que os estudos arqueológicos identificaram como sendo os vestígios do forte holandês (em rosa) circunscritos pelas estruturas remanescentes da fortaleza luso-brasileira (linhas pretas).

Estes achados registraram as diferenças a respeito das dimensões, das configurações internas e do posicionamento entre essas duas estruturas, evidenciando que a fortaleza luso-brasileira não derivou significativamente da localização do forte construído originalmente. As alterações mais relevantes foram promovidas por reformas que aumentaram suas estruturas e a área total que a fortaleza passou a ocupar (Figura 5b).

A análise integrada das imagens modernas e históricas possibilitou observar como a dinâmica hidráulica do CSC-Sul movimentou seus estoques sedimentares ao longo dos

séculos. Antes possuindo uma ilha barreira (Figura 5a), o PSII desenvolveu e deu lugar a extensos terraços de baixa-mar, a grandes bancos de areia perpendiculares à costa e à ilha da Coroa do Avião (Figuras 5c, 5d e 5e).

Figura 5. Evolução morfológica e urbana da área de estudo: **a)** Mapa do período holandês do PSII; **b)** Forte holandês (em rosa) circunscrito pela fortaleza luso-brasileira (linhas pretas); **c); d) e e)** Pontal sul da Ilha de Itamaracá.



Fontes: **a)** Arquivo Nacional Holandês; **b)** IPHAN; **c) e d)** SEMAS-PE; **e)** CEBERS 4.

Até meados da década de 1970, o PSII era praticamente inabitado (Figura 5c). Contudo, esta condição mudou ao longo da década de 1980 (Figura 5d) com o estabelecimento de grandes loteamentos e empreendimentos hoteleiros, além do aumento das residências de segunda moradia destinadas ao veraneio. Atualmente (Figura 5e), o PSII apresenta uma urbanização consolidada e voltada, principalmente, à população flutuante de veraneio e à cadeia de serviços e infraestrutura demandados por este público e a população residente.

Observando a sequência das Figuras 5c, 5d e 5e, destaca-se o recuo da linha de costa e a movimentação dos estoques sedimentares entre a praia e a área dos bancos de areia nas imediações da sede do ICMBio/CMA. Nota-se que a posição do Forte Orange (Fortaleza de Santa Cruz) em relação ao CSC-Sul não foi alterada significativamente, considerando a documentação e o período aqui analisado.

As imagens analisadas permitiram reconhecer que as estruturas remanescentes da fortaleza luso-brasileira, na prática, ainda permanecem na mesma localização de seu antecessor holandês e relativamente bem preservadas, tornando-as um ponto de referência consistente para observação do entorno do seu sítio arqueológico, que sofreu mudanças significativas ao longo de tempo (*e.g.*, erosão costeira e urbanização).

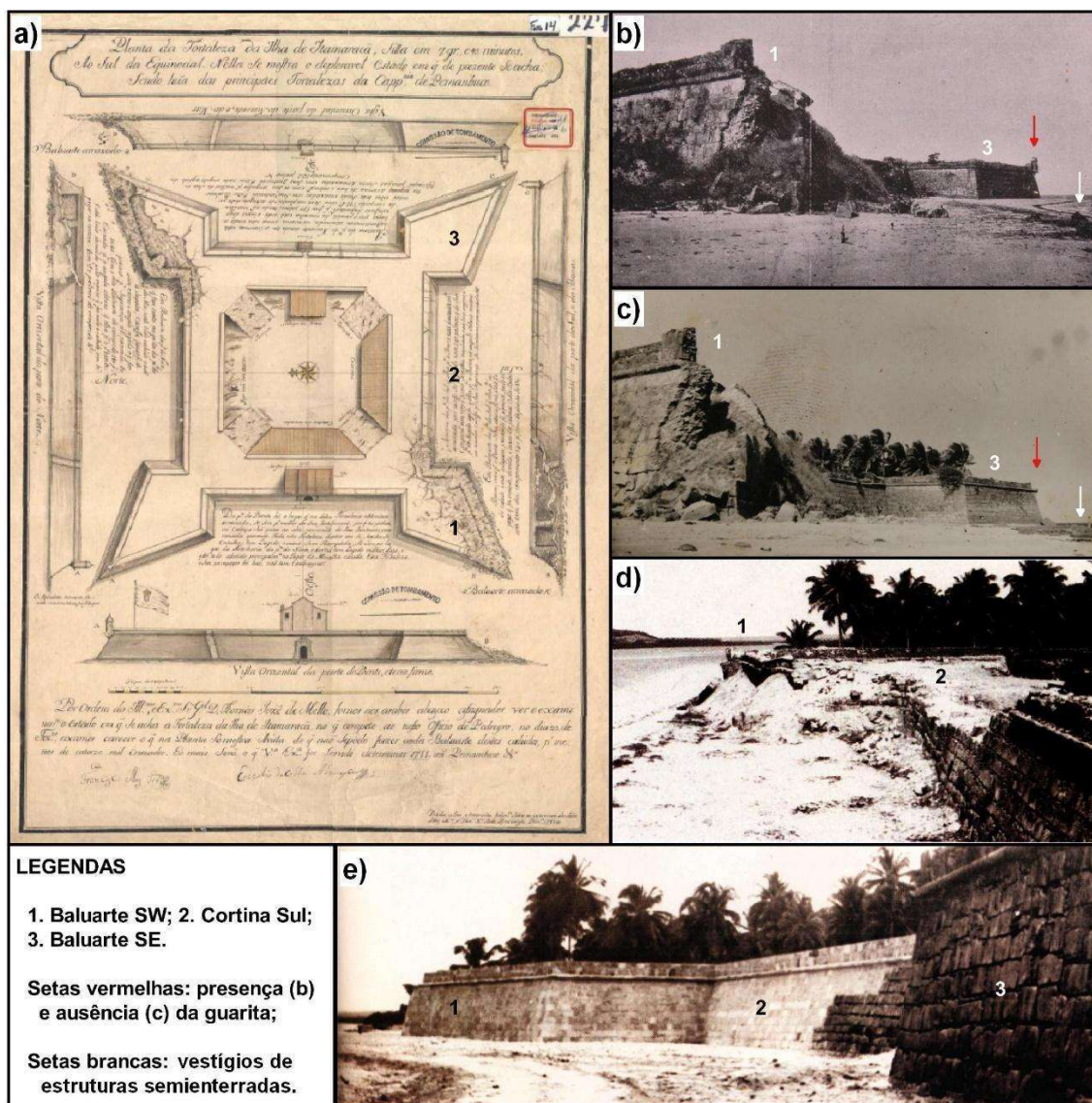
4.4.4 Exposição do patrimônio histórico e cultural à erosão

Entendendo a Fortaleza de Santa Cruz como um ponto de referência seguro, tanto pelas marcas e vestígios que traz em suas estruturas, quanto por sua localização, e o mais antigo ainda disponível, foi o primeiro patrimônio a ser analisado quanto à sua exposição ao processo erosivo. Os registros fotográficos, mapas e plantas analisados permitiram identificar as partes mais vulneráveis da estrutura da fortaleza luso-brasileira. Uma planta baixa de danos de 1788, registrou os principais problemas e agravos presentes em suas estruturas à época (Figura 6a).

A Figura 6a ilustra os baluartes SW (1) e NE como sendo os pontos da fortaleza mais danificados à época. As Figuras 6b e 6c ilustram o registro de vestígios de estruturas externas da fortaleza (setas brancas), parcialmente aterrados na faixa de praia defronte à cortina sul (2), próximas à “linha do deixa” da última preamar.

A Figura 6b representa a fotografia mais antiga analisada no presente trabalho. Nela é possível observar a existência de uma guarita do baluarte SE (3) e o estado de preservação deste em relação ao baluarte SW (1), com parte de sua estrutura desmoronada, e ambos diretamente expostos à ação hidráulica do CSC-Sul. A figura 6c ilustra as condições de preservação da fortaleza no início da década de 1950. Nota-se a ausência da guarita do baluarte SE (3) (seta vermelha). Além disso, destaca-se a semelhança no estado de preservação entre as décadas de 1920 e 1950.

Figura 6. Danos à estrutura da Fortaleza de Santa Cruz: **a)** Planta de danos de 1788; **b); c) e d)** Ruínas do baluarte SW e da cortina sul (décadas de 1920, 1950 e 1970, respectivamente); **e)** Restauração do baluarte SW e da cortina sul.



Fontes: **a)** Barthel (2007) e Albuquerque (2009); **b); c) e d)** IPHAN; **e)** Albuquerque (2009) e IPHAN.

As Figuras 6d e 6e ilustram o antes e o depois (respectivamente) da restauração executada pelo IPHAN, no início da década de 1970, onde foram reconstruídos (entre outros) os baluartes e as cortinas em ruínas. Basicamente, as mesmas estruturas identificadas pela planta de danos de 1788.

Considerando a documentação analisada, é possível observar que o baluarte SE (3) e sua junção à cortina sul (2) foram as estruturas que melhor suportaram a ação direta da dinâmica costeira do CSC-Sul (Figura 6). Não foram encontrados indícios que o baluarte NW, a entrada da fortaleza luso-brasileira (cortina oeste) e sua cortina leste tenham sofrido exposição direta à força hidráulica do CSC-Sul.

4.4.5 Exposição do patrimônio público e privado à erosão

O entorno do sítio arqueológico do Forte Orange possui restaurantes, bares na praia, equipamentos públicos e privados de apoio ao comércio e ao turismo (*e.g.*, vias de acesso, calçadas, estacionamentos, barracas, cadeiras etc.), marinas, hotéis, pousadas e residências de 1ª e 2ª moradia. Além disso, abriga uma pequena área de manguezal que integra um sistema estuarino maior.

O PSII é uma área urbanizada que cresceu com a exploração turística e imobiliária com pouco planejamento urbano. Sendo assim, apresenta problemas de ordem pública, tais como superexploração de seus recursos naturais, poluição, dificuldades na coleta e destinação de resíduos, saneamento básico e construções irregulares. Somado a isso, na primeira década dos anos 2000, um processo erosivo provocado pela regressão da linha de costa provocou grandes prejuízos a residências e ao comércio de beira mar, além de agravar a exposição do Forte Orange à erosão de suas praias.

A Figura 7 ilustra o Forte Orange e o entorno do seu sítio arqueológico. Atualmente, as estruturas da fortaleza estão limitadas a norte por um pequeno fragmento de manguezal e, a sul, pelas águas do CSC-Sul (Figuras 7a e 7d). Seus baluartes SE (Figura 7b) e SW (Figura 7c), e toda a extensão de sua cortina sul, nos períodos de preamar, permanecem sob a ação direta das ondas e das correntes de maré do CSC-Sul, obrigando o comércio de bares e restaurantes do seu entorno a recuar suas estruturas, e a diminuir sua área de atuação.

Figura 7. Fortaleza de Santa Cruz (preamar): **a)** Área de manguezal, a norte, e CSC-Sul, a sul; **b)** Baluarte SE e cortina sul; **c)** Baluarte SW e barracas de praia; e **d)** Praia do polo comercial e turístico e Forte Orange; e **e)** Recuo da linha de costa a oeste da fortaleza.



Fonte: *Google Earth – Maxar Technologies* (2007); e o autor (2018).

Além disso, de forma emergencial e improvisada, muitos construíram de forma precária estruturas para conter os efeitos do processo erosivo, através da tentativa de fixação da linha de costa. A Figura 7d apresenta a configuração da faixa de praia arenosa em 2007, adjacentes ao polo comercial e turístico do Forte Orange, onde é possível observar que o baluarte SW e a cortina sul não estavam sob a ação direta do CSC-Sul. Atualmente, como permite observar a Figura 7e, a linha de costa retrocedeu de forma significativa, expondo totalmente a muralha interna aos baluartes SE e SW à ação direta das águas do CSC-Sul durante a preamar.

A Figura 8 ilustra o agravamento do processo erosivo entre 2007 e 2017, na faixa de praia arenosa da margem leste (figuras 8a e 8b, respectivamente). Como pode ser observado, a linha de costa retrocedeu de forma significativa (marcadores coloridos destacam os pontos de correspondências entre as imagens). Os estoques sedimentares, hora acomodados na zona do pós-praia na forma de praia emersa (Figura 8a), gradativamente, foram remobilizados pela dinâmica costeira local, estreitando a faixa de

praia e formando uma zona de estirâncio com extensas áreas de terraços de baixa-mar e bancos areia (Figura 8b).

Esta reconfiguração morfológica trouxe prejuízos aos terrenos públicos (sede do ICMBio/CMA) e privados (residências e comércio de beira-mar), ocasionando a perda de áreas significativas de terrenos à beira-mar e a destruição por desmoronamento de benfeitorias (*i.e.*, muros, postes de iluminação pública, vias e acessos públicos, quiosques, casas etc.). Como resultado, obras emergenciais e pontuais, e a realocação de estruturas, foram realizadas ao longo deste trecho de litoral (Figura 8b).

Figura 8. Vista aérea do recuo da linha de costa na margem leste, imediações do ICMBio/CMA (baixa-mar): **a)** Faixa de praia e linha de costa em 2007; e **b)** Recuo da linha de costa e terraço de baixa-mar contíguo a bancos de areia em 2017.



Fontes: **a)** Google Earth – Maxar Technologies (2007); e **b)** StudioLUMIX (2017).

4.5 DISCUSSÃO

4.5.1 Variação sazonal dos estoques sedimentares

A análise da série amostral dos mapas topo-batimétricos trouxe informações importantes e confiáveis acerca da dinâmica que interfere na disponibilidade e movimentação dos estoques sedimentares e, conseqüentemente, para o uso, a ocupação, a proteção e a preservação do ambiente costeiro da área de estudo. Neste contexto,

Gonçalves et al. (2019) classificaram o PSII como uma zona costeira altamente impactada pela atividade humana, além de destacarem a necessidade de uma gestão costeira integrada que considere o atual cenário encontrado nestas praias. Na mesma linha de entendimento, Lima et al. (2017), entre 2000 e 2010, observaram que o município da Ilha de Itamaracá apresentava uma GIZC aquém de suas necessidades, destacando, entretanto, uma melhora em 2010 quanto aos indicadores sociais e econômicos.

A variação espaço-temporal dos estoques sedimentares distribuídos na área mapeada mostrou correspondência com a sazonalidade dos períodos chuvoso e seco. Onde, o padrão esperado de aporte sedimentar às praias ao longo do verão e a respectiva erosão, com a acomodação dos sedimentos na forma de bancos de areia adjacentes à praia, ao longo do inverno, foi registrada.

Araújo et al. (2021) observaram que estas praias recebem aporte sedimentar entre a segunda metade do verão e a primeira metade do inverno, e perdem sedimentos entre a segunda metade do inverno e a primeira metade do verão. Estes registros corroboram com o padrão observado em Nov.2017 e Dez.2018, onde os estoques sedimentares, de forma geral, ainda permaneciam acomodados na forma de bancos de areia adjacentes às praias.

Entre outros achados, Araújo et al. (2021) ainda observaram que *(i)* o balanço sedimentar nas praias da margem leste (orientação S–N) do PSII é negativo; *(ii)* a fuga de sedimento destas praias apresenta uma possível relação de causa e efeito com o aumento energético da potência de onda nos períodos de inverno; e *(iii)* a dinâmica sedimentar deste trecho acomoda seus estoques junto à faixa de praia que se estende entre as imediações da sede do ICMBio/CMA e a porção central da área mapeada.

Estas observações corroboram os resultados encontrados no presente estudo, ilustrados pela série amostral de mapas topo-batimétricos e a sua análise pelo método DoD. Onde, apesar do balanço negativo (Abr.2017/Dez.2018), *(i)* o ganho em cota altimétrica da zona do pós-praia e estirâncio concentrou-se entre as porções sul e central, enquanto a perda localizou-se, principalmente, entre o centro e o norte da área mapeada; e *(ii)* os meses de Set.2017/2018 corresponderam ao padrão morfológico esperado para o fim do período de inverno, com indícios de um possível atraso entre a chegada do verão e o estabelecimento do seu padrão morfológico característico (*e.g.*, Nov.2017).

Wiggins et al. (2019), no Reino Unido e Silva et al. (2021), na Austrália, encontraram correspondências em seus estudos entre os padrões morfológicos e a distribuição dos estoques sedimentares e a energia do clima de onda correspondente. Estes autores discutiram a respeito das implicações de planejamento e gestão do ambiente, a partir do entendimento fornecido por seus dados e análises, que as respectivas comunidades costeiras precisariam lidar.

4.5.2 Gestão sustentável do ambiente costeiro

Com relação à GIZC, os documentos e os estudos, além do arcabouço legal, aqui apresentados (subitem 4.4.2.) evidenciaram que a administração municipal da Ilha de Itamaracá tem à sua disposição instrumentos adequados para a implementação de uma eficiente gestão integrada do seu ambiente costeiro.

Contudo, como observaram Kosyan e Velikova (2015), entre os estados costeiros do Mar Negro, a existência de conselhos e entidades consultivas e deliberativas (*e.g.*, o comitê gestor do PGI Orla Itamaracá), não garantem uma GIZC eficiente e, tampouco, a participação e o interesse popular necessários. Estes autores basearam-se em questões que são familiares à gestão costeira em Pernambuco: *(i)* práticas que desconsideram a legislação em vigor (*e.g.*, construções, usos e ocupações irregulares); *(ii)* desenvolvimento costeiro não sustentável; *(iii)* falta de dados e de pesquisas científicas apropriadas; e *(iv)* o baixo entendimento dos benefícios da GIZC por parte da população em geral e dos gestores municipais.

No Brasil, Nicolodi et al. (2021), analisando o processo de implementação do ZEEC no litoral dos estados costeiros, observaram que a gestão costeira precisa melhorar a geração e a disponibilização de produtos técnicos, a articulação entre os setores da sociedade, incentivar a participação pública e a integração entre as equipes técnicas e as esferas governamentais, orientando sobre os processos de licenciamento ambiental, buscando a otimização de esforços e recursos (*e.g.*, financeiros, materiais e humanos) para o desenvolvimento sustentável da zona costeira.

Com relação às ações estruturais, até então observadas no PSII (*e.g.*, muros de contenção, espigões, enrocamentos diversos), estas foram focadas, exclusivamente, na proteção das infraestruturas e benfeitorias ameaçadas pelo processo erosivo. Em sua

maioria, estas ações foram realizadas de forma pontual e improvisada, sem qualquer análise ou estudo técnico-científico, ou o devido atendimento às normas de segurança em engenharia. Estas intervenções não são duradouras e não controlam o processo erosivo atuante, podendo até agravá-lo (Souza, 2009; Kosyan e Velikova, 2015; Brasil, 2018).

Vos et al. (2019) destaca a necessidade e as vantagens de projetos de proteção e recuperações costeiras que considerem a praia e o sistema de dunas como uma barreira de proteção natural, além da promoção de um ecossistema, conferindo benefícios ecológicos, biodiversidade e segurança às comunidades costeiras. Alinhado a esta linha de entendimento, O Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira (Brasil, 2018) apresenta a alimentação artificial das praias como sendo a metodologia mais eficaz para o controle e a recuperação de áreas afetadas pela erosão costeira.

Segundo Luijendijk et al. (2019), a alimentação artificial das praias, atualmente, vem se configurando como a abordagem mais comum para mitigar os efeitos da erosão costeira em praias arenosas, porém alerta sobre a necessidade dos dados refletirem informações sobre a evolução esperada em escala de tempo de décadas, o que dará suporte a este tipo de intervenção, aumentando suas chances de sucesso. Ainda de acordo com Alfredini e Arasaki (2009), este tipo de intervenção permite estabilizar ou ampliar praias sujeitas a erosão, ou criar uma nova praia, que é a configuração morfológica mais adequada para absorver a energia das ondas.

As praias são ambientes multifacetados que englobam uma série de aspectos, usos e funções (*e.g.*, biológicos, ambientais, conservacionistas, sociais, culturais, religiosos, econômicos etc.). Dessa forma, mesmo que a alimentação artificial de uma praia seja entendida como uma ação estrutural que gera menos efeitos adversos ao ambiente natural, também possui seus riscos e limitações.

Uma “engorda” de praia é uma obra de engenharia civil, muitas vezes conduzida através de aterros hidráulicos (Alfredini e Arasaki, 2009), os quais exercem impactos diretos tanto na área doadora quanto na praia receptora dos sedimentos, com potencial de alterar e prejudicar os ecossistemas envolvidos (*e.g.*, excessivo arrastamento das areias às praias adjacentes, podendo alterar aspectos ambientais, de uso e culturais). Entretanto, as limitações mais observadas ao se cogitar este tipo de intervenção são a

disponibilidade e os custos econômicos dos materiais de empréstimos (*e.g.*, sedimentos), que, por vezes, torna a obra inviável.

4.5.3 Exposição do patrimônio à erosão costeira

O pontal sul da Ilha de Itamaracá possui alta importância turística e econômica para o município da Ilha de Itamaracá. Esta área possui beleza cênica e características ambientais atrativas ao turismo de sol e praia, além de guardar e contar uma parte importante da história de Pernambuco e do Brasil. Dessa forma, recomenda-se especial cuidado na preservação das características naturais, culturais e históricas deste ambiente.

Os resultados apresentados no presente estudo evidenciaram que o convívio com os efeitos da erosão costeira no PSII possui registros desde o período colonial holandês e português. Combinando estes resultados aos obtidos por meio de imagens modernas de sensoriamento remoto e imagens e documentos históricos, foi possível reconhecer que o PSII, o sítio arqueológico e as estruturas do Forte Orange, historicamente, sempre estiveram expostos a processos erosivos.

Os documentos históricos pesquisados e os estudos arqueológicos realizados nas estruturas do Forte Orange, evidenciaram que esta não é a primeira vez que a fortaleza está exposta à ação direta das águas do CSC-Sul; a presença de carapaças de ostras, encontradas nos vestígios de suas estruturas externas, confirmaram que estas já estiveram em contato permanente com a água (*e.g.*, Barthel, 2007; Albuquerque, 2010a e 2010b; Oliveira & Santos, 2014).

Segundo Barthel (2007), em 1688, os avanços do mar e do canal destruíram uma estacada que protegia a fortaleza, exigindo a reparação desta estrutura. Em seus estudos, esta autora apresenta um mapa de danos de 1788 (Figura 6a), elaborado pelo então *Capitão de Engenharia Antônio Bernardino Pereira do Lago*, intitulado “Planta da Fortaleza da ilha de Itamaracá”. Este documento (de propriedade do arquivo do Exército do Rio de Janeiro) ilustra a posição dos quartéis e dos baluartes, dois deles arruinados (SW e NE), onde foram anotadas recomendações de reforço relacionadas “às pancadas do mar” ao baluarte SW, adjacente ao CSC-Sul, e à cortina de face sul. O outro baluarte danificado (NE, cortina de face norte) encontra-se, atualmente, vizinho a um pequeno manguezal (localizado entre a fortaleza e a sede do ICMBio/CMA). Este, possivelmente,

remanescente da antiga angra que separava a ilha barreira do bloco de terra principal da ilha de Itamaracá (Barthel, 2007; Albuquerque, 2010b; Oliveira & Santos, 2014).

Atualmente, a estrutura principal da fortaleza, os vestígios de suas estruturas externas e as praias adjacentes encontram-se todos integrados ao bloco principal da Ilha. Os registros da antiga ilha barreira são apenas documentais (antigas iconografias, mapas ou cartas marítimas do período holandês).

Em caso semelhante, Albuquerque (2010b), relata um outro possível registro da influência dos processos erosivos junto às estruturas do Forte Orange e ao entorno do seu sítio arqueológico. Plantas do forte holandês (~1633–1654) registraram a existência de uma estrutura de defesa, um hornaveque, que, arqueologicamente, nunca foi encontrado (seu registro é apenas documental). Esta estrutura estaria instalada na face leste do Forte Orange, reforçando as defesas dos baluartes SE e NE e a cortina entre eles. O hornaveque consistia em um prolongamento externo das muralhas do forte em paliçadas ou estacadas de madeira (*e.g.*, troncos, estacas e tábuas) e pau-a-pique (galhos ou varas treliçadas reforçados por cobertura e preenchimento em argamassa de argila) (Barthel, 2007). De acordo com Albuquerque (2010b), esta estrutura poderia ter sido *(i)* apenas projetada e nunca construída, *(ii)* desmontada ou mesmo danificada em batalha, ou *(iii)* destruída pela intensa movimentação das areias no exterior adjacente ao forte.

Na primeira década dos anos 2000, uma série de escavações arqueológicas foram realizadas na área externa da fortaleza, adjacente à cortina de face sul, entre os baluartes SW e SE. Nestas escavações, foram encontrados os vestígios de uma subunidade identificada como berma (Barthel, 2007; Albuquerque, 2010a; Albuquerque, 2010b), que consistia em uma espécie de caminho que circundava a muralha interna dos fossos servindo como um contraforte para a prevenção de desmoronamentos, era de pedra e envolvia toda a fortaleza. Barthel (2007) explica que estas estruturas estavam encobertas por um grande volume de areia à época das escavações – realizadas entre 2002 e 2003, significando um rebaixamento de ~2,0m em relação à base – e estavam localizadas junto ao flanco do baluarte SW. Ao término dos trabalhos de escavação, as estruturas encontradas foram sobrepostas por uma proteção de madeira e novamente aterradas. Atualmente, estas estruturas, outrora protegidas sob a areia em 2003, estão novamente expostas às águas do CSC-Sul, descobertas pela ação da erosão costeira no PSII.

Desde 2010 o IPHAN, na intenção de proteger e salvaguardar o patrimônio histórico, vem fazendo sucessivas tentativas de instalar um projeto de obra para proteção do avanço do mar contra as estruturas do Forte Orange. Contudo, o projeto, segundo seus próprios idealizadores, destina-se apenas a proteger as estruturas da ala leste do Forte Orange (IPHAN, 2009). Ou seja, aproximadamente, a área compreendida entre a metade da cortina sul e o baluarte SE.

Atualmente, a tentativa de se proteger apenas o lado leste do forte – historicamente menos suscetível a desmoronamentos, de acordo com a documentação aqui analisada – é inócua e insuficiente para garantir a segurança estrutural da ala oeste do Forte Orange (baluarte SW e sua junção à cortina sul). Além disso, apesar da proposta contar com projeto executivo baseado em levantamentos e análises de dados oceanográficos, o referido projeto – que consiste na instalação de dois espigões de 35m de comprimento, com espaçamento entre si de 70m, justapostos ao baluarte SE e ao centro da cortina sul, com orientação ~SE e voltados para o CSC-Sul – não foge à regra comum das intervenções observadas ao longo das praias do PSII: obras pontuais, projetadas para proteção individual e desconectadas à escala dos efeitos do processo erosivo atuante. Em sendo executada, em caso de êxito, seria capaz apenas de proteger uma curta faixa de praia (~70m), insuficiente para garantir proteção à estrutura da fortaleza como um todo.

Os resultados das análises realizadas a partir de imagens de sensoramento remoto (*i.e.*, imagens de satélites e de aerolevantamentos) evidenciaram as diferenças morfológicas das praias do entorno do Forte Orange entre as épocas de 2007 e 2018. À exceção da presença do Forte Orange, o PSII não possui mais as características morfológicas as quais embasaram o referido projeto de proteção.

Ao longo do tempo, a dinâmica costeira do PSII impulsionou um realinhamento natural da linha de costa, intensificado, pontualmente, nas áreas onde intervenções foram realizadas e pelas ações antrópicas que alteraram o aporte sedimentar continental às praias do PSII. Esteves (2014) defende o gerenciamento do realinhamento da linha de costa como uma abordagem de engenharia suave (equivalente às ações não estruturais), com o objetivo de prover uma forma mais sustentável de manejo da erosão costeira através do melhoramento da capacidade adaptativa natural da comunidade costeira. Mangor et al. (2017) apresenta metodologias e alternativas disponíveis ao gerenciamento da linha de costa voltadas ao planejamento costeiro sustentável. Neste aspecto, o presente estudo

forneceu dados e resultados que enriqueceram os conhecimentos acerca dos processos costeiros e apresentou estratégias de GIZC adequadas ao município da Ilha de Itamaracá.

4.6 CONCLUSÕES

No presente estudo, baseado em diretrizes da Gestão Integrada da Zona Costeira, foram apresentadas e analisadas possíveis estratégias para o uso e a proteção sustentáveis do ambiente costeiro do Pontal Sul da Ilha de Itamaracá. Adicionalmente, trouxe uma análise e um registro da exposição do patrimônio público, privado, histórico e cultural à dinâmica e aos processos costeiros atuantes neste trecho de litoral.

Através dos MDTs gerados e da aplicação do método DoD, foram analisadas e mapeadas as variações sazonais dos padrões morfológicos e a distribuição dos estoques sedimentares das praias de margem leste do PSII. Foi possível observar, dentro do período analisado, que as praias analisadas apresentaram, de forma geral, uma tendência erosiva dos seus estoques sedimentares próximos ao seu limite sul, adjacente ao baluarte SE do Forte Orange, e em sua porção norte; além de uma tendência de acúmulo sedimentar ao longo da faixa de praia entre as porções sul e central da área estudada.

A análise realizada como as imagens modernas e as imagens e documentos históricos, permitiu registrar o realinhamento da linha de costa no trecho de litoral analisado, destacando assim as estruturas e as intervenções que fixaram pequenas faixas de linha de costa de forma pontual. Além disso, possibilitou observar a evolução da ocupação urbana e as mudanças no ambiente costeiro do Pontal Sul da Ilha de Itamaracá, dentro de uma escala temporal histórica e contemporânea, a partir da referência do sítio arqueológico do Forte Orange e das marcas e vestígios deixados em suas estruturas.

O presente estudo demonstrou que o município da Ilha de Itamaracá possui instrumentos de GIZC adequados à sua realidade político-administrativa e financeira. Além destes, o município tem à sua disposição a legislação municipal, estadual e federal que oferecem segurança jurídica ao licenciamento, à fiscalização, à gerência do ambiente costeiro, e ao planejamento do uso e da ocupação sustentáveis do seu litoral.

Em relação às ações estruturante, apesar da alimentação artificial do ambiente praiar ser considerada (dentro das análises e das propostas aqui abordadas) a intervenção que melhor atende à recuperação morfológica e zonal do ecossistema costeiro, conferindo

a este benefícios ecológicos, manutenção da biodiversidade, proteção ao patrimônio histórico e cultural e segurança às benfeitorias à retaguarda do ambiente praiar, seus custos financeiros e técnicos, além das dificuldades político-administrativas a serem superadas, tornam desafiadora a execução desta intervenção. Adicionalmente, apenas o “engordamento” das praias no PSII, sem o apoio de outros tipos de obras de proteção e regeneração costeira, tornaria esta intervenção uma ação não duradoura. A dinâmica sedimentar do PSII exige que diferentes técnicas e tipos de obras costeiras sejam planejadas para funcionarem de forma integrada, e não isolada.

O enfrentamento e a convivência com processo erosivo atuante no Pontal Sul da Ilha de Itamaracá dependerão da aplicação e do funcionamento de políticas públicas eficientes, além do atendimento às já existentes, e a utilização de instrumentos e diretrizes para gestão integrada da zona costeira, promovendo assim o compartilhamento de responsabilidades e a ampla participação nas decisões para o manejo sustentável dos recursos e dos sistemas do ambiente costeiro. Os resultados obtidos pelo presente estudo poderão auxiliar no entendimento das variações morfológicas sazonais impulsionadas pela dinâmica costeira do PSII, oferecendo subsídios confiáveis aos gestores municipais no processo de tomada de decisões.

REFERÊNCIAS

- Aiello, A.; Canora, F.; Pasquariello, G.; Spilotro, G. 2013. Shoreline variations and coastal dynamics: A space-time data analysis of the Jonian litoral, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 129, 124–135. DOI 10.1016/j.ecss.2013.06.012.
- Albuquerque, M.; Lucena, V.; Walmsley, D. 1999. Fortes de Pernambuco: Imagens do passado e do presente. Recife: *Graftorres*. 204 p.
- Albuquerque, M. 2009. Arqueologia do Forte Orange. *Revista da Cultura*. Rio de Janeiro, n. 15, ano IX, p. 37–47.
- Albuquerque, M. 2010a. Arqueologia do forte Orange: O forte holandês. *Revista da Cultura*, Rio de Janeiro, n. 17, ano X, p. 36–43.
- Albuquerque, M. A. G. M. 2010b. Arqueologia do Forte Orange II. *Revista da Cultura*, Rio de Janeiro, v. 16, p. 44–51.
- Albuquerque, M. A. G. M.; Albuquerque, V. C. L. 2018. Acervo Arqueológico do Forte Orange – Estruturas Preservadas. *Revista Noctua – Arqueologia e Patrimônio*. 3–37. DOI 10.26892/noctua.v2i3p3-37.

- Alfredini, P.; Arasaki, E., 2009. Obras e Gestão de Portos e Costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental. 2.ed. São Paulo: Blucher. Instituto Mauá de Tecnologia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 804p. ISBN 8521204868.
- Almeida, T. L. M.; Manso, V. A. V. 2011. Sedimentologia da Plataforma Interna Adjacente a Ilha de Itamaracá – PE. *Estudos Geológicos*. 21, 1, 135–152. ISSN 1980 – 8208.
- Araújo. M. C. B.; Costa, M. F. 2008. Environmental Quality Indicators for Recreational Beaches Classification. *Journal of Coastal Research*. 24, 6, 1439–1449. DOI 10.2112/06-0901.1.
- Araújo, M. C. B.; Souza, S. T.; Chagas, A. O.; Barbosa, S. C. T.; Costa, M. F. 2007. Análise da Ocupação Urbana das Praias de Pernambuco, Brasil. *J. Integr. Coast. Zone Manag.* 7, 2, 97–104. DOI 10.5894/rgci17.
- Araújo, R. J. V.; Pereira, P. S.; Lino, A. P.; Araújo, T. C. M.; Gonçalves, R. M. 2021. Morphodynamic Study of Sandy Beaches in a Tropical Tidal Inlet Using RPAS. *Marine Geology*, 438, 106540. DOI 10.1016/j.margeo.2021.106540.
- Ariza, E.; Jimenez, J. A.; Sarda, R.; Villares, M.; Pinto, J.; Fraguell, R.; Elisabet Roca, E.; Marti, C.; Valdemoro, H.; Ballester, R.; Fluvia, M. 2010. Proposal for an Integral Quality Index for Urban and Urbanized Beaches. *Environmental Management*. 45, 998–1013. DOI 10.1007/s00267-010-9472-8.
- Barthel, S. G. A. 2007. Arqueologia de uma Fortificação: o Forte Orange e a Fortaleza de Santa Cruz em Itamaracá, Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 168 p.
- Botero, C.; Pereira, C.; Tasic, M.; Manjarrez, G. 2015. Design of an index for monitoring the environmental quality of tourist beaches from a holistic approach. *Ocean & Coastal Management*. 108, 65–73. DOI 10.1016/j.ocecoaman.2014.07.017.
- Brasil. 2018. Grupo de Integração do Gerenciamento Costeiro – GI-GERCO/CIRM Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira – Brasília/DF, 111 p. ISBN 978-85-68813-13-3.
- Casarín, R. S.; Lacouture, M. M. V.; Durón, F. J. R.; Daniela Pedroza Paez, D. P.; Pérez, M. A. O.; Baldwin, E. G. M.; Calzadilla, M. A. D.; Mireille Del Carmen Escudero Castillo, M. D. C. E.; Angélica Félix Delgado, A. F.; Salinas, A. C. 2014. Caracterización de la zona costera y planeamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable. *Instituto de Ingeniería – UNAM*. 117 p. ISBN 978-607-02-6287-6.
- Costanza, R.; d’Arge, R.; Groot, R.; Stephen Farberk, S.; Grasso, M.; Bruce Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O’Neill, R. V.; Paruelo, J.; Raskin, R. G.; Suttonkk, P.; Van den Belt, M. 1997. The value of the world’s ecosystem services and natural capital. *Nature*. 387, 253–260.

- Dallas, K. L.; Barnard, P. L. 2011. Anthropogenic influences on shoreline and nearshore evolution in the San Francisco Bay coastal system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n. 92, p. 194-204. DOI 10.1016/j.ecss.2010.12.031.
- Davis, A.; Fitzgerald, D. M. 2004. *Beaches and Coasts*. 1. ed. Massachusetts – USA. *Blackwell Publishing*. 419 p. ISBN 10 0632043083.
- Esteves, L. S. 2014. Managed realignment: A viable long-term coastal management strategy? *Springer Briefs in Environmental Science*. ISBN 978-94-017-9028-4.
- Ford, M. R.; Dickson, M. E. 2018. Detecting ebb-tidal delta migration using Landsat imagery. *Marine Geology*, 405, 38–46. DOI 10.1016/j.margeo.2018.08.002.
- Genchi, S. A.; Vitale, A. J.; Perillo, G. M. E.; Seitz, C. Delrieux, C. A. 2020. Mapping Topobathymetry in a Shallow Tidal Environment Using Low-Cost Technology. *Remote Sensing*, 12, 1394. DOI 10.3390/rs12091394.
- Gomes, G.; Silva, A. C. 2014. Coastal Erosion Case at Candeias Beach (NE-Brazil). *Journal of Coastal Research*, 71, 30–40. DOI 10.2112/SI71-004.1.
- Gonçalves, R. M.; Saleem, A.; Queiroz, H. A. A.; Awange, J. L. 2019. A fuzzy model integrating shoreline changes, NDVI and settlement influences for coastal zone human impact classification. *Applied Geography*. 113, 102093. DOI 10.1016/j.apgeog.2019.102093.
- Gonçalves, L. R.; Gerhardinger, L. C.; Polette, M.; Turra, A. 2021. An Endless Endeavor: The Evolution and Challenges of Multi-Level Coastal Governance in the Global South. *Sustainability*. 13, 10413. DOI 10.3390/su131810413
- Holanda, T. F., Gonçalves, R. M., Lino, A. P., Pereira, P. S., Sousa, P. H. G. O., 2020. Morphodynamic classification, variations and coastal processes of Paiva beache, PE, Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 21 (2), 235–251. DOI 10.20502/rbg.v21i2.1769.
- Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN. 2009. Projeto de Recuperação e Revitalização, Formulação de um Modelo de Uso e Gestão e Preparação de um Plano de Financiamento Para o Forte Orange: Sub-Projeto de CONTENÇÃO DO MAR e Projeto Executivo. Recife – PE, 84 p.
- Instituto De Tecnologia De Pernambuco – ITEP. 2012. Relatório de impacto ambiental – RIMA: Recuperação da Orla Marítima – Municípios de Jaboatão dos Guararapes, Recife, Olinda e Paulista (Pernambuco). Recife – PE, 98 p.
- Kosyan, R. D.; Velikova, V. N. 2015. Coastal zone e Terra (and aqua) incognita e Integrated Coastal Zone Management in the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1–16. DOI 10.1016/j.ecss.2015.11.016.
- Lima, J. P.; Gonçalves, R. M.; Schmidt, M. A. R. 2017. Avaliação da eficácia do gerenciamento costeiro integrado utilizando AHP (Analytic Hierarchy Process) para a Ilha de Itamaracá, Pernambuco, Brasil. *Geociências*. 36, 4, 743–753.

- Lisboa, P. V.; Fernandes, E. H. 2015. Anthropogenic influence on the sedimentary dynamics of a sand spit bar, Patos Lagoon Estuary, RS, Brazil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*. 15,1, 35–46. DOI 10.5894/rgci541.
- Long, N.; Millescamps, B.; Guillot, B.; Pouget, F.; Bertin, X. 2016. Monitoring the topography of a dynamic tidal inlet using RPA imagery. *Remote Sens.*, 8, 387. DOI 10.3390/rs8050387.
- Lucrezi, S.; Saayman, M.; Van der Merwe, P. 2016. An assessment tool for sandy beaches: A case study for integrating beach description, human dimension, and economic factors to identify priority management issues. *Ocean & Coastal Management*. 121, 1–22. DOI 10.1016/j.ocecoaman.2015.12.003.
- Luijendijk, A. P.; Schipper, M. A.; Ranasinghe, R. 2019. Morphodynamic Acceleration Techniques for Multi-Timescale Predictions of Complex Sandy Interventions. *Journal of Marine Science and Engineering*. 7, 78. DOI 10.3390/jmse7030078.
- Mangor, K., Drønen, N. K., Kærgaard, K. H., Kristensen, S. E., 2017. Shoreline Management Guidelines. DHI. 462p. ISBN 978-87-90634-04-9.
- Martins, A. M. 2020. Serviços Ecossistêmicos de Ambientes Costeiros do Litoral de Pernambuco. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 123 p.
- Martins, K. A.; Pereira, P. S.; Lino, A. P.; Gonçalves, R. M. 2016. Determinação da erosão costeira no Estado de Pernambuco através de geoindicadores. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17, 3. DOI 10.20502/rbg.v17i3.854.
- Medeiros, C.; Kjerfve, B. 1993. Hydrology of a Tropical Estuarine System: Itamaracá, Brasil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 36, 495–515. 0272-7714/93/050495.
- Ministério da Economia – ME. 2022. Manual Projeto Orla. Ministério da Economia. Secretaria de Coordenação e Governança do Patrimônio da União – Brasília: ME, 324 p. ISBN 978-65-997520-0-1.
- Ministério do Meio Ambiente – MMA. 2008. Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil – Brasília: MMA. 242 p. ISBN 978-85-7738-112-8.
- Mitchell, S. B.; Jennerjahn, T. C.; Vizzini, S.; Zhang, W. 2015. Changes to processes in estuaries and coastal waters due to intense multiple pressures – An introduction and synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 156, 1–6. DOI 10.1016/j.ecss.2014.12.027
- Nicolodi, J.; Gruber, N. 2020. Abordagem geográfica da Gestão Costeira Integrada. In: Muehe, D.; Lins-de-Barros, F. M.; Pinheiro, L. (orgs.) *Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos*. Rio de Janeiro: PGGM, 382–401. ISBN 978-65-992571-0-0.

- Nicolodi, J. L.; Asmus, M. L.; Polette, M.; Turra, A.; Seifert Jr, C. A.; Stori, F. T.; Shinoda, D. C.; Mazzer, A.; Souza, V. A.; Gonçalves, R. K. 2021. Critical gaps in the implementation of Coastal Ecological and Economic Zoning persist after 30 years of the Brazilian coastal management policy. *Marine Policy*. 128, 104470. DOI 10.1016/j.marpol.2021.104470
- Nel, R.; Campbell, E. E.; Harris, L.; Hauser, L.; Schoeman, D. S.; McLachlan, A.; Preez, D. R.; Bezuidenhout, K.; Schlacher, T. A. 2014. The status of sandy beach science: Past trends, progress, and possible futures. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. DOI 10.1016/j.ecss.2014.07.016
- Oliveira, A. L. N.; Santos, J. L. 2014. A Ilha de Itamaracá e a organização da defesa no período colonial (séculos XVI e XVII): contribuição para a história do litoral norte de Pernambuco, Brasil. *Cadernos do LEPAARQ*. XI, 21. ISSN 2316 8412.
- Pereira, L. C. C.; Jiménez, J. A.; Medeiros, C.; Costa, R. M. 2003. The influence of the environmental status of Casa Caiada and Rio Doce beaches (NE-Brazil) on beaches users. *Ocean & Coastal Management*. 46, 1011–1030. DOI 10.1016/j.ocecoaman.2004.01.002
- Pereira, P. S.; Martins, K. A.; Neto, A. V.; Lino, A. P.; Macaíba, M. B.; Olinto, A.; Fisher, A.; Araújo, R. J. V.; Schettini, C. A. F.; Araújo, T. C. M. 2015. Atlas da vulnerabilidade à erosão costeira e mudanças climáticas em Pernambuco. 1.ed. Recife: Editora Universitária – UFPE, 98 p. ISBN 978-85-415-0788-2.
- Pereira, P. S.; Araújo, T. C.; Manso, V. A. V. 2017. Tropical Sandy beaches of Pernambuco state. In Short, A. D. & Klein, A. H. F. (Ed.). *Brazilian Beaches Systems*. Springer, 251–279. DOI 10.1007/978-3-319-30394-9_10.
- Santos, J. L.; Oliveira, A. L. N. 2015. Arqueologia e História Urbana: anotações de pesquisa sobre a Ilha de Itamaracá Colonial. *História Unicap*. 2, 3, 45–53.
- Silva, R.; Chávez, V.; Bouma, T. J.; Van Tussenbroek, B. I.; Arkema, K. K.; Martínez, M. L.; Oumeraci, H.; Heymans, J. J.; Osorio, A. F.; Mendoza, E.; Mancuso, M.; Asmus, M.; Pedro Pereira, P. 2019. The Incorporation of Biophysical and Social Components in Coastal Management. *Estuaries and Coasts*. DOI 10.1007/s12237-019-00559-5.
- Silva; A. P.; Silva, G. V.; Strauss, D.; Murray, T.; Woortmann, L. G.; Taber, J.; Cartwright, N.; Tomlinson, R. 2021. Headland bypassing timescales: Processes and driving forces. *Science of the Total Environment*, 793, 148591. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.148591.
- Souza, C. R. G.; Suguio, K.; Oliveira, M. S.; Oliveira, P. E. 2005. Quaternário do Brasil. 1.ed. Ribeirão Preto – SP: Ed. Holos. 328p. ISBN 85-86699-47-0.
- Souza, C. R. G. 2009. A Erosão Costeira e os Desafios da Gestão Costeira no Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada, Brasil*, v. 9, n. 1, p. 17–37.

Vos, D.; Nela, R.; Schoemanc, D.; Harrisa, L. R.; Preez, D. 2019. Effect of introduced Casuarina trees on the vulnerability of sea turtle nesting beaches to erosion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. DOI 10.1016/j.ecss.2019.03.015.

Wiggins, M.; Scott, T.; Masselink, G.; Russell, P.; McCarroll, R. J. 2019. Coastal embayment rotation: Response to extreme events and climate control, using full embayment surveys. *Geomorphology*. 327, 385–403. DOI 10.1016/j.geomorph.2018.11.014

5 CONCLUSÃO

O presente estudo buscou descrever e analisar, em diferentes escalas espaço-temporais, como a dinâmica e os processos costeiros atuam na evolução das feições e depósitos sedimentares do PSII; e assim, apresentar estratégias alinhadas à CIZC e às vocações e características urbanas, comerciais, turísticas, culturais e ambientais, coadunadas à legislação ambiental vigente, para a gestão das praias deste trecho de litoral.

A análise da variação sazonal dos estoques sedimentares das praias analisadas, entre dezembro de 2017 e dezembros de 2018, evidenciou que o processo erosivo é dominante no PSII, prevalecendo, apesar da existência de trechos de praia em acreção, sobretudo, nas praias menos abrigadas. Foi observado que o aporte sedimentar ocorre entre a segunda metade do verão e a primeira metade do inverno, enquanto a perda de sedimentos acontece entre a segunda metade do inverno e a primeira metade do verão. Possivelmente, em resposta aos padrões de variação da potência de onda, mais energéticos no período chuvoso e menos intensos no período seco.

Através dos estudos da variabilidade espaço-temporal da linha de costa e a sua relação com a potência de onda e índices climáticos, foram observados ciclos de acreção e erosão em escalas temporais interanuais e multidecadais. As análises de correlação entre a potência de onda e a influência dos índices ENSO evidenciaram que os eventos de La Niña (El Niño) conduzem ao aumento (diminuição) da potência de onda que, por sua vez, desencadeiam processos erosivos (progradativos) na linha de costa das praias estudadas, sendo mais intensos a partir de 2006 e durante a estação chuvosa (período de inverno).

Expostas à erosão costeira e localizadas entre praias erodidas e criticamente erodidas, as estruturas do Forte Orange (1633) serviram como um registro das primeiras tentativas de se lidar com o processo erosivo atuante no PSII. As variações sazonais dos padrões morfológicos e a distribuição dos estoques sedimentares, revelaram uma tendência erosiva nos limites sul e na porção norte, enquanto o acúmulo sedimentar foi mais evidente no trecho central da faixa de praia analisada. Por fim, a presente tese defende que a adaptação e a convivência com a dinâmica sedimentar atuante no PSII dependerão da aplicação e do atendimento às políticas públicas existentes e da implementação de instrumentos e diretrizes para GIZC, que deverão nortear intervenções que promovam o uso sustentável, a proteção e a regeneração do ambiente praial.

REFERÊNCIAS

- Aiello, A.; Canora, F.; Pasquariello, G.; Spilotro, G. 2013. Shoreline variations and coastal dynamics: A space-time data analysis of the *Jonian* litoral, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Italy, n. 129, p. 124-135. DOI 10.1016/j.ecss.2013.06.012.10
- Albuquerque, J. L. 2009. *Caracterização Morfodinâmica e Vulnerabilidade à Erosão do Litoral Leste da Ilha de Itamaracá – PE*. 125 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Almeida, H. R. R. C. 2008. *Séries Temporais de Imagens Sub-Orbitais e Orbitais de Alta Resolução Espacial na Avaliação da Morfodinâmica Praial no Município do Cabo de Santo Agostinho – PE*. 117 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Almeida, T. L. M.; Manso, V. A. V. 2011. Sedimentologia da Plataforma Interna Adjacente a Ilha de Itamaracá – PE. *Estudos Geológicos, Brasil*, v. 21, n. 1, p. 135-152.
- Araújo, M. C. B.; Souza, S. T.; Chagas, A. O.; Barbosa, S. C. T.; Costa, M. F. 2007. Análise da Ocupação Urbana das Praias de Pernambuco, Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada, Brasil*, v. 7, n. 2, p. 97-104.
- Araújo, R. J. V.; Pereira, P. S.; Lino, A. P.; Araújo, T. C. M.; Gonçalves, R. M. 2021. Morphodynamic Study of Sandy Beaches in a Tropical Tidal Inlet Using RPAS. *Marine Geology*, 438, 106540. DOI 10.1016/j.margeo.2021.106540.
- Barthel, Stela G. Alves. 2007. *Arqueologia de uma Fortificação: o Forte Orange e a Fortaleza de Santa Cruz em Itamaracá, Pernambuco*. 168 p. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Batista, E. M.; Souza Filho, P. W. M. E; Silveira, O. F. M. 2009. Avaliação de áreas deposicionais e erosivas em cabos lamosos da zona costeira amazônica através da análise multitemporal de imagens de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica, Brasil*, v. 27, p. 83-96. ISSN 0102-261X.
- Barry, P.; Coakley, R. 2013. Field Accuracy Test of RPAs Photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Rostock, Germany, v. XL-1/W2, 2013 UAV-g2013, p. 27-31.
- Briele, A. C. 2014. *Assessment of The Application of Permeable Pile Groins as Coastal Protection*. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Delft University of Technology, Delft.
- Chen, C. A.; Gao, X.; Ishizaka, J.; Lebel, L. 2015. Editorial: Coastal seas in a changing world: Anthropogenic impact and environmental responses. *Continental Shelf Research*, v. 111, p. 109-111. DOI 10.1016/j.csr.2015.11.007.

- Dada, O. A.; Li, G.; Qiao, L.; Ding, D.; Ma, Y.; Xu, J. 2016. Seasonal shoreline behaviours along the arcuate Niger Delta coast: Complex interaction between fluvial and marine processes. *Continental Shelf Research*, n. 122, p. 51-67,. DOI 10.1016/j.csr.2016.03.002.
- Dallas, K. L.; Barnard, P. L. 2011. Anthropogenic influences on shoreline and nearshore evolution in the San Francisco Bay coastal system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n. 92, p. 194-204. DOI 10.1016/j.ecss.2010.12.031.
- Davis, A.; Fitzgerald, D. M. 2004. *Beaches and Coasts*. 1. ed. Massachusetts – USA: Blackwell Publishing company.
- Gomes, G.; Silva, A. C. 2014. Coastal Erosion Case at Candeias Beach (NE-Brazil). *Journal of Coastal Research*, Florida, si. 71, p. 30-40.
- Gonçalves, R. M.; Saleem, A.; Queiroz, H. A. A.; Awange, J. L. 2019. A fuzzy model integrating shoreline changes, NDVI and settlement influences for coastal zone human impact classification. *Applied Geography*. 113, 102093. DOI 10.1016/j.apgeog.2019.102093.
- Holanda, T.F., Gonçalves, R.M., Lino, A.P., Pereira, P.S., Sousa, P.H.G.O., 2020. Morphodynamic classification, variations and coastal processes of Paiva beach, PE, Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 21 (2), 235–251. DOI 10.20502/rbg.v21i2.1769.
- Luijendijk, A.; Hagenaars, G.; Ranasinghe, R.; Baart, F.; Donchyts, G.; Aarninkhof, S. 2018. The State of the World's Beaches. *Nature: Scientific Reports*, v. 8, n. 6641. DOI 10.1038/s41598-018-24630-6.
- Martins, K. A. 2015. *Vulnerabilidade à erosão costeira e mudanças climáticas através de indicadores em Pernambuco, Brasil*. 106 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Martins, K. A.; Pereira, P. S.; Lino, A. P.; Gonçalves, R. M. 2016. Determinação da erosão costeira no Estado de Pernambuco através de geoindicadores. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, São Paulo, v. 17, n. 3. DOI 10.20502/rbg.v17i3.854.
- Mendonça, F. J. B. 2005. *Posicionamento de Alta Resolução – Adequação e Aplicação à Morfologia Costeira*. 94 p. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Mendonça, F. J. B.; Medeiros, C.; Rollnic, M. 2006. Morphogenesis of the Coroa do Avião, a Sand Bank/Barrier Islet at Northeastern-Brazil. *Journal of Coast Research*, Brazil, si. 39, p. 290-293. ISSN 0749-0208.
- Moura, A. R. L. U. 2009. *Processos Dinâmicos e Evolutivos da Zona Costeira de Itamaracá por Sensoriamento Remoto e Medidas in Situ*. 118 p. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Silveira, L. F.; Klein, A. H. F.; Tessler, M. G. 2011. Classificação Morfodinâmica das Praias do Estado de Santa Catarina e do Litoral Norte do Estado de São Paulo Utilizando Sensoriamento Remoto. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, Santa Catarina, v. 15, n. 2, p. 13-28. DOI 10.14210/bjast.2011v15n2.

Silva, G. V.; Muler, M.; Prado, M. F. V.; Short, A. D.; Klein, A. H. F.; Toldo, E. E. 2016. Shoreline Change Analysis and Insight into the Sediment Transport Path along Santa Catarina Island North Shore. *Journal of Coastal Research*, Florida, v. 32, n. 4, p. 863-874. DOI 10.2112/JCOASTRES-D-15-00164.1.

Souza, C. R. G. 2009. A Erosão Costeira e os Desafios da Gestão Costeira no Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, Brasil, v. 9, n. 1, p. 17-37.

Turner, I. L.; Harley, M. D.; Drummond, C. D. 2016. UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*, Sydney, v. 114, p. 19-24, DOI 10.1016/j.coastaleng.2016.03.011.

Williams, A.T.; Rangel-Buitrago, N.; Pranzini, E.; Anfuso, G. 2018. The management of coastal erosion. *Ocean & Coastal Management*, v. 156, p. 4-20.

APÊNDICE A – DATAS DE AQUISIÇÃO DAS IMAGENS LANDSAT

Tabela I. Data de captura das imagens para extração das linhas de costa do *Setor 1*.

Setor 1				
1980	1990	2000	2010	2020
10-06-1984	27-06-1990	30-01-2000	02-06-2010	28-05-2020
30-09-1984	23-12-1991	12-10-2000	24-08-2011	13-06-2020
28-05-1985	15-05-1992	29-09-2001	28-07-2013	19-10-2020
16-06-1986	02-07-1992	08-03-2002	13-08-2013	
20-09-1986	18-05-1993	18-08-2003	05-02-2014	
02-05-1987	10-11-1993	19-09-2003	25-03-2014	
11-10-1988	13-11-1994	09-01-2004	16-08-2014	
27-08-1989	11-07-1995	10-02-2004	17-09-2014	
12-09-1989	28-08-1995	13-03-2004	13-04-2015	
28-09-1989	07-03-1996	29-03-2004	20-09-2015	
	30-08-1996	01-04-2005	22-10-2015	
	04-12-1996	08-09-2005	27-02-2016	
	21-09-1998	11-11-2005	14-03-2016	
	08-09-1999	15-02-2006	22-09-2016	
		06-05-2006	09-11-2016	
		26-08-2006	18-04-2017	
		29-10-2006	28-11-2017	
		14-11-2006	23-05-2018	
		22-03-2007	28-09-2018	
		07-04-2007	01-12-2018	
		09-05-2007	02-11-2019	
		25-05-2007		

Fonte: o autor (2022).

Tabela II. Data de captura das imagens para extração das linhas de costa do *Setor 2*.

Setor 2				
1980	1990	2000	2010	2020
30-09-1984	18-01-1990	30-01-2000	02-06-2010	28-05-2020
28-05-1985	23-12-1991	12-10-2000	08-10-2010	13-06-2020
16-06-1986	15-05-1992	01-02-2001	25-09-2011	15-07-2020
02-05-1987	02-07-1992	18-08-2003	26-06-2013	19-10-2020
10-07-1989	11-02-1993	19-09-2003	28-07-2013	
28-09-1989	10-11-1993	29-03-2004	13-08-2013	
	13-11-1994	08-09-2005	30-09-2013	
	28-08-1995	24-09-2005	20-01-2014	
	10-05-1996	11-11-2005	05-02-2014	
	30-08-1996	27-09-2006	25-03-2014	
	04-12-1996	29-10-2006	10-04-2014	
	14-06-1997	07-04-2007	17-09-2014	
	21-09-1998	09-05-2007	08-02-2015	
	08-09-1999	25-05-2007	29-04-2015	
	24-09-1999	30-09-2007	20-09-2015	
			22-10-2015	
			07-11-2015	
			27-02-2016	
			22-09-2016	
			18-04-2017	
			09-09-2017	
			23-05-2018	
			28-09-2018	
			17-10-2019	

Fonte: o autor (2022).