



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

MAYKON TARGINO DA SILVA

DINÂMICA DA LINHA DE COSTA DO ESTADO DO CEARÁ, BRASIL

FORTALEZA

2022

MAYKON TARGINO DA SILVA

DINÂMICA DA LINHA DE COSTA DO ESTADO DO CEARÁ, BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de concentração: Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Michael Vandesteem Silva Souto.

Coorientadora: Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S581d Silva, Maykon Targino da.
Dinâmica da linha de costa do Estado do Ceará, Brasil / Maykon Targino da Silva. – 2022.
125 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Michael Vandesteen Silva Souto.
Coorientação: Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte.
1. Gestão da zona costeira. 2. Monitoramento costeiro. 3. Geologia costeira. I. Título.

CDD 551

MAYKON TARGINO DA SILVA

DINÂMICA DA LINHA DE COSTA DO ESTADO DO CEARÁ, BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de concentração: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 25/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Michael Vandesteem Silva Souto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alfredo Marcelo Grigio
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN)

Prof. Dr. Antonio Conceição Paranhos Filho
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS)

Prof. Dra. Débora Nogueira Lopes
Universidade Federal de Goiás (UFG)

Prof. Dr. Eduardo Viana Freires
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Maria Neuma e Francisco.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus. Agradeço pela vida, força e coragem para enfrentar as vicissitudes da vida.

A minha mãe, Neuma, e ao meu pai, Francisco, pelo carinho, atenção, dedicação, formação moral e por sempre me apoiarem.

A minha tia, Nilda, e Antônio Neto (*In Memoriam*), pelo grande homem que foi e que muito contribuiu para estar onde estou hoje. E, também, aos meus primos, Cláudia, Rejane, Paulo e Ranny Edson.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Michael Vandesteem Silva Souto, pela confiança que me foi depositada, pelas críticas, ensinamentos e sugestões.

A minha coorientadora, Profa. Dr. Cynthia Romariz Duarte, pelas dúvidas que me foram equacionadas, sugestões e ensinamentos.

Ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará – GEOCE, pela disponibilidade dos softwares e suporte técnico indispensável para a realização dessa pesquisa.

Aos companheiros de laboratório do GEOCE, em especial, Cláudio, Débora, Eduardo e Rangel, pela ajuda nos trabalhos de campo e sugestões.

“A verdadeira força não é a do mar em fúria que tudo destrói, mas do rochedo, impassível, que a tudo resiste”. Henrique José de Souza.

RESUMO

A zona costeira é um ambiente dinâmico onde a erosão marinha exerce o papel de agente modelador da paisagem. Essa erosão pode ser causada tanto por fatores naturais como antrópicos e quando sua ação alcança construções humanas pode causar danos econômicos. Nesse ambiente costeiro existe grande concentração populacional e desenvolvimento econômico. Na zona costeira brasileira é possível observar o cenário supracitado em alguns trechos onde um exemplo é o litoral cearense. Esse litoral é importante sob os vieses ambiental, econômico e social. Apesar dessa relevância, existe a necessidade de estudos para melhor compreender a dinâmica do litoral cearense. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo analisar e especializar o comportamento da linha de costa do Estado do Ceará por meio de diferentes metodologias implementadas em Sistema de Informação Geográfica, com o uso de produtos de Sensoriamento Remoto, no intuito de subsidiar a gestão costeira. Para alcançar esse objetivo foram realizados: processamento digital de imagens; confecção de mapas de variação da linha de costa; quantificação das áreas de progradação e retrogradação; e, pesquisa de campo. Na zona costeira do Ceará, no período 1984-2019, houve matematicamente um equilíbrio entre a acreção e a erosão, contudo, existiram trechos com erosão intensa em diferentes setores. No trecho de praia entre Fortaleza e Paraipaba houve o predomínio da classe média sensibilidade à erosão costeira com 79,1% (92,1 km). Apesar dessa predominância existiram recuos significativos em Caucaia e Paracuru. Com relação à densidade de urbanização predominou a média densidade com 39,7% (46,2 km). Por fim, a classe de muito baixo potencial de danos econômicos devido à erosão costeira prevaleceu com 41,8% (48,7 km). A presente pesquisa fez melhorias na metodologia que determina o potencial de danos econômicos devido à erosão costeira em dois aspectos: i) no estabelecimento da sensibilidade de erosão; e, ii) na definição da densidade de urbanização. Para trabalhos futuros, com a metodologia anterior, recomenda-se a inserção de métodos econométricos e a espacialização dos seus resultados.

Palavras-chave: gestão da zona costeira; monitoramento costeiro; geologia costeira.

ABSTRACT

The coastal zone is a dynamic environment where coastal erosion plays the role of a landscape modeling agent. Natural and anthropic factors cause this erosion, and when its action reaches human constructions, it can cause economic damage. In this coastal environment, there is great population concentration and economic development. In the Brazilian coastal zone, it is possible to observe the scenario mentioned above in some stretches, for example, Fortaleza (Ceará) and adjacent shoreline. This region of Ceará is important under biases environmental, economic and social. Despite this relevance, studies need to understand the dynamics of the Ceará coast better. Therefore, the present study aimed to analyze and specialize the behavior of the shoreline of the State of Ceará through different methodologies implemented in Geographic Information System, with the use of Remote Sensing products, in order to subsidize coastal management. This objective was performed: digital processing of satellite images; calculation of the shoreline variation; determination of erosion sensitivity; determination of urban density; determination of the potential economic damage; and field work. In the coastal zone of Ceará, in the period 1984-2019, there was mathematically a balance between accretion and erosion; however, there are stretches with intense erosion in different sectors. On the stretch of beach between Fortaleza and Paraipaba, there was a predominance of the medium class sensitivity to shoreline erosion with 79.1% (92.1 Km). Despite this predominance, there were significant retreats in Caucaia and Paracuru. Regarding the urban density, the predominant class was the low urban density with 39.7% (46.2 Km). Finally, the very low potential class for economic damage due to shoreline erosion prevailed with 58.1% (67.7 Km). The present research has made improvements in the methodology that determines the potential economic damage due to erosion in two aspects: i) in establishing the erosion sensitivity and ii) in defining the urban density. However, as a recommendation for future work, the previous methodology still needs the insertion of econometric methods and spatialization of its results to be more robust.

Keywords: coastal zone management; coastal monitoring; coastal geology.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
EPR	End Point Rate
GIS	Geographic Information System
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LRR	Linear Regression Rate
NDWI	Normalized Difference Water Index
NSM	Net Shoreline Movement
OLI	Operational Land Imager
PDI	Processamento Digital de Imagens
RGB	Red, Green, Blue
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO I CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	11
1.1	Introdução	11
1.2	Objetivos.....	13
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>13</i>
1.3	Materiais e Métodos.....	14
<i>1.3.1</i>	<i>Materiais.....</i>	<i>14</i>
<i>1.3.2</i>	<i>Métodos.....</i>	<i>15</i>
2	CAPÍTULO II VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA NO LITORAL CEARENSE (1984-2019).....	19
2.1	Introdução.....	21
2.2	Metodologia.....	21
2.3	Resultado e discussão.....	23
<i>2.3.1</i>	<i>Litoral leste.....</i>	<i>24</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Litoral metropolitano.....</i>	<i>28</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Litoral oeste.....</i>	<i>34</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Litoral extremo oeste.....</i>	<i>41</i>
2.4	Conclusão.....	51
3	CAPÍTULO III DINÂMICA DA LINHA DE COSTA NO TRECHO DE PRAIA ENTRE OS MUNICÍPIOS DE FORTALEZA E PARAIPABA, ESTADO DO CEARÁ.....	55
3.1	Introdução.....	57
3.2	Área de estudo.....	58
3.3	Materiais e métodos.....	59
3.4	Resultados.....	64
<i>3.4.1</i>	<i>Setor 1.....</i>	<i>65</i>
<i>3.4.2</i>	<i>Setor 2.....</i>	<i>67</i>
<i>3.4.3</i>	<i>Setor 3.....</i>	<i>71</i>
3.5	Discussão.....	74
3.6	Conclusões.....	78
4	CAPÍTULO IV USE OF REMOTE SENSING AND GIS IN THE ANALYSIS OF THE POTENTIAL FOR ECONOMIC DAMAGE DUE	

**TO COASTAL EROSION ON THE STRETCH OF BEACH THE
MUNICIPALITIES OF FORTALEZA AND PARAIPABA, CEARÁ,**

	BRAZIL.....	85
4.1	Introduction.....	87
4.2	Study site.....	88
4.3	Methodological procedures.....	90
4.4	Results and discussions.....	95
4.5	Conclusion.....	107
5	CONCLUSÕES.....	115
	REFERÊNCIAS.....	117

1 CAPÍTULO I CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

A tese intitulada “Dinâmica da linha de costa do Estado do Ceará, Brasil”, configura-se como pré-requisito e etapa final para formação e obtenção de titulação de doutorado em Geologia do Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC). O presente estudo está organizado em seis capítulos com os seguintes conteúdos:

No Capítulo I contém uma introdução ao tema da erosão costeira e seus impactos econômicos, contextualiza a importância de estudos sobre esse tema e fala sobre a relevância de aplicá-los no litoral do Ceará, em especial, em parte da Região Metropolitana de Fortaleza, especificamente entre o trecho de praia dos municípios de Fortaleza e Paraipaba. Ainda, são apresentados de forma geral os materiais e métodos usados ao longo do presente estudo.

No Capítulo II foi realizado um estudo sobre a variação da linha de costa no litoral cearense entre 1984 e 2019. Na sequência, no Capítulo III, consta um estudo da dinâmica da linha de costa em parte da Região Metropolitana de Fortaleza, especificamente entre o trecho de praia dos municípios de Fortaleza e Paraipaba, Ceará. Já o Capítulo IV apresenta uma análise do potencial de prejuízos econômicos devido à erosão costeira para entre o trecho de praia dos municípios de Fortaleza e Paraipaba, Ceará. Por fim, no Capítulo V, são expostas as considerações finais do trabalho.

1.1 Introdução

As zonas costeiras são as regiões mais habitadas no planeta e possuem desenvolvimento econômico intensivo (BROMMER; BOCHEV-VAN DER BURGH, 2009). Essa região, em sentido geomorfológico, possui um importante agente modelador que é a erosão da linha de costa (FAIRBRIDGE, 2004). Essa erosão pode ser causada tanto por processos naturais como pela ação antrópica (CAMFIELD; MORANG, 1996).

Apesar da relevância do processo erosivo costeiro, houve um período de tempo onde os gestores da zona costeira não davam a devida atenção a ele, até o momento em que efeitos adversos começaram a ser sentidos na economia e sociedade (SILVA *et al.*, 2014), por exemplo, no setor turístico com a destruição de suas amenidades e infraestruturas que impacta diretamente no poder de atração dos turistas para as praias (ALEXANDRAKIS *et al.*, 2015). No intuito de compreender a ação desse processo, surgiu entre os pesquisadores da zona costeira

a necessidade de quantificação da erosão da linha de costa. As metodologias concebidas para essa quantificação evoluíram ao longo do tempo devido aos avanços tecnológicos, uma demonstração desse progresso é percebido pela diferença entre os equipamentos e produtos utilizados pelos procedimentos antigos, fotografias aéreas monocromáticas e mesa de luz projetada (e.g. DOLAN *et al.*, 1978), em comparação com as metodologias surgidas posteriormente que podem utilizar produtos de sensoriamento remoto sofisticado (BOAK; TURNED, 2005; TURNED *et al.*, 2016) em conjunto com sistema de informação geográfica (OJEDA ZÚJAR *et al.*, 2013; ALEXANDRAKIS; POULOS, 2014; MANN; WESTPHAL, 2014). Atualmente, nessas análises da linha de costa as principais ferramentas empregadas são: *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) (HIMMELSTOSS *et al.*, 2018), *BeachTools* (ZARILLO *et al.*, 2008) e *AMBUR R package* (JACKSON *et al.*, 2012).

Esse progresso também foi percebido na concepção de metodologias que relacionam os efeitos da erosão costeira em outros setores, como o da atividade do turismo (ALEXANDRAKIS *et al.*, 2015). Além da metodologia supracitada, existe outra que faz uma associação entre a retrogradação costeira e suas implicações em outras atividades humanas, denominada potencial de prejuízos econômicos devido à erosão costeira (SANTOS *et al.*, 2007). Esse potencial é o produto dos valores atribuídos à susceptibilidade da erosão costeira com a densidade de urbanização (SANTOS *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2007; NASCIMENTO *et al.*, 2013). Apesar desse avanço, a metodologia do potencial de danos econômicos somente usa indicadores visuais como, por exemplo, raízes de árvores expostas, árvores caídas, muros derrubados, entre outros, para determinar a sensibilidade de erosão da linha de costa (SANTOS *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2007; NASCIMENTO *et al.*, 2013), desse modo, não é possível determinar se o comportamento erosivo é de curto ou longo prazos. Essa limitação pode ser superada mediante o uso de linhas de costa históricas extraídas de imagens de satélites, em ambiente GIS, com posterior análise estatística executada pelo DSAS.

Uma região propícia para aplicação de estudos sobre a dinâmica da linha de costa e do potencial de prejuízos econômicos devido à erosão costeira é o litoral cearense, em especial, em parte da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), especificamente entre o trecho de praia dos municípios de Fortaleza e Paraipaba, haja vista sua importância socioeconômica. Nesse litoral existem dois portos (Porto do Mucuripe e Porto do Pecém) importantes para a economia do nordeste, inúmeras indústrias dos mais variados setores próximos da linha de costa, geração de energia eólica *onshore* (BRANNSTROM *et al.*, 2017) e, forte atividade turística que impulsiona a expansão imobiliária (PEREIRA, 2020). Ainda, ao longo desse litoral existem comunidades de pescadores tradicionais e indígenas, já a maior concentração

populacional está na RMF (PAULA *et al.*, 2013).

Em uma pesquisa sobre as praias cearenses, PINHEIRO *et al.* (2016) perceberam a necessidade de estudos sobre a dinâmica costeira em longo prazo para melhor compreensão desse ambiente. Diante do exposto, a presente pesquisa fez uma análise da evolução da linha de costa do litoral cearense no período 1984-2018, depois realizou um estudo da dinâmica da linha de costa no trecho de praia entre os municípios de Fortaleza e Paraipaba, e, por fim, executou uma melhoria na metodologia que determina o potencial de danos econômicos devido à erosão costeira e aplicou-a no trecho anteriormente mencionado. Assim, o presente trabalho justifica-se tanto pela ótica científica, por contribuir para o aperfeiçoamento de uma metodologia que avalia o processo de erosão costeira e suas implicações na sociedade, quanto pelo viés social que consiste no subsídio ao poder público e aos *stakeholders* com informações importantes como: identificação de áreas de risco de erosão da linha de costa; e, identificação de áreas com potencial de prejuízos econômicos devido à erosão costeira. Com isso, o presente trabalho colabora para a gestão costeira da área em estudo, tendo em vista que “*successful coastal management requires that long-term shoreline erosion rates be determined*” (DOUGLAS; CROWELL, 2000, p. 145).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar e espacializar o comportamento da linha de costa do Estado do Ceará por meio de diferentes metodologias implementadas em Sistema de Informação Geográfica, com o uso de produtos de Sensoriamento Remoto, no intuito subsidiar a gestão costeira.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a evolução da linha de costa de todo o Ceará para determinar os *hotspots* de erosão no período 1984-2018;
- Analisar a dinâmica da linha de costa no trecho de praia entre Fortaleza e Paraipaba no período 1984-2020;
- Determinar a densidade de urbanização próxima da linha de costa no trecho de praia entre Fortaleza e Paraipaba; e,

- Determinar o potencial de danos econômicos devido à erosão costeira no trecho de praia entre Fortaleza e Paraipaba.

1.3 Materiais e Métodos

1.3.1 Materiais

Os recursos que subsidiaram a presente pesquisa foram as imagens dos Satélites Landsat 5 e 8 (USGS, 2021). As informações sobre as características dos satélites encontram-se na Tabela 1.

- *Softwares*: ArcGIS 10.5 (ESRI, 2017), Google Earth 7.3 (Google, 2020) e SPRING 5.5 (CAMARA et al., 1996);
- Arquivos Vetoriais: divisa estadual, limites municipais, linha de costa;
- Aeronave remotamente pilotada (ARP) *Mavic Pro 2*;
- GPS *eTrex 30*; e,
- Câmera fotográfica.

Tabela 1 – Características dos satélites utilizados.

Satélite/Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial
Landsat 5-TM	(B1) Azul	0,45-0,52 μm	30 m
	(B2) Verde	0,52-0,60 μm	
	(B3) Vermelho	0,63-0,69 μm	
	(B4) IV/Próximo	0,76-0,90 μm	
	(B5) IV/Médio	1,55-1,75 μm	
	(B6) IV/Termal	10,4-12,5 μm	
	(B7) IV/Médio	2,08-2,35 μm	
Landsat 8-OLI	(B1) Coastal	0,43-0,45 μm	30 m
	(B2) Azul	0,45-0,51 μm	
	(B3) Verde	0,53-0,59 μm	
	(B4) Vermelho	0,64-0,67 μm	
	(B5) IV/Próximo	0,85-0,88 μm	
	(B6) SWIR 1	1,57-1,65 μm	
	(B7) SWIR 2	2,11-2,29 μm	
	(B8) Pancromático	0,50-0,68 μm	15 m
Landsat 8-TIRS	(B9) Cirrus	1,36-1,38 μm	30 m
	(B10) TIRS 1	10.6-11.19 μm	100 m
	(B11) TIRS 2	11.5-12.51 μm	

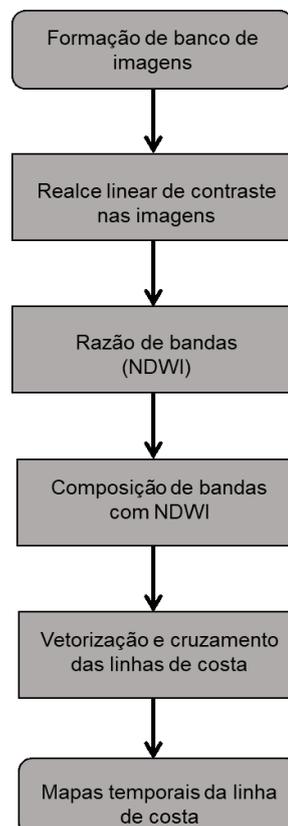
Fonte: MOREIRA (2001); USGS (2021).

1.3.2 Métodos

A seguir é apresentado de modo genérico as metodologias utilizadas no presente estudo.

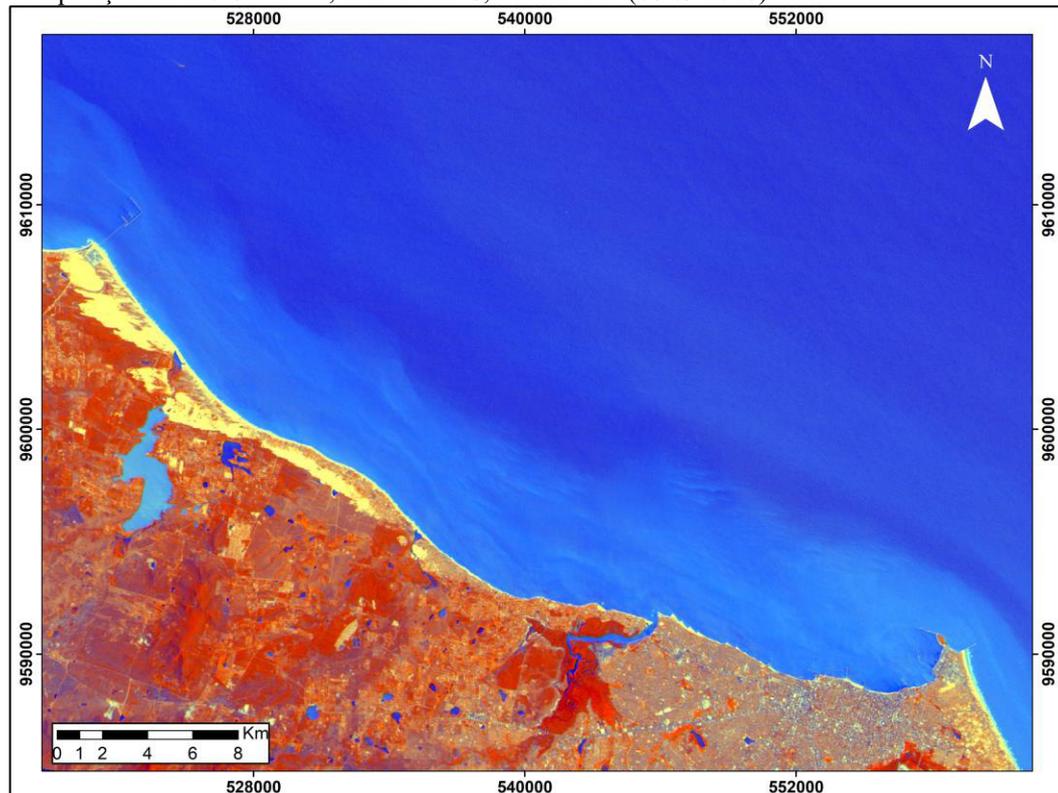
No Capítulo II foi realizada uma análise multitemporal da linha de costa de todo o litoral cearense. A primeira etapa consistiu na obtenção de imagens dos Satélites Landsat 5 e 8 (Figura 1) do sítio eletrônico *Earth Explorer* (USGS, 2021). Depois foram feitos o pré-processamento das imagens mediante realce linear de contraste, confecção do *Normalized Difference Water Index* (NDWI) e composição colorida em RGB-5-3-NDWI (Figura 2) no software SPRING 5.5 (CAMARA *et al.*, 1996). Na sequência teve a vetorização manual da linha de costa pelo método de polígono e o posterior cruzamento delas no ArcGIS 10.5 (ESRI, 2017). Por fim, a confecção dos mapas de variação da linha de costa. Para os demais capítulos, a base de dados das imagens de satélite foram todas adquiridas do *Earth Explorer* (USGS, 2021), o Processamento Digital de Imagens (PDI) e a vetorização e confecção dos mapas também foram feitos, respectivamente, no SPRING 5.5 (CAMARA *et al.*, 1996) e no ArcGIS 10.5 (ESRI, 2017).

Figura 1 – Fluxograma da metodologia do Capítulo II.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2 – Exemplo de composição colorida que foi usada para a extração da linha de costa. Composição RGB-5-3-NDWI, LANDSAT 8, Sensor OLI (06/09/2020).

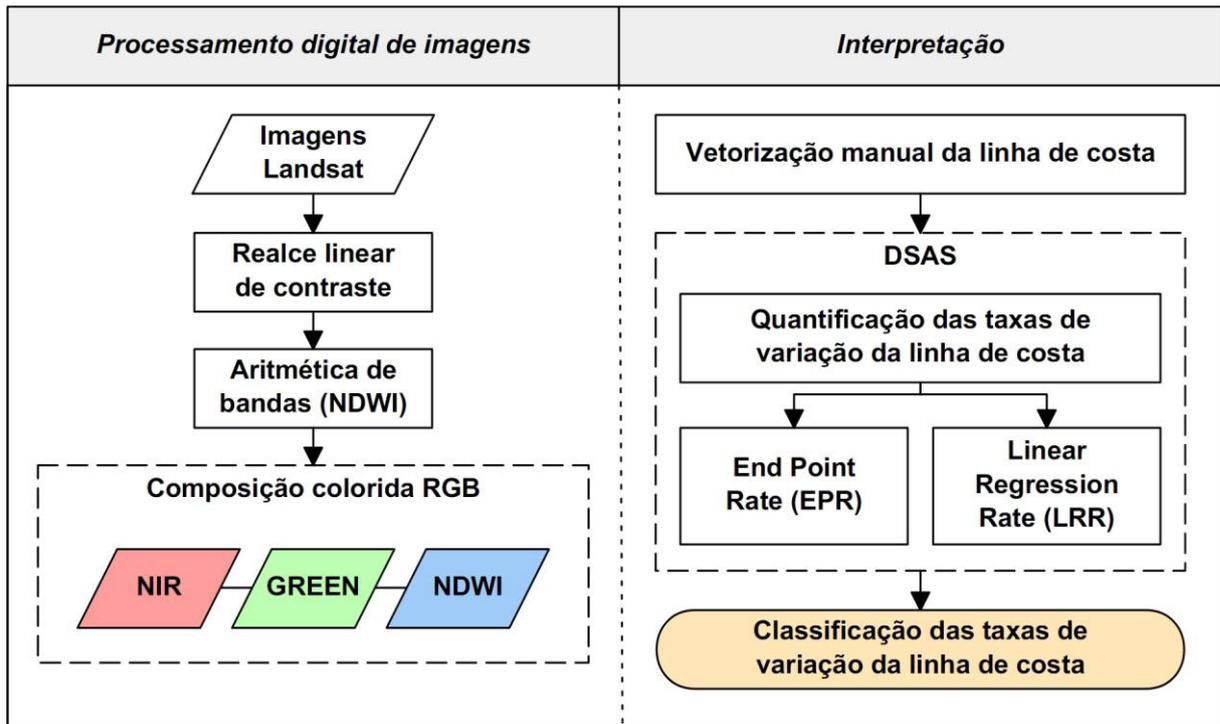


Fonte: Elaborado pelo autor.

Já no Capítulo III foi realizada uma análise da variação da linha de costa para o trecho de praia entre os municípios de Fortaleza e Paraipaba. As fases iniciais foram: obtenção de imagens dos satélites Landsat 5 e 8, realce linear de contraste, confecção do NDWI, composição colorida e vetorização da linha de costa (Figura 3). Depois foram criados transectos e uma *baseline* para calcular a variação da linha de costa com a extensão *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). Na sequência foram definidas as classes de variação da linha de costa.

No Capítulo IV foi feita uma análise preliminar do potencial de danos econômicos devido à erosão costeira para o trecho de praia entre os municípios de Fortaleza e Paraipaba. Inicialmente foram feitas as mesmas etapas do capítulo anterior, a saber: obtenção de imagens dos Satélites Landsat 5 e 8, realce linear de contraste, confecção do NDWI, composição colorida e vetorização da linha de costa (Figura 4). Depois foi terminada a sensibilidade de erosão com base nos valores de variação da linha de costa fornecido pelo DSAS. Subsequente foi determinada a densidade de urbanização mediante pesquisa de campo (Figura 5) e visualização de imagens de satélite do Google Earth 7.3 (GOOGLE, 2020). Por último, foi determinado o potencial de danos econômicos devido à erosão costeira mediante o produto entre a sensibilidade de erosão e a densidade de urbanização.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia do Capítulo III.



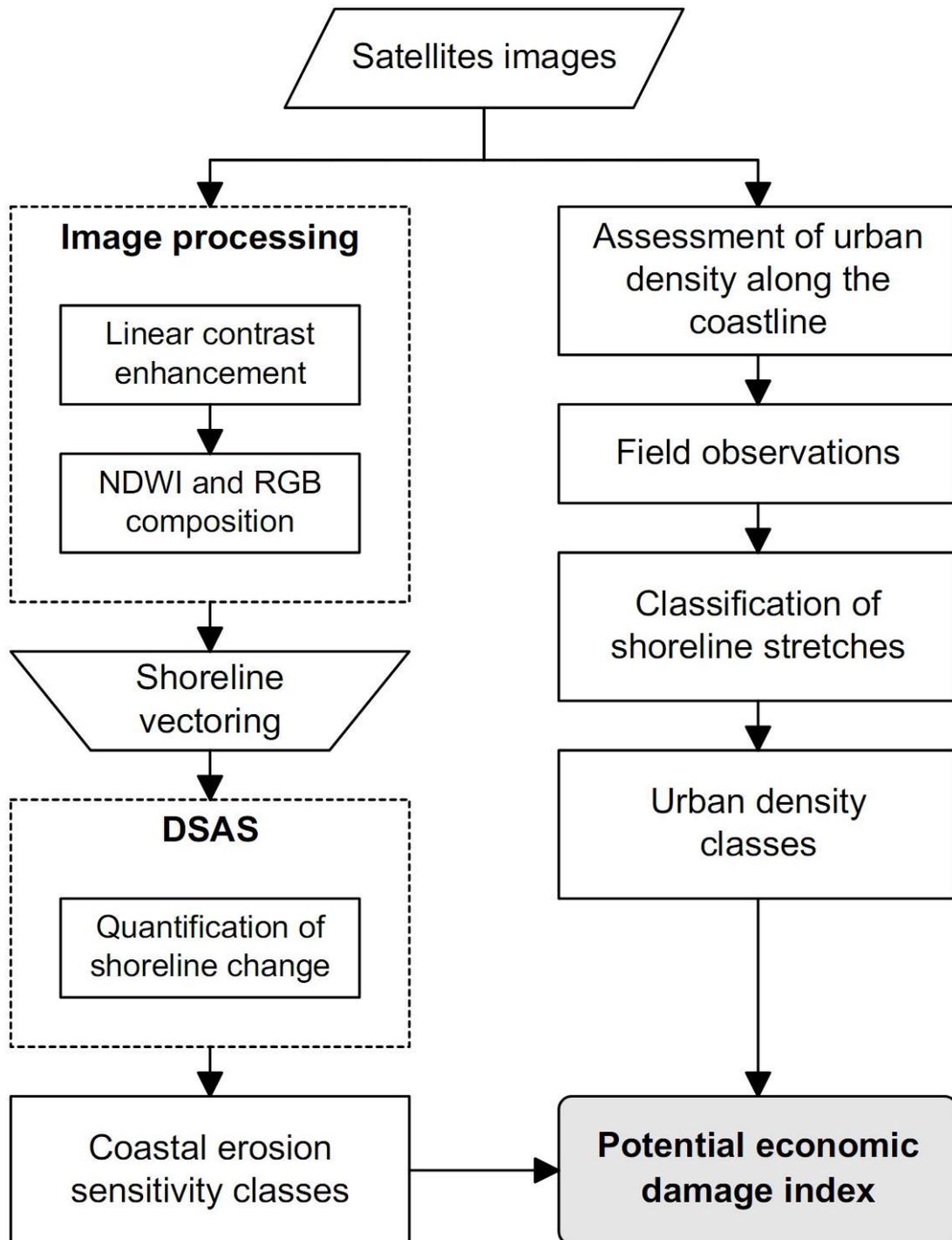
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4 – Trabalho de campo com ARP para auxiliar na determinação das classes de densidade de urbanização. Imagem tomada na Praia de Icarai, no município de Caucaia (CE), levantamento feito no dia 31/10/2019.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia do Capítulo IV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2 CAPÍTULO II VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA DO LITORAL CEARENSE (1984-2018)

O artigo intitulado “Variação da linha de costa do litoral cearense (1984-2018)” foi publicado no dia 24/12/2019 na Revista Brasileira de Geografia Física, versão online, v. 12, n. 7, p.1984-2295. O objetivo desse artigo foi analisar a evolução da linha de costa de todo o Estado do Ceará em um intervalo de tempo de 34 anos de análises, dentro da escala temporal de 1984 a 2018. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.7.p2551-2579>.

VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA DO LITORAL CEARENSE (1984-2018)

Shoreline variation in Ceará coastal zone (1984-2018)

Resumo

A erosão costeira ocorre em várias partes do mundo. Ela, por vezes, destrói equipamentos e casas próximos da linha de costa causando prejuízos econômicos. No Estado do Ceará existem trechos que estão retrogradando, exemplo clássico é da área próxima do Porto do Mucuripe (Fortaleza). Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi analisar a evolução da linha de costa de todo o Estado do Ceará, dentro da escala temporal de 1984 a 2018. Para alcançar esse objetivo foram realizados o processamento digital de imagens de satélite, confecção de mapas de variação da linha de costa e quantificação das áreas de progradação e retrogradação. Em termos matemáticos, na zona costeira do Ceará houve equilíbrio dinâmico entre os processos de acreção e erosão, contudo, existem alguns *hotspots* de erosão nos diferentes setores do litoral. Há necessidade de monitoramento contínuo da zona costeira em diferentes escalas espaciais e temporais para melhor compreensão do comportamento costeiro, bem como políticas que inibam a ocupação deletéria a essa região.

Palavras-chave: Zona costeira; Monitoramento; Erosão Costeira.

Abstract

Coastal erosion occurs in several parts of the world. Sometimes, it destroys structures close to the shoreline causing economic damage. In the state of Ceará, Brazil, there are stretches with retrogradation. A classic example is from the area near the Mucuripe harbor (Fortaleza). From this context, the objective of this paper was to analyze the evolution of the State of Ceará shoreline between 1984 and 2018. To achieve this objective, the digital processing of satellite images was performed, developing maps of shoreline variation and quantification of progradation and retrogradation areas. In mathematical terms, at the coastal zone of Ceará there was a dynamic balance between the processes of accretion and erosion. However, there are some erosion hotspots in different sectors of the state shoreline. There is a need for continuous monitoring of the coastal zone in different spatial and temporal scales to better understand coastal behavior, as well as policies that inhibit the deleterious occupation of this region.

Keywords: Coastal zone; Monitoring; Coastal Erosion.

2.1 Introdução

As áreas litorâneas são ambientes dinâmicos e sensíveis. Sobre essas áreas assentam a maior concentração populacional da terra e possuem grande desenvolvimento econômico (Brommer e Bochev-Van Der Burgh, 2009). Um problema, que pode ser de origem antrópica ou natural (Camfield e Morang, 1996), é a erosão costeira que atinge várias praias no mundo (Fairbridge, 2004).

No Brasil, a erosão costeira ocorre em vários trechos de sua costa, na região nordeste cerca de 60 a 65% da linha de costa sofrem com o processo erosivo (Muehe, 2018). No litoral cearense são observados alguns trechos em retrogradação da linha de costa (Morais et al., 2006). Um caso clássico no Ceará é o processo erosivo de praias adjacentes ao Porto do Mucuripe em Fortaleza (Bezerra et al., 2007).

A erosão costeira, por vezes, gera prejuízos econômicos para a população e indústrias que estão localizadas próximas dessa área (Silva et al., 2007; Nascimento et al., 2013; Alexandrakis et al., 2015). Nesse cenário, o estudo do comportamento da linha de costa torna-se relevante para o planejamento e gestão da zona costeira. Uma área propícia para aplicação desse estudo é a costa do Estado do Ceará que possui 573 Km de extensão.

Esse estado possui uma lacuna sobre estudos da dinâmica costeira em longo prazo (Pinheiro et al., 2016). No intuito de contribuir para o preenchimento dessa lacuna, a presente pesquisa teve como objetivo analisar a evolução da linha de costa de todo o Estado do Ceará, dentro da escala temporal de 1984 a 2018. Diante do exposto, o presente estudo é justificado tanto pela ótica científica, por ser uma atualização de informações sobre o comportamento da linha de costa, como social, por subsidiar o poder público e os stakeholders com o conhecimento da dinâmica costeira que afeta diretamente o uso e ocupação.

2.2 Metodologia

Neste estudo foram utilizados produtos de sensoriamento remoto para obtenção da linha de costa de todo o Ceará. As cenas utilizadas estão listadas na Tabela 1. Os satélites Landsat 5 e 8 foram escolhidos por ter uma abrangência temporal significativa para a área, desde 1984, e também pela possibilidade de trabalhar com a mesma resolução espacial, 30 m. As cenas foram baixadas do sítio eletrônico do Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS.

Tabela 1. Lista de cenas utilizadas no presente estudo

Data	Satélite/Sensor	Órbita/Ponto
12/09/1984	Landsat 5-TM	216-063
15/06/1984	Landsat 5-TM	217-062
08/07/1984	Landsat 5-TM	218-062
15/08/1991	Landsat 5-TM	216-063
19/06/1991	Landsat 5-TM	217-062
10/06/1991	Landsat 5-TM	218-062
23/08/2000	Landsat 5-TM	216-063
01/10/2000	Landsat 5-TM	217-062
21/08/2000	Landsat 5-TM	218-062
06/08/2008	Landsat 5-TM	216-063
11/11/2008	Landsat 5-TM	217-062
07/12/2008	Landsat 5-TM	218-062
09/10/2018	Landsat 8-OLI	216-063
19/10/2018	Landsat 8-OLI	217-062
08/09/2018	Landsat 8-OLI	218-062

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas imagens foram selecionadas com base em dois requisitos básicos: todas elas são do período de verão no Ceará; e, possuem a menor quantidade de nuvens sobre a linha de costa. Os intervalos das datas dos períodos analisados não seguem um padrão fixo, por exemplo, cinco em cinco anos, haja vista a inexistência de imagens que atendam aos requisitos da presente pesquisa no espaço temporal anteriormente mencionado.

Antes de iniciar o mapeamento multitemporal da linha de costa são utilizadas algumas técnicas que auxiliam esse mapeamento. Uma dessas técnicas é o processamento digital de imagens utilizadas foram o realce linear de contraste e razão de bandas mediante *Normalized Difference Water Index* (NDWI) que é a relação (verde – infravermelho / verde + infravermelho) das faixas do espectro eletromagnético (Mcfeeters, 1996). O NDWI utilizado em conjunto com as bandas do verde e do infravermelho (RGB-infravermelho-verde-NDWI) possibilita uma boa distinção da linha de costa pautada nas cores com tons amarelos, para areia, e azuis, para águas oceânicas (Grigio et al., 2005).

Já as aplicações dessas técnicas procederam da seguinte forma: foram selecionadas as faixas do verde e do infravermelho; depois, houve aplicação do realce linear de contraste em ambas faixas, o produto desse realce foi utilizado para a execução da razão de bandas onde resultou no NDWI. Na sequência teve aplicação do realce linear de contraste no NDWI e, em seguida, foi feita a composição RGB-4-2-NDWI (Figura 1) para Landsat 5 e RGB-5-3-NDWI para Landsat 8. Essas imagens serviram de base para a vetorização da linha de costa dos diferentes anos. Após a vetorização foi realizado o cruzamento dos diferentes anos que formaram os períodos, por exemplo, 1984-1991. O processamento digital das imagens foi

executado no *software* SPRING 5.5.2 (INPE, 2018) e a vetorização e o cruzamento no *software* ArcGIS 10.2 (ESRI, 2014).

Figura 1 - composição RGB-4-2-NDWI para o ano de 2018.

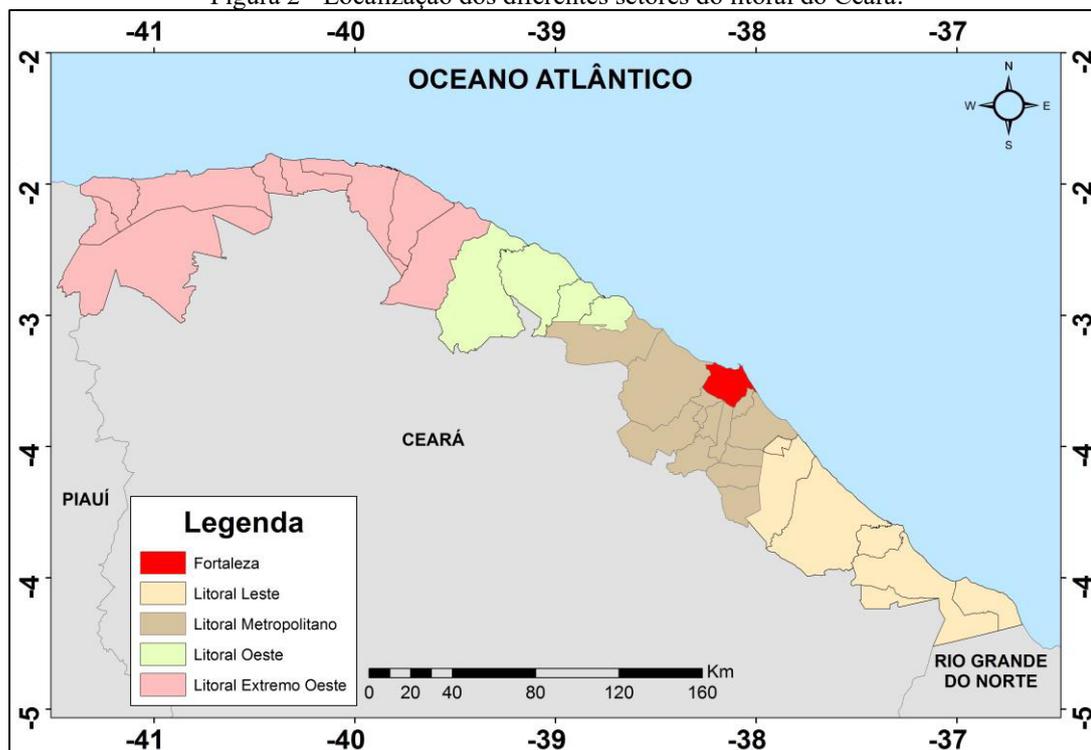


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 Resultado e discussão

A análise dos resultados da evolução da linha de costa do Estado do Ceará pode ser feita a partir da bacia hidrográfica que banha a costa; da geometria da costa, entre outras abordagens, contudo, a análise aqui foi realizada mediante os diferentes setores definidos na legislação, a saber: litoral leste; litoral metropolitano; litoral oeste e litoral extremo oeste (Figura 2) (Ceará, 2006). Essa escolha foi feita porque, conforme a Lei nº 13.796, de 30 de junho de 2006 determina (Ceará, 2006), a setorização acima mencionada deve ser seguida quando da concepção de planejamento, zoneamento e ordenamento territorial, e considerando que uma das principais contribuições do presente estudo é subsidiar o poder público com informações, nada mais lógico do que seguir o modelo que deve ser utilizado pelo poder público, não que necessariamente seja o mais apropriado.

Figura 2 - Localização dos diferentes setores do litoral do Ceará.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.1 Litoral Leste

A análise evolutiva do litoral leste foi realizada mediante comparações de períodos que consistiram em: 1984-1991; 1991-2000; 2000-2008; e, 2008-2018. A partir dessa análise foram identificados os hotspots de erosão. As áreas erodidas foram divididas em três diferentes trechos: **A** e **B**, localizados próximos da foz do Rio Jaguaribe, e **C**, na foz do rio Pirangi.

No primeiro período 1984-1991, ocorreu uma situação de estabilidade (Tabela 2). No trecho **A** (margem de Aracati) (Figura 3) houve o predomínio da acreção com o crescimento de um esporão arenoso próximo da foz. Já no trecho **B** (margem de Fortim) surgiu uma barra arenosa, contudo, próximo da foz houve intenso processo erosivo com recuo que atingiu o valor máximo de 241 m. Por fim, no trecho **C** (foz do rio Pirangi) é observada a ação de ambos processos, acreção dessa foz mediante crescimento do esporão, em 648 m, na direção E-W, na margem direita (Fortim) e erosão na margem esquerda (Praia de Parajuru, Beberibe) com recuo máximo de 240 m.

No segundo período 1991-2000, é observado o predomínio da acreção com 4,28 Km² de área ganha e taxa anual de progradação de 0,47 Km² (Tabela 2). No trecho **A** (margem de Aracati) ocorreu a ação dos dois processos, contudo, a erosão abrangeu uma área maior e o

recuo alcançou 193 m (Figura 3). A erosão provocou, no trecho **B** (margem de Fortim), o desaparecimento de uma barra arenosa que tinha surgido no período anterior 1984-1991, e teve local que o recuo atingiu 158 m. Semelhante ao período anterior 1984-1990, no trecho **C** (foz do rio Piranji), o esporão continuou a crescer (921 m) na direção E-W, na margem direita (Fortim) dessa foz e a erosão, na esquerda (Praia de Parajuru, Beberibe), chegou a causar o recuo de 163 m (Figura 3).

Tabela 2. Áreas de acreção e erosão, em Km², da linha de costa do litoral leste do Ceará.

PROCESSO	1984 - 1991	1991 - 2000	2000 - 2008	2008 - 2018
ACREÇÃO	2,61792	4,28911	3,5	0,89473
EROSÃO	2,35188	1,40895	1,21840	6,43157
RAZÃO	0,26604	2,88016	2,2816	-5,53685

Fonte: Elaborado pelo autor.

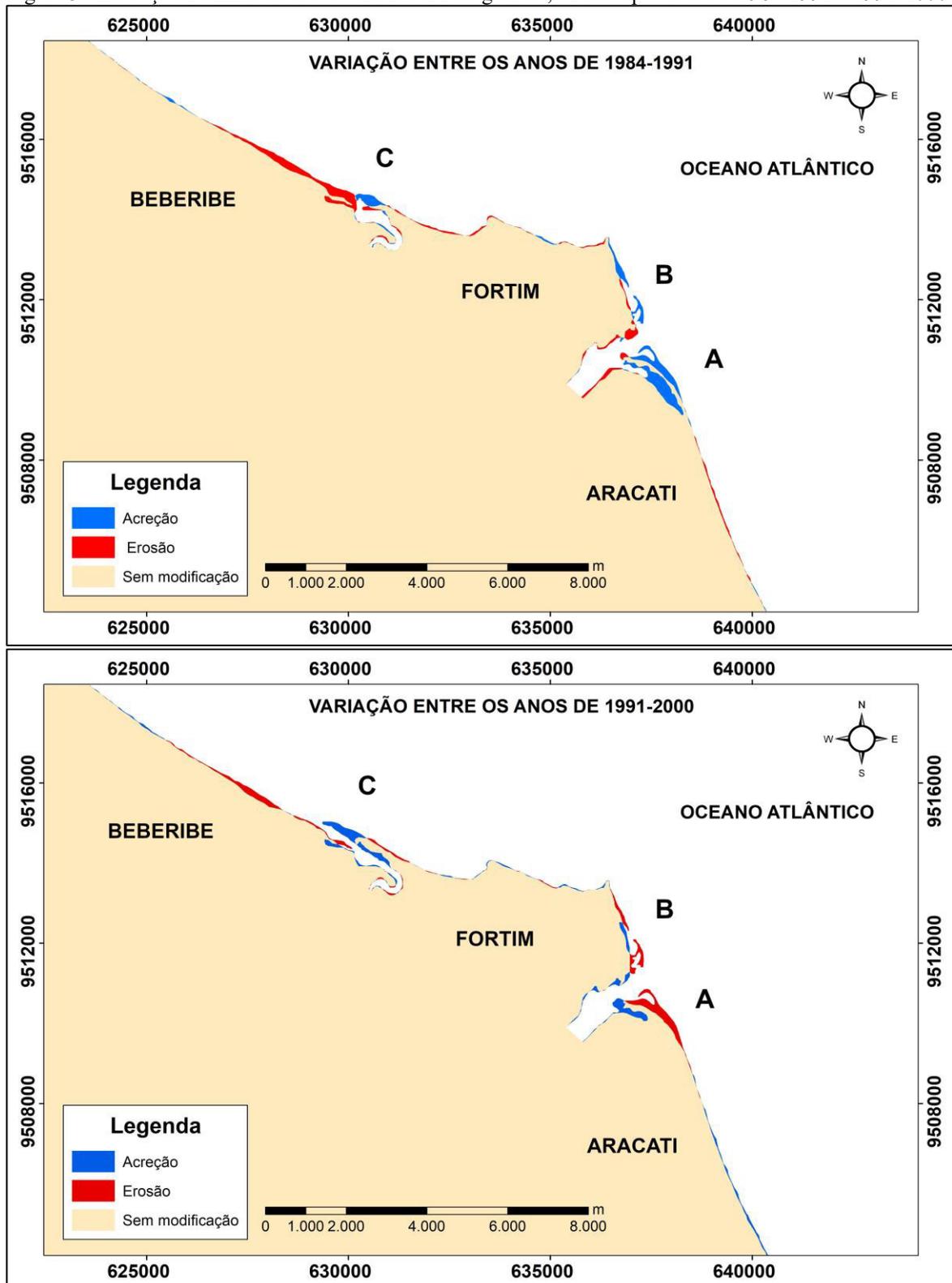
Semelhante aos dois primeiros períodos (1984-1991 e 1991-2000) no terceiro 2000-2008, ocorreu a predominância da acreção com 3,5 Km² de área ganha e taxa anual de progradação de 0,43 Km² (Tabela 2). No trecho **A** (margem de Aracati), os dois processos foram atuantes, destaque maior para a acreção que atingiu o valor máximo de 276 m (Figura 4). A tendência erosiva do trecho **B** (margem de Fortim) continua e a retrogradação alcançou o valor de 182 m. Já no trecho **C** (foz do rio Piranji) houve a continuação do crescimento do esporão arenoso em termos de comprimento (540 m) na margem de Fortim, contudo, redução de sua largura, o recuo na margem esquerda (Praia de Parajuru, Beberibe) chegou a atingir 123 m.

Diferentemente dos dois últimos períodos (1991-2000 e 2000-2008) no comparativo 2008-2018 houve o predomínio da erosão com 6,43 Km² de área perdida e taxa anual de retrogradação de 0,64 Km² (Tabela 2). A erosão atuou ao longo do trecho **A** (margem de Aracati) que retrogradou 239 m (Figura 4). No trecho **B** (margem de Fortim), um ponto retrogradou 188 m. Por fim, no trecho **C** (foz do rio Piranji) há uma ruptura do esporão arenoso que vinha crescendo na margem de Fortim nos períodos anteriores e passa a formar um segundo esporão em contato com a costa na Praia de Parajuru (Beberibe), o maior valor de recuo foi 234 m nessa praia. A tendência erosiva nessa praia foi observada no período de 2004-2016 onde o recuo alcançou 360 m (Barros et al., 2018), já o presente estudo indica uma continuação desse comportamento.

Quando analisado os períodos individuais para o litoral leste é constatado de início uma situação de equilíbrio 1984-1991, depois ocorrem dois períodos com a predominância da acreção (1991-2000 e 2000-2008), e, por último, o predomínio da erosão 2008-2018. Na soma

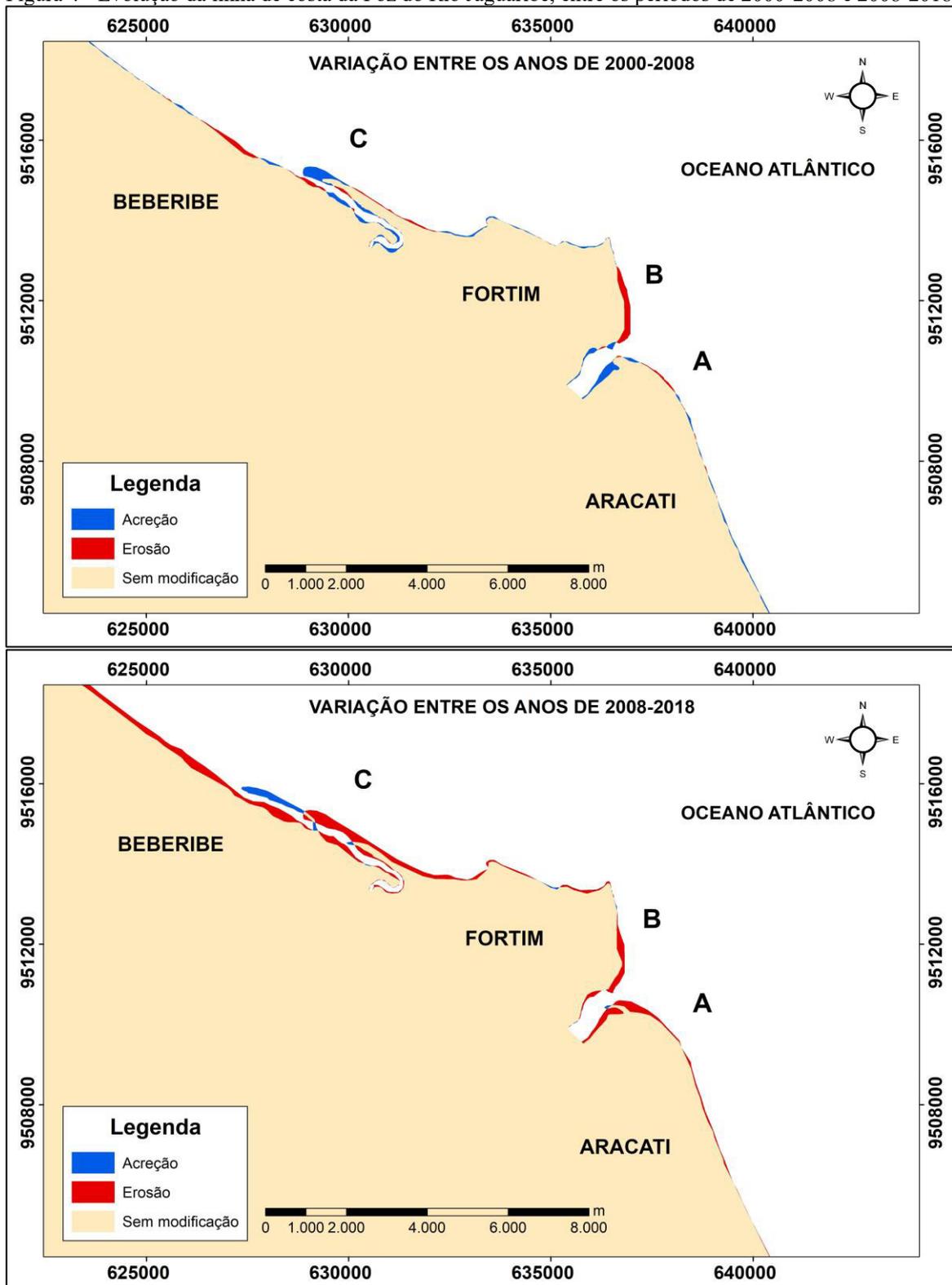
desses períodos é percebida uma situação de relativa estabilidade, 11,3 Km² de acreção e 11,4 Km² de erosão.

Figura 3 - Evolução da linha de costa da Foz do Rio Jaguaribe, entre os períodos de 1984-1991 e 1991-2000.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4 - Evolução da linha de costa da Foz do Rio Jaguaribe, entre os períodos de 2000-2008 e 2008-2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A erosão percebida nos pontos acima é ocasionada por um conjunto de fatores como: diminuição da vazão do rio Jaguaribe provocada pela construção de barragens (Morais et al., 2008); interrupção do transporte de sedimentos eólico (Claudino-Sales e Carvalho, 2014); e, “o regime de vazão fluvial, o comportamento do transporte eólico, as barreiras naturais para o *bypass* das areias, configuração geomorfológica e uso e ocupação do solo” (Morais et al., 2018, p. 280). Vale ressaltar que a interferência do promontório na deriva litorânea pode contribuir para o processo erosivo (Claudino-Sales e Carvalho, 2014), ainda, no litoral leste há a prevalência de praias de estado morfodinâmico refletivo com terraço de baixa mar (Pinheiro et al., 2016) o que confere uma relativa susceptibilidade a erosão.

2.3.2 Litoral Metropolitano

A linha de costa da região metropolitana foi dividida em diferentes trechos para melhor expor o comportamento da dinâmica costeira, para Fortaleza foram estabelecidos os seguintes: **A** (Praia do Futuro), **B** (Porto do Mucuripe-Praia Mansa-Praia do Titanzinho) e **C** (Praia de Iracema-Barra do Ceará); e, para Caucaia, **D** (Praia de Iparana), **E** (Praia do Pacheco-Praia de Icarai) e **F** (Praia de Tabuba).

No período de 1984-1991 houve equilíbrio no balanço sedimentar (Tabela 3). Na costa de Fortaleza (Figura 5), o trecho **A** (Praia do Futuro) teve a predominância da acreção onde o maior valor de progradação foi de 39 m, no trecho **B** (Porto do Mucuripe-Praia Mansa-Praia do Titanzinho) ocorreu erosão onde o recuo atingiu 92 m, no trecho **C** (Praia de Iracema-Barra do Ceará) ambos processos atuaram, os valores máximos foram de 89 m e 37 m, respectivamente, acreção e erosão. Já em Caucaia (Figura 6), no trecho **D** (Praia de Iparana) a erosão provocou o desaparecimento de um esporão próximo a foz do rio Ceará, no trecho **E** (Praia do Pacheco-Praia de Icarai) a erosão foi severa e alcançou 118 m, por fim, no trecho **F** (Praia de Tabuba), ambos os processos atuaram, contudo, os valores foram relativamente baixos tanto para acreção (26 m) como para erosão (52 m).

Diferentemente do período anterior 1984-1991, o de 1991-2000 foi marcado pelo predomínio da acreção com 1,15 Km² de área ganha e taxa anual de progradação de 0,20 Km². Nesse período, em Fortaleza (Figura 5), ocorreu progradação no trecho **A** (Praia do Futuro) atingindo valor máximo de 71 m, no trecho **B** (Porto do Mucuripe-Praia Mansa-Praia do Titanzinho) ocorreu a ação dos dois processos com valores máximos de recuo de 61 m e de acreção de 97 m, no trecho **C** (Praia de Iracema-Barra do Ceará) houve pontos onde a acreção atingiu 55 m e em outros a erosão alcançou 39 m.

Tabela 3. Áreas de acreção e erosão, em Km², da linha de costa do litoral metropolitano do Ceará.

PROCESSO	1984 - 1991	1991 - 2000	2000 - 2008	2008 - 2018
ACREÇÃO	1,28989	1,88517	1,34542	1,47391
EROSÃO	1,11632	0,73453	1,73816	1,70606
RAZÃO	0,173568	1,15063	-0,39275	-0,23215

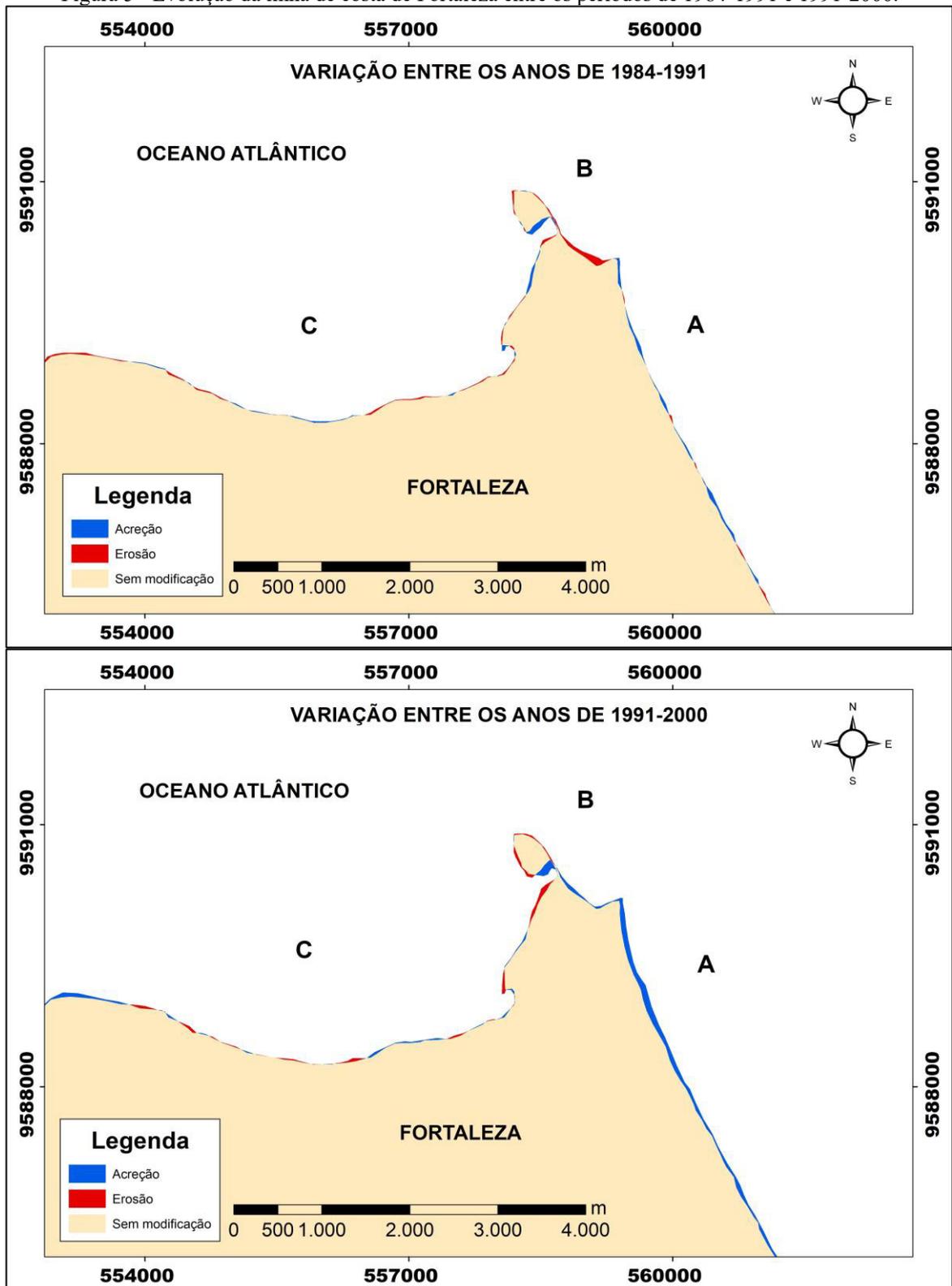
Fonte: Elaborado pelo autor.

No litoral de Caucaia (Figura 6), no trecho **D** (Praia de Iparana), o esporão que tinha sido erodido no período anterior 1984-1991, foi novamente construído no período de 1991-2000, no trecho **E** (Praia do Pacheco-Praia de Icarai) os dois processos agiram, o valor máximo de acreção foi de 61 m e de erosão foi 70 m, já no trecho **F** (Praia de Tabuba) a acreção predominou e atingiu o valor máximo de 80 m. Em outro estudo nesse litoral, a tendência erosiva já tinha sido observada no intervalo entre os anos de 1974 e 2001 impulsionada pelo transporte eólico (Carvalho e Claudino-Sales, 2016). Maia e Farias 2010, também constataram retrogradação da linha de costa em Caucaia, no período de 1991 e 1999, onde o recuo chegou a alcançar 9,4m/ano.

O período de 2000-2008, semelhante ao período de 1984-1991, é caracterizado pelo equilíbrio dinâmico entre os dois processos. O trecho da Praia do Futuro (**A**) (Figura 7) progrediu 55 m, essa praia tem índice de mobilidade alto, ou seja, susceptibilidade alta para processos de acreção ou erosão (Albuquerque et al., 2009). No trecho **B** (Porto do Mucuripe-Praia Mansa-Praia do Titanzinho), novamente, ocorreram os dois processos, o valor máximo de acreção foi de 183 m e o de erosão foi de 76 m, no trecho **C** (Praia de Iracema-Barra do Ceará) tanto a acreção como a erosão atuaram com valores máximos de, respectivamente, 82 m e 75 m. Um estudo anterior, entre os anos de 1972 e 2003, corrobora com o que aqui foi observado, isto é, tendência de recuo da linha de costa no lado oeste do Porto do Mucuripe e acreção no leste (Bezerra et al., 2007).

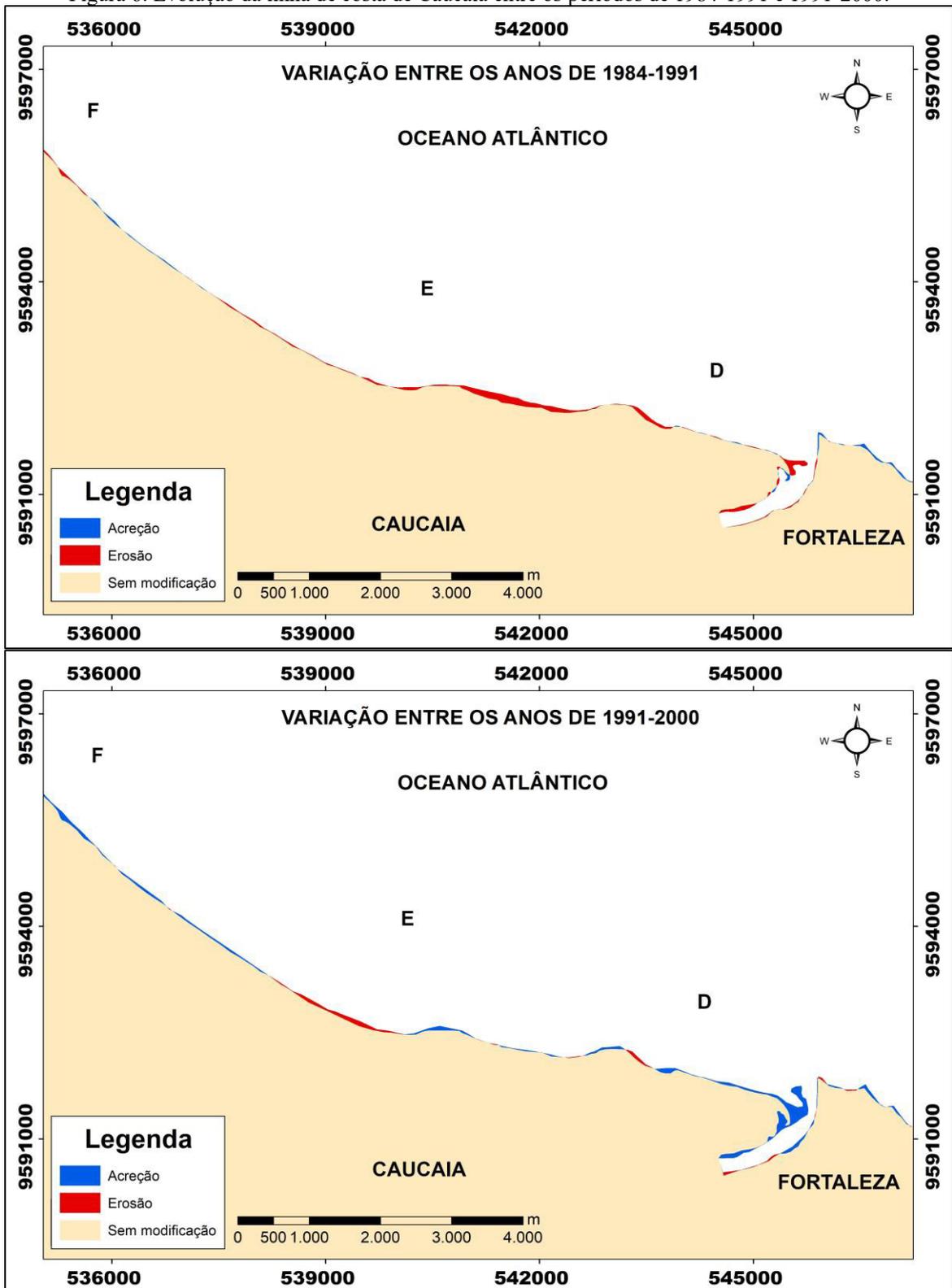
O período de 2000-2008 é marcado por severa erosão no litoral de Caucaia (Figura 8), no trecho **D** (Praia de Iparana), o esporão que havia sido reconstruído no período anterior 1991-2000, é novamente erodido, no trecho **E** (Praia do Pacheco-Praia de Icarai) o recuo foi de 78 m, já na Praia da Tabuba (trecho **F**) foi de 81 m.

Figura 5 - Evolução da linha de costa de Fortaleza entre os períodos de 1984-1991 e 1991-2000.



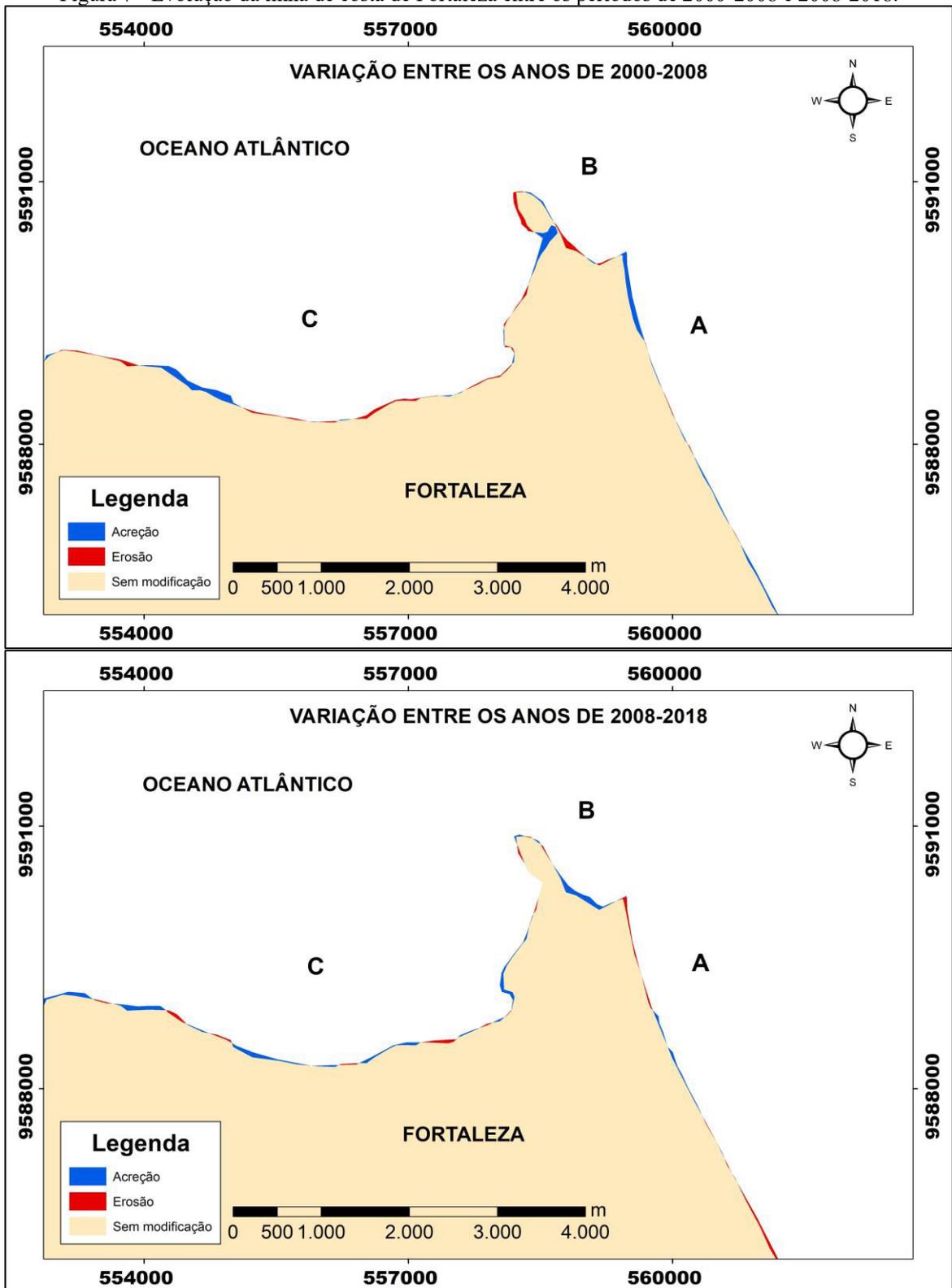
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6. Evolução da linha de costa de Caucaia entre os períodos de 1984-1991 e 1991-2000.



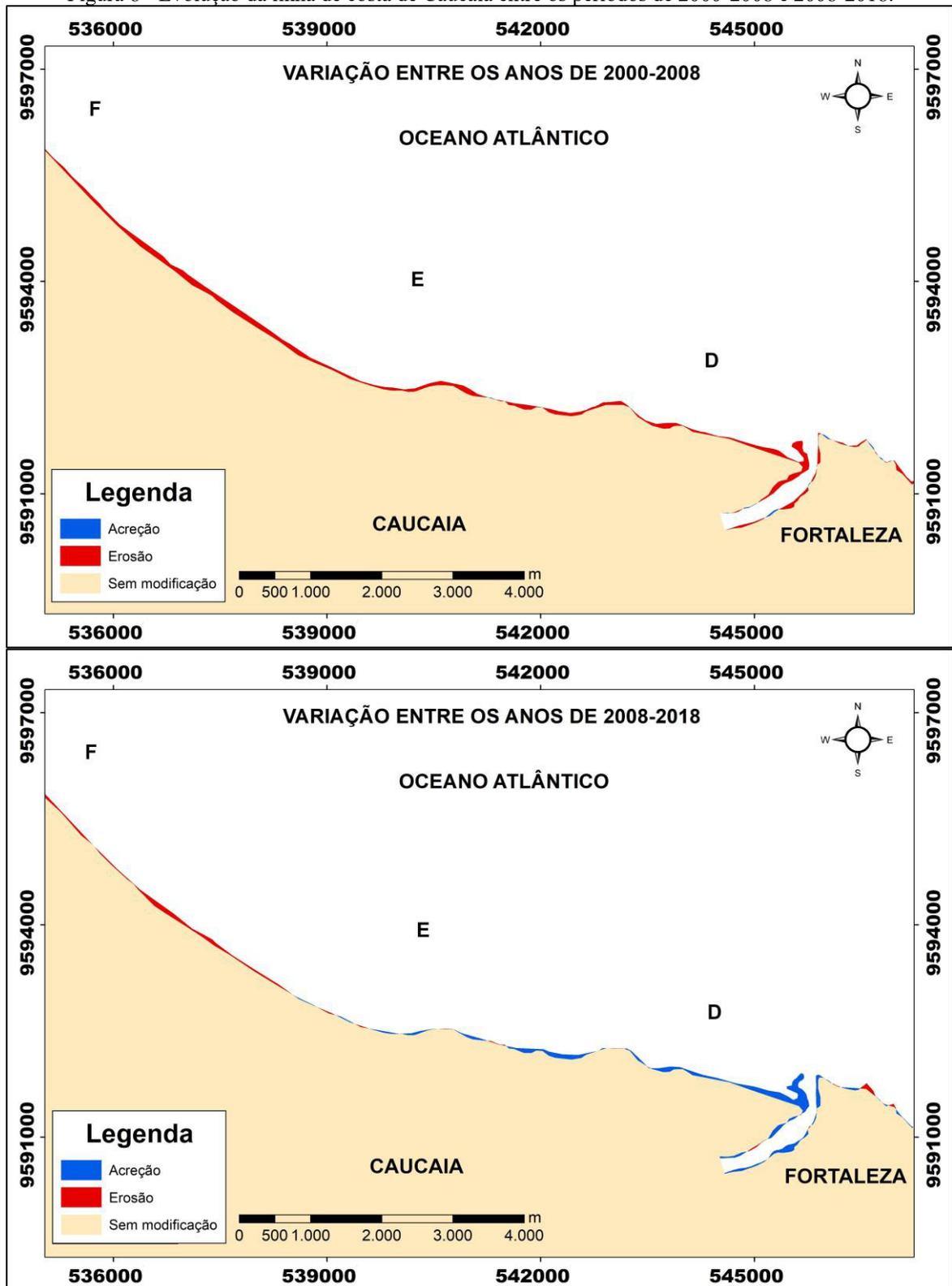
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 - Evolução da linha de costa de Fortaleza entre os períodos de 2000-2008 e 2008-2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 - Evolução da linha de costa de Caucaia entre os períodos de 2000-2008 e 2008-2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O balanço sedimentar novamente é marcado por um equilíbrio dinâmico, agora para o período de 2008-2018. Na costa de Fortaleza (Figura 7), na Praia do Futuro (trecho A),

diferentemente do que vinha acontecendo nos períodos anteriores (1984-1991, 1991-2000 e 2000-2008) que, como corrobora a literatura, foi marcado pela progradação no período de 1972-2010 (Marino e Freire, 2013), no atual 2008-2018, em um pequeno trecho, ocorreu recuo onde atingiu 48 m, no trecho **B** (Porto do Mucuripe-Praia Mansa-Praia do Titanzinho) a acreção atuou e alcançou o valor máximo de 77 m, no trecho **C** (Praia de Iracema-Barra do Ceará) a acreção e a erosão agiram em diferentes pontos, destaque maior para a acreção que fez uma extensão maior da linha de costa e chegou a alcançar 94 m.

Em Caucaia (Figura 8), no período de 2008-2018, no trecho **D** (Praia de Iparana), novamente o esporão próximo da foz do rio Ceará foi reconstruído mediante a acreção, essa feição teve um comportamento cíclico no presente estudo ora erodida (1984-1991 e 2000-2008) ora reconstruída (1991-2000 e 2008-2018), no trecho **E** (Praia do Pacheco-Praia de Icarai) os dois processos atuaram, com valores máximos de acreção de 70 m e de erosão de 70 m, o trecho **F** (Praia de Tabuba) novamente sofre com a erosão com recuo de 62 m.

Na análise dos diferentes períodos o litoral metropolitano tem, inicialmente, uma situação de equilíbrio 1984-1991, no seguinte o predomínio da acreção 1991-2000, depois duas sequências de equilíbrio dinâmico (2000-2008 e 2008-2018). A soma dos processos dos diferentes períodos individuais (acreção, 5,99 Km² e erosão, 5,29 Km²) demonstra uma situação de relativa estabilidade.

Essa tendência erosiva observada no Porto do Mucuripe é resultado da implantação desse porto que não realizou estudos adequados da hidrodinâmica costeira vindo a acarretar a retrogradação da linha de costa (Maia et al., 1998; Bezerra et al., 2007). Para conter a erosão provocada pela instalação do Porto do Mucuripe foram construídos molhes que obstruíram a passagem de sedimentos, por conseguinte, diminuíram o aporte sedimentar e causaram o recuo da linha de costa em Caucaia (Farias e Maia, 2010).

2.3.3 Litoral Oeste

As áreas do litoral oeste que tiveram uma maior dinâmica da linha de costa foram separadas em diferentes trechos, na foz do rio Curú, tem-se os trechos **A** (Paracuru) e **B** (Paraipaba), e, na foz do rio Mundaú, **C** (Trairi) e **D** (Itapipoca).

No período de 1984-1991 foi constatada a prevalência da acreção com 3,02 Km² de área ganha (Tabela 4) e taxa anual de 0,43 Km². No trecho **A** (Paracuru) (Figura 9) teve uma diminuição significativa no tamanho do esporão (861 m) na foz do rio Curú, ainda em um ponto dessa área a acreção agiu e progradou 107 m, já no trecho **B** (Paraipaba) ocorreu aumento do

tamanho do esporão em direção ao centro da foz desse rio, a progradação atingiu 68 m. Na foz do rio Mundaú (Figura 10), no trecho **C** (Trairi), os dois processos agiram, contudo, o destaque maior é para a severa erosão que retrogradou até 324 m e culminou com a retração do esporão próximo da comunidade de Mundaú, já no trecho **D** (Itapipoca), semelhante ao trecho anteriormente citado, a acreção e a erosão promoveram alterações, mas o processo mais intenso foi o primeiro que provocou a progradação de até 172 m em contraposição ao segundo que retrogradou 77 m, a acreção contribuiu com o crescimento do esporão em direção ao “meio” da foz.

Tabela 4. Áreas de acreção e erosão, em Km², da linha de costa do litoral oeste do Ceará.

PROCESSO	1984 - 1991	1991 - 2000	2000 - 2008	2008 - 2018
ACREÇÃO	3,02371	0,41465	1,00187	1,68739
EROSÃO	0,48649	3,07578	0,95223	0,46050
RAZÃO	2,53722	-2,66113	0,04964	1,22688

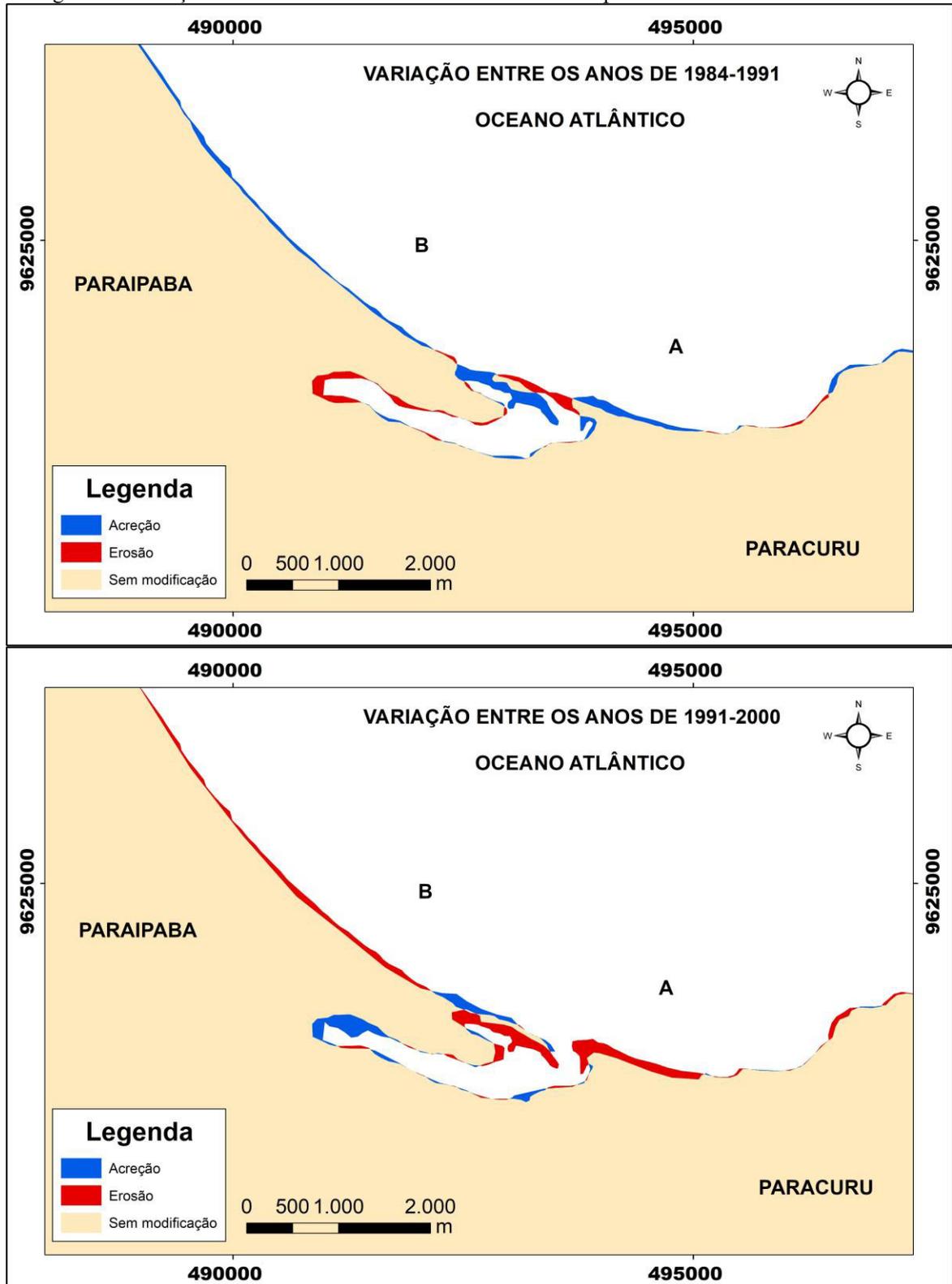
Fonte: Elaborado pelo autor.

O período de 1991-2000, diferentemente do período anterior 1984-1991, é caracterizado pelo predomínio da erosão com 3,07 Km² de área perdida e taxa anual de retrogradação de 0,34 Km². Na foz do rio Curú (Figura 9), no trecho **A** (Paracuru) ocorreu forte erosão com recuo de até 263 m, ainda na mesma foz, contudo, no trecho **B** (Paraipaba) tanto a acreção quanto a erosão agiram com valores máximos de até, respectivamente, 118 m e 241 m, a retrogradação atingiu de modo significativo o esporão. A foz do rio Mundaú (Figura 10) sofreu com o forte processo erosivo tanto na margem direita (trecho **C**, Trairi), como na esquerda (trecho **D**, Itapipoca), os recuos foram de, respectivamente, 155 m e 126 m. Essa erosão, no trecho **C** (Trairi), ocorreu, novamente, próximo da comunidade de Mundaú, já no trecho **D** (Itapipoca) ocasionou a diminuição do esporão que tinha crescido no período anterior 1984-1991.

Diferentemente dos dois períodos anteriores (1984-1991 e 1991-2001) o de 2000-2008 é marcado por equilíbrio no balanço sedimentar. Na foz do rio Curú (Figura 11), no trecho **A** (Paracuru) os dois processos atuaram, a acreção promoveu o crescimento do esporão nessa margem, contudo, destaque maior para a severa erosão que promoveu o recuo de até 128 m da linha de costa. Semelhante ao trecho anterior, no trecho **B** (Paraipaba), a acreção e erosão agiram, a progradação teve o valor máximo de 148 m, a retrogradação provocou a diminuição do tamanho do esporão e o recuo de até 131 m. Para essa região, Quintela-Falção et al. (2011), tinham constatado, no período entre 2001-2007, uma retração da costa de Paraipaba de 470,26 m e um aumento do esporão, em termos de comprimento, e redução da sua largura, no lado de

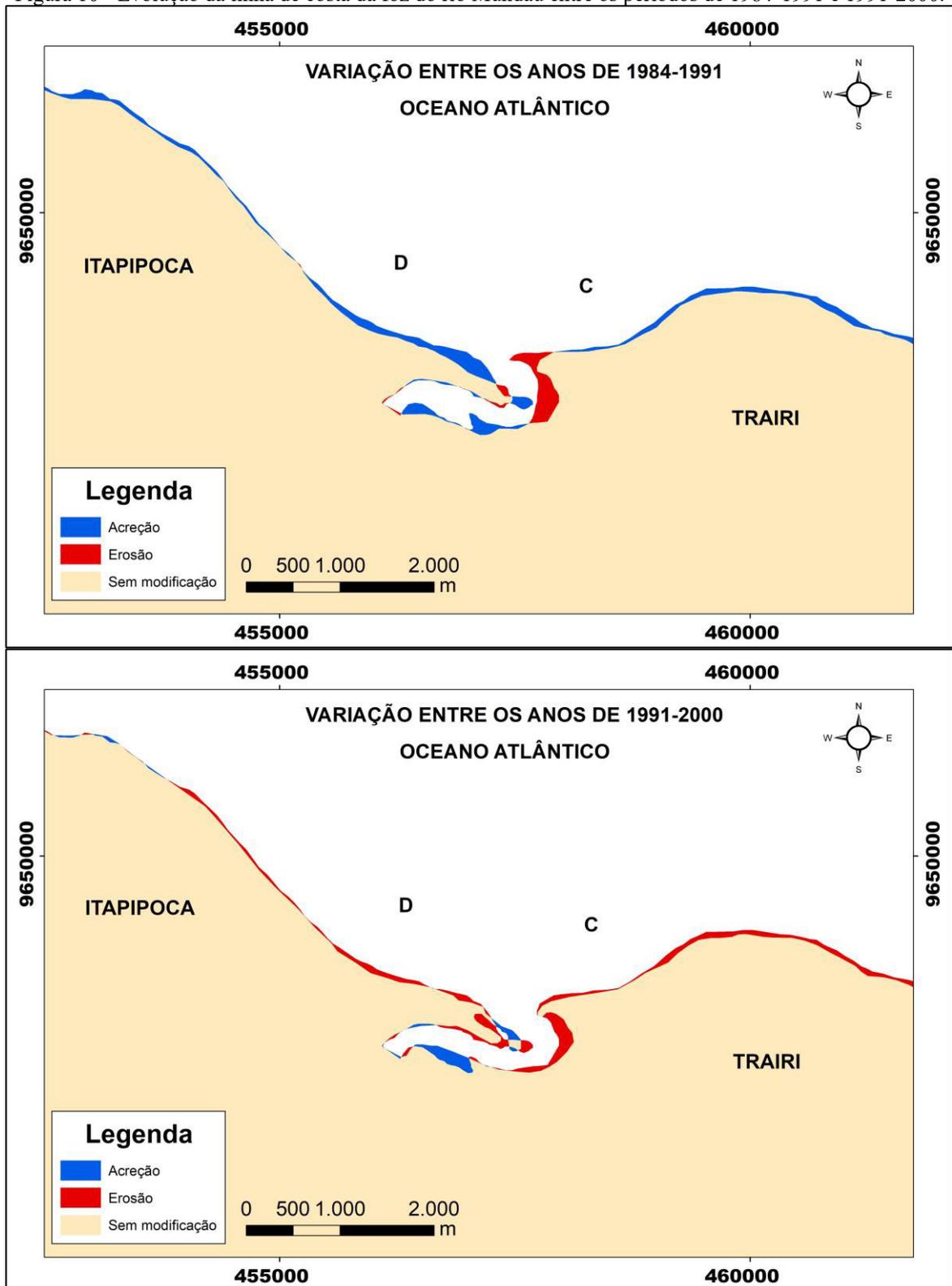
Paracuru. Esse comportamento, observado por Falção-Quintela et al. (2011), continua até 2008 conforme exposto no presente estudo.

Figura 9 - Evolução da linha de costa da foz do rio Curú entre os períodos de 1984-1991 e 1991-2000.



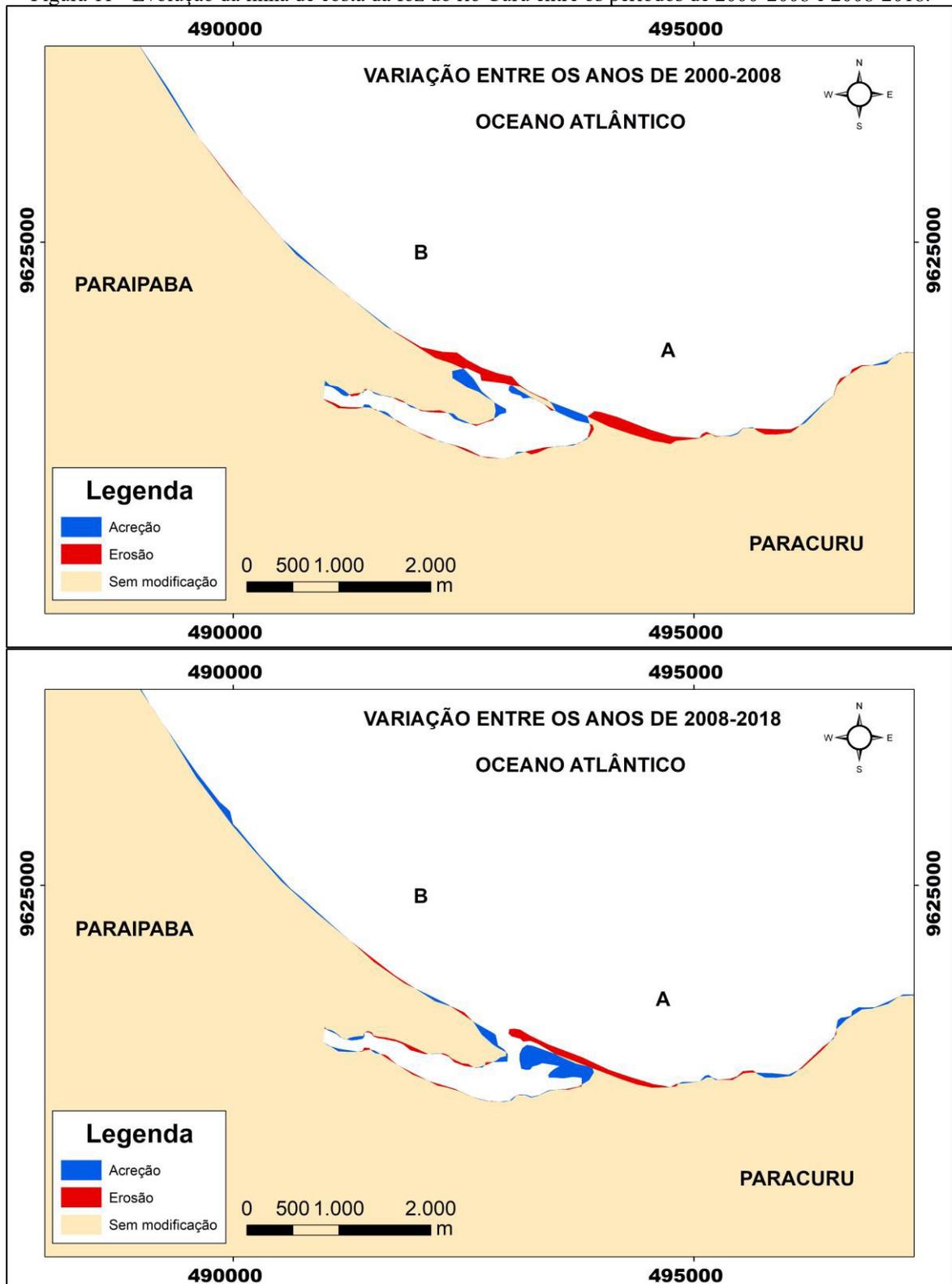
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Evolução da linha de costa da foz do rio Mundaú entre os períodos de 1984-1991 e 1991-2000.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 - Evolução da linha de costa da foz do rio Curú entre os períodos de 2000-2008 e 2008-2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No período de 2000-2008, na foz do rio Mundaú (Figura 12), no trecho C (Trairi), semelhante aos trechos anteriores (A, Paracuru, e B, Paraipaba) tanto a acreção como a erosão

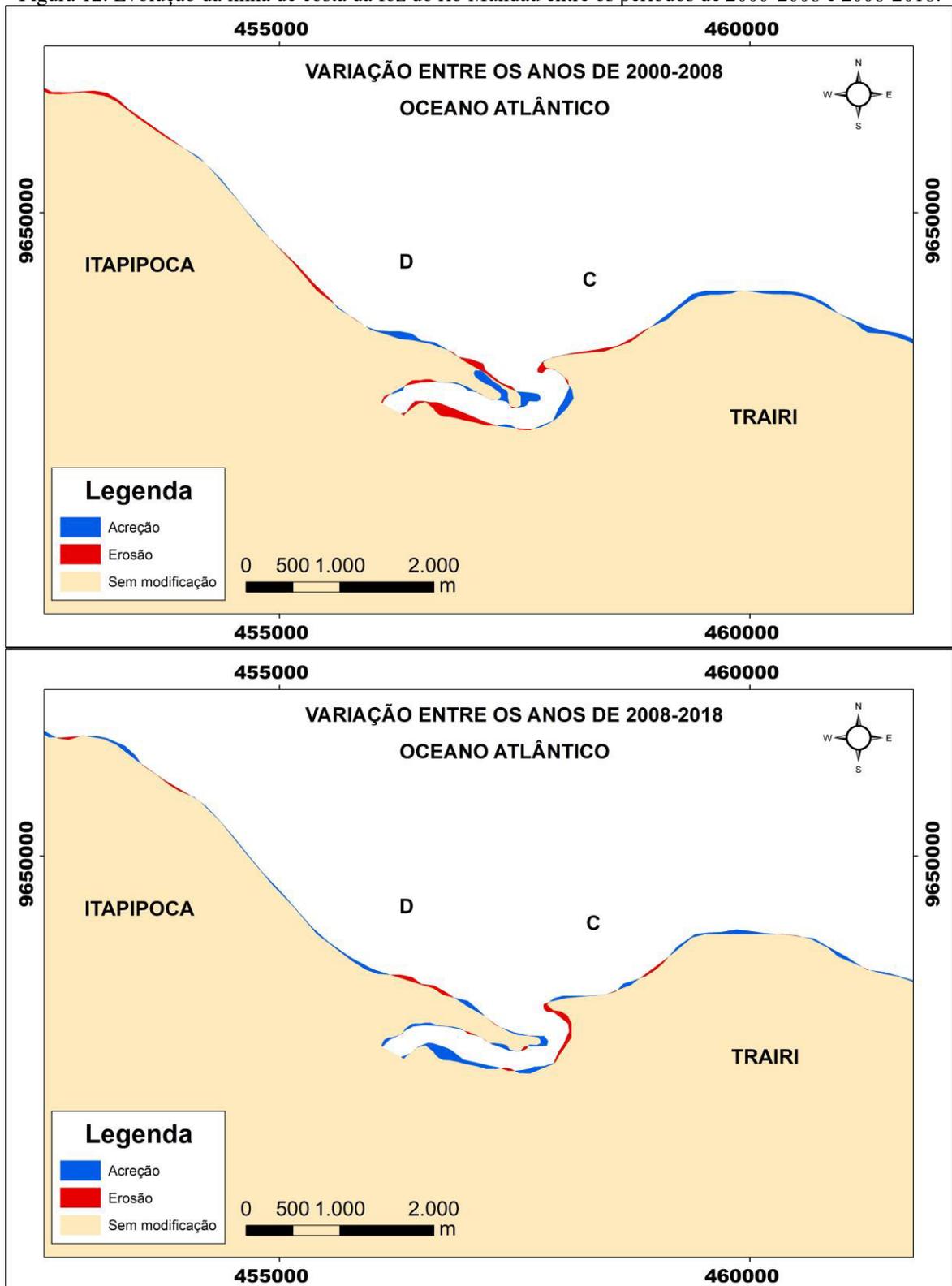
provocaram alterações na linha de costa, valores máximos de progradação e retrogradação foram, respectivamente, 88 m e 97 m, a erosão provocou, novamente, o recuo do esporão próximo da comunidade de Mundaú. Ainda nessa foz, no trecho **D** (Itapipoca), os dois processos também atuaram, a acreção teve o valor máximo de 209 m e provocou o crescimento do esporão em direção ao “meio” da foz, já a erosão ocasionou o recuo da linha de costa de até 78 m.

O período de 2008-2018 é marcado pelo predomínio da acreção com 1,68 Km² de área ganha e taxa anual de progradação de 0,16 Km². Na foz do rio Curú (Figura 11), no trecho **A** (Paracuru) houve o deslocamento do esporão em direção ao interior da foz e aumento da sua largura em 274 m, já no trecho **B** (Paraipaba), os dois processos agiram, a acreção e a erosão tiveram valores máximos de, respectivamente, 98 m e 44 m. Na foz do rio Mundaú (Figura 12), no trecho **C** (Trairi), os dois processos atuaram, a linha de costa progradou 30 m, contudo, o valor do recuo foi de 63 m próximo da comunidade de Mundaú (Trairi). Essa tendência erosiva, na foz do Rio Mundaú, já tinha sido observada anteriormente, no período de 1958-2010, onde o recuo em Trairi foi de 415 m (Mendes, 2012). Já o trecho **D** (Itapipoca) também teve a ação dos dois processos, a acreção promoveu, semelhante ao período anterior 2000-2008, o crescimento do esporão em direção ao centro da foz com o avanço de 84 m, a erosão agiu em um trecho pequeno e recuou a linha de costa em até 47 m.

Na análise dos diferentes períodos o litoral oeste tem, inicialmente, a predominância da acreção 1984-1991, depois a prevalência da erosão 1991-2000, uma situação de equilíbrio dinâmico 2000-2008 e, na sequência, o domínio da acreção 2008-2018. A soma dos processos dos diferentes períodos demonstra uma pequena vantagem da acreção (6,12 Km²) sobre a erosão (4,97 Km²), esse valor baixo pode indicar uma situação de relativa estabilidade.

Um importante fator que contribui na retrogradação da linha de costa, na área da foz do rio Curú, é a existência de convergência de ondas, por conseguinte, aumento na intensidade da deriva litorânea que potencializa a ação do processo erosivo (Carvalho et al., 2007). Em Paracuru, a ocupação do topo da falésia inibe o fluxo de sedimentos do tabuleiro em direção ao litoral e, por conseguinte, intensifica a abrasão marinha no local (Magalhães e Meireles, 2016). Semelhante ao que ocorre em Paracuru, na foz do rio Mundaú uma das causas da retrogradação é a ocupação da zona de *bypass* (Meireles et al., 2006). A fisiografia da linha de costa do litoral oeste é dominada por promontórios e é considerada estável, em termos de balanço sedimentar, mediante um equilíbrio dinâmico onde o *bypass* contribui nesse balanço impedindo a aceleração da erosão (Carvalho et al., 2004; Carvalho e Sales, 2016). Essa estabilidade observada na literatura foi endossada com os dados da presente pesquisa que constataram um pequeno domínio da acreção nesse segmento costeiro.

Figura 12. Evolução da linha de costa da foz do rio Mundaú entre os períodos de 2000-2008 e 2008-2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.4 Litoral Extremo Oeste

Foram identificados os seguintes trechos que tiveram uma dinâmica mais intensa da linha de costa: na foz do rio Aracatiaçu, trechos **A** (Amontada) e **B** (Itarema); em Itarema, trechos **C** (foz do rio Aracatimirim), **D** (Praia de Almofala), **E** (Praia do Porto) e **F** (Ilha do Guajiru); em Acaraú, trecho **G** (Praias de Espriado e Volta do Rio); trecho **H**, entre Mangue Seco (Jijoca de Jericoacoara) e Guriú (Camocim); e, trecho **I**, foz do riacho Tucunduba (Camocim).

O período de 1984-1991 é caracterizado pela acreção onde foi constatado um aumento de 14,76 Km² (Tabela 5) de área ganha com taxa anual de 2,10 Km². Na foz do rio Aracatiaçu (Figura 13), no trecho **A** (margem pertencente a Amontada), foi observada a erosão que provocou o rompimento do esporão e recuo de até 170 m, no **B** (margem pertencente a Itarema), a acreção promoveu o surgimento de um esporão, ainda, um pequeno trecho teve erosão com recuo de até 189 m. Em Itarema, no trecho **C** (foz do rio Aracatimirim), a erosão provocou o rompimento do esporão na sua margem direita, já a acreção construiu um esporão na margem esquerda, houve também retrogradação com recuo de 188 m, para essa região, Aguiar et al. (2012) identificaram recuo de até 410 m, entre 1958 e 1988, e o rompimento do esporão em 1988; no trecho **D** (Praia de Almofala), a erosão agiu e o provocou a retrogradação de 70 m.

Tabela 5. Áreas de acreção e erosão, em Km², da linha de costa do litoral extremo oeste do Ceará.

PROCESSO	1984 - 1991	1991 - 2000	2000 - 2008	2008 - 2018
ACREÇÃO	14,7634	5,81507	8,99317	4,57653
EROSÃO	4,72899	13,3025	5,67224	11,9604
RAZÃO	10,03443	-7,4874	3,32092	-7,38392

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda em Itarema (Figura 14), no período de 1984-1991, no trecho **E** (Praia do Porto), a acreção promoveu o crescimento do esporão, na direção E-W, em 785 m, o processo erosivo agiu em poucas áreas e o recuo foi de até 94 m. No trecho **F** (Ilha do Guajiru, Itarema), a deposição ocasionou o crescimento do esporão da “ilha” na direção E-W, em 605 m, o pequeno esporão que estava na frente da “ilha” foi deslocado na direção E-W, já a erosão ocorreu em algumas pequenas áreas onde o recuo alcançou 93 m. Souza et al. 2016 também observaram o crescimento do esporão da “ilha” na direção E-W, no período de 1984-1994. Em Acaraú, no trecho **G** (Praias de Espriado e Volta do Rio), a acreção ocorreu em mais áreas, a progradação máxima foi de 348 m, já o processo erosivo ocasionou o recuo de 198 m. Para a

localidade de Espraiado (Acaráú), Moraes et al. 2015 observaram uma tendência de acreção no período de 1987-1991, esse resultado ratifica o que aqui foi constatado. Para a mesma área da costa de Acaráú, Souza et al. 2016 também identificaram o predomínio da acreção, contudo, com erosão pontual em alguns trechos, principalmente, na localidade de Espraiado no período de 1984-1994. Conforme o observado, os dois estudos indicam as mesmas tendências ao aqui constado.

Para o trecho **H** (Figura 15), no período de 1984-1991, é observada a acreção na praia de Mangue Seco (Jijoca de Jericoacoara) que promoveu o crescimento do esporão em 415 m na direção E-W, a erosão nessa praia foi em uma pequena área com recuo de 80 m; ainda no trecho **H**, a erosão foi severa na praia de Guriú (Camocim) e esculpiu/formou uma barra arenosa, o valor de retrogradação máxima foi de 371 m. No trecho **I**, foz do riacho Tucunduba (Camocim), os dois processos atuaram, a erosão provocou o desaparecimento do esporão na margem direita e o recuo de 262 m, ainda nessa margem, a deposição promoveu o aumento linear de 78 m, na margem esquerda, surgiram dois esporões e progradação de 153 m, já a erosão ocasionou o recuo de 102 m.

Diferentemente do período anterior (1984-1991) no de 1991-2000 ocorreu o predomínio da erosão onde a área perdida foi de 13,3 Km² (Tabela 4) com taxa anual de recuo de 1,47 Km². Na foz do rio Aracatiaçu (Figura 13), no trecho **A** (Amontada), a acreção iniciou a reconstrução do esporão erodido no período anterior 1984-1991 onde o crescimento foi de 304 m, ainda, teve retrogração em um pequeno trecho com recuo de 72 m; no trecho **B** (Itarema), houve o deslocamento e crescimento do esporão na direção E-W, a linha de costa recuou até 271 m. Em Itarema, no trecho **C** (foz do rio Aracatimirim), a erosão atuou nas duas margens do rio, na direita, ocasionou o recuo de 207 m, na esquerda, ela fez desaparecer o esporão que tinha surgido no período anterior 1984-1991, em um pequeno trecho, na margem esquerda, teve progradação de até 210 m. Já no trecho **D** (Praia de Almofala), os dois processos atuaram, a acreção alcançou o valor máximo de 94 m e a erosão de 148 m.

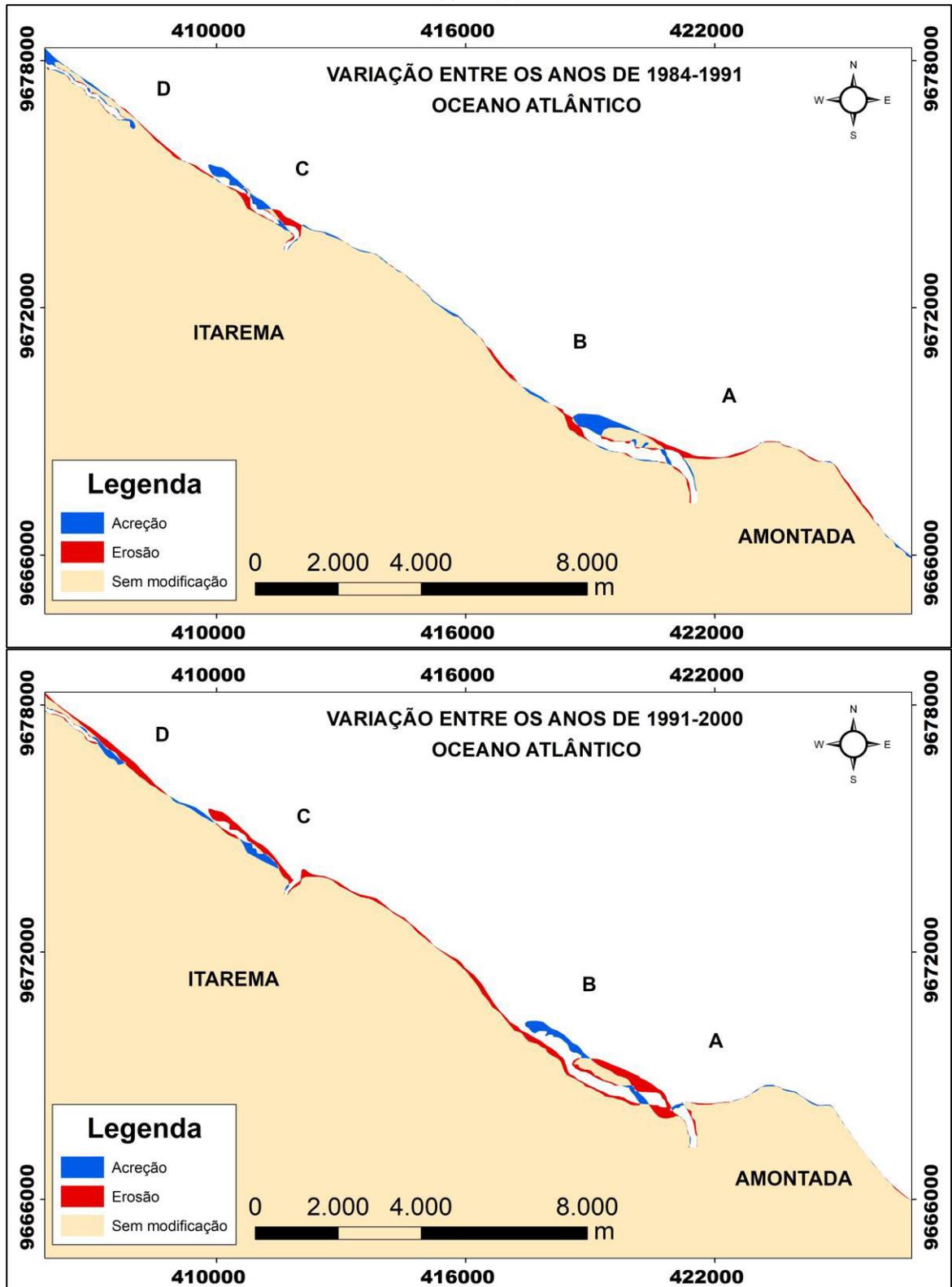
Para o período de 1991-2000, há aumento das áreas que sofreram com a erosão, no trecho **E** (Praia do Porto, Itarema) (Figura 14), teve retrogradação de 173 m e diminuição da largura do esporão, ainda, esse mesmo esporão aumentou seu comprimento na direção E-W, em 1.048 m. Para a região da praia anteriormente mencionada, Farias e Maia 2010, constataram tendência de erosão com 8,8 m/ano, no período de 1991-2005. Na Ilha do Guajiru (Itarema), trecho **F**, o processo erosivo promoveu a redução de sua largura em alguns pontos, a área que faz a ligação dessa região com o continente teve um forte recuo de 618 m, ainda, ocorreu aumento do comprimento dela em 1.036 m. Em Acaráú, no trecho **G** (Praias de Espraiado e

Volta do Rio), os dois processos atuaram, a acreção promoveu o crescimento de um esporão em até 1.054 m, apesar disso, houve aumento das áreas com erosão com recuos de até 268 m. Moraes et al. 2015 e Souza et al. 2016, observaram o aumento do processo de erosão para os períodos de 1991-1999 e 1994-2003, respectivamente, para as regiões de Espraiado e Volta do Rio (Acaráú) e Ilha do Guajiru (Itarema).

No trecho **H** (Figura 15), no período de 1991-2000, a acreção, na praia de Manguê Seco (Jijoca de Jericoacoara), provocou o crescimento do esporão em 439 m na direção E-W, a erosão esculpiu/formou outra barra arenosa, em alguns pontos do esporão houve recuo de 135 m; ainda no trecho anteriormente mencionado, na praia de Guriú (Camocim), a erosão foi severa, a retrogradação máxima foi de 250 m. Para o trecho **I**, foz do riacho Tucunduba (Camocim), a deposição formou um esporão na margem direita, o aumento linear máximo nessa margem foi de 216 m, já na margem esquerda, a acreção formou dois pequenos esporões ao passo que a erosão fez sumir um esporão que existia no período anterior (1984-1991).

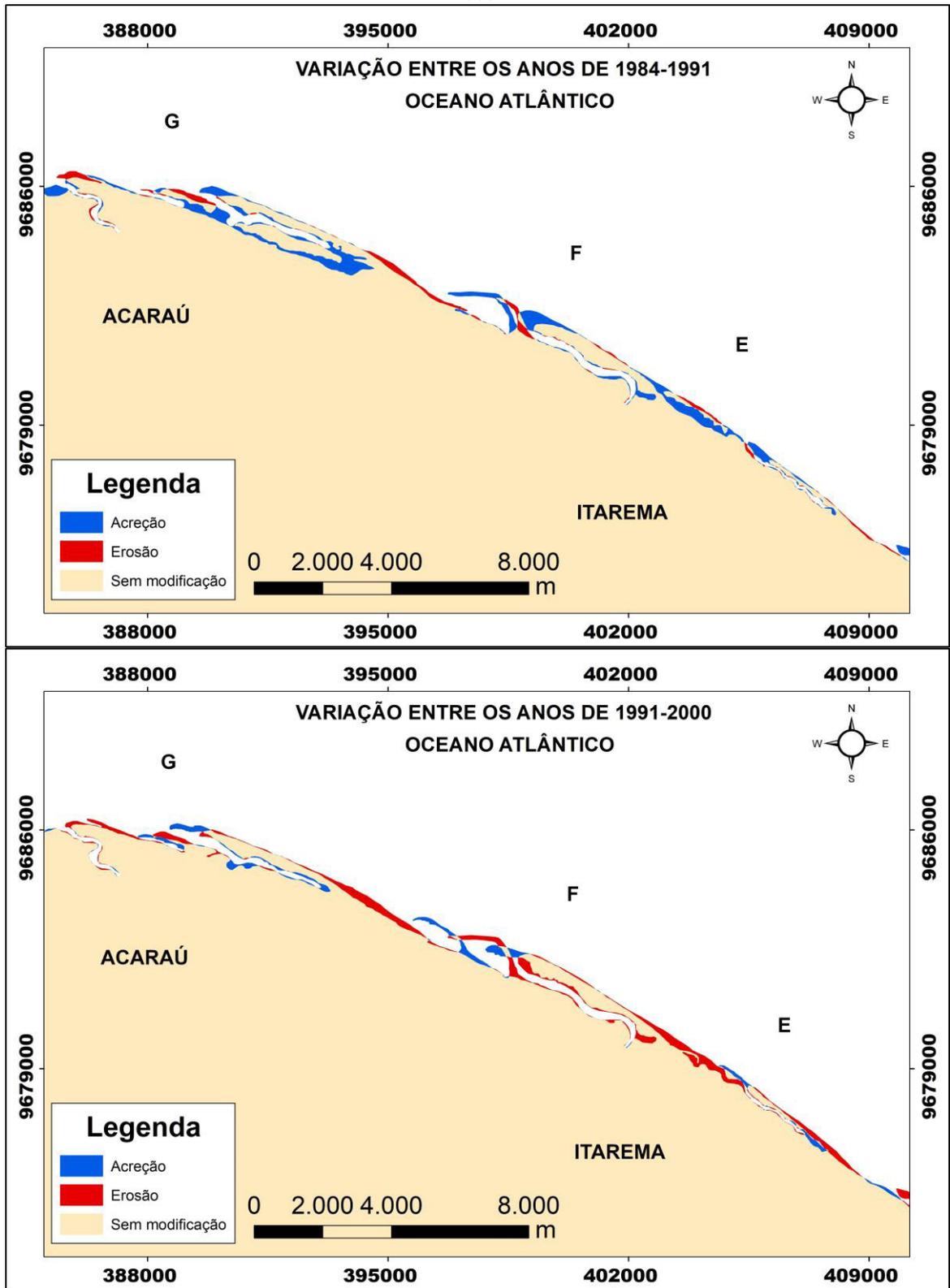
A acreção novamente prevalece, agora para o período 2000-2008 com 8,99 Km² de área ganha e taxa anual de progradação de 1,12 Km². Na foz do rio Aracatiaçu (Figura 16), no trecho **A** (Amontada), o processo de reconstrução do espigão iniciado no período anterior 1991-2000, continua onde o aumento foi de 644 m, ainda, um pequeno trecho teve recuo de 96 m; nessa mesma foz, no trecho **B** (margem pertencente a Itarema), o esporão, semelhante ao período anterior (1991-2000), continua a crescer no sentido E-W, contudo, ele rompe a ligação com o continente, há também o surgimento de outro esporão em contato com a costa. Em Itarema, no trecho **C** (foz do rio Aracatimirim), os dois processos atuaram, a acreção teve os valores de 28 m, na margem direita, e 32 m, na esquerda, já a erosão ocasionou os recuos de 55 m, na margem direita, e 36 m, na margem esquerda. Aguiar et al. (2012), observaram uma relativa estabilidade na foz do rio Aracatiaçu, no período de 1988-2004, no presente estudo, foi percebida uma diminuição do processo de erosão e aumento da acreção no intervalo de 2000-2008, o que pode indicar uma tendência parecida com a apontada no trabalho anteriormente mencionado. No trecho **D** (Praia de Almofala), ocorreu uma diminuição tanto da progradação (29 m) como da retrogradação (75 m), em comparação ao período anterior (1991-2000).

Figura 13 - Evolução da linha de costa da região entre Amontada e Itarema para os períodos de 1984-1991 e 1991-2000.



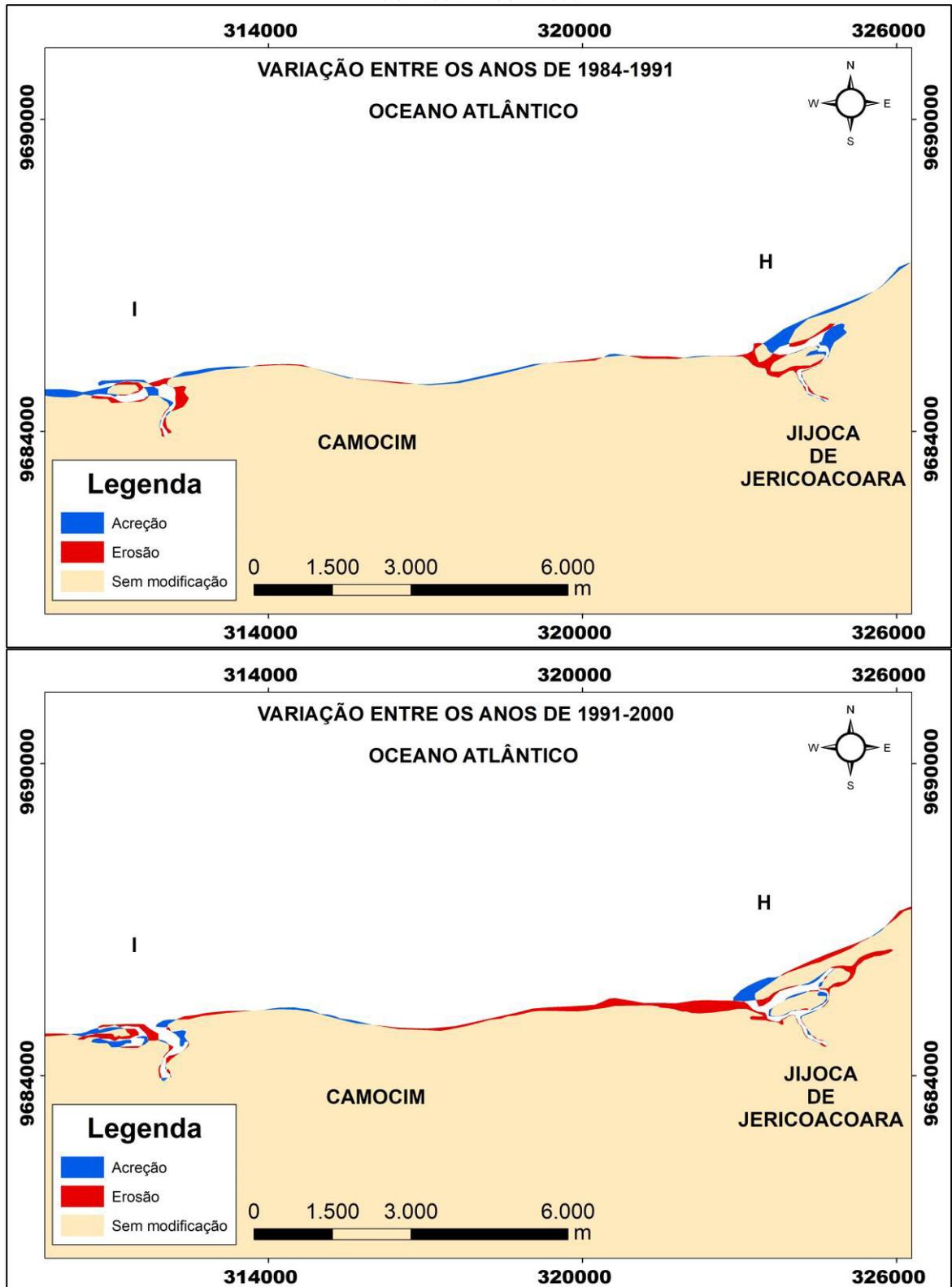
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14. Evolução da linha de costa da região entre Itarema e Acaraú para os períodos de 1984-1991 e 1991-2000.



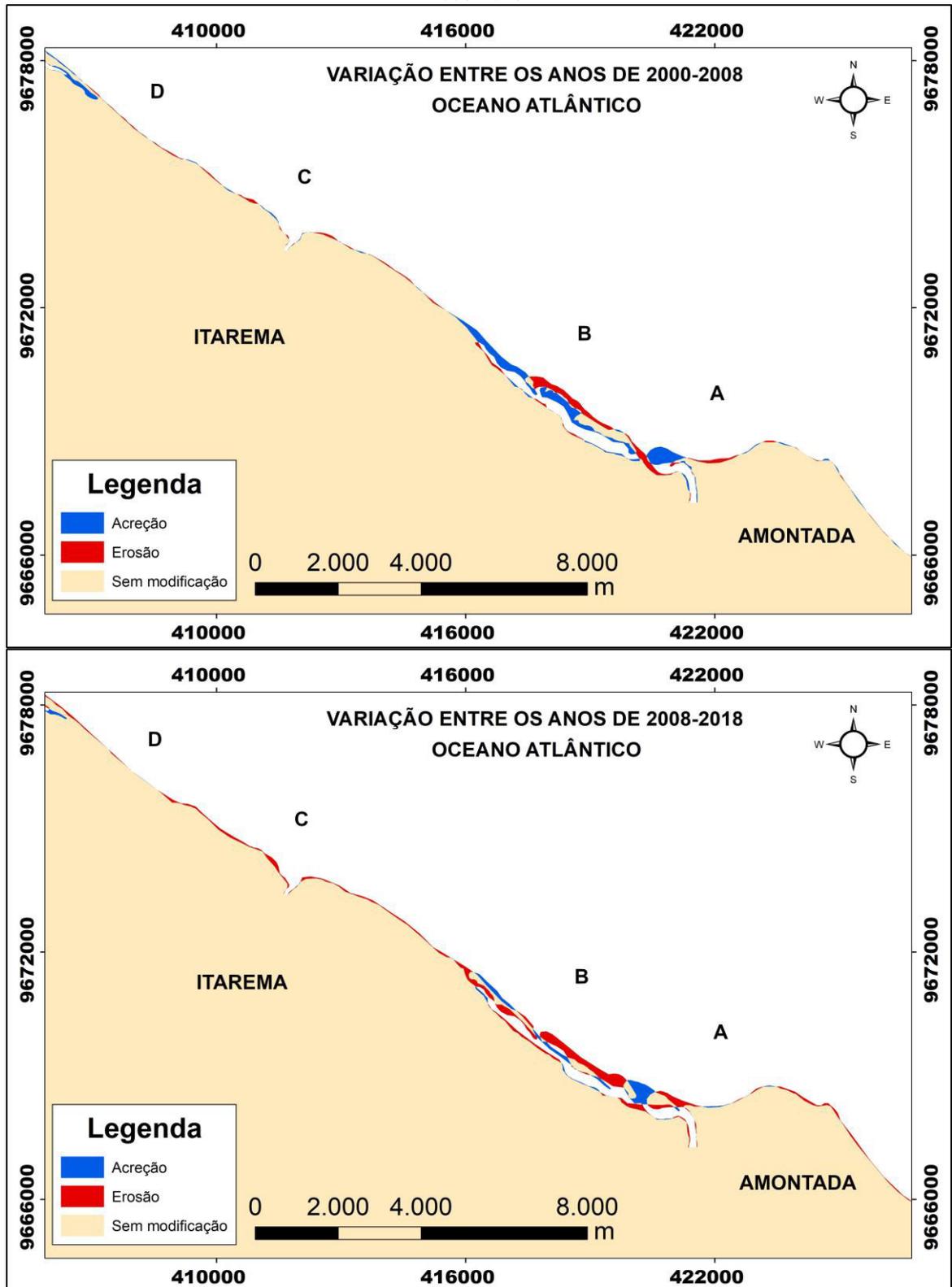
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Evolução da linha de costa da região entre Jijoca de Jericoacoara e Camocim para os períodos de 1984-1991 e 1991-2000.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Evolução da linha de costa da região entre Amontada e Itarema para os períodos de 2000-2008 e 2008-2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No período de 2000-2008, no trecho E (Praia do Porto, Itarema) (Figura 17), novamente o esporão aumentou seu comprimento na direção E-W, em 1.395 m, a erosão agiu

em poucas áreas e o recuo alcançou 167 m. No trecho **F** (Ilha do Guajiru, Itarema), a erosão provocou o rompimento da ligação dessa “ilha” ao continente em uma dada área, contudo, a acreção construiu outra ligação, mas com uma largura menor, o processo deposicional ainda aumentou o comprimento dessa “ilha” na direção E-W em 609 m. Em Acaraú, no trecho **G** (Praias de Espraiado e Volta do Rio), a acreção promoveu o aumento de um esporão em 334 m na direção E-W, já a erosão causou o desaparecimento de um esporão que estava conectado a costa, o recuo alcançou 143 m.

Para o trecho **H** (Figura 18), no período de 2000-2008, a acreção promoveu o crescimento das barras arenosas e do esporão na praia de Mangue Seco (Jijoca de Jericoacoara), o crescimento do esporão foi na direção E-W em 192 m; ainda no trecho **H**, na praia de Guriú (Camocim), a erosão provocou o recuo de 168 m. Na localidade de Guriú (Camocim), Farrapeira Neto e Morais 2014, entre 2003 e 2010, observaram retrogradação de até 93,83 m. Para o trecho **I**, foz do riacho Tucunduba (Camocim), a erosão causou a diminuição do esporão na margem direita, em 342 m, e o desaparecimento de dois esporões que tinham surgidos na margem esquerda no período anterior (1991-2000).

O período de 2008-2018, semelhante ao de 1991-2000, registrou o predomínio da erosão com 11,96 Km² de área perdida e taxa anual de recuo de 1,19 Km². Na foz do rio Aracatiaçu (Figura 16), no trecho **A** (Amontada), o esporão que vinha crescendo nos dois períodos anteriores rompe e é conduzido para na direção E-W; ainda nessa foz, no trecho **B** (Itarema), houve uma ruptura do esporão que surgiu no período anterior (2000-2008) e estava em contato com a costa, e diminuição da sua largura. Semelhante ao período de 1991-2000, no de 2008-2018, a erosão agiu de forma severa no trecho **C** (foz do rio Aracatimirim, Itarema), os valores nas margens direita e esquerda foram de 78 m e 106 m, respectivamente. O trecho **D** (Praia de Almofala), sofreu com a erosão com recuo de 70 m.

No período de 2008-2018, no trecho **E** (Praia do Porto, Itarema) (Figura 17), a erosão provocou o rompimento do esporão que vinha crescendo nos períodos anteriores, a parte desprendida do esporão maior se liga a costa, o recuo máximo foi de 500 m, já a progradação máxima foi de 294 m. No trecho **F**, o esporão que era ligado ao continente é rompido e passar a formar uma barra arenosa, a Ilha do Guajiru (Itarema), o recuo máximo nessa região foi de 132 m, a deposição atuou em alguns pontos, o maior valor de progradação foi na ilha anteriormente mencionada com 188 m. O trecho **G** (Praias de Espraiado e Volta do Rio, Acaraú), é marcado por severa erosão, ela provocou a diminuição do comprimento do esporão em 1.143 m. Essa mesma tendência erosiva foi observada por Souza et al. (2016), no período de 2003-2013.

Figura 17 - Evolução da linha de costa da região entre Itarema e Acaraú para os períodos de 2000-2008 e 2008-2018.

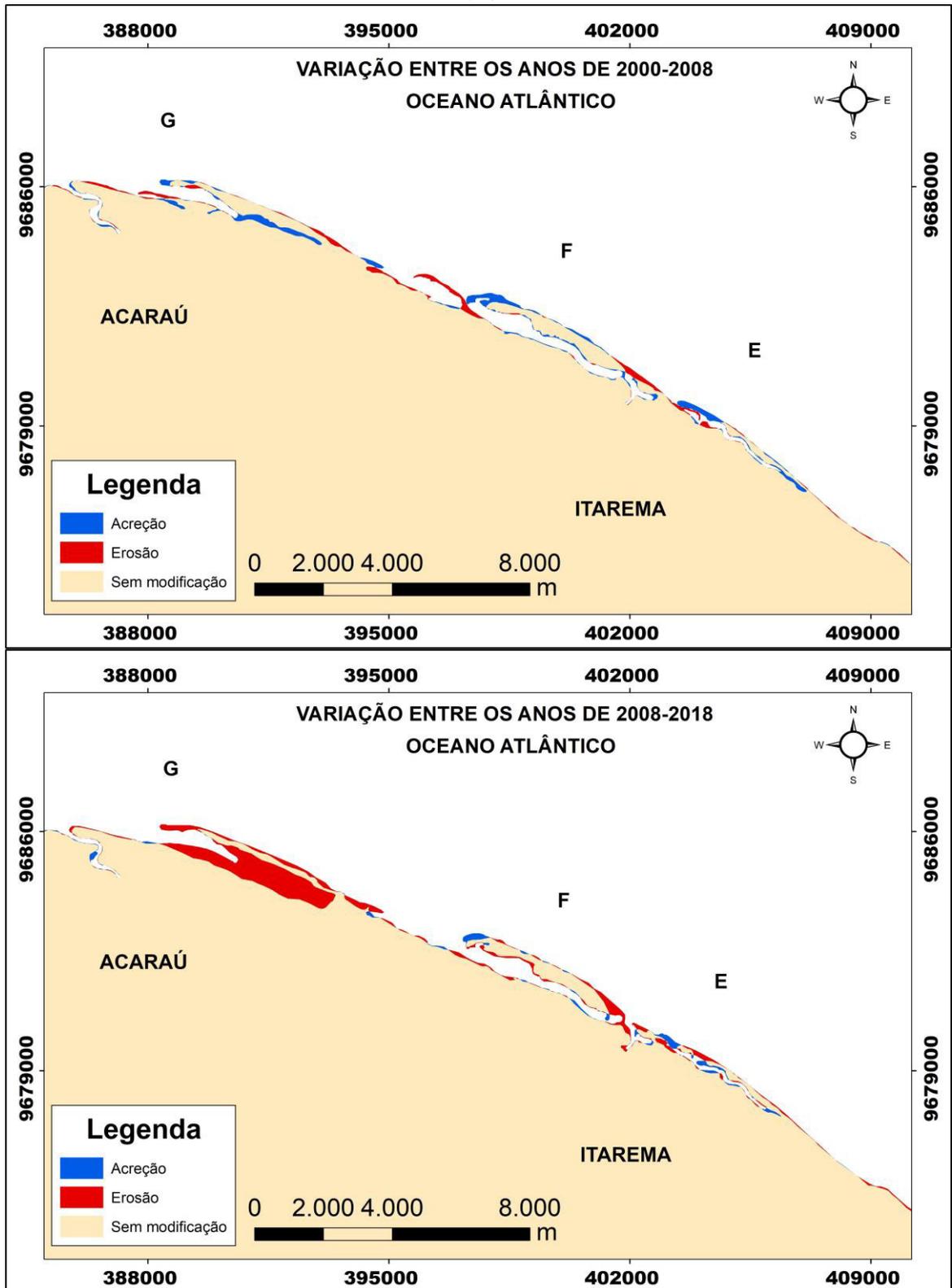
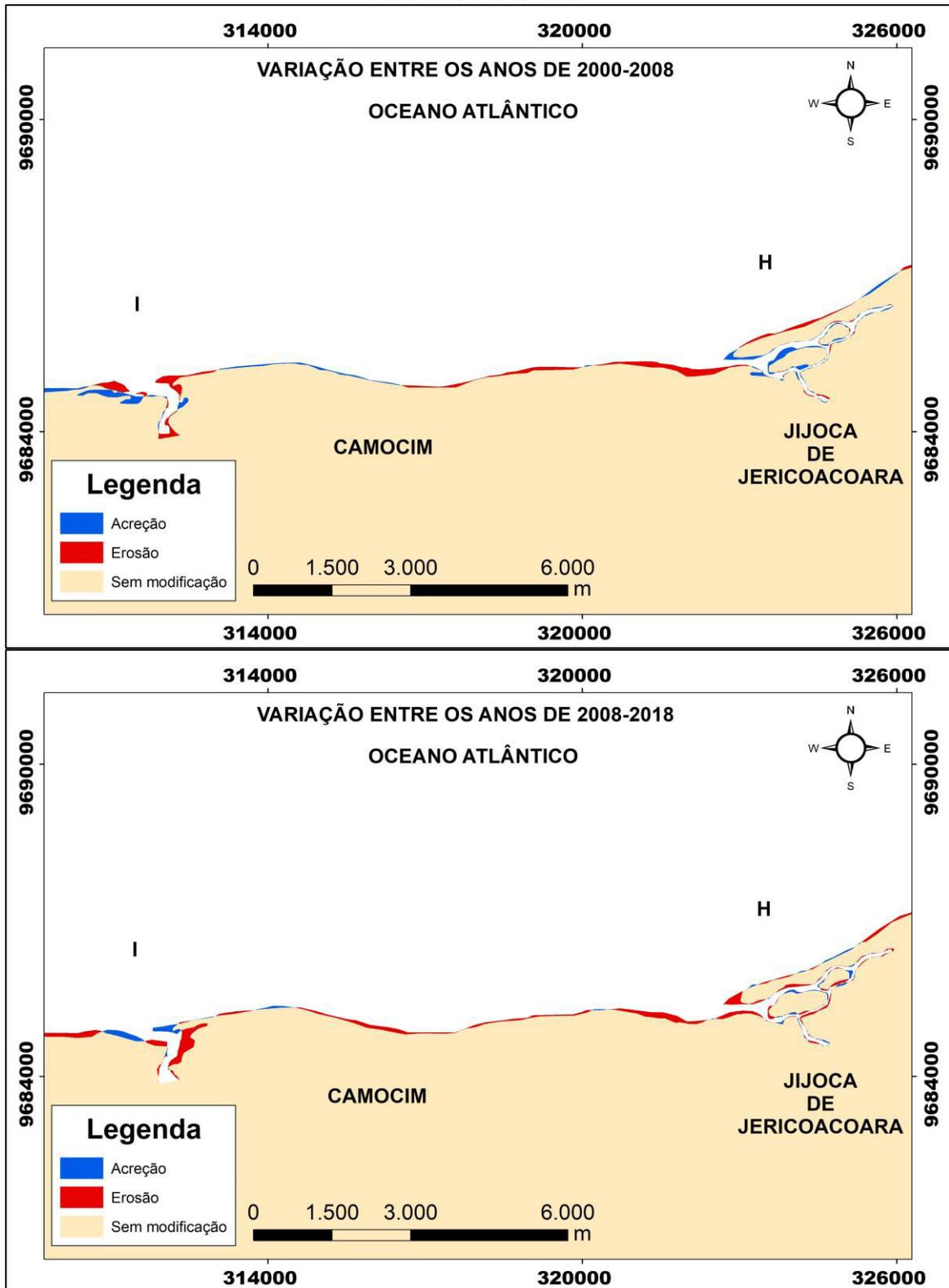


Figura 18 - Evolução da linha de costa da região entre Jijoca de Jericoacoara e Camocim para os períodos de 2000-2008 e 2008-2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No trecho **H** (Figura 18), no período de 2008-2018, a erosão causou a diminuição do esporão na praia de Mangue Seco (Jijoca de Jericoacoara) em 331 m, a acreção ocorreu em

poucos pontos com ganhos de até 53 m; na praia de Guriú (Camocim), a deposição promoveu ganhos de até 50 m, já a erosão foi mais intensa com recuos de até 132 m. Para o trecho I, foz do riacho Tucunduba (Camocim), a acreção aumentou o esporão na margem direita na direção E-W em 382 m, na esquerda houve ganho de até 111 m, já a erosão foi severa com recuos de 512 m, na margem direita, e 104 m, na esquerda.

A análise dos diferentes períodos do litoral extremo oeste explicita um comportamento cíclico nos processos que predominaram, conforme observado: 1984-1991 (acreção); 1991-2000 (erosão); 2000-2008 (acreção); e, 2008-2018 (erosão). A soma dos processos dos diferentes períodos demonstra uma pequena predominância da erosão (35,6 Km²) sobre a acreção (34,1 Km²).

Na foz do rio Aracatiaçu, semelhante ao que acontece na foz do rio Curú, há uma convergência de ondas (concentração de energia), por conseguinte, aumento na intensidade da deriva litorânea que contribui para a erosão (Carvalho et al., 2007). Esse recuo da linha de costa em Guriú (Camocim) pode ser consequência da ação do promontório de Jijoca de Jericoacoara, que age como uma barreira natural à deriva litorânea e reduz o aporte sedimentar, por conseguinte, provocando erosão (Claudino-Sales e Carvalho, 2014). O estado morfodinâmico praias desses hotspots é o refletivo, o que confere um grau de susceptibilidade maior a erosão costeira (Pinheiro et al., 2016).

2.4 Conclusão

A soma dos processos de acreção e erosão dos diferentes períodos de todos os litorais explicita uma alternância entre os processos que predominaram: 1984-1991 (acreção), 1991-2000 (erosão), 2000-2008 (acreção) e 2008-2018 (erosão). No todo foi observada uma situação de estabilidade (acreção (57,68 Km²) e erosão (57,62 Km²), isso em termos matemáticos.

Apesar da situação de estabilidade, foram identificados trechos com uma grande dinâmica, são eles: no litoral leste, foz do rio Jaguaribe e foz do rio Piranji; no litoral metropolitano, em Fortaleza, as Praias do Futuro, de Porto do Mucuripe, a Mansa, do Titanzinho, de Iracema e Barra do Ceará, em Caucaia, as Praias de Iparana, Pacheco, Icarai e Tabuba; no litoral oeste, a foz do rio Curú e a foz do rio Mundaú; no litoral extremo oeste, na foz do rio Aracatiaçu, em Itarema, na foz do rio Aracatimirim, nas Praias de Almofala, do Porto e Ilha do Guajiru; em Acaraú, nas Praias de Espreado e Volta do Rio; na Praia de Mangue Seco

(Jijoca de Jericoacoara); na Praia de Guriú (Camocim); e, na foz do riacho Tucunduba (Camocim).

Para uma melhor compreensão da dinâmica costeira do Ceará existe a necessidade de estudos mais detalhados que englobem diversas variáveis e escalas espaciais e temporais. Deve ser dada atenção aos *hotspots* de erosão. Portanto, há necessidade de monitoramento contínuo da zona costeira cearense, bem como são necessárias políticas públicas efetivas que inibam o uso e ocupação prejudicial ao ambiente costeiro.

Referências

- AGUIAR, P.F., EL-ROBRINI, M., FREIRE, G.S.S., CARVALHO, R.G., 2012. Análise multitemporal da Praia de Torrões (Itarema, Ceará, Brasil) em médio período (1958-2004) utilizando imagens Quickbird e fotografias aéreas. *Revista Geonorte* 2, 1279-1290.
- ALBUQUERQUE, M.G., CALLIARI, L.J., CORREA, I.C.S., PINHEIRO, L.S., 2009. Morfodinâmica da praia do futuro, Fortaleza-CE: uma síntese de dois anos de estudo. *Quaternary and Environmental Geosciences* 1, 49-57.
- ALEXANDRAKIS, G., MANASAKIS, C., KAMPANIS, N.A., 2015. Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective. *Ocean & Coastal Management* 111, 1–11.
- BARROS, E.L., GUERRA, R.G.P., PINHEIRO., MORAIS, J.O., 2018. Erosão costeira no litoral leste do Ceará: tendência natural e reflexos dos impactos antropogênicos. In: XII Simpósio Nacional de Geomorfologia- SINAGEO, 2018, Crato. Paisagem e Geodiversidade: A Valorização do patrimônio Geomorfológico Brasileiro. Crato: UGB, 1-10.
- BEZERRA, M.O., PINHEIRO, L., MORAIS, J.O., 2007. Shoreline Change of the Mucuripe Harbour Zones (Fortaleza-Ceará, Northeast of Brazil) 1972 - 2003. *Journal of Coastal Research* 50, 1163-1167.
- BROMMER, M.B., BOCHEV-VAN DER BURGH, L., 2009. Sustainable coastal zone management: a concept for forecasting long-term and large-scale coastal evolution. *Journal of Coastal Research* 25, 181-188.
- CAMFIELD, F.E., MORANG, A., 1996. Defining and interpreting shoreline change. *Ocean & Coastal Management* 32, 129-151.
- CARVALHO, A.M., DOMINGUEZ, J.M.L., MAIA, L.P., 2004. Interação entre deriva litorânea e potencial de formação de dunas na morfogênese costeira do NW do Ceará. *Mercator (UFC)* 3, 79-94.
- CARVALHO, A.M., MAIA, L.P., DOMINGUEZ, J.M.L., 2007. A deriva e o transporte litorâneo de sedimentos no trecho entre Cumbuco e Matões – costa noroeste do Estado do Ceará. *Arquivos de Ciências do Mar* 40, 43-51.

CARVALHO, A.C., CLAUDINO-SALES, V., 2016. Contribuição do transporte eólico no processo de evolução da linha de costa. *Mercator (UFC)* 15, 105-115.

CEARÁ, 2006. Lei Estadual nº 13.796, de 30 de junho.

CLAUDINO-SALES, V., CARVALHO, A.M., 2014. Dinâmica costeira controlada por promontórios no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. *Geociências (São Paulo. Online)* 33, 579-595.

ESRI Environmental Systems Research Institute. 2014. Software ArcGIS Desktop, license type Arcinfo, version 10.2.

FAIRBRIDGE, R.W., 2004. Classification of coasts. *Journal of Coastal Research* 20, 155-165.

FARIAS, E.G.G., MAIA, L.P., 2010. Uso de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do Estado do Ceará, Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada* 10, 521-544.

FARRAPEIRA NETO, C.A., MORAIS, J.O., 2014. Evolução da linha de costa do município de Camocim, Ceará, Brasil. *Revista da Casa da Geografia de Sobral* 16, 101-114.

GRIGIO, A.M., AMARO, V.E., VITAL, H., DIODATO, M.A., 2005. A method for coastline evolution analysis using GIS and Remote Sensing: a case study from the Guamaré City, Northeast Brazil. *Journal of Coastal Research* 42, 412-421.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais 2018, Software SPRING 5.5

MAGALHÃES, D.C., MEIRELES, A.J.A., 2016. Dinâmica geoambiental associada à ponta litorânea em Paracuru – Ceará – Brasil. *Revista da Casa da Geografia de Sobral* 18, 145-162.

MAIA, L.P., JIMENEZ, J.A., SERRA, J., MORAIS, J.O., 1998. The coastline of Fortaleza city. A product of environmental impacts caused by the mucuripe harbor. *Arquivos de Ciências do Mar* 31, 93-100.

MARINO, M.T.R.D., FREIRE, G.S.S., 2013. Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, região metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará, Brasil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management* 13, 113-129.

MCFEETERS, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17, 1425-1432.

MEIRELES, A.J.A., SILVA, E.V., THIERS, P.R.L., 2006. Os campos de dunas móveis: fundamentos dinâmicos para um modelo integrado de planejamento e gestão da zona costeira. *GEOUSP* 10, 101-119.

MENDES, J.S., 2012. Dinâmica das paisagens da APA do estuário do Rio Mundaú: evolução espaço-temporal e potencialidades ambientais. Dissertação (Mestrado). Fortaleza, UFC.

MORAIS, J.O., PINHEIRO, L., CAVALCANTE, A.A., PAULA, D.P., SILVA, R.L., 2008. Erosão costeira em praias adjacentes às desembocaduras fluviais: o caso de Pontal de Maceió,

Ceará, Brasil, Revista de Gestão Costeira Integrada 8, 61-76.

MORAIS, J.O., PINHEIRO, L.S., PESSOA, P.R.S., FREIRE, G.S.S., CARVALHO, A. M., GUERRA, R.G.P., BARROS, E.L., 2018. CEARÁ, In: MUEHE, D. (Org.), Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro., Editora do MMA, Rio de Janeiro, pp. 261-287.

MORAES, M.V.A.R., FREIRE, G.S.S., MANSO, V.A.V., COSTA, S.S.L., PORTELA, J.P., 2015. Variações temporais da linha de costa do município de Acaraú – Ceará – Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física 8, 981-989.

MUEHE, D., (Org.), 2018. Erosão e progradação do litoral brasileiro. Editora do MMA, Rio de Janeiro.

NASCIMENTO, L., BITTENCOURT, A.C.S.P., SANTOS, A.N.; DOMINGUEZ, J.M.L., 2013. Potencial de prejuízos econômicos em função da densidade de urbanização e da sensibilidade à erosão costeira na Costa do Cacau – Bahia. Revista Brasileira de Geomorfologia 14. 261-270.

PINHEIRO, L.S., MORAIS, J.O., MAIA, L.P., 2016. The beaches of Ceará. In: Short, A.D., & Klein, A.H.F. (Org.), Brazilian beach systems. Editora Springer, pp. 175-199.

QUINTELA-FALCÃO, T.O., MORAIS, J.O., PINHEIRO, L.S., 2011. Morphodynamics of the Curu Estuary Inlet - Brazil. Journal of Coastal Research 64, 805-808.

SILVA, I.R., BITTENCOURT, A.C.S.P., DOMINGUEZ, J.M.L., MELLO E SILVA, S.B., 2007. Potencial de danos econômicos face à erosão costeira relativo às praias da Costa do Descobrimento – litoral sul do Estado da Bahia. Revista Pesquisas em Geociências 34, 35-44.

SOUZA, C.D., SILVA, R.M.N., RODRIGUES, L.I.C., MORORÓ, E.A.A., DUARTE, C.R., SOUTO, M.V.S., SABADIA, J.A.B., 2016. Emprego de imagens Landsat na análise temporal da linha de costa da porção Oeste do Estado do Ceará. Revista de Geologia 29, 181-194.

3 CAPÍTULO III DINÂMICA DA LINHA DE COSTA NO TRECHO DE PRAIA ENTRE OS MUNICÍPIOS DE FORTALEZA E PARAIPABA, ESTADO DO CEARÁ, BRASIL

O artigo intitulado “Dinâmica da linha de costa no trecho de praia entre os municípios de Fortaleza e Paraipaba, Estado do Ceará, Brasil” foi submetido na Revista Brasileira de Geomorfologia no dia 27/06/2022. O objetivo desse artigo foi analisar a evolução da linha de costa em uma parte da Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará, no período de 1984-2020.

Dinâmica da linha de costa no trecho de praia entre os municípios de Fortaleza e Paraipaba, Estado do Ceará, Brasil

Dynamics of the shoreline on the stretch of beach between the municipalities of Fortaleza and Paraipaba, State of Ceará, Brazil

Resumo: A erosão costeira é um problema recorrente em vários lugares no mundo, inclusive no Ceará, que possui no trecho de praia entre Fortaleza e Paraipaba importância socioeconômica, que necessita de estudos de longos prazos para compreender a dinâmica costeira nessa região. Assim, o presente artigo teve como objetivo analisar a evolução da linha de costa no trecho de praia entre Fortaleza e Paraipaba. Para isso, foram feitos: processamento digital de imagens; extração das linhas de costa; cálculos de variação da linha de costa; e, classificação e interpretação dos resultados. Na análise por períodos, no primeiro setor, a estabilidade e a acreção predominaram em dois períodos cada uma, respectivamente, 1984-1991 e 2000-2008, e, 1991-2000 e 2014-2020; já no segundo e terceiro setores a erosão prevaleceu, para ambos (1984-1991; 2000-2008; e 2008-2014). Os trechos que tiveram uma dinâmica com respostas expressivas foram: i) os recuos da linha de costa na praia de Icaraí (Caucaia) e na foz do rio Curú (Paracuru); e, ii) a progradação no Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante). A análise por períodos foi relevante porque ela evidencia processos significativos que podem ser mascarados por outros métodos estatísticos, como a regressão linear.

Palavras-chave: Gestão da zona costeira; Erosão costeira; DSAS.

Abstract: Coastal erosion is a recurrent problem in many places, including Ceará, which has in the stretch of beach between Fortaleza and Paraipaba socioeconomic importance, requires long-term studies to understand the coastal dynamics in this region. Thus, this paper aimed to analyze the shoreline evolution in the stretch of beach between Fortaleza and Paraipaba. For this, the following were performed: digital image processing; shorelines extraction; shoreline variation calculations; and classification and interpretation of the results. In the analysis by periods, in the first sector, stability and accretion prevailed in two periods each, respectively, 1984-1991 and 2000-2008, and 1991-2000 and 2014-2020; while in the second and third sectors, erosion prevailed, for both, in three periods (1984-1991; 2000-2008; and 2008-2014). The stretches that had a dynamic with more expressive answers were: i) the shoreline retreats in Icaraí beach (Caucaia) and the mouth of the Curú river (Paracuru), and ii) the degradation in the Pecém Port (São Gonçalo do Amarante). The analysis by periods was relevant because it highlights significant processes that can be masked by other statistical methods, such as linear regression.

Keywords: Coastal zone management; Coastal erosion; DSAS.

3.1. Introdução

A zona costeira é um ambiente muito dinâmico e um fator que contribui para isso é o processo erosivo (FAIRBRIDGE, 2004), que pode ter causa tanto natural quanto antrópica (CAMFIELD; MORANG, 1996). A erosão costeira se torna um problema quando alcança áreas construídas e, por conseguinte, causa prejuízos econômicos com a destruição de estruturas urbanas (ALEXANDRAKIS; MANASAKIS; KAMPANIS, 2015). Esse processo erosivo vem ocorrendo em vários lugares no mundo nas últimas décadas (CELLONE; CAROL; TOSI, 2016; FITTON HANSOM; RENNIE, 2016; LEATHERMAN, 2018; NGUYEN; TAKEWAKA, 2020) e também é percebido no Brasil, principalmente na região Nordeste (MARTINS; PEREIRA, 2014; GONÇALVES *et al.*, 2019). É estimado que cerca de 60 a 65% do litoral nordestino sofram com o recuo da linha de costa (MUEHE, 2018). No Estado do Ceará alguns trechos estão sob erosão (MORAIS *et al.*, 2018), onde um caso clássico relatado foi o recuo observado após a construção do Porto do Mucuripe (BEZERRA; PINHEIRO; MORAIS, 2007).

O Estado do Ceará possui uma zona costeira com 573 Km de extensão, desde o limite com o Estado do Rio Grande do Norte, no extremo Leste, até o limite com o Estado do Piauí, no extremo Oeste. Um trecho de grande destaque nesse litoral está compreendido entre a praia de Sabiaguaba, no município de Fortaleza, até a praia de Lagoinha, no município de Paraipaba, devido à sua importância socioeconômica pela presença: de dois importantes portos para o nordeste brasileiro (Porto do Mucuripe e Porto do Pecém); Reserva Ecológica da Lagoinha; instalações de complexos indústrias de vários nichos de mercado; parques eólicos *onshore* (BRANNSTROM *et al.*, 2017); e a intensa atividade turística em conjunto com uma expansão imobiliária (PEREIRA, 2020). Além disso, existem projetos para a implantação de parques eólicos no setor *offshore* e a construção de um HUB de hidrogênio verde. No trecho do litoral acima mencionado existe uma alta concentração populacional onde também são encontradas comunidades de pescadores tradicionais (PAULA *et al.*, 2013).

Estudar o comportamento da linha de costa é relevante, haja vista auxiliar no planejamento e na gestão da zona costeira, em especial, no trecho de praia entre Fortaleza e Paraipaba, que compreende parte da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), pois possui grande ocupação urbana/industrial de uso complexo. Pinheiro *et al.* (2016) estudaram as praias do Estado do Ceará e identificaram a necessidade de estudos de longo prazo da dinâmica costeira que pudessem melhor avaliar as modificações da linha de costa em relação as ocupações dos espaços nas últimas décadas. Nesse sentido, levantamentos decadais da linha de

costa proporcionam uma melhor compreensão da morfodinâmica costeira em estudos de monitoramento costeiro (AMARO; SANTOS; SOUTO, 2012).

Os estudos sobre o comportamento da morfodinâmica costeira não são novidades para o trecho do litoral acima mencionado, um exemplo é o trabalho de Silva *et al.* (2019) que, por meio da análise de polígonos, no período 1984-2018, apresentou dados sobre as Praias do Futuro, de Iracema (Fortaleza), de todo o litoral de Caucaia e da foz do rio Curú (Paracuru-Paraipaba). Já Farias e Maia (2010) fizeram uma análise com o DSAS, no período 1968-2004, em algumas praias como: Iracema (Fortaleza) e Icarai (Caucaia). Apesar disso, trabalhos com o viés de compreender o comportamento da linha de costa para o trecho de praias entre Fortaleza e Paraipaba estão ou desatualizados ou não usam uma base estatística sólida. Logo, diante do exposto, o presente artigo teve como objetivo analisar a evolução da linha de costa no trecho de praia entre os municípios de Fortaleza e Paraipaba, no período de 1984-2020, por meio do DSAS. Com isso, o presente trabalho contribui cientificamente com a atualização de dados sobre a dinâmica costeira, ao mesmo tempo, subsidia o poder público com informações sobre o comportamento da linha de costa, que tem implicação direta no uso e ocupação das áreas próximas dessa área litorânea, para o planejamento de ações ou na criação de políticas públicas para mitigar problemas futuros.

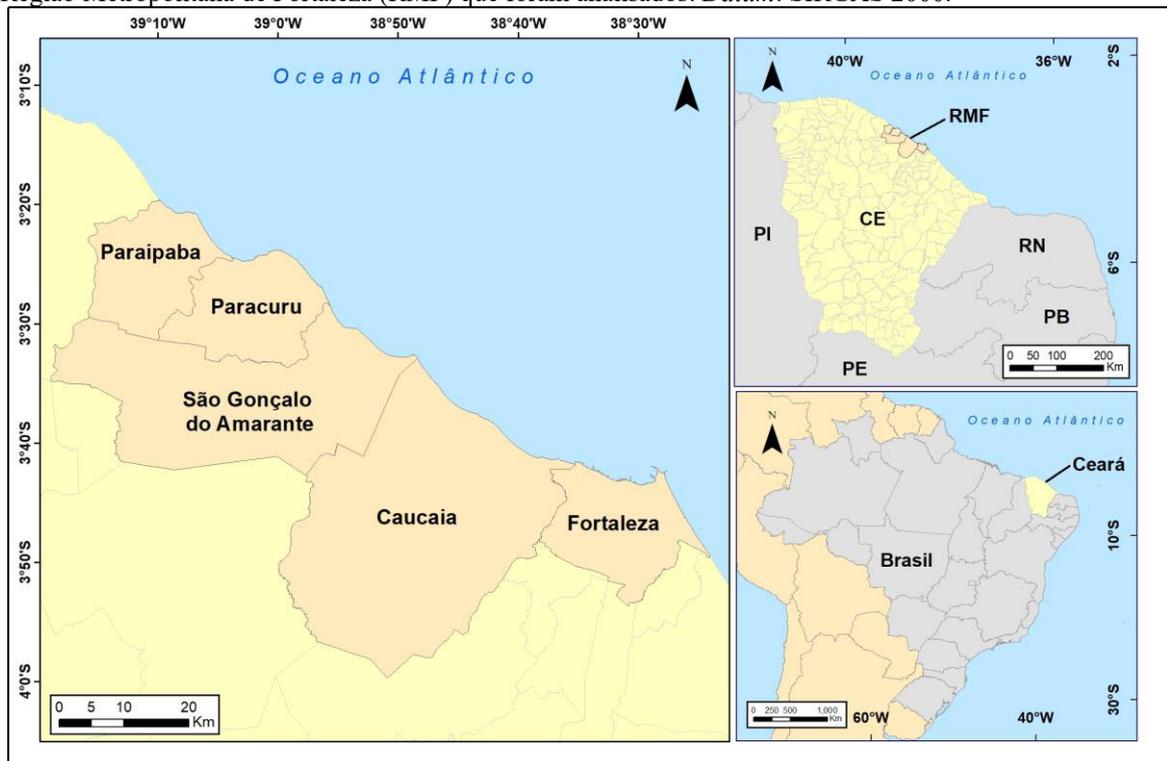
3.2. Área de Estudo

A área de estudo é composta pela zona costeira dos municípios de Fortaleza, Caucaia, São Gonçalo do Amarante, Paracuru e Paraipaba, e está localizada no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil (Figura 1). A faixa costeira está alinhada na direção NNW-ESE, onde somente alguns promontórios interrompem esse padrão (CEARÁ, 2022). Dois dos cinco promontórios presentes são formados por rochas quartzíticas de idade Pré-Cambriana (Mucuripe e Pecém), enquanto os outros três promontórios são compostos por rochas Cenozoicas do Grupo Barreiras (Taíba, Paracuru e Lagoinha); além disso, existem os depósitos arenosos praias, os depósitos arenosos eólicos e os *beachrocks* que complementam o contexto geológico da área estudada (CLAUDINO-SALES; CARVALHO, 2014).

A geomorfologia da área é composta por falésias, praias arenosas, dunas móveis e fixas (PINHEIRO *et al.*, 2016). Quanto aos aspectos morfodinâmicos, as amplitudes médias de marés, no período 2010-2020, foram: 1,53 m no Mucuripe, 1,54 m no Pecém, e 1,45 m em Paracuru (MARINHA DO BRASIL, 2021), e a direção da deriva litorânea tem uma direção de leste para oeste (CEARÁ, 2022). Nessa região existem ondas dos tipos *Sea* e *Swell* que incidem

com direções dos quadrantes norte, nordeste e leste, onde predominam os dois últimos, essas direções mudam ao longo do ano, já a média da altura significativa de ondas é 1,66 m identificada no período 2016-2017 (COSTA, 2019). Sobre os estados morfodinâmicos, são encontrados os seguintes: banco e calha longitudinal; bancos dispostos transversalmente à praia e fortes correntes de retorno; terraço de baixa-mar; refletiva mais terraço de baixa-mar; e, refletiva mais marés baixas e correntes de retorno (PINHEIRO *et al.*, 2016).

Figura 1. Localização da área de estudo, em destaque a esquerda parte dos municípios que fazem parte da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) que foram analisados. *Datum:* SIRGAS 2000.



Fonte: elaborado pelo autor.

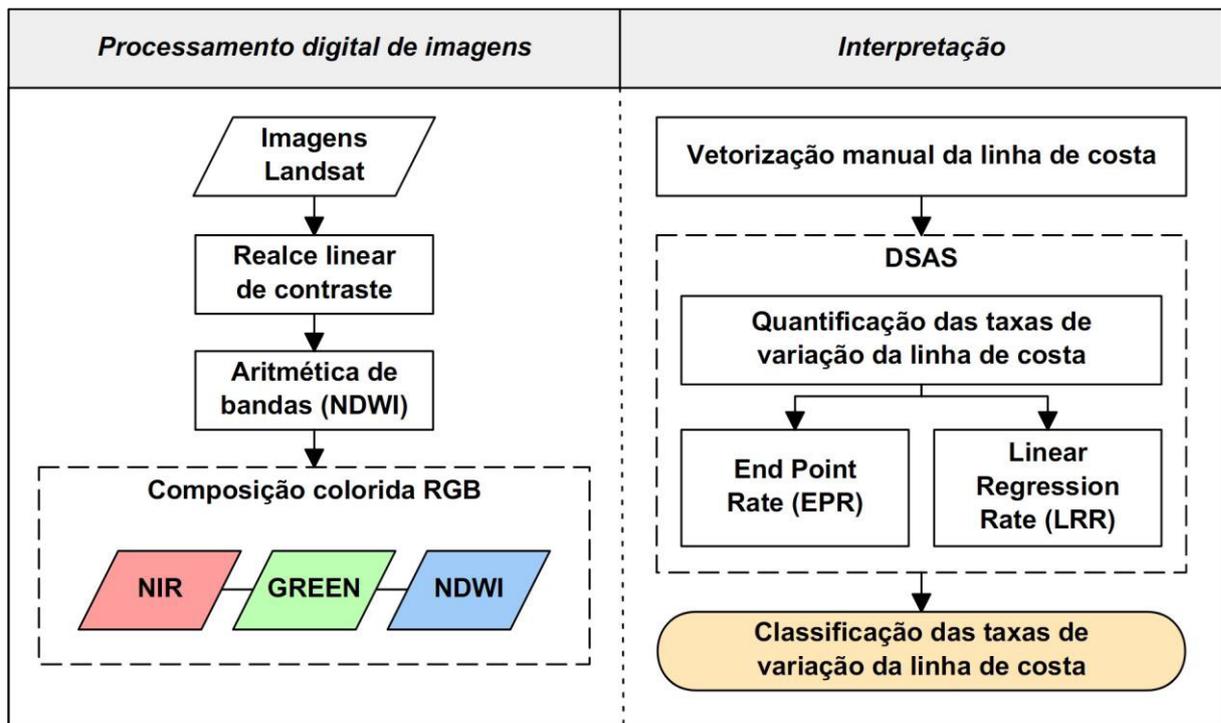
3.3 Materiais e Métodos

O presente estudo foi realizado mediante o uso de produtos de Sensoriamento Remoto, trabalhados dentro de um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Inicialmente foi conformado uma base de dados com 18 cenas de imagens utilizadas no estudo (Figura 2). Essas cenas são originárias dos satélites Landsat 5 e 8, dos sensores TM e OLI, respectivamente, onde na análise por períodos foram utilizados os anos de 1984, 1991, 2000, 2008, 2014 e 2020, já para a análise de regressão linear todas as cenas constantes na Tabela 1 foram usadas. A escolha desses dois satélites se deveu a possibilidade de trabalhar com a mesma

resolução espacial, no caso de 30 m, e por eles possuírem uma abrangência temporal significativa para a área em estudo com imagens datadas desde 1984.

O requisito principal utilizado na seleção das cenas foi possuir a menor quantidade de nuvens possíveis de modo que não impedisse a visualização da linha de costa. Elas ficaram entre os meses de junho a outubro, pois refletem o período de estiagem, ou seja, período de menor ocorrência de nuvens. É importante mencionar que as cenas não seguem um intervalo fixo de anos entre elas, por exemplo, três em três anos, haja vista a inexistência de imagens em alguns períodos ou com a presença de nuvens sobre a linha de costa. Todas as cenas foram adquiridas do sítio eletrônico do *United States Geological Survey* (USGS).

Figura 2. Fluxograma da metodologia.



Fonte: elaborado pelo autor.

Depois de formada a base de dados foram realizadas técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), a saber: realce linear de contraste (ampliação histográfica) e aritmética de bandas no *software* SPRING (CAMARA *et al.*, 1996). Essa aritmética de bandas foi feita mediante o *Normalized Difference Water Index* (NDWI), onde o índice foi concebido para delimitar feições de corpos de água e realçar sua presença em imagens de Sensoriamento Remoto (MCFEETERS, 1996). A sua fórmula matemática é:

$$\frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad (1)$$

onde GREEN representa o comprimento de onda do verde na região do visível e o NIR o infravermelho próximo do espectro eletromagnético (MCFEETERS, 1996). Os tamanhos dos comprimentos de ondas do verde e do NIR para os satélites Landsat 5 e Landsat 8 são, respectivamente, 0,500 a 0,600 μm e 0,760 a 0,900 μm , e, 0,533 a 0,590 μm e 0,851 a 0,879 μm (USGS, 2022).

Tabela 1. Fonte de dados históricos para a extração da linha de costa.

Data/Hora	Maré (cm)	Satélite/Sensor	Path/Row
15/06/1984 12:14	160	Landsat 5-TM	217/062
20/07/1985 12:16	148	Landsat 5-TM	217/062
19/06/1991 12:09	203	Landsat 5-TM	217/062
24/08/1992 12:08	199	Landsat 5-TM	217/062
30/10/1993 12:08	86	Landsat 5-TM	217/062
14/08/2000 12:24	74	Landsat 5-TM	217/062
01/08/2001 12:26	135	Landsat 5-TM	217/062
27/07/2005 12:34	164	Landsat 5-TM	217/062
05/10/2007 12:39	196	Landsat 5-TM	217/062
21/09/2008 12:31	68	Landsat 5-TM	217/062
01/07/2013 12:48	207	Landsat 8-OLI	217/062
18/06/2014 12:46	140	Landsat 8-OLI	217/062
08/08/2015 12:46	210	Landsat 8-OLI	217/062
26/08/2016 12:46	209	Landsat 8-OLI	217/062
13/08/2017 12:46	115	Landsat 8-OLI	217/062
13/06/2018 12:45	17	Landsat 8-OLI	217/062
22/10/2019 12:46	203	Landsat 8-OLI	217/062
06/09/2020 12:46	66	Landsat 8-OLI	217/062

Fonte: Marinha do Brasil (2021); USGS (2021).

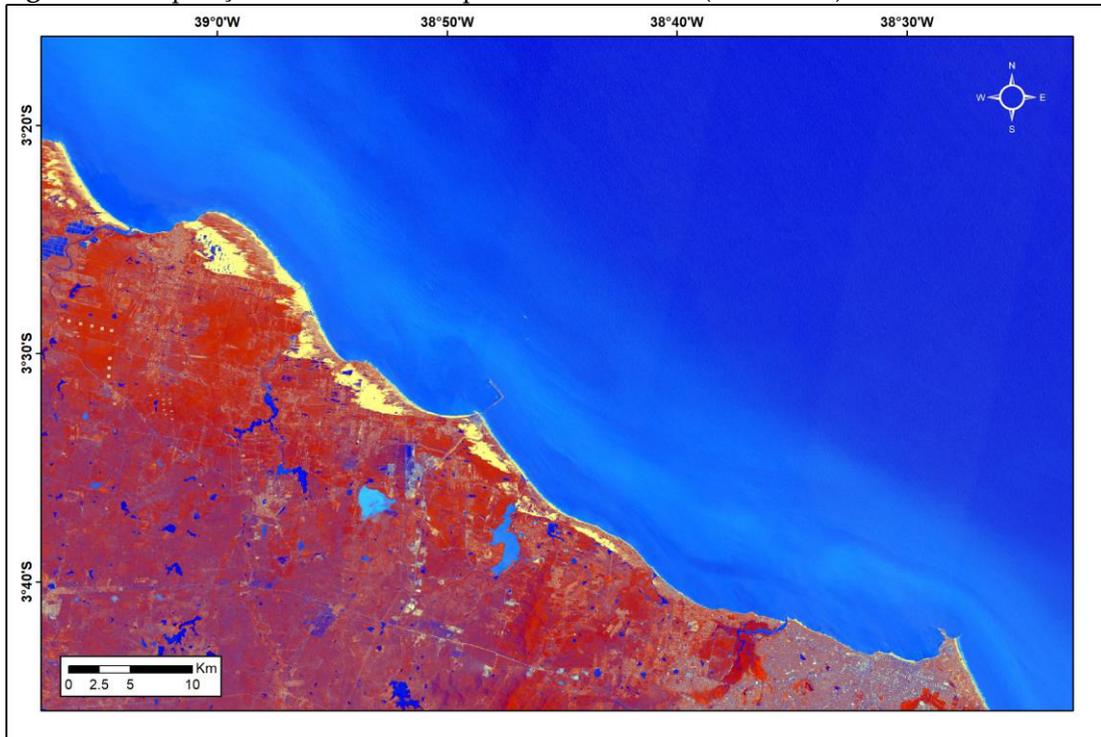
O uso do índice anterior aplicado em conjunto com as bandas espectrais do verde e do infravermelho próximo na composição colorida NIR-GREEN-NDWI (RGB) permite uma boa diferenciação da linha de costa baseada nas cores com tons amarelos, para areia, e azuis, para águas (GRIGIO *et al.*, 2005). As composições formadas foram: RGB 4-2-NDWI (Figura 3), para cenas do Landsat 5; e RGB 5-3-NDWI, para cenas do Landsat 8. Essas composições coloridas são amplamente usadas em estudos costeiros tanto em imagens de satélites de baixa (ABU ZED; SOLIMAN; YASSIN, 2018) como de alta resolução espacial (DAI *et al.*, 2019).

A utilização da superfície de contato seca/úmida da praia como *proxy* da linha de costa em imagens de satélite nem sempre é tão nítida e, quando no processo de vetorização, pode inserir erros significativos na determinação da linha de costa (CROWELL; LEATHERMAN; BUCKLEY, 1991). Contudo, Crowell, Leatherman e Buckley (1991) indicam

esse tipo de *proxy*, extraído de imagens de satélites, para ambientes com regimes de micromaré, em vista disso torna-se adequado para o presente estudo, pois a zona costeira aqui abordada tem o regime anterior. Além do problema anterior, outro problema nesse tipo de abordagem é o uso de poucas imagens de satélite (MUEHE; KLUM-OLIVEIRA, 2014), para superar essa limitação foram utilizadas 18 imagens de satélites compreendendo os anos de 1984 até 2020.

Após a etapa anterior foi realizada a vetorização manual da linha de costa de todas as cenas por meio da interpretação visual entre as áreas emersas (continente) das áreas submersas (corpos d'água). O processo vetorial anterior e todo os demais foram feitos no ArcGIS 10.5 (ESRI, 2017). Na sequência foram aplicadas técnicas de quantificação para avaliar a variação da linha de costa mediante o *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) que é uma ferramenta de extensão do ArcGIS (HIMMELSTOSS *et al.*, 2018). Essa quantificação das mudanças foi calculada por meio das estatísticas de mudança da série temporal de linhas de costa. Nessa ferramenta foi criada uma *baseline offshore* e, em seguida, construído um conjunto de transectos perpendiculares a ela com espaçamento de 100 m entre eles. Depois, foram geradas pelo DSAS as medidas de distância entre a *baseline* e as linhas de costa, por conseguinte, as taxas de variação.

Figura 3. Composição RGB-4-2-NDWI para o LANDSAT 5 (21/09/2008). *Datum:* SIRGAS 2000.



Fonte: elaborada pelo autor.

Os métodos estatísticos usados foram o *End Point Rate* (EPR) e o *Linear Regression Rate* (LRR). O primeiro é o resultado da divisão entre a distância total de mudança da linha de costa pela diferença do tempo decorrido (YUE; LIU, 2019). Enquanto o segundo é o resultado da aplicação de uma linha de regressão de mínimos quadrados em todas as linhas de costa (CIRITCI; TÜRK, 2020). O

EPR é calculado da seguinte forma:

$$EPR = \frac{(d1-d0)}{(t1+t0)} m/ano \quad (2)$$

onde:

d1: posição da linha de costa mais antiga;

d0: posição da linha de costa mais recente;

t1: ano da linha de costa mais recente;

t0: ano da linha de costa mais antiga (CIRITCI; TÜRK, 2020).

O LRR é calculado pelo:

$$y = mx + b \quad (3)$$

onde:

y: distância da baseline (metros);

m: inclinação (taxa de mudança);

b: intercepto (onde a linha cruza o eixo y)

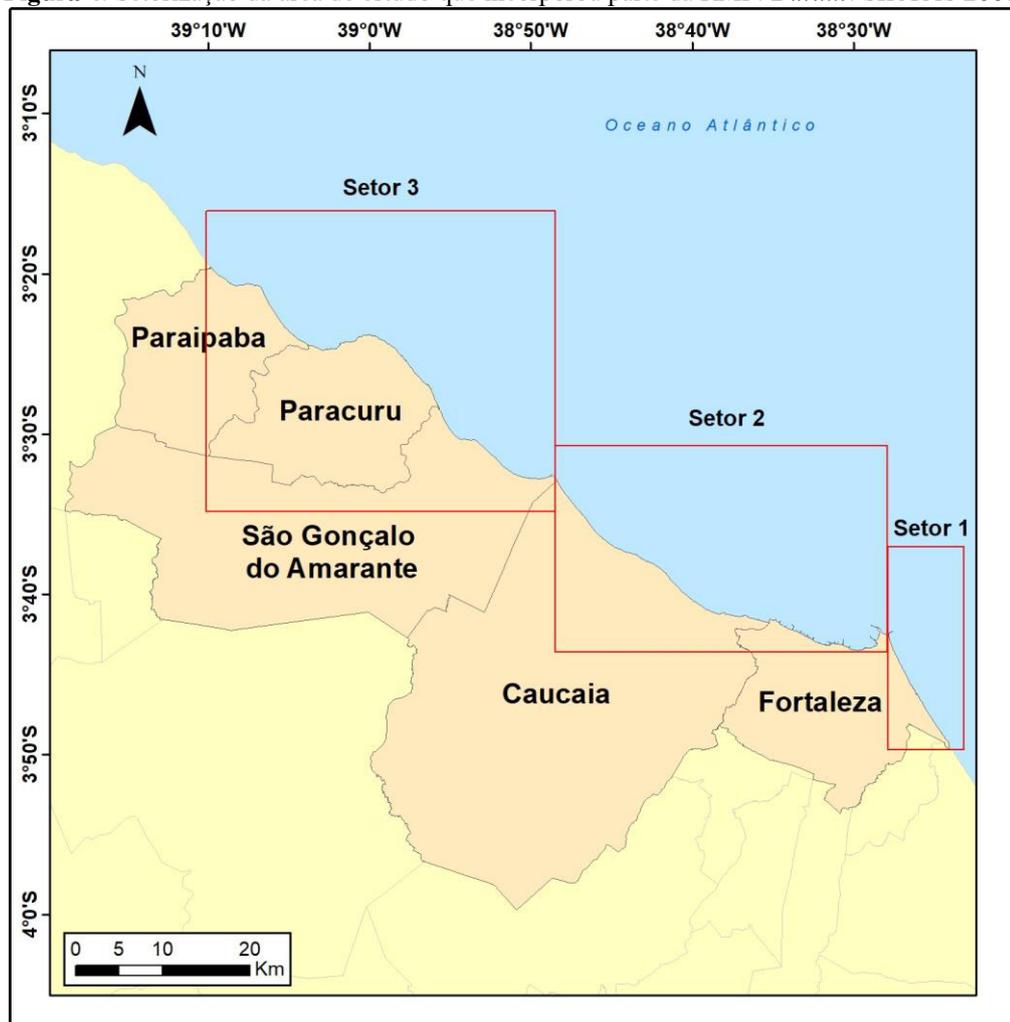
(HIMMELSTOSS *et al.*, 2018).

Depois de obtidos os resultados dos cálculos estatísticos foram determinadas as classes para o EPR e LRR, segmentadas em cinco classes, onde os valores se basearam na média e no desvio-padrão para todo o trecho em estudo. Para o EPR e o LRR foram definidas as seguintes classes: i) acreção alta (> 3,5); ii) acreção (1,5/3,5); iii) estabilidade (-1,5/1,5); iv) erosão (-1,5/-3,5); e, v) erosão alta (<-3,5).

3.4 Resultados

A análise da dinâmica da linha de costa no trecho de praia entre Fortaleza e Paraipaba se deu mediante a setorização para melhor avaliar de acordo com as características morfológicas da linha de costa e sua disposição espacial e geométrica em relação à direção das forças hidrodinâmicas. Foram concebidos três setores denominados de 1, 2 e 3 (Figura 4), definidos com base nas seguintes características: setor 1, por ser um trecho a *updrift* do espião do Mucuripe (Fortaleza), com forma mais retilínea e direção quase perpendicular da costa em relação aos ventos predominantes na região; setor 2, por ser o trecho com mais intervenções de obras de engenharia ao longo da linha de costa, morfologia suave (quase retilínea) com ventos mais oblíquos em relação a costa; e, setor 3, trecho que é fortemente influenciado pelos promontórios, com pequenas baías em forma de “zeta”, protegendo algumas áreas pela ação de ondas.

Figura 4. Setorização da área de estudo que incorporou parte da RMF. *Datum:* SIRGAS 2000.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.4.1. Setor 1

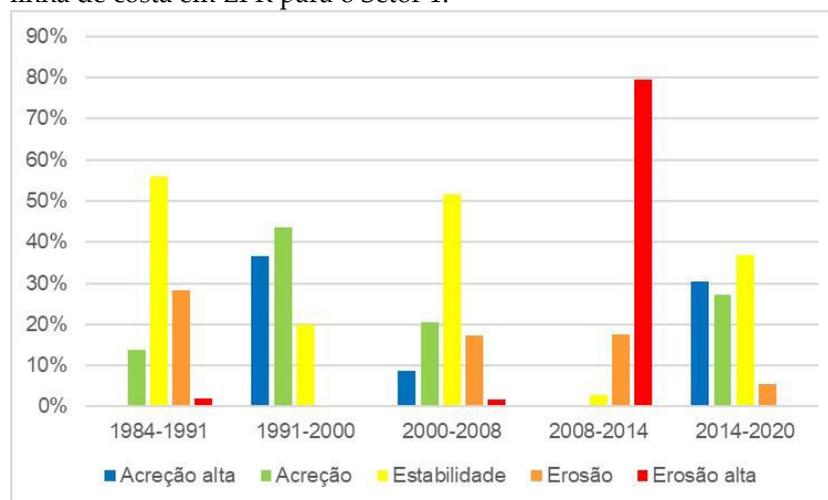
Para o setor 1, no período 1984-1991, houve predomínio da estabilidade com 56% (Figura 5) que equivale a 8,1 Km de extensão. Já a segunda classe com maior valor foi a erosão com 28% e 4,1 Km de extensão. A maior taxa de recuo foi de 4,46 m/a (EPR) na região próxima da foz do rio Ceará e a maior taxa de acreção foi de 3,41 m/a (EPR) localizada próxima do espigão do Titanzinho (Fortaleza) (Figura 6).

Diferente do período anterior (1984-1991), o de 1991-2000 foi marcado pela deposição expressa pela predominância das classes acreção e acreção alta, respectivamente, 43% (6,3 Km) e 37% (5,3 Km) (Figura 5). A maior taxa de acreção foi de 9,93 m/a (EPR) na praia da Sabiaguaba (Fortaleza) (Figura 6).

Semelhante ao primeiro período (1984-1991), a estabilidade prevaleceu entre os anos de 2000 e 2008 com 52% (7,5 Km), seguida pela acreção com 21% (2,9 Km). No período anterior (1991-2000) a praia da Sabiaguaba tinha registrado a maior taxa de acreção, contudo, no presente ocorreu a maior taxa de retrogradação de -10,48 m/a (EPR) (Figura 6); já a maior taxa de acreção foi de 6,29 m/a (EPR) localizada próxima do espigão do Titanzinho.

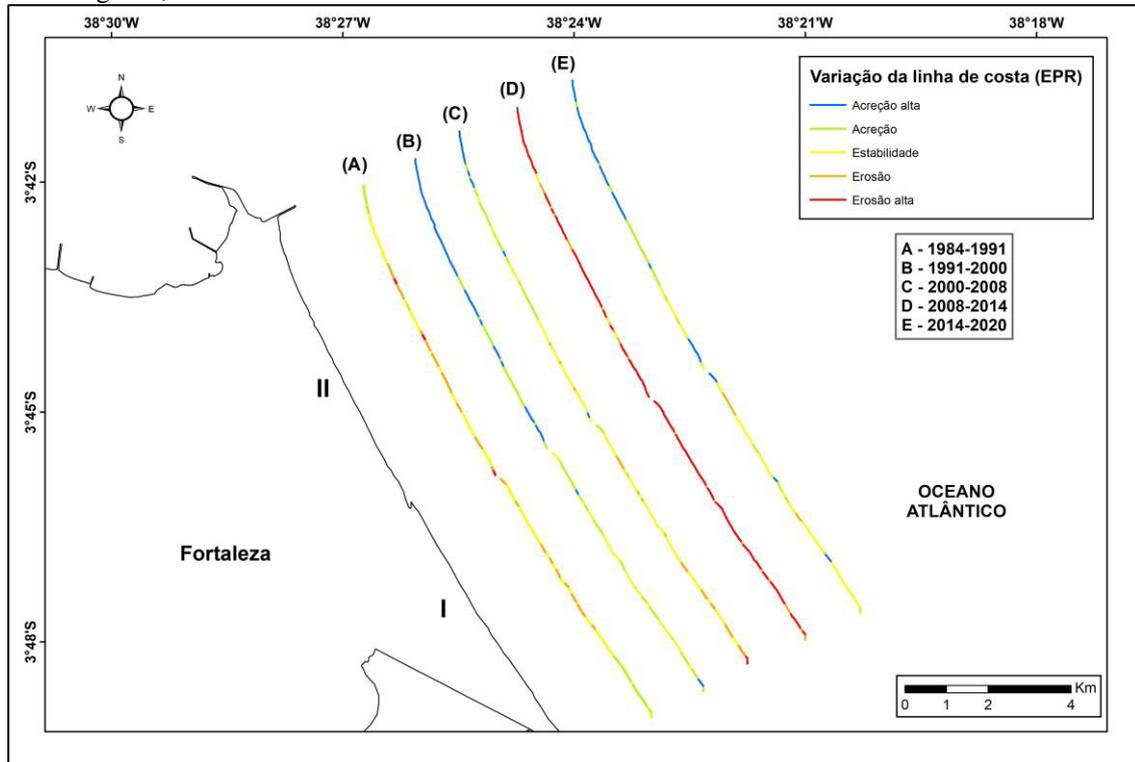
O período 2008-2014 teve uma dinâmica diferente dos anteriores em virtude da predominância da retrogradação onde a classe erosão alta teve 80% (11,5 Km) e a erosão 18% (2,5 Km). A região próxima do espigão do Titanzinho, que em períodos anteriores fora marcada pela acreção, registrou a maior taxa de recuo (-12,24 m/a) (EPR) (Figura 6).

Figura 5. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR para o Setor 1.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 6. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR, em períodos, para o Setor 1. I – Praia da Sabiaguaba; II – Praia do Futuro. *Datum:* SIRGAS 2000.



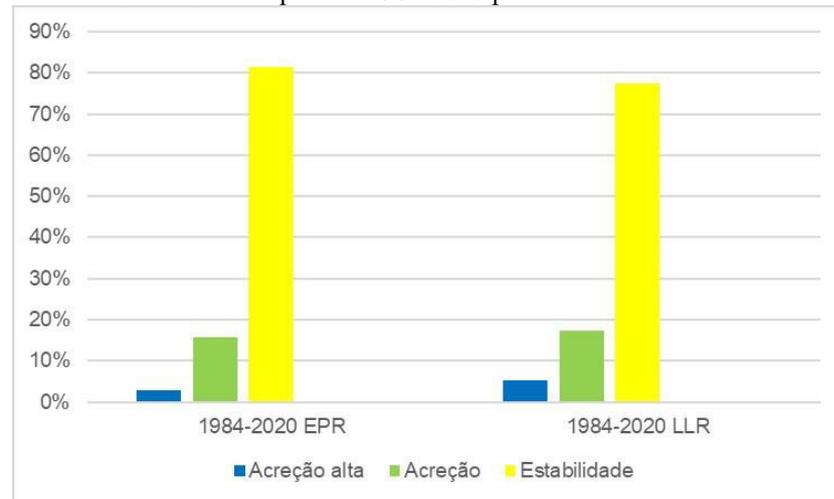
Fonte: elaborado pelo autor.

No período 2014-2020 volta a predominar a deposição quando somada a acreção com a acreção alta, respectivamente, 27% (3,9 Km) e 30% (4,4 Km). A classe individual que teve o maior valor foi a estabilidade (37%, 5,3 Km). Novamente o trecho próximo do espigão do Titanzinho registrou a maior taxa de acreção com 9,91 m/a (EPR), já a maior taxa de erosão foi na praia da Sabiaguaba próximo da foz do rio Cocó com -2,8 m/a (EPR) (Figura 6).

Os resultados do período de 1984-2020 indicaram o predomínio da estabilidade tanto no EPR, com 81%, que equivale a 11,8 Km, como no LRR, com 77%, equivalente a 11,2 Km de extensão (Figura 7). Essa estabilidade abrangeu toda a praia da Sabiaguaba e parte da praia do Futuro onde também foi observada a acreção com uma taxa máxima de 4,11 m/a para o EPR e 4,09 m/a para o LRR no trecho próximo do espigão do Titanzinho (Figura 8).

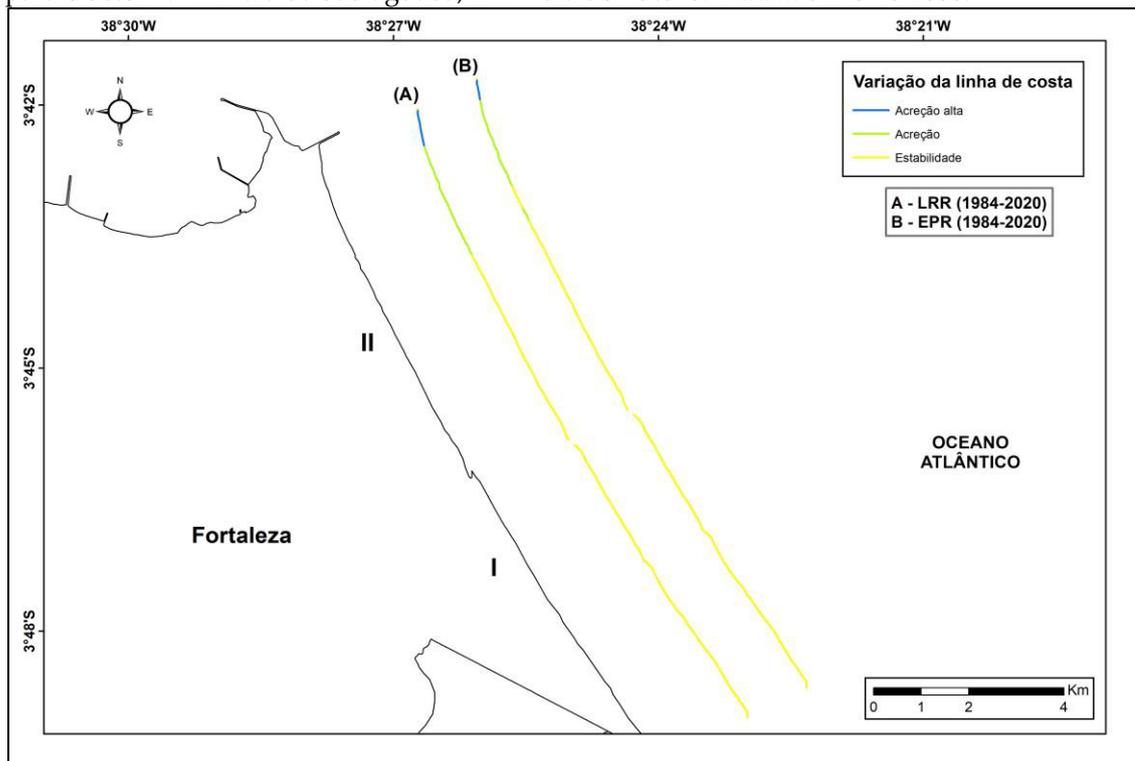
Na análise por períodos o Setor 1 teve, inicialmente, uma situação de estabilidade (1984-1991), na sequência com predomínio da acreção (1991-2000), depois novamente uma estabilidade (2000-2008), seguido por um período erosivo (2008-2014) e um deposicional (2014-2020). Já os resultados de todo o período em análise, isto é, 1984-2020, indicaram uma situação de estabilidade nos métodos estatísticos EPR e LRR.

Figura 7. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR e LRR no período 1984-2020 para o Setor 1.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR e LRR, no período de 1984-2020, para o Setor 1. I – Praia da Sabiaguaba; II – Praia do Futuro. Datum: SIRGAS 2000.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.4.2. Setor 2

A classe individual que predominou no primeiro período (1984-1991) foi a estabilidade com 39% e 19,2 Km de extensão (Figura 9). Contudo, quando somadas as classes de erosão (31%, 15 Km) e erosão alta (27%, 13 Km) é possível perceber que a retrogradação

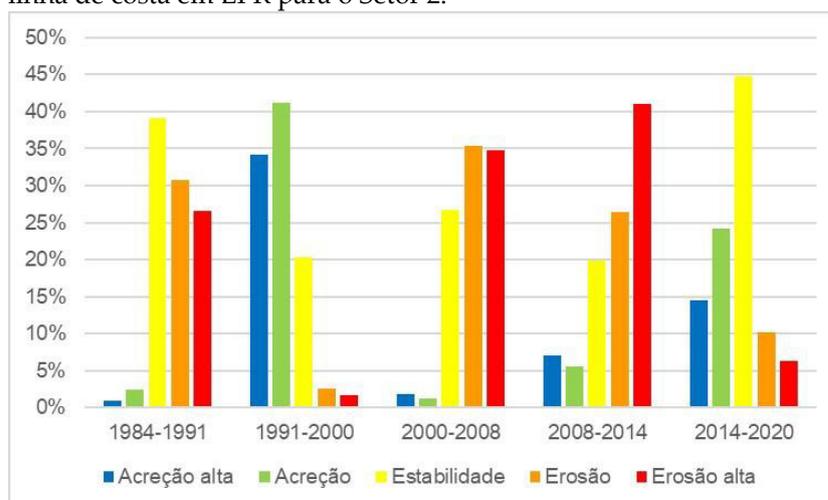
prevaleceu na linha de costa do Setor 2 com 58% (28 Km). A maior taxa de recuo foi de 15,48 m/a (EPR) na praia do Pacheco/Praia de Icarai (Caucaia), já a maior taxa de acreção foi 12,9 m/a (EPR) no trecho entre a praia de Iracema e a Barra do Ceará (Fortaleza) (Figura 10).

Diferente do período anterior (1984-1991), o de 1991-2000 foi marcado pela predominância da deposição com 41% (20,2 Km) para a acreção e 34% (16,7 km) para a acreção alta (Figura 9). Na região do Porto do Mucuripe (Fortaleza) ocorreu a maior taxa de deposição com 10,26 m/a (EPR), já a maior taxa de recuo foi de 4,77 m/a (EPR) na praia do Pacheco/Praia de Icarai (Caucaia) (Figura 10).

Novamente predominou o recuo da linha de costa, agora para o período 2000-2008, com as classes erosão e erosão alta com valores iguais e somando juntas 70% em um total de 34,4 Km de extensão (Figura 9). Na praia de Icarai (Caucaia) a taxa de erosão foi de 10,81 m/a (EPR), enquanto na praia de Iracema (Fortaleza) ocorreu a maior taxa de acreção com 7,85 m/a (EPR) (Figura 10).

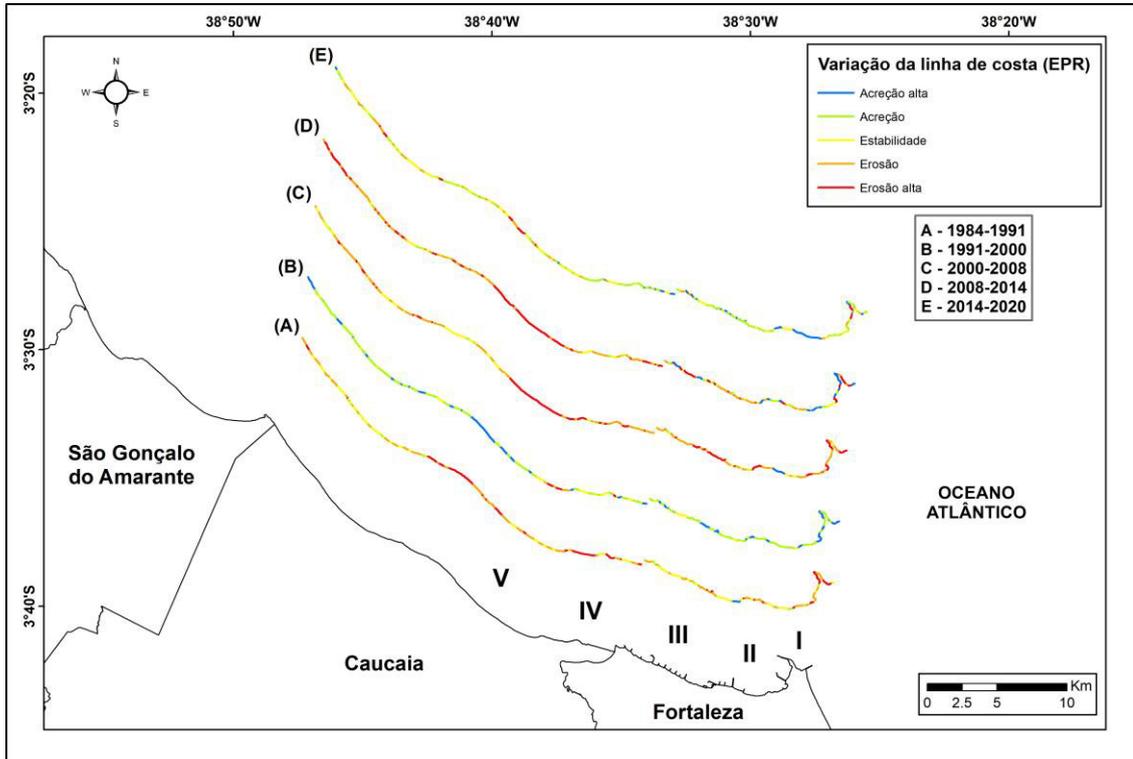
Idêntico ao período anterior (2000-2008), no de 2008-2014 predominou a retrogradação com a classe erosão alta com 41% (20,1 Km) em primeiro seguida da classe erosão com 26% (12,9 Km) (Figura 9). A maior taxa de recuo foi na Barra do Ceará próximo da foz do Rio Ceará com -18,51 m/a, destaque também para a taxa erosiva na Praia do Pacheco/Praia de Icarai (Caucaia) de 12,5 m/a; já a maior taxa de deposição foi de 20,23 m/a no trecho do Porto do Mucuripe (Fortaleza) (Figura 10).

Figura 9. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR para o Setor 2.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 10. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR em períodos para o Setor 2. I – Porto do Mucuripe; II – Praia de Iracema; III – Barra do Ceará; IV – Praia de Iparana; V – Praia do Pacheco/Praia de Icarai. Datum: SIRGAS 2000.



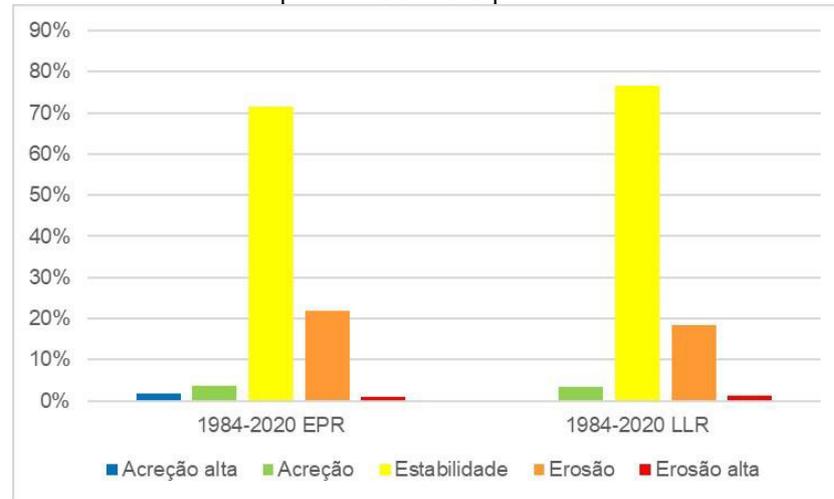
Fonte: elaborado pelo autor.

No período 2014-2020 prevaleceu, pela primeira vez, a estabilidade com 45% (21,9 Km) (Figura 9). É importante observar também a tendência de deposição nesse período constatada pelos valores de acreção com 24% (11,8 Km) e acreção alta com 15% (7,1 Km). Na Praia do Pacheco/Praia de Icarai (Caucaia) a taxa de recuo foi de -7,32 m/a (EPR), já na praia de Iracema (Fortaleza) ocorreu uma taxa de deposição de 22,97 m/a (EPR) (Figura 10).

Semelhante ao Setor 1, no Setor 2 a estabilidade também predominou no período 1984-2020 tanto no EPR como no LRR, respectivamente, 72% (35,1 Km) e 77% (37,6 Km) (Figura 11). Nesse período a taxa de erosão na Praia do Pacheco/Praia de Icarai (Caucaia) foi de -3,65 m/a, no LRR, enquanto no EPR foi de -3,61 m/a na praia de Iparana (Caucaia) (Figura 12). Já a maior deposição foi na praia de Iracema (Fortaleza) com 3,94 m/a, no LRR, e, 4,63, no EPR.

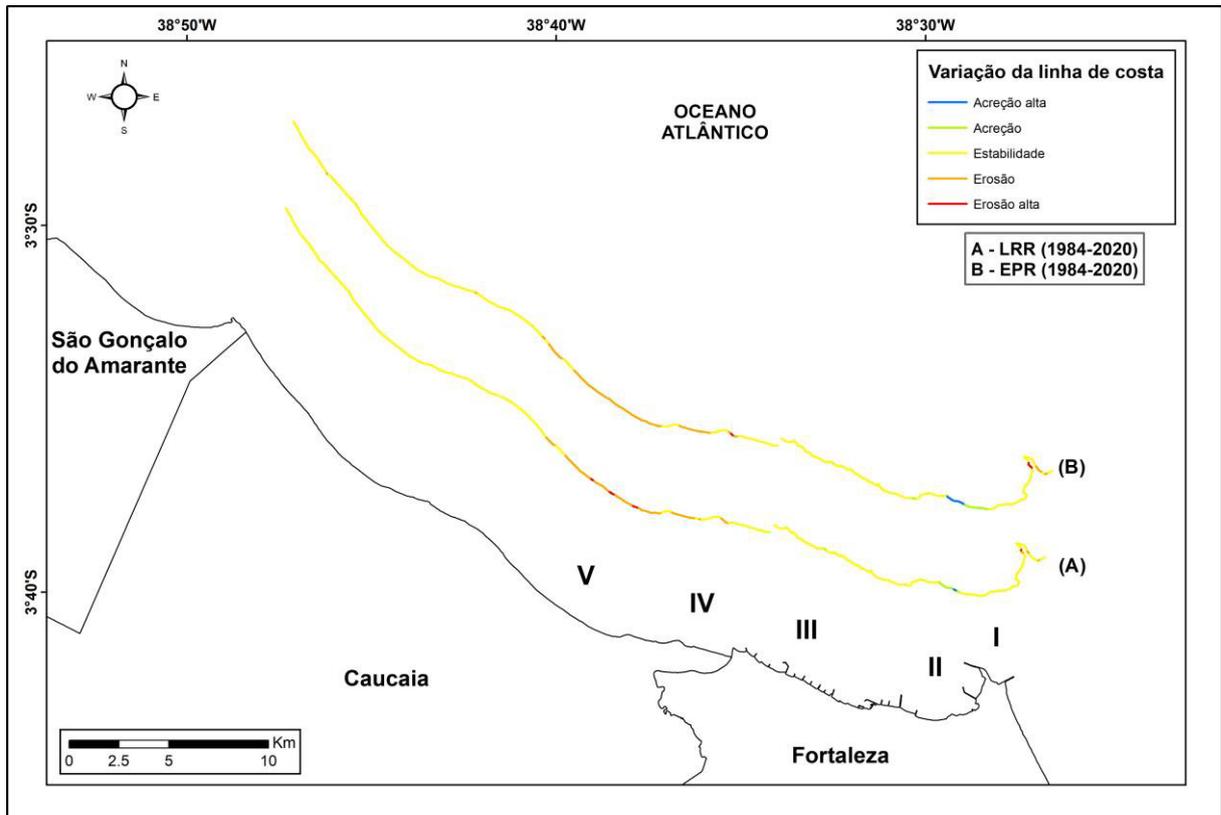
No Setor 2, a erosão prevaleceu em três períodos (1984-1991; 2000-2008; e, 2008-2014), a acreção em um (1991-2000) e a estabilidade também em um (2014-2020). Contudo, idêntico ao Setor 1, a estabilidade predominou no Setor 2 no período de 1984-2020 tanto para os valores de LRR como de EPR.

Figura 11. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR e LRR no período 1984-2020 para o Setor 2.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 12. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR e LRR, no período de 1984-2020, para o Setor 2. I – Porto do Mucuripe; II – Praia de Iracema; III – Barra do Ceará; IV – Praia de Iparana; V – Praia do Pacheco/Praia de Icarai. Datum: SIRGAS 2000.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.4.3. Setor 3

Idêntico ao que ocorreu no Setor 2, no Setor 3, no período de 1984-1991 predominou individualmente a classe estabilidade com 32% (17 Km) (Figura 13). Contudo, as classes erosão e erosão alta somaram 60% (31,8 Km) do trecho do Setor 3 e indicaram a prevalência de processos erosivos. As maiores taxas de acreção e erosão foram próximas da foz do rio Curú onde a deposição teve 37,81 m/a (EPR), em Paraipaba, e o recuo teve -33 m/a (EPR), em Paracuru (Figura 14). Outro trecho que teve recuo significativo foi no Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante) com -15,79 m/a (EPR).

No período de 1991-2000 prevaleceu a acreção com 38% e 19,9 Km de extensão (Figura 13). A maior taxa de deposição nesse período foi no Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante) com 24 m/a (EPR); outra vez próximo da foz do rio Curú (Paracuru) ocorreu a maior taxa de recuo com -10,5 m/a (EPR) (Figura 14).

Novamente a erosão predominou agora no período de 2000-2008 com 32% (17 Km) (Figura 13). A segunda classe com maior valor foi a estabilidade com 30% (15,7 Km); quando somados os valores da erosão (32%, 17 Km) com a erosão alta (29%, 15,1 Km) é possível perceber que 61% (32,1 Km) do Setor 3 teve retrogradação. A maior taxa de recuo foi próxima da foz do rio Curú (Paracuru) com -38,41 m/a (EPR); já a maior taxa de deposição foi de 45,87 m/a (EPR) no Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante) (Figura 14).

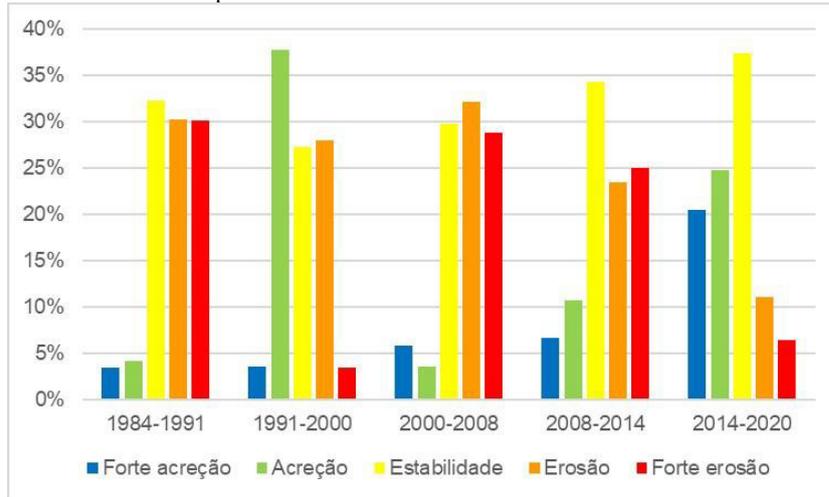
Igual ao primeiro período (1984-1991), no de 2008-2014 predominou individualmente a estabilidade com 34% (18,1 Km), contudo, a soma das classes erosão (23%, 12,4 Km) e erosão alta (25%, 13,1 Km) indica a supremacia desse processo (Figura 13). As maiores taxas de acreção e erosão ocorreram em pontos próximos do Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante), respectivamente, 38,43 m/a (EPR) e -21,32 m/a (EPR); é relevante mencionar que a segunda maior taxa de recuo ocorreu próxima da foz do rio Curú (Paracuru) com -12,86 m/a (EPR) (Figura 14).

De novo a estabilidade individualmente prevaleceu, agora para o período de 2014-2020, com 37% (19,7 Km) (Figura 13). Diferente do período anterior onde a erosão foi o processo mais atuante, no presente, a acreção teve os maiores valores, a saber: acreção, 25% (13,1 Km), e acreção alta, 20% (10,7 Km). A maior taxa de deposição foi no trecho do Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante) com 31,07 m/a (EPR); já a maior taxa erosiva foi na foz do rio Curú (Paracuru) com -25,7 m/a (EPR) (Figura 14).

No Setor 3, a estabilidade prevaleceu no período de 1984-2020, semelhante aos dois setores anteriores. Os valores para o EPR e o LRR foram, respectivamente, 78% (41 Km) e

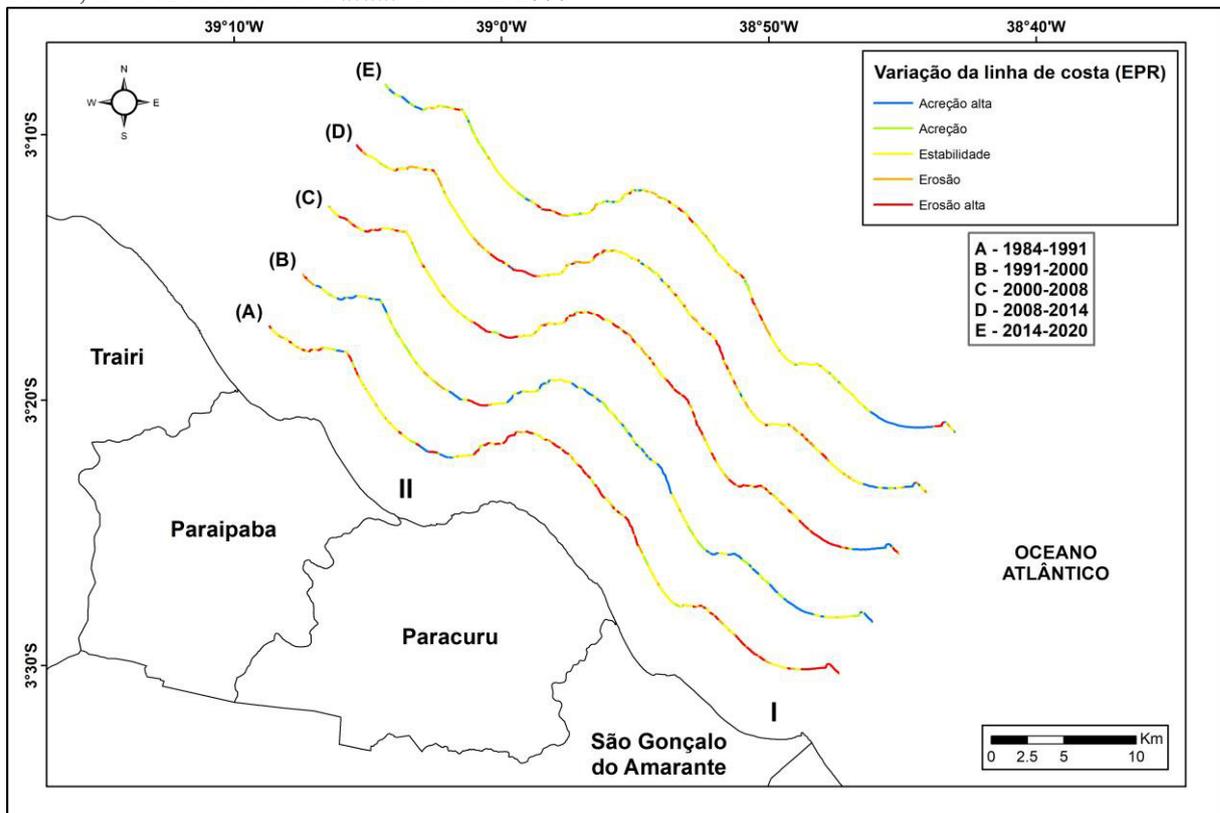
82% (43,2 Km) (Figura 15). As maiores taxas de recuo foram na foz do rio Curú (Paracuru) com 7,73 m/a (LRR) e 8,84 m/a (EPR); já as maiores taxas de deposição foram no trecho do Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante) com 12,24 m/a (LRR) e 10,74 m/a (EPR) (Figura 16).

Figura 13. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR para o Setor 3.



Fonte: elaborado pelo autor.

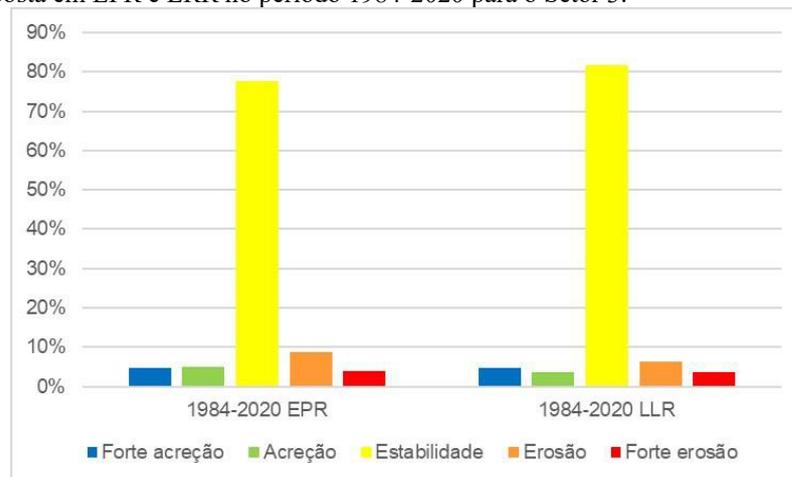
Figura 14. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR em períodos para o Setor 3. I – Porto do Pecém; II – Foz do rio Curú. Datum: SIRGAS 2000.



Fonte: elaborado pelo autor.

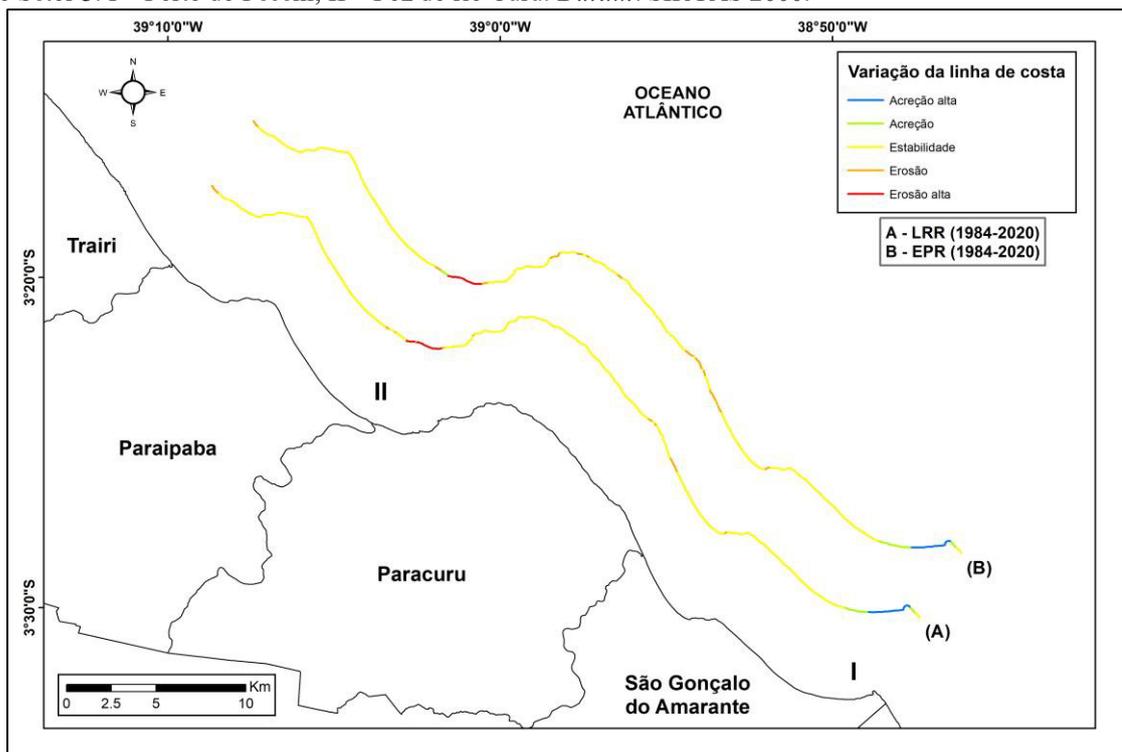
Na análise por períodos, o Setor 3 teve o primeiro dominado pela erosão (1984-1991), depois pela acreção (1991-2000), na sequência dois períodos erosivos (2000-2008 e 2008-2014) e, por fim, um deposicional (2014-2020). Esse comportamento dos períodos do Setor 3 é semelhante ao do Setor 2, a única diferença reside no período de 2014-2020 onde no Setor 2 predominou a estabilidade, contudo, com uma tendência deposicional. Já no período de 1984-2020 nos Setores 1 e 2 houve a prevalência da estabilidade tanto no EPR como no LRR.

Figura 15. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR e LRR no período 1984-2020 para o Setor 3.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 16. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR e LRR, no período de 1984-2020, para o Setor 3. I – Porto do Pecém; II – Foz do rio Curú. Datum: SIRGAS 2000.



Fonte: elaborado pelo autor.

Esse comportamento erosivo pode ser explicado pelo estágio morfodinâmico praiial que varia ao longo do ano no Setor 1. Um desses estágios é o terraço de baixa mar (ALBUQUERQUE *et al.*, 2009) onde, segundo Short (1993), em período de preamar ondas com altura inferior a 1 m ultrapassam o terraço sem romper e atinge a praia que assume um estágio refletivo, a presença desse estágio na área é confirmada por Pinheiro *et al.* (2016), um exemplo foi o da maré registrada no momento de captura da cena de 2014 que foi de 140 cm (MARINHA DO BRASIL, 2020). Conclui-se que o comportamento da praia era refletivo e influenciou na determinação da posição da linha de costa, haja vista ela ser estabelecida com base no contado seco/úmido, assim, ela apresentou um padrão erosivo condicionada pela elevação da maré.

Ainda para o Setor 1, no presente artigo foi percebido, no período 1984-2020, o predomínio da estabilidade, as taxas máximas de acreção foram: 4,11 m/a (EPR) e 4,09 m/a (LRR). Em um recorte temporal diferente (1972-2010), Marino e Freire (2013) constataram as seguintes taxas de acreção: 3,09 m/a (EPR) e 3,14 m/a (LRR). Diante disso, é possível perceber que as taxas nos dois trabalhos indicam uma tendência deposicional expressiva em alguns trechos e que houve uma elevação dos seus valores ao longo do tempo como é constatado pelo presente estudo. Os trechos desse setor que tiveram uma tendência deposicional é consequência direta do trapeamento de sedimentos da deriva litorânea ocasionado pelo espigão do Titãzinho (MARINO; FREIRE, 2013) e da mobilidade praiial alta, isto é, alta susceptibilidade a eventos erosivos ou deposicionais (ALBUQUERQUE *et al.*, 2009).

No Setor 2, Silva *et al.* (2019) constataram a prevalência da acreção no litoral oeste de Fortaleza nos períodos: 1984-1991, 1991-2000, 2000-2008 e 2008-2018. As taxas de acreção aqui observadas foram muito semelhantes às de Silva *et al.* (2019) (Tabela 2), por exemplo, no período 1984-1991, no presente estudo foi percebida a taxa de 12,9 m/a, já em Silva *et al.* (2019) foi de 12,7 m/a. Ambos os estudos ratificam a tendência de deposição no litoral oeste de Fortaleza.

Silva *et al.* (2019) perceberam a predominância do recuo da linha de costa nos períodos de 1984-1991, 1991-2000, 2000-2008 e 2008-2018 no litoral de Caucaia, no Setor 2. Na comparação das taxas de recuo constatadas por Silva *et al.* (2019) com as do presente estudo, no geral, tiveram valores semelhantes, o único período que tiveram valores com uma diferença mais acentuada foi no de 1991-2000, onde a taxa aqui foi de 4,77 m/a, enquanto no trabalho anteriormente mencionado foi de 7,7 m/a. Já em um intervalo temporal um pouco maior (1991-2004), Farias e Maia (2010) constataram uma taxa de recuo de 4 m/a na Praia de Pacheco

(Caucaia) que é um pouco menor do que a observada aqui (4,77 m/a), mas ambas sinalizam a tendência erosiva dessa praia.

Ainda para o litoral de Caucaia, Lima *et al.* (2019) detectaram uma taxa máxima de retrogradação de 6 m/a no período de 2004-2014, enquanto aqui, em um período diferente (2008-2014), a taxa de erosão foi de 12,5 m/a. Já no período de 2004-2018, foi observada uma erosão de 52,79 m com uma taxa média anual de 3,7 m na Praia de Icarai (Caucaia) por MOREIRA *et al.* (2020). Para o litoral de Caucaia, no período 2014-2020, o presente estudo identificou uma taxa de recuo de 7,32 m/a que é superior àquela constatada por Moreira *et al.* (2020) que foi de 3,7 m/a. Essa diferença pode ser resultado da amplitude temporal e dos anos em que elas foram analisadas. Apesar das diferenças das taxas de erosão dos estudos acima mencionados, eles explicitam a tendência de recuo da linha de costa no litoral de Caucaia.

O comportamento da linha de costa no Setor 2 possui relação direta com as intervenções feitas em Fortaleza, iniciada com a construção do Porto do Mucuripe, em 1875. Na construção desse porto não foram realizados estudos adequados da hidrodinâmica costeira o que resultou em erosão na costa de Fortaleza (MAIA *et al.*, 1998; BEZERRA; PINHEIRO; MORAIS, 2007). Diante dessa externalidade negativa, inúmeras obras de engenharia foram feitas ao longo do tempo para conter o processo erosivo, no todo, foram construídos 21 espigões, 10 enrocamentos, 4 quebra-mares e 1 molhe (BARROS *et al.*, 2021). Desse modo, essas obras contribuíram para a acreção observada em Fortaleza. Todavia, elas trapearam sedimentos que eram fornecidos para as praias de Caucaia causando erosão (FARIAS; MAIA, 2010). Diante da retrogradação da linha de costa, foram construídas estruturas para conter o avanço do mar em Caucaia, contudo, elas se mostraram ineficazes e findaram por potencializar a ação erosiva (PAULA, 2015). Como agravantes, as praias desse município são do tipo refletiva com terraço de baixa mar que confere uma maior susceptibilidade a eventos erosivos (PINHEIRO *et al.*, 2016). Duas outras características presentes na área são: (i) a existência de um potencial de remoção de sedimentos das praias devido ao transporte eólico (CARVALHO; CLAUDINO-SALES, 2016) e a (ii) ocupação de dunas (AMARO *et al.*, 2015; PAGÁN *et al.*, 2017) que contribuem para o déficit sedimentar no ambiente praias.

Para o Setor 3, Silva *et al.* (2019) analisando a região que compreende a foz do rio Curú, nos períodos de 1984-1991, 1991-2000, 2000-2008 e 2008-2018, detectaram acreção na margem de Paraipaba e erosão na de Paracuru. Já Quintela-Falcão, Morais e Pinheiro (2011) identificaram no período de 2001-2007 uma taxa de recuo de 78,38 m/a na região da foz do rio Curú (Paracuru). Essa taxa do estudo anteriormente mencionado diverge da aqui encontrada no período de 2000-2008 que foi de -38,41 m/a. Essa discrepância de valores das taxas pode ser

decorrente da diferença temporal entre os dois estudos. Ambos os estudos apontam para o significativo comportamento erosivo no trecho próximo da foz do rio Curú em Paracuru.

Em São Gonçalo do Amarante, Duarte et al. (2018) identificaram o seguinte comportamento: a) 40 m/a (EPR) de acreção no trecho próximo do porto do Pecém; e, b) 10 m/a (EPR) de recuo em um setor a sotamar do porto do Pecém. Já os valores aqui observados foram de 38,43 m/a (EPR) e -21,32 m/a (EPR), respectivamente, acreção e erosão para os trechos acima mencionados. As discrepâncias das taxas podem ser consequência de dois fatores: a) intervalo temporal diferente entre os dois estudos sendo o de Duarte *et al.* (2018), no período de 2011-2014, e o presente, no de 2008-2014; e, b) Duarte *et al.* (2018) trabalharam com imagens de alta resolução espacial do Satélite RapidEye com 5 m de resolução espacial, enquanto o presente estudo usou imagens dos Satélites Landsat 5 e 8 que possuem 30 m de resolução espacial.

No Setor 3 dois trechos tiveram uma dinâmica intensa, são eles: Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante) e foz do rio Curú (Paracuru). Para o primeiro trecho, a erosão observada na década de 1980 e 1990 foi causada pelas intervenções antrópicas na zona costeira, em especial, as obras do porto, que incluía a construção de um Terminal de Embarque Provisório – TEP (molhe), e também ocorreu a urbanização sobre o campo de dunas (MEIRELES *et al.*, 2006). Esse comportamento erosivo começa a ser alterado após a implantação de estruturas de proteção costeira e a remoção do TEP que trapeava sedimentos (MORAIS *et al.*, 2018). Depois das modificações anteriores o trecho do Porto do Pecém passa a ser predominantemente deposicional. No segundo trecho existe uma convergência de ondas que atinge a costa e, por conseguinte, aumenta a intensidade da deriva litorânea e eleva o potencial da ação dos processos erosivos (CARVALHO *et al.*, 2007). Além disso, as praias nesse trecho têm como estágio praiial dominante o tipo refletivo com terraço de baixa mar que são susceptíveis aos eventos erosivos (PINHEIRO *et al.*, 2016). Aqui também ocorre a ocupação do campo de dunas (MAGALHÃES; MEIRELES, 2016) que interfere no sistema praia-dunas e provoca a diminuição da entrada de sedimentos no ambiente praiial (MEIRELES; SILVA; THIERS, 2006).

Na área em estudo, a especulação imobiliária, o turismo e a vilegiatura influenciam fortemente a fabricação do tecido urbano costeiro promovendo sua expansão (PEREIRA, 2020), que é materializada no espaço pelos inúmeros loteamentos, hotéis, resorts, condomínios residenciais, entre outros. O processo de urbanização e a construção de estruturas rígidas sobre a praia e dunas ativas contribuem para a elevação do recuo médio da linha de costa (FORGIARINI *et al.*, 2019). Diante disso, se a expansão do tecido urbano acontecer sem

planejamento e finde por ocupar ambientes frágeis terão como consequências o agravamento da erosão costeira nos trechos onde ela atua hoje e sua ocorrência em novos lugares.

Outro fator que impactará diretamente a região costeira aqui abordada é a elevação do nível do mar (KULP; STRAUSS, 2019). A média global do nível do mar tem aumentado consideravelmente desde 1900 e ela certamente continuará a subir nos próximos anos sendo os valores dessa elevação dependente da temperatura global que condicionará o derretimento da camada de gelo e a expansão termal dos oceanos (MASSON-DELMONTTE *et al.*, 2021). Essa elevação do nível do mar impacta diretamente as comunidades costeiras que estão em risco de inundação onde é estimado que 5,3% (360 milhões) da população mundial vivam em regiões abaixo do novo nível de linha de maré alta predita (STRAUSS *et al.*, 2021).

Assim, fatores locais, como intervenções na linha de costa e a ocupação desordenada, e globais, elevação do nível do mar, poderão aumentar a extensão e intensidade da erosão da linha de costa no trecho de praia entre Fortaleza e Paraipaba. Como medida relevante encontra-se em fase final de concepção o Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Ceará que ordenará a ocupação urbana na zona costeira (CEARÁ, 2022). Sugere-se que a gestão costeira na região seja pautada em informações fornecidas por um sistema de monitoramento costeiro que use diferentes tecnologias e metodologias para melhor compreender a dinâmica desse ambiente. Estratégias podem ser usadas para lidar com o problema de erosão da linha de costa, por exemplo: a) construção de mecanismos de defesa; b) adaptação ao recuo; c) gestão do recuo (criação de zonas de sacrifício); e, d) intervenções sobre as causas (WILLIAMS *et al.*, 2018). Concernentes as ações de proteção a serem adotadas, elas podem ser de engenharia *soft* ou *hard* (PRANZINI, 2018) onde os exemplos são: engordamento praias (LUO *et al.*, 2016), esporão (KRISTENSEN *et al.*, 2016), sistema *dewatering* (VICINANZA *et al.*, 2010), *seawalls* (BEUZEN *et al.*, 2018), enrocamento (BAYLE *et al.*, 2020) e molhes (SAENGSUPAVANICH, 2019).

3.6. Conclusões

A análise da dinâmica da linha de costa mediante o *Linear Regression Rate* (LRR) e o *End Point Rate* (EPR), em períodos, permite uma melhor compreensão do comportamento dos processos de acreção e erosão. No presente estudo, tanto os valores de LRR como os de EPR, nesse caso para a linha de costa mais antiga (1984) e a mais atual (2020), indicaram uma situação de estabilidade nos três setores. Contudo, quando é analisado em períodos, mediante o EPR, é possível observar o comportamento de variação da predominância dos processos de

acrecção e erosão. Essa análise por períodos é importante, pois ela evidencia processos significativos que podem ser mascarados pelo EPR dos anos extremos e pelo LRR.

Como supramencionado, os valores de EPR (1984-2020) e LRR (1984-2020) indicaram a predominância da estabilidade em todos os três setores. Já os resultados por períodos, mediante o EPR, explicitam que no primeiro setor tanto a estabilidade como a acreção predominaram duas vezes, respectivamente, em 1984-1991 e 2000-2008, e em 1991-2000 e 2014-2020. No segundo setor o processo que mais predominou foi a erosão constatada em três períodos: 1984-1991; 2000-2008; e, 2008-2014. Por fim, no terceiro setor, semelhante ao segundo, prevaleceu a erosão e também nos mesmos três períodos (1984-1991; 2000-2008; e, 2008-2014).

Na área em estudo três trechos chamam a atenção, a saber: a costa leste de Fortaleza; a costa de Caucaia; e, a costa de Paracuru. O primeiro se destaca pelo comportamento de estabilidade da linha de costa com uma tendência deposicional. Esse comportamento na costa leste de Fortaleza é consequência principalmente da sua localização a *updrift* de um espigão. Já o segundo é marcado pela tendência erosiva que atinge principalmente as praias de Iparana, Pacheco e Icarai. Esse comportamento erosivo em Caucaia é resultado de intervenções na linha de costa de Fortaleza (*updrift*) que trapeiam sedimentos que seriam fornecidos ao sistema costeiro à *downdrift*. Por fim, no terceiro é observado alguns trechos erosivos, contudo, o ponto mais significativo é na região da foz do rio Curú. Os fatores que contribuem para a erosão em Paracuru são: a) a ocupação do campo de dunas que altera a dinâmica sedimentar do ambiente praiado, e b) a convergência de ondas que atinge a região próxima da foz do rio Curú que, por conseguinte, aumenta a intensidade da deriva litorânea e o potencial de ação da erosão.

Para o litoral do trecho de praia entre Fortaleza e Paraipaba faz-se necessário um monitoramento contínuo da linha de costa. É importante que esse monitoramento seja realizado em diferentes escalas espaciais, produtos de média e alta resoluções, e temporais. A criação de produtos 3D e levantamentos com GPS geodésico e estação total também são fontes confiáveis e que merecem ser inseridas em estudos costeiros. O conjunto de informações criadas pelos produtos e tecnologias anteriores têm um potencial de subsidiar a tomada de decisão dos planejadores e gestores da zona costeira para que contribuam com o desenvolvimento sustentável dessa região.

Referências

ABU ZED, A. A.; SOLIMAN, M. R.; YASSIN, A. A. Evaluation of using satellite image in detecting long term shoreline change along El-Arish coastal zone, Egypt. **Alexandria**

Engineering Journal, v. 57, p. 2687-2702, 2018. DOI: 10.1016/j.aej.2017.10.005

ALBUQUERQUE, M. G.; CALLIARI, L. J.; CORREA, I. C. S.; PINHEIRO, L. S. Morfodinâmica da praia do futuro, Fortaleza-CE: uma síntese de dois anos de estudo. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 1, p. 49-57, 2009. DOI: 10.5380/abequa.v1i2.14092

ALEXANDRAKIS, G.; MANASAKIS, C.; KAMPANIS, N. A. Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective. **Ocean & Coastal Management**, v. 111, p. 1-11, 2015. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2015.04.001

AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T.; SOUTO, M. V. S. **Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento remoto e Geodésia de precisão**. Natal: Do autor, 2012. 120p.

AMARO, V. E.; GOMES, L. R. S.; LIMA, F. G. F.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; BUSMAN, D. V.; SANTOS, A. L. S. Multitemporal analysis of coastal erosion based on multisource satellite images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil. **Marine Geodesy**, v. 38, p. 1-25, 2015. DOI: 10.1080/01490419.2014.904257

BAYLE, P. M.; BLENKINSOPP, C. E.; CONLEY, D.; MASSELINK, G.; BEUZEN, T.; ALMAR, R. Performance of a dynamic cobble berm revetment for coastal protection, under increasing water level. **Coastal Engineering**, v. 159, p. 103712, 2020. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2020.103712

BEZERRA, M. O.; PINHEIRO, L.; MORAIS, J. O. Shoreline change of the Mucuripe harbor zones (Fortaleza-Ceará, Northeast of Brazil) 1972-2003. **Journal of Coastal Research**, v. 50, p. 1163-1167, 2007.

BEUZEN, T.; TURNER, I. L.; BLENKINSOPP, C. E.; ATKINSON, A.; FLOCARD, F.; BALDOCK, T. E. Physical model study of beach profile evolution by sea level rise in the presence of seawalls. **Coastal Engineering**, v. 136, p. 172-182, 2018. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2017.12.002

BRANNSTROM, C.; GORAYEB, A.; MENDES, J. S.; LOUREIRO, C.; MEIRELES, A. J. A.; SILVA, E. V.; FREITAS, A. L. R.; OLIVEIRA, R. F. Is Brazilian wind power development sustainable? Insights from a review of conflicts in Ceará state. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 62-71, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.047

CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, p. 395-403, 1996. DOI: 10.1016/0097-8493(96)00008-8

CAMFIELD, F. E.; MORANG, A. Defining and interpreting shoreline change. **Ocean & Coastal Management**, v. 32, p. 129-151, 1996. DOI: 10.1016/S0964-5691(96)00059-2

CARVALHO, A. M.; CLAUDINO-SALES, V. Contribuição do transporte eólico no processo de evolução da linha de costa. **Mercator**, v. 15, p. 105-115, 2016.

CEARÁ. **Relatório consolidado do Zoneamento Ecológico-Econômico da zona costeira**

do Ceará – ZEEC. Fortaleza: SEMA. 2022.

CELLONE, F.; CAROL, E.; TOSI, L. Coastal erosion and loss of wetlands in the middle Río de la Plata estuary (Argentina). **Applied Geography**, v. 76, p. 37-48, 2016. DOI: 10.1016/j.apgeog.2016.09.014

CIRITCI, D.; TÜRK, T. Analysis of coastal changes using remote sensing and geographical information systems in the Gulf of Izmit, Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, p. 341, 2020. DOI: 10.1007/s10661-020-08255-9

CLAUDINO-SALES, V.; CARVALHO, A. M. Dinâmica costeira controlada por promontórios no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. **Geociências**, v. 33, p. 579-595, 2014.

COSTA, C. E. B. **Análise descritiva do padrão de ondas no litoral do Ceará através de dados observados**. Monografia (Graduação em Oceanografia), Fortaleza: Universidade Federal do Ceará. 2019.

CROWELL, M.; LEATHERMAN, S. P.; BUCKLEY, M. K. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. **Journal of Coastal Research**, v. 7, p. 839-852, 1991.

DAI, C.; HOWAT, I. M.; LAROUB, E.; HUSBY, E. Coastline extraction from repeat high resolution satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 229, p. 260-270, 2019. DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.010

DUARTE, C. R.; MIRANDA, F. P.; LANDAU, L.; SOUTO, M. V. S.; SABADIA, J. A. B.; SILVA NETO, C. A.; RODRIGUES, L. I. C.; DAMASCENO, A. M. Short-time analysis of shoreline based on RapidEye satellite images in the terminal area of Pecém Port, Ceará, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, p. 4376-4389, 2018. DOI: 10.1080/01431161.2018.1457229

ESRI – Environmental Systems Research Institute. Software ArcGis Desktop, version 10.5. 2017.

FAIRBRIDGE, R. W. Classification of coasts. **Journal of Coastal Research**, v. 20, p. 155-165, 2004. DOI: 10.2112/1551-5036(2004)20[155:COC]2.0.CO;2

FARIAS, E. G. G.; MAIA, L. P. Uso de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do Estado do Ceará, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 10, p. 521-544, 2010. DOI: 10.5894/rgci224

FITTON, J. M.; HANSOM, J. D.; RENNIE, A. F. A national coastal erosion susceptibility model for Scotland. **Ocean & Coastal Management**, v. 132, p. 80-89, 2016. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2016.08.018

FORGIARINI, A. P. P.; FIGUEIREDO, S. A.; CALLIARI, L. J.; GOULART, E. S.; MARQUES, W.; TROMBETTA, T. B.; OLEININK, P. H.; GUIMARÃES, R. C.; ARIGONY-NETO, J.; SALAME, C. C. Quantifying the geomorphologic and urbanization influence on coastal retreat under sea level rise. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 230, 106437, 2019. DOI: 10.1016/j.ecss.2019.106437

GONÇALVES, R. M.; SALEEM, A.; QUEIROZ, H. A. A.; AWANGE, J. L. A fuzzy model integrating shoreline changes, NDVI and settlement influences for coastal zone human impact classification. **Applied Geography**, v. 113, p. 102093, 2019. DOI: 10.1016/j.apgeog.2019.102093

GRIGIO, A. M.; AMARO, V. E.; VITAL, H.; DIODATO, M. A. A method for coastline evolution analysis using GIS and Remote Sensing: a case study from the Guamaré City, Northeast Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 42, p. 412-421, 2005.

HIMMELSTOSS, E. A.; HENDERSON, R. E.; KRATZMANN, M. G.; FARRIS, A. S. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide**: U.S. Geological Survey Open-File Report, 2018. 110p.

KRISTENSEN, S. E.; DRØNEN, N.; DEIGAARD, R.; FREDSOE, J. Impact of groyne fields on the littoral drift: a hybrid morphological modelling study. **Coastal Engineering**, v. 111, 13-22, 2016. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.01.009

KULP, S. A.; STRAUSS, B. H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. **Nature Communications**, v. 10, p. 4844, 2019. Doi: 10.1038/s41467-019-12808-z

LEATHERMAN, S. P. Coastal erosion and the United States National Flood Insurance Program. **Ocean & Coastal Management**, v. 156, p. 35-42, 2018. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.04.004

LIMA, J. C.; LIMA, R. J. R.; BARROS, E. L.; PAULA, D. P. Análise multitemporal da variabilidade da linha de costa do litoral do município de Caucaia, Ceará, Brasil. **Revista Casa da Geografia de Sobral**, v. 21, p. 864-884, 2019.

LUO, S.; LIU, Y.; JIN, R.; ZHANG, J.; WEI, W. A guide to coastal management: benefits and lessons learned of beach nourishment practices in China over the past two decades. **Ocean & Coastal Management**, v. 134, p. 207-215, 2016. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2016.10.011

MAGALHÃES, D. C.; MEIRELES, A. J. A. Dinâmica geoambiental associada à ponta litorânea em Paracuru – Ceará – Brasil. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, v.18, p. 145-162, 2016.

MAIA, L. P.; JIMENEZ, J. A.; SERRA, J.; MORAIS, J. O. The coastline of Fortaleza city. A product of environmental impacts caused by the mucuripe harbor. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 31, p. 93-100, 1998. DOI: 10.32360/acmar.v31i1-2.31378

MARINHA DO BRASIL. Banco Nacional de Dados Oceanográficos. 2021.

MARINO, M. T. R. D.; FREIRE, G. S. S. Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, região metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará, Brasil. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 13, p. 113-129, 2013. DOI: 10.5894/rgci373

MARINO, M. T. R. D.; FERNANDES, D.; MORAES, S. G.; TAJRA, A. A. Vulnerabilidade física de parte do litoral leste do Ceará à erosão. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 38,

p. 253-281, 2016. DOI: 10.5380/dma.v38i0.46765

MARTINS, K. A.; PEREIRA, P. S. Coastal erosion at Pau Amarelo Beach, Northeast of Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 71, p. 17-23, 2014. DOI: 10.2112/SI71-002.1

MASSON-DELMONTTE, V.; ZHAI, A.; PIRANI, S. L.; CONNORS, C.; PÉAN, S.; BERGER, N.; CAUD, Y.; CHEN, L.; GOLDFARB, M. I.; GOMIS, M.; HUANG, K.; LEITZELL, E.; LONNOY, J. B. R.; MATTHEWS, T. K.; MAYCOCK, T.; WATERFIELD, O.; YELEKÇI, R.; YU.; ZHOU, B. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press. 2021. In press.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, p. 1425-1432, 1996. DOI: 10.1080/01431169608948714

MEIRELES, A. J.; SILVA, A. E.; THIERS, P. R. L. Os campos de dunas móveis: fundamentos dinâmicos para um modelo integrado de planejamento e gestão da Zona Costeira. **Revista GEOUSP**, v. 20, p. 101-119, 2006. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2006.74010

MORAIS, J. O.; PINHEIRO, L. S.; PESSOA, P. R. S.; FREIRE, G. S. S.; CARVALHO, A. M.; GUERRA, R. G. P.; BARROS, E. L. CEARÁ. In: MUEHE, D. (Org.). **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Rio de Janeiro: MMA, 2018. p. 261-287.

MOREIRA, T. F.; ALBUQUERQUE, M. G.; ESPINOZA, J. M. A.; PAULA, D. P.; ALVES, D. C. L.; BARROS, E. L.; BENDÔ, A. R. R.; CONCEIÇÃO, T. F. Estudo do comportamento da linha de costa na praia do Icarai (Caucaia, Ceará), a partir dos métodos digital shoreline analysis system e do polígono de mudança. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, p. 3395-3411. 2020. DOI: 10.26848/rbgf.v13.07.p3395-3411

MUEHE, D.; KLUM-OLIVEIRA. Deslocamento da linha de costa versus mobilidade praia. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 5, p. 121-124, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abequa.v5i2.35884>

MUEHE, D., (Org.). **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Rio de Janeiro, MMA. 2018. 759p.

NGUYEN, Q. H.; TAKEWAKA, S. Land subsidence and its effects on coastal erosion in the Nam Dinh Coast (Vietnam). **Continental Shelf Research**, v. 207, p. 104227. 2020. DOI: 10.1016/j.csr.2020.104227

PAGÁN, J. I.; LÓPEZ, I.; ARAGONÉS, L.; GARCIA-BARBA, J. The effects of the anthropic actions on the Sandy beaches of Guardamar del Segura, Spain. **Science of the Total Environment**, v. 601-602, p. 1364-1377, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.272

PAULA, D. P.; DIAS, J. M. A.; FERREIRA, Ó.; MORAIS, J. O. High-rise development of the sea-front at Fortaleza (Brazil): perspectives on its valuation and consequences. **Ocean & Coastal Management**, v. 77, p. 14-23, 2013. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2012.03.004

PAULA, D. P. Erosão costeira e estruturas de proteção no litoral da região metropolitana de Fortaleza (Ceará, Brasil): um contributo para artificialização do litoral. **REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 9, p. 73-86, 2015.

PEREIRA, A. Q. **Coastal resorts and urbanization in Northeast Brazil**. Cham: Springer, 2020. 74p. DOI: 10.1007/978-3-030-46593-3

PINHEIRO, L. S.; MORAIS, J. O.; MAIA, L. P. The Beaches of Ceará. In: SHORT, A. D. & KLEIN, A. H. F. **Brazilian Beach Systems**. Springer, pp. 175-199, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-30394-9_7

PRANZINI, E. Shore protection in Italy: from hard to soft engineering ... and back. **Ocean & Coastal Management**, v. 156, p. 43-57, 2018. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.04.018

QUINTELA-FALCÃO, T. O; MORAIS, J. O.; PINHEIRO, L. S., (2011) Morphodynamics of the Curu Estuary inlet – Brazil. *Journal of Coastal Research* 64, 805-808.

SAENGSUPAVANICH, C. Willingness to restore jetty-created erosion at a famous tourism beach. **Ocean & Coastal Management**, v. 178, 104817, 2019. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2019.104817

SHORT, A. D. 1993. **Beaches of the New South Wales Coast. A guide to their nature, characteristics, surf and safety**. Australian Beach Safety and Management Program. The University Printing Service, University of Sidney. 358p.

SILVA, M. T.; LOPES, D. N.; REBOUÇAS, I. S.; FREIRES, V. E.; SILVA NETO, C. A.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S. Variação da linha de costa no litoral cearense (1984-2018). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, p. 2551-2579, 2019. DOI: 10.26848/rbgf.v13.3.p1132-1144

STRAUSS, B. H.; KULP, S. A.; RASMUSSEN, D. J.; LEVERMANN, A. Unprecedented threats to cities from multi-century sea level rise. **Environmental Research Letters**, In press. 2021. DOI: 10.1088/1748-9326/ac2e6b

USGS. United States Geology Survey. Earth explorer. 2021.

USGS. United States Geology Survey. Landsat 5 and Landsat 8. 2022.

VICINANZA, D.; GUIDA, A.; FERRANTE, V.; CIAVOLA, P. Performance of a beach dewatering system – Chiaiolella Beach, Procida Island, Italy. **Journal of Coastal Research**, v. 26, p. 753-761, 2010. DOI: 10.2112/08-1165.1

WILLIAMS, A. T.; RANGEL-BUITRAGO, N.; PRANZINI, E.; ANFUSO, G. The management of coastal erosion. **Ocean & Coastal Management**, v. 156, p. 4-20, 2018. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.03.022

YUE, H.; LIU, Y. Variations in the lake area, water level, and water volume of Hongjiannao Lake during 1986-2018 based on Landsat and ASTER GDEM data. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, p. 606, 2019. DOI: 10.1007/s10661-019-7715-6

4 CAPÍTULO IV USE OF REMOTE SENSING AND GIS IN THE ANALYSIS OF THE POTENTIAL ECONOMIC DAMAGE DUE TO COASTAL EROSION ON THE STRETCH OF BEACH BETWEEN THE MUNICIPALITIES OF FORTALEZA AND PARAIPABA, CEARÁ STATE, BRAZIL

O artigo intitulado “Use of remote sensing and GIS in the analysis of the potential for economic damage due to coastal erosion on the Fortaleza Metropolitan Region (FMR), Ceará, Brazil”, que foi submetido para a Revista Earth Science Informatics. O objetivo desse artigo foi realizar uma análise preliminar do potencial de prejuízos econômicos devido à erosão costeira em na Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará, Brazil.

USE OF REMOTE SENSING AND GIS IN THE ANALYSIS OF THE POTENTIAL ECONOMIC DAMAGE DUE TO COASTAL EROSION ON THE STRETCH OF BEACH BETWEEN THE MUNICIPALITIES OF FORTALEZA AND PARAIPABA, CEARÁ STATE, BRAZIL

Abstract Methodologies to assess shoreline erosion and its economic damage are essential for coastal planners and managers. A methodology that works on this theme has a gap in determining whether shoreline erosion is short or long term. Also, the classification of urban density is simplistic and does not adequately the complexity of the coastal zone cover and use. Given this, we proposed to overcome these limitations by using statistical methods and creating new urban density classes with their respective classification keys. We tested this improvement on the beaches between Fortaleza and Paraipaba, Ceará, Brazil. To do so, we performed a set of procedures: digital processing of satellite images; the calculation of the variation shoreline; determination of erosion sensitivity; determination of the urban density; and the determination of the potential economic damage. The medium erosion sensitivity predominated with 92.1 Km (79.1%). The Caucaia and Paracuru shoreline stretches had a significant retreat despite this predominance. Regarding urbanization, stretches with medium urban density predominated with 46.2 Km (39.7%). Finally, the very low potential economic damage class had the largest extension with 48.7 Km (41.8%). The previous predominance occurs due to extensive stretches with very low and low urban density associated with medium erosion sensitivity, indicating shoreline stability. Improvements have increased the robustness of the methodology, and it can be an essential tool for planning and managing the coastal zone for public and private initiatives. In addition, we suggest inserting the insertion of econometric methods and spatialization its results.

Keywords Geoprocessing; Coastal management; Shoreline variation; LANDSAT.

4.1 Introduction

Shoreline erosion is a coastal zone modeling process that may have a natural or anthropic origin. These interventions by hard engineering change the coastal hydrodynamics and thus impair the sediment budget, leading to erosion. This erosive process occurs in several parts of the world (CELLONE et al., 2016; FITTON et al., 2016; LEATHERMAN, 2018; NGUYEN; TAKEWAKA, 2020) and portions of the Brazilian coast (MARTINS; PEREIRA, 2014; GONÇALVES et al., 2019; VENANCIO et al., 2020). In Ceará State, Northeast Brazil, some stretches of shoreline are suffering with erosion (MORAIS et al., 2018); where a classic case was the retreat observed after the construction of Mucuripe Harbor (Fortaleza) (BEZERRA et al., 2007). However, public managers only gave due attention to the coastal erosion when they felt its adverse effects on the economy and society (SILVA et al., 2014).

When shoreline erosion affects built-up regions, the damage is not limited to the demolished coastal structures; it also influences local economies that rely on beach tourism as a major source of revenue since the appeal of these tourist attractions declines (ALEXANDRAKIS et al., 2015). Although actions to contain coastal erosion and improve beach amenities generate costs for governments and private enterprises, they positively impact the local economy in the medium-term since the beaches do not lose their attractiveness to tourists and thus maintain the tourist flow (CORRAL; SCHLING, 2017). Therefore, studies relating to coastal erosion and economic losses are relevant for the government and the private sector.

Santos et al. (2007) developed a methodology that links coastal erosion and economic damage. Its products make it possible to determine the susceptibility of stretches of the shoreline to economic damage due to its erosion (SILVA et al., 2007). In this context, the potential economic damage due to erosion of the shoreline is the product of urban density with sensitivity to erosion (NASCIMENTO et al., 2013). We emphasize that this methodology presented here does not propose to make an econometric analysis of economic damage due to shoreline erosion. It proposes a preliminary analysis that indicates the areas most likely to have economic damage due to shoreline erosion. This information can be handy for coastal zone managers and stakeholders since they will know which coastal stretches have a greater or smaller potential economic damage due to shoreline erosion. Public managers, for example, will be able to take action to reduce the high potential for damage in specific coastal.

This methodology determined the erosion sensitivity through geo-indicators (exposed tree roots, fallen trees, destroyed urban structures, presence of active cliffs, and others)

(SANTOS et al., 2007); thus, it cannot determine whether the erosive behavior is short or long term. Silva et al. (2020) proposed an improvement in determining the erosion sensitivity using the polygon change method. However, we proposed improvement using a statistically more reliable method through Digital Shoreline Analysis System (DSAS) tool (HIMMELSTOSS et al., 2018) to determine erosion sensitivity. Another issue where methodology remains to be improved is determining the urban density. Santos et al. (2007) classified the density of the shoreline based on the number of structures present: less than 4 (low), 5 to 10 (medium), and more than 10 (high). This classification is simplistic, and it fails to capture the complexity of coastal zones with a wide range of land use and occupation. As a response, we developed five density classes, each with its classification keys, to account for the complexities of land use and land cover and improve the determination of urban density.

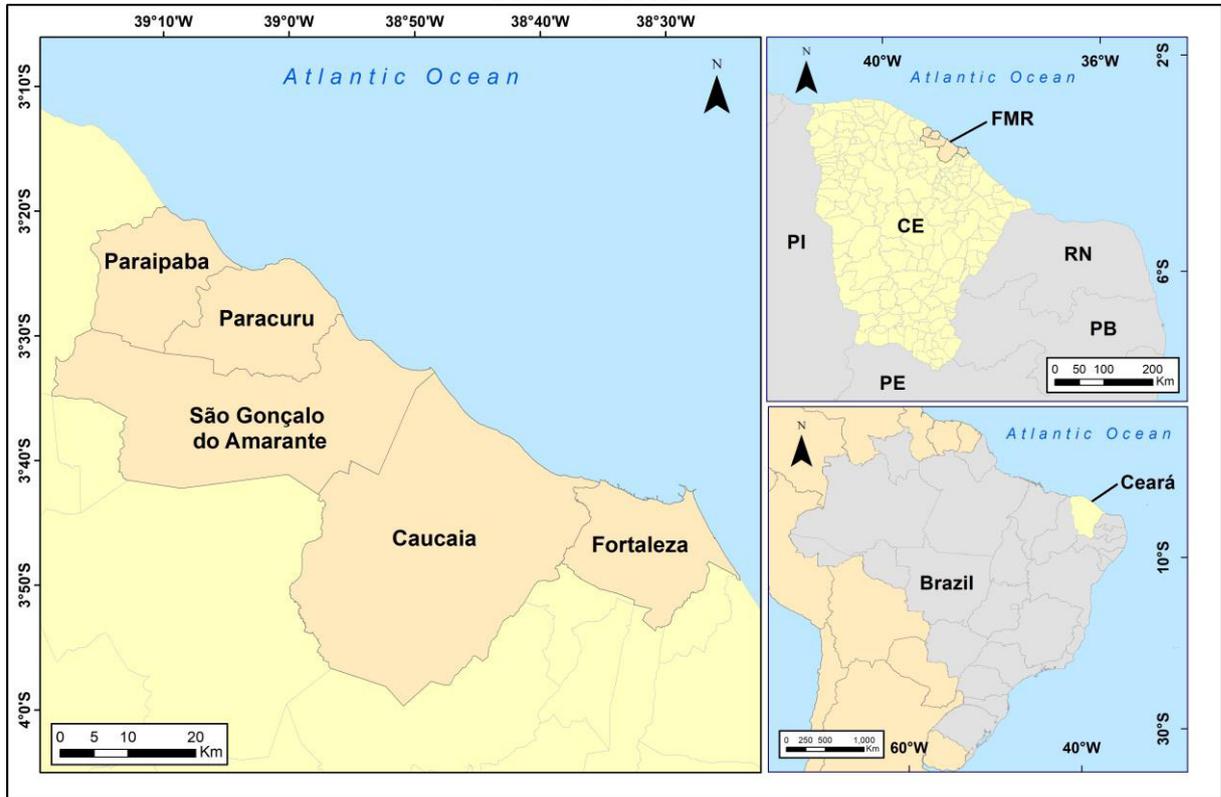
Given the above, this paper aimed to improve the methodology for determining the potential economic damage due to coastal erosion. We tested the methodology with its improvements on the beaches between Fortaleza and Paraipaba, Ceará (Brazil). We selected this region for its economic and social importance. In the economic context, it has an intense beach tourist activity (PEREIRA, 2020), in addition to two ports (Mucuripe and Pecém), several industries of various applications close to the shore, and onshore wind farms (BRANNSTROM et al., 2017). There is also a project for the construction of an offshore wind farm. In the social context, this sector of the Ceará coast has a high population density, including indigenous settlements and traditional fishing communities (PAULA et al., 2013). Beyond all that, Pinheiro et al. (2016) identified the need for long-term studies to understand better the coastal dynamics of Ceará. Given this, the present paper is important because it provides information about the coastal dynamics for managers and planners; indicates areas with lower or higher potential for economic damage due to coastal erosion; understands the effects of anthropogenic changes in the coastal zone, particularly on the shoreline; and, contribute to the improvement of the methodology that determines the potential for economic damage due to coastal erosion.

4.2 Study site

The study area is composed of the municipalities of Fortaleza, Caucaia, São Gonçalo do Amarante, Paracuru, and Paraipaba, in the state of Ceará, northeastern Brazil (Fig. 1). The alignment of the coastal strip is an ESE-NNW direction, with only a few headlands interrupting the pattern (CEARÁ, 2022). Two of the five headlands are formed by Precambrian quartzite (Mucuripe and Pecém), while three are of Cenozoic rocks of the Barreiras Group

(Taíba, Paracuru, and Lagoinha); in addition, there are sandy beaches and beach rocks (CLAUDINO-SALES; CARVALHO, 2014).

Fig. 1 Location of the stretch of beaches between Fortaleza and Paraipaba, Ceará State, Northeastern of Brazil. Datum: SIRGAS 2000.



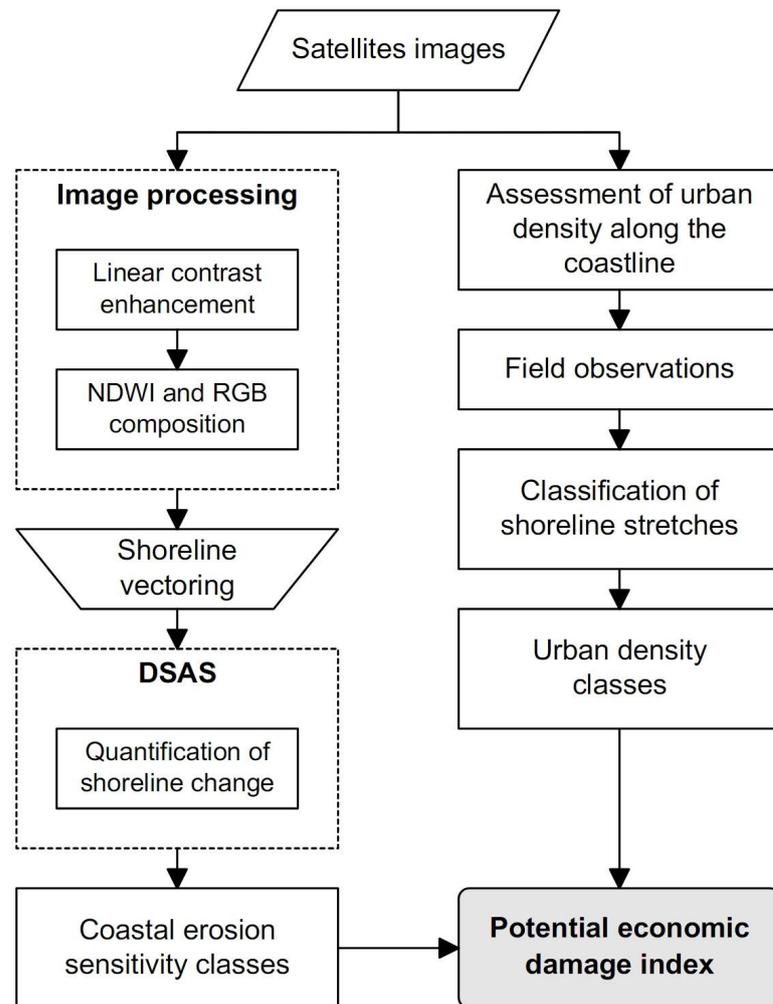
Source: Author.

The formation geomorphology comprises cliffs, sandy beaches, and mobile and fixed dune fields (PINHEIRO et al., 2016). As for hydrodynamic aspects, the mean tide amplitude is 1.53 m at Mucuripe, 1.54 m at Pecém, and 1.45 m at Paracuru (MARINHA DO BRASIL, 2021), and littoral drift has east to the west direction (CEARÁ, 2022). In this region, there are sea and swell type waves with quadrants with north, northeast, and east orientations, with the predominance of the last two; these directions change throughout the year, already the mean height significant wave height is 1.66 m (COSTA, 2019). Regarding morphodynamics, beach states are present: longshore bar and trough (LBT); transverse bar and rip (TBR); low tide terrace (LTT); reflective plus low tide terrace (R+LTT); and reflective plus low tidal and rips (R+LTR) (PINHEIRO et al., 2016).

4.3 Methodological procedures

We conducted a preliminary analysis of the potential for economic damage due to coastal erosion in three stages, namely: (i) determination of sensitivity to erosion; (ii) determination of urban density; and (iii) determination of the potential economic damage (Fig. 2).

Fig. 2 Workflow for applying the proposed method.



Source: Author.

First, we determine the sensitivity to erosion by multitemporal analysis of the shoreline extracted from remote sensing products. We chose the images of the Landsat 5 and 8 satellites (Table 1) because they have a significant time interval for the area since 1984 and the possibility of working with the same spatial resolution (30 m). We select these images based on the requirement to have the least amount of clouds over the shoreline. The date intervals did not follow a fixed pattern, for example, 5 in 5 years, given the lack of images that meet the

requirements of the present study in the 1984-2020-time interval. We obtained the scenes courtesy of the United States Geological Survey (USGS).

Table 1 Sources of historical data for shoreline extraction used in the study (USGS, 2021)

Date	Satellite/Sensor	Path/Row
06/15/1984	Landsat 5/TM	217/062
07/20/1984	Landsat 5/TM	217/062
06/19/1991	Landsat 5/TM	217/062
08/24/1992	Landsat 5/TM	217/062
08/14/2000	Landsat 5/TM	217/062
08/01/2001	Landsat 5/TM	217/062
07/27/2005	Landsat 5/TM	217/062
10/05/2007	Landsat 5/TM	217/062
09/21/2008	Landsat 5/TM	217/062
07/01/2013	Landsat 8/OLI	217/062
06/18/2014	Landsat 8/OLI	217/062
08/08/2015	Landsat 8/OLI	217/062
08/26/2016	Landsat 8/OLI	217/062
08/13/2017	Landsat 8/OLI	217/062
06/13/2018	Landsat 8/OLI	217/062
10/22/2019	Landsat 8/OLI	217/062
09/06/2020	Landsat 8/OLI	217/062

Source: USGS, 2021.

Before the coast mapping, we used linear contrast enhancement and the band ratio in the satellite images. With the band ratio, we applied the Normalized Difference Water Index (NDWI); this index was developed to delineate open water features and enhance their presence in remote sensing images (MCFEETERS, 1996). Its mathematical formula is:

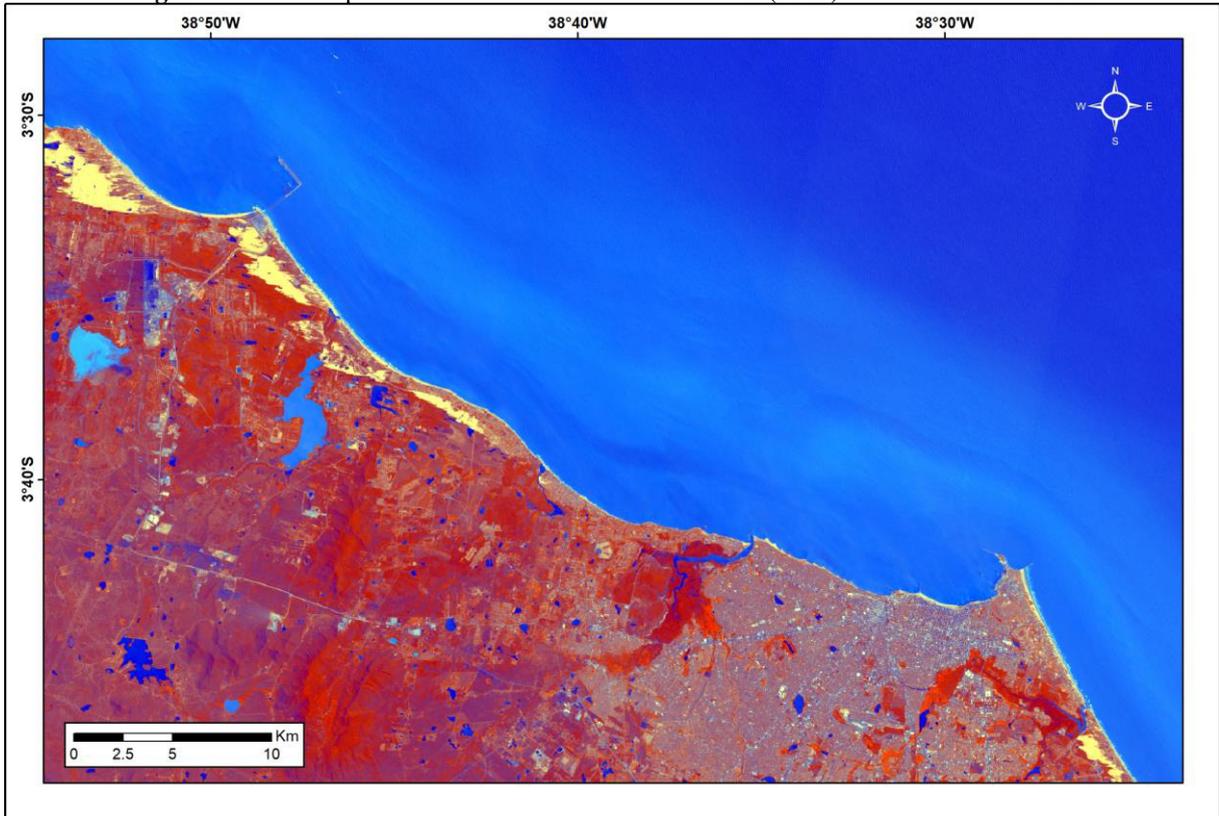
$$\frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad (2)$$

where GREEN denotes the visible green spectrum strip, and NIR denotes the near-infrared spectrum strip.

This index and the green and infrared bands in the RGB composition near-infrared-green-NDWI (Fig. 3) allowed a good distinction of the shoreline based on colors with shades of yellow for sand, and blue, for ocean waters (GRIGIO et al., 2005). Coastal studies use this index widely in low-resolution (ABU ZED et al., 2018) and high-resolution satellite imagery (DAI et al., 2019). Subsequently, we vectored the shoreline manually and applied quantification techniques to assess the shoreline variability. Digital Shoreline Analysis System (DSAS), an extension tool of ArcGIS® (HIMMELSTOSS et al., 2018), quantified the changes by calculating the rate-of-change statistics of a shoreline time series. We created an offshore baseline and a series of transects perpendicular to it. We chose a transects spacing of 100 m because the shape of the shoreline in the study area has, in some stretches, closed angles where

DSAS cannot create the transects satisfactorily. Thus, with previous spacing, the tool created the transects satisfactorily. Then we generate by DSAS the distance measurements between the baseline and shorelines and, therefore, the variation rates.

Fig. 3 Colorful composition RGB-4-2-NDWI of Landsat 5 (2008). Datum: SIRGAS 2000



Source: Author.

The statistical methods we used were Net Shoreline Movement (NSM) and Linear Regression Rate (LRR). The first determines the distance between the oldest and most recent shoreline and results in a linear distance in meters that indicates the displacement of the shoreline (YUE; LIU, 2019). While the second calculates the rate of shoreline variation using a least-squares regression line applied to the entire shoreline and results in an annual rate in meters (CIRITCI; TÜRK, 2020). The calculation of NSM is as follows:

$$\text{NSM} = D_{t2} - D_{t1} \quad (2)$$

where:

D_{t2} : For each transect, the distance of the earliest shorelines

D_{t1} : For each transect, the distance of the latest shorelines (MUSKANANFOLA et al., 2020)

The calculation LRR is as follows:

$$y = mx + b \quad (3)$$

where:

y: Distance from baseline (meters)

m: Slope (the rate of change)

b: Intercept (where the line crosses the y-axis) (HIMMELSTOSS et al., 2018)

Based on the LRR values of the transects, their mean and standard deviation, we classified the sensitivity to coastal erosion according to the following characteristics: accretion greater than +3.5 m/year (very low sensitivity); accretion between +3.5 m/year and +1.5 m/year (low sensitivity); variation between +1.5 and -1.5 (medium sensitivity); erosion between -1.5 and -3.5 m/year (high sensitivity); and, erosion less than -3.5 m/year (very high sensitivity). For the very low, low, medium, high, and very high classes, we assign the values 1, 2, 3, 4, and 5, respectively.

To classify the urban density of the coast, we adapted the classification developed by Kosztra and Bütter (2019). The classes and their characteristics are as follows: (a) very low level, without buildings; (b) low level, isolated buildings; (c) medium level, has a discontinuous urban pattern in which urban structures predominate, although there are considerable discontinuous green spaces and exposed soil; (d) high level, has a continuous urban pattern in which urban structures predominate with the prevalence of horizontal buildings, and there may be buildings with less than three floors, discontinuous green spaces, and exposed soil are exceptions; and, (e) very high level, has a continuous urban pattern where urban structures prevail with a predominance of vertical buildings with three or more floors, discontinuous green spaces, and exposed soil are exceptions (Fig. 4). Then, we assign the values 1, 2, 3, 4, and 5, respectively, to the very low, low, medium, and high classes. We framed the stretches of the coast in previous classes through field research and visualization of images available in Google Earth software (GOOGLE, 2020).

Finally, we determine the potential economic damage that results from the product of erosion sensitivity values with urban density for the entire shoreline (Nascimento et al., 2013). We fit the values of the previous products in the following classes of potential economic damage: (a) very low susceptibility, 1 to 5; (b) low, 6 to 10; (c) medium, 11 to 15; (d) high, 16 to 20; and, (e) very high, above of 20. We carry out the digital processing of the images in the SPRING software (Camara et al., 1996) and the vector processes in ArcGIS 10.5 (ESRI, 2017).

Fig. 4 Classification key for urban density. **A**, very low level; **B**, low level; **C**, medium level; **D**, high level; and **E**, very high level.

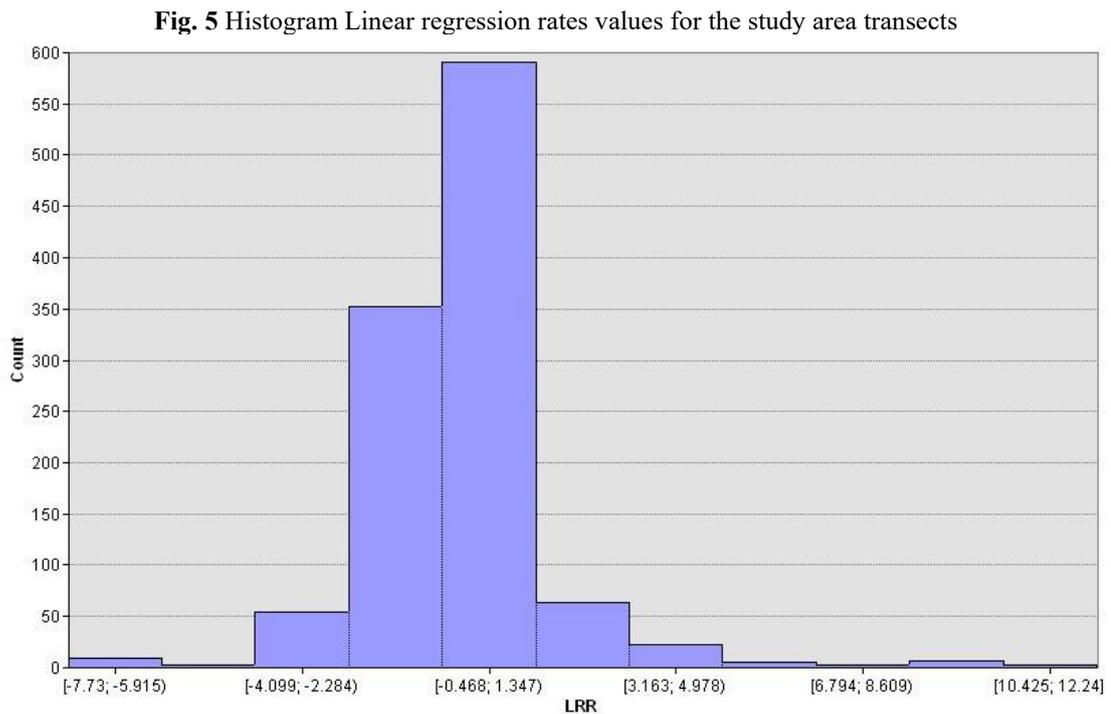


Source: ESRI provides basemap source.

4.4 Results and discussions

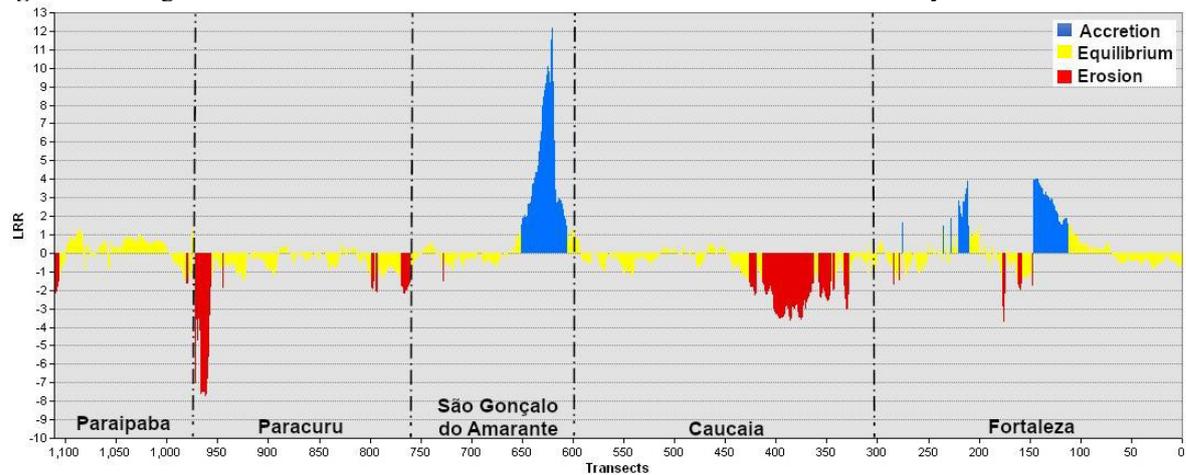
The previous techniques used geo-indicators (SANTOS et al., 2007) or the polygon change method (SILVA et al., 2019) to estimate erosion sensitivity. We apply statistical methods using DSAS (HIMMELSTOSS et al., 2018) to improve the determination of erosion sensitivity. This tool provided us with a set of data that assisted us in understanding the behavior of the shoreline, as we see below.

We observed, when analyzing the rates of shorelines variations determined for each transect by the LRR, considering the full extension of the study area, in the period 1984-2020, there was a predominance of transects with values between -1 and 1 (772 transects, 69.4%) (Fig. 5). Transects with these values are present in all municipalities studied and, in the stretches where they occur, indicate a dynamic balance (Fig. 6).



Source: Author.

The second-largest record included values between -1 and -2 (124 transects, 11.2%) (Fig. 5) that indicated an erosive tendency in the stretches. Similar to the previous transect, it also occurred in all municipalities but with a greater concentration in Caucaia (Fig. 6). In contrast, the third-largest record comprised the values between 1 and 2 (54 transects, 4.9%) (Fig. 5), indicating a tendency to progradation. These values occur in some stretches of the coast under study; however, its concentration is greater in Fortaleza (Fig. 6).

Fig. 6 Linear regression rates that indicate the shoreline variation of the area under study between 1984 and 2020

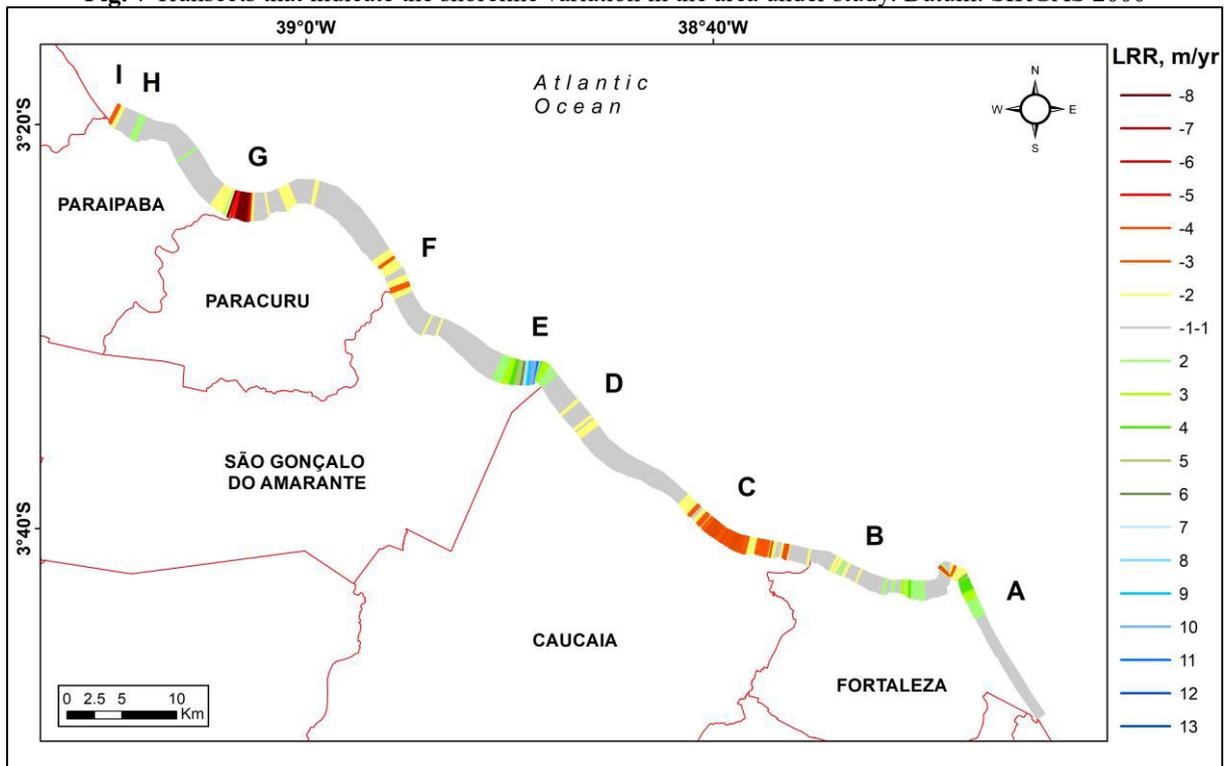
Source: Author.

In Fortaleza, on the east coast, we observed an extensive stretch with values between -1 and 1 and a tendency progradation of up to 4.09 m/yr near the Titãzinho groin at Futuro Beach (Table 2) (Figures 7, point A, and 8). For this same beach, in a polygon change analysis, occurred linear values of 39 m (1984-1991), 71 m (1991-2000), 55 m (2000-2008), and -48 m (2008-2018) (SILVA et al. 2019). From 1972 to 2010, a progradation of up to 3.14 m/yr occurred detected using the LRR method (MARINO; FREIRE, 2013). We found an increased deposition rate on this beach compared to Marino & Freire (2013). We attribute this progradation tendency to high beach mobility (ALBUQUERQUE et al., 2009) and its location in the updrift of a groin (MARINO; FREIRE, 2013).

Table 2 Trend of change in the shoreline obtained through linear regression rates for the municipalities of the study area

LRR (m/year)	Min	Max	Mean	Average NSM (m)
Fortaleza	-3.73	4.09	0.23	8
Caucaia	-3.65	1.26	-0.92	-39
São Gonçalo do Amarante	-1.72	12.24	1.29	36
Paracuru	-7.73	0.61	-0.95	-41
Paraipaba	-2.47	1.39	0.12	1

Fig. 7 Transects that indicate the shoreline variation in the area under study. Datum: SIRGAS 2000



Source: Author.

Fig. 8 Stretch of the Futuro Beach where accretion occurred, Fortaleza (2019)



Source: Author.

Still in Fortaleza, on the west coast (Fig. 7, point **B**), we observed the following behaviors: stretches where they varied between -1 and 1 m/yr; stretches that retread up to -3.73 m/yr (region close to the port of Mucuripe); and others that have prograded up to 3.94 m/yr.

Silva et al. (2019) also observed the action of both erosion and accretion on the west coast of Fortaleza, with extreme values, respectively, of -92 m (1984-1991) and 183 m (2000-2008). Also, Bezerra et al. (2007) identified the action of the two processes mentioned above, but with the prevalence of accretion. In the previous region, the erosion resulted from the construction of the Mucuripe harbor, where at the time, groin application did not perform adequate studies of coastal hydrodynamics (MAIA et al., 1998; BEZERRA et al., 2007). This Fortaleza coastline is noted by many interventions in all were 21 groins, 10 ripraps, 4 breakwaters, 3 beach nourishment, and 1 jetty (Fig. 9) to erosive contain (BARROS et al., 2021). We attributed the actions previous to the progradation trend in some stretches in Fortaleza.

Fig. 9 Beach nourishment on Iracema Beach, Fortaleza (2019)



Source: Author.

In Caucaia (Fig. 7, point C), we saw a significant stretch of erosion comprising the beaches of Iparana, Pacheco, and Icaraí (Fig. 10), where they retreated up to -3.65 m/yr. For these beaches, Farias & Maia (2010) detected a retreat of up to -9.4 m/yr (1991-2004). This erosive trend continued from 2004 to 2014, with a maximum of -6 m/yr (Lima et al., 2019). For these beaches, in a polygon change analysis, linear retreats occurred of -118 m (1984-1991); -70 m (1991-2000); -78 m (2000-2008); and -70 m (2008-2018) (SILVA et al., 2019). Despite the methodological differences between the three studies, the first two used DSAS (FARIAS; MAIA, 2010; LIMA et al., 2019), and the third used the polygon change method (SILVA et al., 2019), they indicated an erosive tendency for the area mentioned above and that remained until

2020 as observed in this paper.

Fig. 10 Road destroyed by shoreline erosion on Icaraí beach, Caucaia (2019)



Source: Author.

Still in Caucaia (Fig. 7, point **D**), in smaller stretches, the shoreline eroded on the beaches of Tabuba (Fig. 11) and Cumbuco, respectively, -2.77 m/yr and -1.25 m/yr. To these beaches, Lima et al. (2019) identified retreats of up to -3.62 m/yr for Tabuba beach and -1 m/yr for Cumbuco Beach from 2004 to 2014. Still, occurred an erosive stretch on Tabuba Beach with retreats of -52 m (1994-1991); -80 m (1991-2000); -81 m (2000-2008); and -62 m (2008-2018) (SILVA et al., 2019). Based on previous studies and data from the present study, we concluded there is an erosive tendency in some spots on Tabuba and Cumbuco beaches, however, with a lower intensity than observed on the eastern beaches of Caucaia. Is noted the high vulnerability to coastal erosion in this municipality (MORAIS et al., 2018), which is caused in part by a sediment trapping created by the groins built-in Fortaleza (updrift) (FARIAS; MAIA, 2010; PAULA, 2015). Also, there is potential for removing sediment from the beach by wind transport (CARVALHO; CLAUDINO-SALES, 2016), and the occupation of the dunes (AMARO et al., 2015; PAGÁN et al., 2017) contribute to the sedimentary deficit of the beaches.

On São Gonçalo do Amarante (Fig. 7, point **E**), we observed intense deposition in the region adjacent to the Pecém harbor (Fig. 12), including the highest value of progradation that occurred in this paper (12.24 m/yr). In addition to the progradation sector mentioned above, occurred an extensive stretch with values between -1 and 1 , indicating a relative balance; this pattern only broken in some erosive points on Taíba beach (-1.52 m/yr) and the limit near

Paracuru (-1.63 m) (Fig. 6, point F). Still, in São Gonçalo do Amarante, Duarte et al. (2018) observed a maximum progradation up to 40 m/yr in the region adjacent to Pecém harbor in a short time interval (2011-2014). This progradation occurred due to the construction of coastal erosion protection structures and removal of a temporary boarding terminal that sediment trap in 2001 (MORAIS et al., 2018). The difference in progradation results between the prior study (40 m/yr) (DUARTE et al., 2018) and the present study (12.18 m/yr) was due to time scale; the present study has a larger time series and, therefore, a greater number of observations that allowed a better determination of data trends, although on a smaller spatial scale.

Fig. 11 Destroyed wall on Tabuba beach, Caucaia (2019)



Source: Author.

Fig. 12 Stretch where there was progradation on the Pecém beach, São Gonçalo do Amarante (2019)



Source: Author.

In the municipality of Paracuru, we observed eroded stretches with the highest concentration in the region near the mouth of the Curú River (Fig. 7, point **G**). In this mouth, the highest rate of retreat occurred in the entire study of -7.73 m/yr in the margin of Paracuru. In the municipality of Paraipaba (Fig. 7, point **H**), Lagoinha beach prograded 1.37 m/yr (Fig. 13) and another sector eroded -2.47 m/yr near the limit with Trari (Fig. 7, point **I**). Two studies had already observed erosion at the mouth of the Curú River, one of the short-time intervals (2001-2007) (QUINTELA-FALCÃO et al., 2011) and the other in a larger interval (1984-2018) (Silva et al. 2019). In the first study (QUINTELA-FALCÃO et al., 2011), linear retreated up to -470 m and an erosion rate of -78.38 m/yr. While in the second (SILVA et al. 2019), maximum retreated up to -861 m of the inlet (1984-1991); -263 m (1991-2000); -148 m (2000-2008); and -44 m (2008-2018). We concluded that there is a significant erosive trend at the mouth of the Curú River, corroborated by a retreat rate of -7.73 m/yr.

Fig. 13 Stretch where there was progradation on the Lagoinha beach, Paraipaba (2019)



Source: Author.

Wave convergence reaches the mouth of the Curú River is one factor that contributes to the erosion shoreline because it increases the intensity of the littoral drift that potentiates the action of the erosive process (CARVALHO et al., 2007). In addition, the headland influence in this region of Paracuru and Paraipaba (CLAUDINO-SALES et al., 2018), where sedimentary budget is theoretically considered stable through a dynamic balance (CARVALHO et al., 2004; CARVALHO & CLAUDINO-SALES, 2016). However, urbanization of the dune field in this region (MAGALHÃES & MEIRELES, 2016) results in

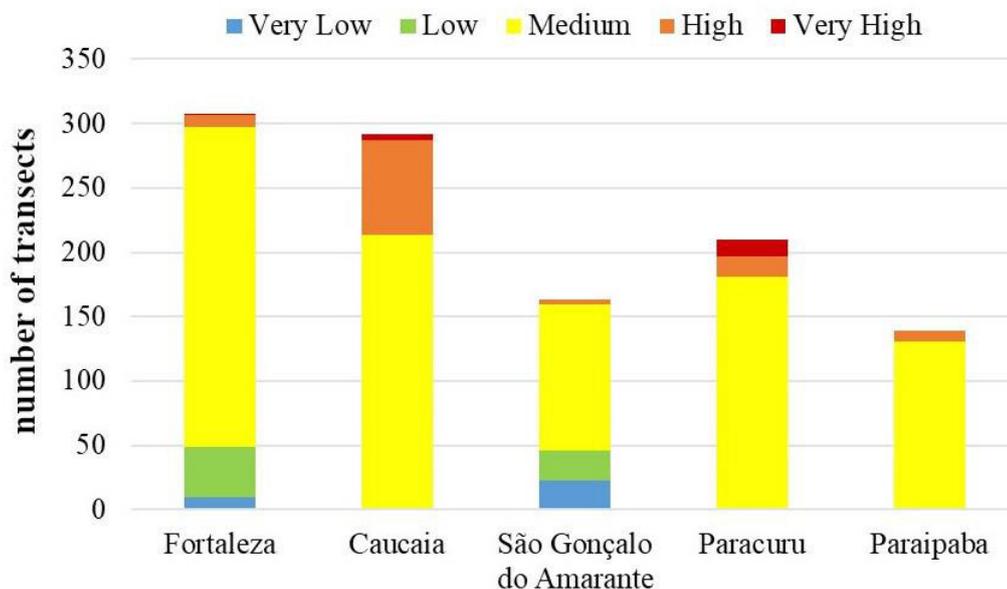
the loss of this geomorphological unit (GARCIA-LOZANO et al., 2018) and, consequently, a decrease in sedimentary into the beach environment, which leads to shoreline erosion (AMARO et al., 2015; PAGÁN et al., 2017).

The global mean sea level has increased considerably since 1900. It will certainly continue to increase in the next 2000 years. Rising values depend on the increase in global temperature that will condition the ice sheets melting and ocean thermal expansion (MASSON-DELMONTTE et al., 2021). This sea-level rise has a direct impact on coastal communities, which are at flood risk. It is estimated that 5.3% (360 million) of the world population lives in regions below the predicted new high tide level lines (STRAUSS et al., 2021). Thus, sea-level rise may aggravate erosive processes in the study area (KULP; STRAUSS, 2019). In addition, the possible construction of an offshore wind power plant in Caucaia may also negatively affect the sedimentary budget of the downdrift (São Gonçalo do Amarante, Paracuru, and Paraipaba) due to sediment trapping and alteration of local hydrodynamics.

The average net shoreline movement (NSM) indicates total shoreline displacement. These NSM measures can serve the public power to create setbacks, especially in the long stretches with few buildings or without. In this indicator, Paracuru and Caucaia had the largest retreats from the shoreline, respectively, 41 m and 39 m (Table 2). On the hand, São Gonçalo do Amarante and Fortaleza had the highest progradation, respectively, 36 m and 8 m. The average values of NSM corroborate the tendency of erosion in Paracuru and Caucaia and accretion in São Gonçalo do Amarante and Fortaleza. Paraipaba had a net shoreline progradation of 1 m.

We classified the LRR values of the transects for erosion sensitivity (Fig. 14). In percentage terms, the medium value predominated in all municipalities, where the highest concentration was in Paraipaba, 94.2% (131 transects). In absolute values, Fortaleza concentrated the most transects in the medium class with 248 (80.5%), followed by Caucaia with 214 (73.3%). In addition, Caucaia had the highest absolute and percentage values for high class, respectively, 73 transects and 25%, indicating an erosive tendency. Paracuru had the highest absolute and percentage values for the very high 13 transects and 6.2% class, indicating an erosive trend similar to the municipality mentioned above. On the other hand, in São Gonçalo do Amarante occurred, a higher concentration of transects in the very low (23 transects, 14.1%) and low (23 transects, 14.1%) classes. Fortaleza concentrated the highest amount of transects in the low class (39 transects). These previous classes indicate an accretional trend where they occurred.

Fig. 14 Number of transects registered for erosion sensitivity classes in each municipality



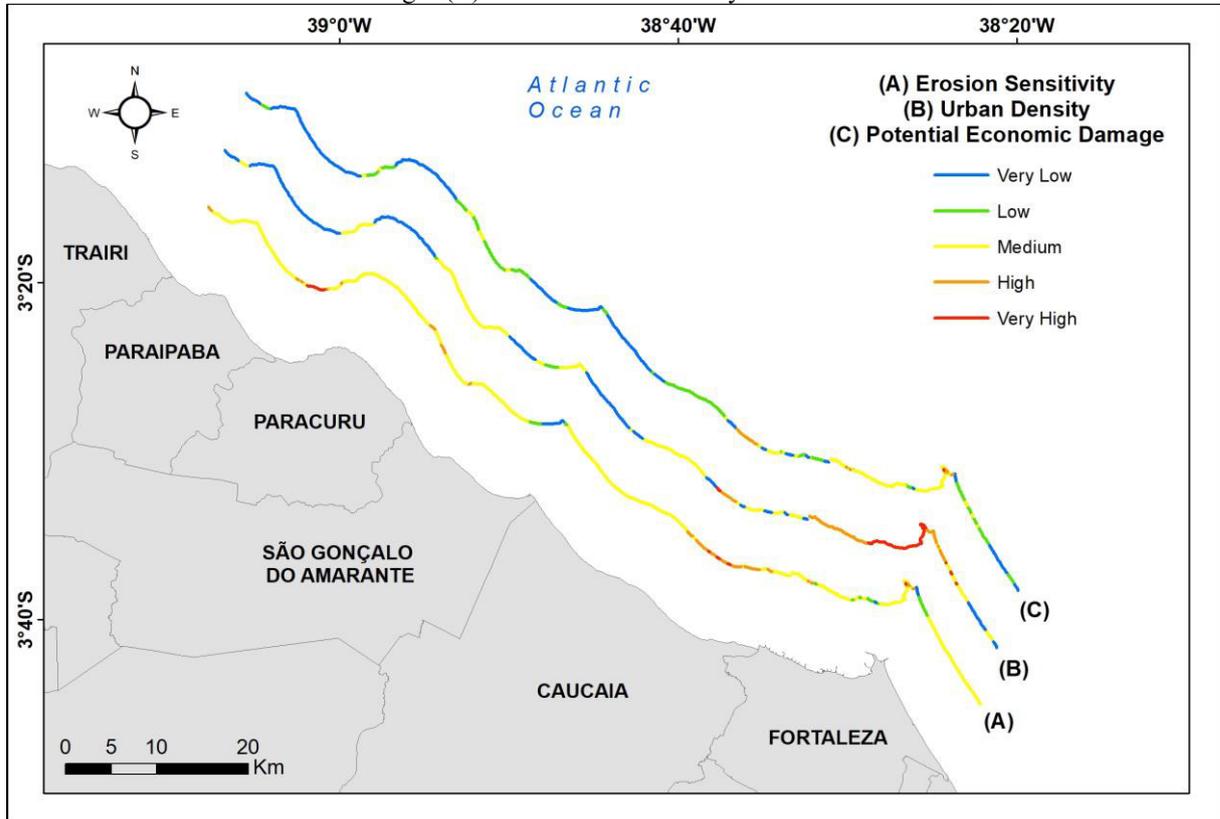
Source: Author.

We vectored the shoreline based on the previous classification to know each erosion sensitivity class (Fig. 15). The medium class predominated with 92.1 km (79.1%) (Fig. 16) registered in all municipalities studies; this class indicates a trend of shoreline stability. While the high (12.4 km, 10.6%) and very high (2.5 km, 2.2%) classes showed us retreats greater than 1.5 m/yr at 14.9 km (12.8%) of the shoreline (Fig. 16); in Caucaia and Paracuru, these classes occurred with larger extensions (Fig. 16). On the other hand, the erosion sensitivity classes low and very low had, respectively, 5.2% (6 km) and 2.9% (3.3 km), they occurred only in Fortaleza, and São Gonçalo do Amarante and indicate a trend of accretion (Fig. 15).

Regarding the urban density, predominated medium density with 46.2 km (39.7%) (Fig. 16), which occurred in several stretches in all municipalities (Fig. 15). Subsequently, the very low class had the second greatest extension with 44.1 km (37.9%); it also occurred in all municipalities (Fig. 15). Fortaleza and Caucaia concentrated the presence of the high, and very high urban density, the values of these classes were, respectively, 12.5 km (10.7%) and 11.4 km (9.8%) (Fig. 16). On the other hand, low density occurred only in some small stretches in São Gonçalo do Amarante and Paracuru, with a total length of 2 km (1.8%). In the region under study, vilegiatura and tourism/real estate strongly influence the coastal urban fabric promoting its expansion (PEREIRA, 2020). In São Gonçalo do Amarante, Paracuru, and Paraipaba, new real estate developments that are installing will contribute to the future increase of urban density. This urbanization and hard structures on the beach and active dunes contribute to the

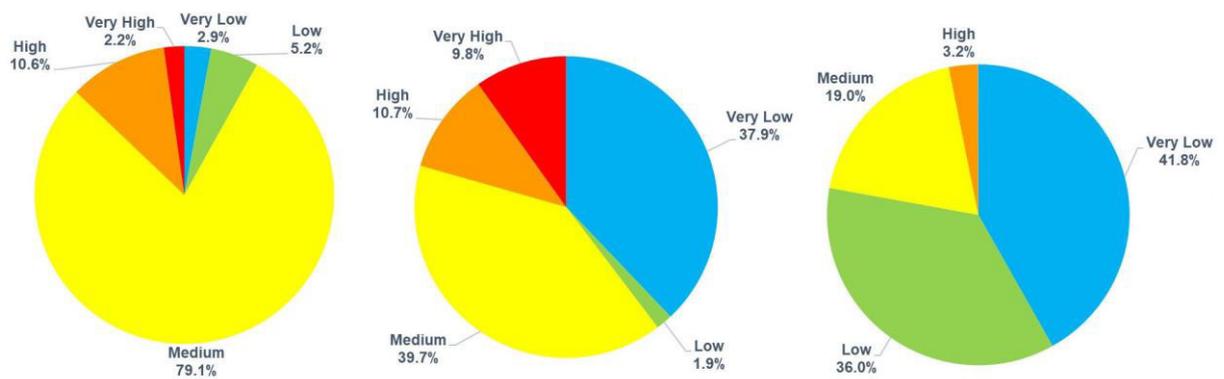
elevation of the average retreat of the shoreline (FORGIARINI et al., 2019). The expansion of the urban fabric and a possible occurrence of shoreline erosion in stretches with very high and high urban density will increase the potential economic damage in the future in the study area.

Fig. 15 Classification of the shoreline for the classes of erosion sensitivity (A), urban density (B), and potential economic damages (C) for the area under study. Datum: SIRGAS 2000



Source: Author.

Fig. 16 Percentages of erosion sensitivity classes, urban density, and potential for economic damages



Source: Author.

Crossing of erosion sensitivity with urban density resulted in 20 combinations/segments indicating potential economic damage due to shoreline erosion for the area under study (Table 3). The very low potential economic damage predominated with a length of 48.7 km (41.8%) (Fig. 16), followed by a low potential with 41.9 km (36%); both classes are present in all municipalities. These classes predominated due to vast stretches of shoreline where accretion or dynamic balance occurred. They concentrated on areas without buildings, in few numbers, or with a discontinuous urban pattern. Despite this accretion trend, we framed a few erosive stretches as having a very low or low economic damage potential due to shoreline erosion occurring in very low or low urban density areas with no or few buildings.

Table 3 Estimation of the potential economic damage due to shoreline erosion to the study area

Segments	Erosion Sensitivity	Urban Density	Potential Economic Damage
1	Very Low (1)	Medium (3)	Very Low (3)
2	Very Low (1)	High (4)	Very Low (4)
3	Very Low (1)	Very High (5)	Very Low (5)
4	Low (2)	Low (2)	Very Low (4)
5	Low (2)	Medium (3)	Low (6)
6	Low (2)	High (4)	Low (8)
7	Low (2)	Very High (5)	Low (10)
8	Medium (3)	Very Low (1)	Very Low (3)
9	Medium (3)	Low (2)	Low (6)
10	Medium (3)	Medium (3)	Low (9)
11	Medium (3)	High (4)	Medium (12)
12	Medium (3)	Very High (5)	Medium (15)
13	High (4)	Very Low (1)	Very Low (4)
14	High (4)	Low (2)	Low (8)
15	High (4)	High (4)	High (16)
16	High (4)	Very High (5)	High (20)
17	Very High (5)	Very Low (1)	Very Low (5)
18	Very High (5)	Low (2)	Low (10)
19	Very High (5)	High (4)	High (20)
20	Very High (5)	Very High (5)	Very High (25)

The medium potential economic damage class had the third-highest occurrence with 19% (22.1 km); Paraipaba was the only municipality where it did not occur; Fortaleza had the highest concentration. This class has as main characteristics: to have a dynamic balance of shoreline in urbanized stretches with a predominance of continuous horizontal or vertical constructions. On the other hand, the high class had a low value of 3.1% (3.6 km). We observed this class in coastal urbanized stretches with a predominance of continuous horizontal constructions and intense shoreline retreats, present only in Caucaia and Fortaleza. We observed that coastal stretches with a continuous urban pattern contribute to the elevation of the potential for economic damage due to shoreline erosion; examples are Fortaleza and Caucaia, which have

stretches with high to very high density. Thus, when shoreline erosion occurs, the potential for damage is greatly increased. We saw that erosion alone does not contribute to the elevation of damage potential; for example, several stretches that had retreated, such as in São Gonçalo do Amarante, Paracuru, and Paraipaba, had very low to medium damage potential.

Regarding the potential economic damage, the low class predominated on the Baleia Coast (Bahia, Brazil) (SANTOS et al., 2007), on the Descobrimento Coast (Bahia, Brazil) (SILVA et al., 2007), and on the Cacau Coast (Bahia, Brazil) (NASCIMENTO et al., 2013), respectively, 50.5%, 60% and 48.7%. On the other hand, Areia Branca (Rio Grande do Norte, Brazil) predominated the medium class with 65.4% (Silva et al., 2020). These regions mentioned above vary in the historical settings of the urban fabric and the shoreline control factors. Although these differences exist, the predominance of classes from low to medium potential economic damage occurred due to extensive stretches with a low urban density, similar to what we observed in this paper. Thus, even if the shoreline erodes, it will not raise potential economic damage since it does not endanger buildings.

Despite the predominance of the very low potential for economic damage, we propose the need for actions so that the high and very high classes do not rise in percentage terms. These actions must line up with integrated coastal management based on information provided by coastal monitoring systems using different technologies and methodologies (for example, PENDER et al., 2015; TAKAMURA et al., 2016; ATKINSON et al., 2018; GRIFFITHS et al., 2019; JAYSON-QUASHIGAH et al., 2019; KELLY; GONTZ, 2020). For this region, the public authorities are being conceived integrated coastal planning through Coastal Ecological and Economic Zoning (C-EEZ). This integrated coastal management can make use of some strategies to deal with the shoreline erosion, i.e.: i) construction of defense mechanisms; ii) adaptation to the retreat; iii) manage the retreat (sacrificial zones); and iv) interventions on the causes (WILLIAMS et al., 2018). Concerning the protective actions, they may be hard or soft engineering (PRANZINI, 2018); examples are nourishment (LUO et al., 2016), groins (KRISTENSEN et al., 2016), submerged breakwater (ZAHRA, 2018), dewatering systems (VICINANZA et al., 2010), seawalls (BEUZEN et al., 2018), revetment (BAYLE et al., 2020), and jetties (SAENGSPAVANICH, 2019). We suggest that setback zones be created in the study area to inhibit the occupation near the shoreline.

Despite the advances achieved in this paper, the methodology can still be improved in quantifying the economic damage. In this damage quantification, econometric methods should be used to know the monetary value of the damage caused by shoreline erosion. Richardson & Scott (2004) performed an econometric analysis of coastal erosion in Louisiana

(US) for the oil and gas, navigation and transportation, commercial fishing, and recreational activities sectors but did not spatialize their findings. Future research should conduct econometric analysis and spatialize their findings to offer the government and stakeholders a synoptic view of the economic losses due to coastal erosion.

4.5 Conclusion

On the stretch of beaches between Fortaleza and Paraipaba, from 1984 to 2020, the very low class predominated, followed by low class, which together summed 90.6 km (77.8%), in the preliminary analysis of the potential economic damage due to shoreline erosion. This predominance occurs due to the prevalence of the medium erosion sensitivity class, which indicates shoreline stability, in conjunction with extensive stretches with very low, low, and medium urban density. It is noteworthy that urban density and shoreline erosion may increase in the future, directly implying the potential economic damage.

The methodology presented here can be an important tool for coastal management, as it allows the identification of coastal stretches with a potential for greater economic damage due to coastal erosion. It also makes it possible to compare different coastal regions through the values of erosion sensitivity, urban density, and potential economic damage due to shoreline erosion. Thus, the information provided by it contributes both to public planning and management (coastal spatial planning, for example) and to stakeholders (choice of a location for industry implementation, for example).

The improvements we have made in determining erosion sensitivity and classifying the urban density have increased the robustness of the methodology that establishes the potential economic damage due to coastal erosion. We improved in determining erosion sensitivity through DSAS that provided a solid statistical basis for classifying the stretches of shoreline and understanding their long-term dynamics. Regarding the urban density, we proposed density classes with their respective classification keys to encompass the complexity of land cover and land use in the coastal zone. In addition, we suggest improving it by including econometric methods and spatializing its results, allowing for the creation of monetary forecast scenarios of losses due to coastal erosion using mathematical and statistical models.

Acknowledgements

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – Finance Code 001.

References

- ABU ZED, A. A., SOLIMAN, M. R., YASSIN, A. A. (2018). Evaluation of using satellite image in detecting long term shoreline change along El-Arish coastal zone, Egypt. *Alexandria Engineering Journal* 57, 2687-2702. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.10.005>
- ALBUQUERQUE, M. G., CALLIARI, L. J., CORREA, I. C. S., & PINHEIRO, L. S. (2009). Morfodinâmica da praia do futuro, Fortaleza-CE: uma síntese de dois anos de estudo. *Quaternary and Environmental Geosciences* 1, 49-57. <http://dx.doi.org/10.5380/abequa.v1i2.14092>
- ALEXANDRAKIS, G., MANASAKIS, C., & KAMPANIS, N. A. (2015). Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective. *Ocean & Coastal Management* 111, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.04.001>
- AMARO, V. E., GOMES, L. R. S., LIMA, F. G. F., SCUDELARI, A. C., NEVES, C. F., BUSMAN, D. V., & SANTOS, A. L. S. (2015). Multitemporal analysis of coastal erosion based on multisource satellite images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil. *Marine Geodesy* 38, 1-25. <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2014.904257>
- ATKINSON, J., ESTEVES, L. S., WILLIAMS, J. W., MCCANN, D. L., & BELL, P. S. (2018). The application of X-Band Radar for characterization of nearshore dynamics on a mixed sand and gravel beach. *Journal of Coastal Research* 85, 281-285. <https://doi.org/10.2112/SI85-057.1>
- BARROS, E. L., PAULA, D. P., GUERRA, R. G. P., & SANTOS, J. O. (2021). Erosion and coastal structures in Brazilian Metropolises: the case of Fortaleza and its inequalities. In: Singh, R. B., Chatterjee, S., Misha, M., & Lucena, A. J. *Practices in Regional Science and Sustainable Regional Development*. Singapore: Springer. 127-150. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2221-2_6
- BAYLE, P. M., BLENKINSOPP, C. E., CONLEY, D., MASSELINK, G., BEUZEN, T., & ALMAR, R. (2020). Performance of a dynamic cobble berm revetment for coastal protection, under increasing water level. *Coastal Engineering* 159, 103712. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103712>
- BEZERRA, M. O., PINHEIRO, L., & MORAIS, J. O. (2007). Shoreline change of the Mucuripe harbor zones (Fortaleza-Ceará, Northeast of Brazil) 1972-2003. *Journal of Coastal Research* 50, 1163-1167.
- BEUZEN, T., TURNER, I. L., BLENKINSOPP, C. E., ATKINSON, A., FLOCARD, F., & BALDOCK, T. E. (2018). Physical model study of beach profile evolution by sea level rise in the presence of seawalls. *Coastal Engineering* 136, 172-182. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.12.002>
- BRANNSTROM, C., GORAYEB, A. MENDES, J. S., LOUREIRO, C., MEIRELES, A. J. A., SILVA, E. V., FREITAS, A. L. R., & OLIVEIRA, R. F. (2017). Is Brazilian wind power development sustainable? Insights from a review of conflicts in Ceará state. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.047>

- CAMARA, G., SOUZA, R. C. M., FREITAS, U. M., & GARRIDO, J. (1996). SPRING: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics* 20 (3), 395-403. [https://doi.org/10.1016/0097-8493\(96\)00008-8](https://doi.org/10.1016/0097-8493(96)00008-8)
- CARVALHO, A. M., DOMINGUEZ, J. M. L., & MAIA, L. P. (2004). Interação entre deriva litorânea e potencial de formação de dunas na morfogênese costeira do NW do Ceará. *Mercator* 3, 79-94.
- CARVALHO, A. M., MAIA, L. P., & DOMINGUEZ, J. M. L. (2007). A deriva e o transporte litorâneo de sedimentos no trecho entre Cumbuco e Matões – costa noroeste do Estado do Ceará. *Arquivos de Ciências do Mar* 40, 43-51. <https://doi.org/10.32360/acmar.v40i1.6142>
- CARVALHO, A. M., & CLAUDINO-SALES, V. (2016). Contribuição do transporte eólico no processo de evolução da linha de costa. *Mercator* 15, 105-115.
- CEARÁ. (2022). *Relatório consolidado do Zoneamento Ecológico-Econômico da zona costeira do Ceará – ZEEC*. Fortaleza: SEMA.
- CELLONE, F., CAROL, E., & TOSI, L. (2016). Coastal erosion and loss of wetlands in the middle Río de la Plata estuary (Argentina). *Applied Geography* 76, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.09.014>
- CIRITCI, D., & TÜRK, T. (2020). Analysis of coastal changes using remote sensing and geographical information systems in the Gulf of Izmit, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment* 192, 341. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08255-9>
- CLAUDINO-SALES, V., & CARVALHO, A. M. (2014). Dinâmica costeira controlada por promontórios no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. *Geociências* 33, 579-595.
- CLAUDINO-SALES, V., WANG, P., & CARVALHO, A. M. (2018). Interactions between various headlands, beaches, and dunes along the Coast of Ceará State, Northeast Brazil. *Journal of Coastal Research* 34, 413-428. <http://dx.doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00173.1>
- CORRAL, L. R., & SCHLING, M. (2017). The impact of shoreline stabilization on economic growth in small island developing states. *Journal of Environmental Economics and Management* 86, 210-228. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.06.001>
- COSTA, C. E. B. (2019). *Análise descritiva do padrão de ondas no litoral do Ceará através de dados observados*. Fortaleza: UFC.
- DAI, C., HOWAT, I. M., LAROUB, E., & HUSBY, E. (2019). Coastline extraction from repeat high resolution satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 229, 260-270. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.010>
- DUARTE, C. R., MIRANDA, F. P., LANDAU, L., SOUTO, M. V. S., SABADIA, J. A. B., SILVA NETO, C. A., RODRIGUES, L. I. C., & DAMASCENO, A. M. (2018). Short-time analysis of shoreline based on RapidEye satellite images in the terminal area of Pecém Port, Ceará, Brazil. *International Journal of Remote Sensing* 39, 4376-4389. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1457229>

ESRI – Environmental Systems Research Institute. (2017). Software ArcGis Desktop, version 10.5.

FARIAS, E. G. G., & MAIA, L. P. (2010). Uso de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do Estado do Ceará, Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada* 10, 521-544. <http://dx.doi.org/10.5894/rgci224>

FITTON, J. M., HANSOM, J. D., & RENNIE, A. F. (2016). A national coastal erosion susceptibility model for Scotland. *Ocean & Coastal Management* 132, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.08.018>

FORGIARINI, A. P. P., FIGUEIREDO, S. A., CALLIARI, L. J., GOULART, E. S., MARQUES, W., TROMBETTA, T. B., OLEININK, P. H., GUIMARÃES, R. C., ARIGONY-NETO, J. & SALAME, C. C. (2019). Quantifying the geomorphologic and urbanization influence on coastal retreat under sea level rise. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 230, 106437. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106437>

GARCIA-LOZANO, C., PINTÓ, J., & DAUNIS-I-ESTADELLA. (2018). Changes in coastal dune systems on the Catalan shoreline (Spain, NW Mediterranean Sea). Comparing dune landscapes between 1890 and 1960 with their current status. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 208, 235-247. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.05.004>

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. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102093>

GOOGLE (2020). Google Earth 7.3

GRIFFITHS, D., HOUSE, C., RANGEL-BUITRAGO, N., & THOMAS, T. (2019). An assessment of areal and transect-based historic shoreline changes in the context of coastal planning. *Journal of Coastal Conservation* 23, 315-330. <https://doi.org/10.1007/s11852-018-0661-6>

GRIGIO, A. M., AMARO, V. E., VITAL, H., & DIODATO, M. A. (2005). A method for coastline evolution analysis using GIS and Remote Sensing: a case study from the Guamaré City, Northeast Brazil. *Journal of Coastal Research* 42, 412-421.

HIMMELSTOSS, E. A., HENDERSON, R. E., KRATZMANN, M. G., & FARRIS, A. S., (2018) *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide*: U.S. Geological Survey Open-File Report, 110 p. <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>

JAYSON-QUASHING, P. N., ADDO, K. A., AMISIGO, B., & WIAFE, G. (2019). Assessment of short-term beach sediment change in the Volta Delta coast in Ghana using data from Unmanned aerial Vehicles (Drone). *Ocean & Coastal Management* 182, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104952>

KELLY, J. T., & GONTZ, A. M. (2020). Rapid assessment of shoreline changes induced by Tropical Cyclone Oma using CubeSat imagery in southeast Queensland, Australia. *Journal of*

Coastal Research 36, 72-87. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-19-00055.1>

KOSZTRA, B., & BÜTTER, G. (2019). *Update CLC illustrated nomenclature guidelines*. Wien: European Environment Agency.

KRISTENSEN, S. E., DRØNEN, N., DEIGAARD, R., & FREDSOE, J. (2016). Impact of groyne fields on the littoral drift: a hybrid morphological modelling study. *Coastal Engineering* 111, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.009>

KULP, S. A., & STRAUSS, B. H., (2019). New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nature Communications* 10, 4844. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12808-z>

LEATHERMAN, S. P. (2018). Coastal erosion and the United States National Flood Insurance Program. *Ocean & Coastal Management* 156, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.04.004>

LIMA, J. C., LIMA, R. J. R., BARROS, E. L., & PAULA, D. P. (2019). Análise multitemporal da variabilidade da linha de costa do litoral do município de Caucaia, Ceará, Brasil. *Revista Casa da Geografia de Sobral* 21, 864-884.

LUO, S., LIU, Y., JIN, R., ZHANG, J., & WEI, W. (2016). A guide to coastal management: benefits and lessons learned of beach nourishment practices in China over the past two decades. *Ocean & Coastal Management* 134, 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.10.011>

MAGALHÃES, D. C., & MEIRELES, A. J. A. (2016). Dinâmica geoambiental associada à ponta litorânea em Paracuru – Ceará – Brasil. *Revista da Casa da Geografia de Sobral* 18, 145-162.

MAIA, L. P., JIMENEZ, J. A., SERRA, J., & MORAIS, J. O. (1998). The coastline of Fortaleza city. A product of environmental impacts caused by the mucuripe harbor. *Arquivos de Ciências do Mar* 31, 93-100. <https://doi.org/10.32360/acmar.v31i1-2.31378>

MARINHA DO BRASIL. (2021). Banco Nacional de Dados Oceanográficos.

MARINO, M. T. R. D., & FREIRE, G. S. S. (2013). Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, região metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará, Brasil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management* 13, 113-129. <http://dx.doi.org/10.5894/rgci373>

MARTINS, K. A., & PEREIRA, P. S. (2014). Coastal erosion at Pau Amarelo Beach, Northeast of Brazil. *Journal of Coastal Research* 71, 17-23. <https://doi.org/10.2112/SI71-002.1>

MASSON-DELMONTTE, V., ZHAI, A., PIRANI, S. L., CONNORS, C., PÉAN, S., BERGER, N., CAUD, Y., CHEN, L., GOLDFARB, M. I., GOMIS, M., HUANG, K., LEITZELL, E., LONNOY, J. B. R., MATTHEWS, T. K., MAYCOCK, T., WATERFIELD, O., YELEKÇI, R., YU., ZHOU, B. (2021) IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In press.

MCFEETERS, S. K., (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17, 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

MORAIS, J. O., PINHEIRO, L. S., PESSOA, P. R. S., FREIRE, G. S. S., CARVALHO, A. M., GUERRA, R. G. P., & BARROS, E. L. (2018). Ceará. In D. Muehe (Ed.), *Panorama da erosão costeira no Brasil* (pp. 261-287). Rio de Janeiro: Editora do MMA.

MUSKANANFOLA, M. R., SUPRIHARYONO., FEBRIANTO, F. (2020). Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. *Regional Studies in Marine Science* 34, 101060. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101060>

NASCIMENTO, L., BITTENCOURT, A. C. S. P., SANTOS, A. N., & DOMINGUEZ, J. M. L., (2013). Potencial de prejuízos econômicos em função da densidade de urbanização e da sensibilidade à erosão costeira na Costa do Cacau – Bahia. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 14, 261-270. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v14i4.175>

NGUYEN, Q. H., & TAKEWAKA, S. (2020). Land subsidence and its effects on coastal erosion in the Nam Dinh Coast (Vietnam). *Continental Shelf Research* 207, 104227. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104227>

PAGÁN, J. I., LÓPEZ, I., ARAGONÉS, L., & GARCIA-BARBA, J. (2017). The effects of the anthropic actions on the Sandy beaches of Guardamar del Segura, Spain. *Science of the Total Environment* 601-602, 1364-1377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.272>

PAULA, D. P., DIAS, J. M. A., FERREIRA, Ó. & MORAIS, J. O. (2013). High-rise development of the sea-front at Fortaleza (Brazil): perspectives on its valuation and consequences. *Ocean & Coastal Management* 77, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.03.004>

PAULA, D. P. (2015). Erosão costeira e estruturas de proteção no litoral da região metropolitana de Fortaleza (Ceará, Brasil): um contributo para artificialização do litoral. *REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA* 9, 73-86.

PENDER, D., CALLAGHAN, D. P., & KARUNARATHNA, H. (2015). An evaluation of methods available for quantifying extreme beach erosion. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy* 1, 31-43. <https://doi.org/10.1007/s40722-014-0003-1>

PEREIRA, A. Q. (2020). *Coastal resorts and urbanization in Northeast Brazil*. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46593-3>

PINHEIRO, L. S., MORAIS, J. O., & MAIA, L. P. (2016). The Beaches of Ceará. In: Short, A. D. & Klein, A. H. F. *Brazilian Beach Systems*. Springer, pp. 175-199. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9_7

PRANZINI, E. (2018). Shore protection in Italy: from hard to soft engineering ... and back.

Ocean & Coastal Management 156, 43-57.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.04.018>

QUINTELA-FALCÃO, T. O., MORAIS, J. O., & PINHEIRO, L. S., (2011) Morphodynamics of the Curu Estuary inlet – Brazil. *Journal of Coastal Research* 64, 805-808.

RICHARDSON, J. A., & SCOTT, L. C. (2004). *The economic impact of coastal erosion in Louisiana on State, Regional, and National Economies*. Baton Rouge: Department of Natural Resources State of Louisiana.

SAENGSUPAVANICH, C. (2019). Willingness to restore jetty-created erosion at a famous tourism beach. *Ocean & Coastal Management* 178, 104817.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104817>

SANTOS, N. A., BITTENCOURT, A. C. S. P., NASCIMENTO, L., & DOMINGUEZ, J. M. L., (2007). A ocupação urbana na orla da Costa das Baleias, Estado da Bahia. Susceptibilidade a danos econômicos em função da dinâmica costeira. *Geociências* 26, 173-180.

SILVA, I. R., BITTENCOURT, A. C. S. P., DOMINGUEZ, J. M. L., & MELLO E SILVA, S. B., (2007). Potencial de danos econômicos face à erosão costeira relativo às praias da Costa do Descobrimento – litoral sul do Estado da Bahia. *Pesquisas em Geociências* 34, 35-44.
<https://doi.org/10.22456/1807-9806.19461>

SILVA, R., MARTÍNEZ, M. L., HESP, P. A., CATALAN, P., OSORIO, A. F., MARTELL, R., FOSSATI, M., SILVA, G. M., MARIÑO-TAPIA, I., PEREIRA, P., CIENGUEGOS, R., KLEIN, A., & GOVAERE, G. (2014). Present and future challenges of coastal erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research* 71, 1-16. <https://doi.org/10.2112/SI71-001.1>

SILVA, M. T., LOPES, D. N., REBOUÇAS, I. S., FREIRES, V. E., SILVA NETO, C. A., DUARTE, C. R., & SOUTO, M. V. S. (2019) Variação da linha de costa no litoral cearense (1984-2018). *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 2551-2579.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.7.p2551-2579>

SILVA, M. T., LOPES, D. N., GRIGIO, A. M., PARANHOS FILHO, A. C., & DIODATO, M. A. (2020). Proposal for improvement of methodology to determine the potential of economic losses due to coastal erosion. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 1132-1144.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p1132-1144>

STRAUSS, B. H., KULP, S. A., RASMUSSEN, D. J., & LEVERMANN, A. (2021). Unprecedented threats to cities from multi-century sea level rise. *Environmental Research Letters*, In press. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2e6b>

TAKAMURA, M., UDO, K., SATO, M., & TAKAHASHI, K. (2016). Analysis of coastal erosion due to the 2011 Great East Japan Tsunami and its recovery using Ground Penetrating Radar data. *Journal of Coastal Research* 75, 477-481. <https://doi.org/10.2112/SI75-096.1>

USGS - United State Geological Survey. (2021). Earth Explorer.

VENANCIO, K. K., GARCIA, P. D., GIRELI, T. Z., & CORRÊA, T. B. (2020). Hydrodynamic modeling with scenario approach in the evaluation of dredging impact on

coastal erosion in Santos (Brazil). *Ocean & Coastal Management* 195, 105227.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105227>

VICINANZA, D., GUIDA, A., FERRANTE, V., & CIAVOLA, P. (2010). Performance of a beach dewatering system – Chiaiolella Beach, Procida Island, Italy. *Journal of Coastal Research* 26, 753-761. <https://doi.org/10.2112/08-1165.1>

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

YUE, H., & LIU, Y. (2019). Variations in the lake area, water level, and water volume of Hongjiannao Lake during 1986-2018 based on Landsat and ASTER GDEM data. *Environmental Monitoring and Assessment* 191, 606. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7715-6>

ZAHRA, K. A. (2018). Assessment of implementation stages of submerged breakwater on the bay and shoreline at Al-Ahlam Sea Resort, Northwest Coast, Egypt. *Ocean & Coastal Management* 165, 15-32. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.08.009>

5 CONCLUSÕES

Os resultados da variação da linha de costa de todo o Estado do Ceará, obtidos mediante o método de mudança de polígonos, indicaram uma alternância entre os processos que predominaram, a saber: 1984-1991 (acrecção); 1991-2000 (erosão); 2000-2008 (acrecção); 2008-2018 (erosão). Todavia, no cálculo de todos os períodos ocorreu um equilíbrio entre as áreas que progradaram e retrogradaram sendo, respectivamente, 57,68 km² e 57,62 km². Apesar dessa estabilidade existem *hotspots* erosivos ao longo do litoral cearense, são exemplos, no litoral leste, na foz do rio Jaguaribe e do rio Piranji; no litoral metropolitano, nas praias de Iparana, Pacheco e Icaraí; no litoral oeste, na foz dos rios Curú e Mundaú; no litoral extremo oeste, na foz do rio Aracatiaçu, nas praias de Almofala, do Porto e Ilha do Guajiru.

O litoral extremo oeste foi o que teve o comportamento erosivo mais significativo. Apesar disso, foi escolhido o trecho de praia de Fortaleza até Paraipaba como foco para analisar o comportamento da linha de costa e do potencial de prejuízos econômicos devido à erosão costeira. Essa escolha se deveu a sua importância socioeconômica materializada pela existência de inúmeras indústrias dos mais variados nichos econômicos, pela indústria do turismo, pela produção de energia eólica *onshore*, também devido à presença de comunidades tradicionais de pescadores e indígenas e a alta concentração populacional.

Essa região foi dividida em três setores: Setor 1, trecho do litoral leste de Fortaleza; Setor 2, trecho do litoral oeste de Fortaleza e todas as praias de Caucaia; e, Setor 3, trecho que compreende todas as praias de São Gonçalo do Amarante, Paracuru e Paraipaba. A análise da variação da linha de costa foi executada com o DSAS. Para o Setor 1, as classes estabilidade e acreção predominaram em dois períodos cada uma, respectivamente, 1984-1991 e 2000-2008, e, 1991-2000 e 2014-2020. Já nos Setores 2 e 3, a classe predominante foi a erosão para ambos e ocorreu nos mesmos períodos, isto é, em 1984-1991, 2000-2008 e 2008-2014. Os trechos que tiveram uma dinâmica mais significativa foram: a) retrogradação na praia de Icaraí (Caucaia) e na foz do rio Curú (Paracuru); e, b) acreção no Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante).

Ainda para o trecho de praia entre Fortaleza e Paraipaba foi constatada a predominância da média sensibilidade de erosão com 79,1% que é equivalente a 92,1 km de extensão. Apesar dessa prevalência ocorreram recuos significativos em trechos de praias localizados em Caucaia e Paracuru. Concernente a urbanização, houve o predomínio da média densidade de urbanização com 39,7% (46,2 km). Já o resultado do potencial de danos econômicos devido à erosão costeira apontou a predominância de um potencial muito baixo com 41,8% (48,7 km). Esse resultado se deveu a ocorrência de extensos trechos com uma

densidade urbana muito baixa ou baixa associada com uma sensibilidade de erosão média que indica estabilidade da linha de costa.

A presente pesquisa realizou melhorias na metodologia que determina o potencial de danos econômicos devido à erosão costeira tanto no estabelecimento da sensibilidade de erosão como na definição da densidade de urbanização. Para a sensibilidade de erosão foi proposto o uso de resultados estatísticos, por meio do DSAS, que permitem compreender as tendências dos processos de acreção e erosão em longo prazo. Já em relação à densidade de urbanização, foram concebidas chaves de classificação que englobam a complexidade da cobertura e uso da terra na zona costeira.

Todavia, como recomendação para trabalhos futuros, a metodologia ainda carece de melhorias que podem ser materializadas com a inserção de métodos econométricos para quantificar os prejuízos e a posterior espacialização desses resultados. Ainda, o monitoramento contínuo da linha de costa se faz necessário por meio de diferentes tecnologias e metodologias para melhor compreender a dinâmica desse ambiente.

REFERÊNCIAS

- ABU ZED, A. A.; SOLIMAN, M. R.; YASSIN, A. A. Evaluation of using satellite image in detecting long term shoreline change along El-Arish coastal zone, Egypt. **Alexandria Engineering Journal**, Alexandria, v. 57, p. 2687-2702, 2018. DOI: 10.1016/j.aej.2017.10.005.
- AGUIAR, P.F.; EL-ROBRINI, M.; FREIRE, G.S.S.; CARVALHO, R.G., Análise multitemporal da Praia de Torrões (Itarema, Ceará, Brasil) em médio período (1958-2004) utilizando imagens Quickbird e fotografias aéreas. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 2, p. 1279-1290, 2012.
- ALBUQUERQUE, M.G., CALLIARI, L.J., CORREA, I.C.S., PINHEIRO, L.S., Morfodinâmica da praia do futuro, Fortaleza-CE: uma síntese de dois anos de estudo. **Quaternary and Environmental Geosciences**, Curitiba, v. 1, p. 49-57, 2009.
- ALEXANDRAKIS, G.; POULOS, S. E. An holistic approach to beach erosion vulnerability assessment. **Scientific Reports**, London, v. 4, p. 6078, 2014.
- ALEXANDRAKIS, G.; MANASAKIS, C.; KAMPANIS, N. A. Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 111, p. 1–11, 2015.
- AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T.; SOUTO, M. V. S. **Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento remoto e Geodésia de precisão**. Natal: Do autor, 2012. 120p.
- AMARO, V. E.; GOMES, L.R.S.; LIMA, F. G. F.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; BUSMAN, D. V.; SANTOS, A. L. S. Multitemporal analysis of coastal erosion based on multisource satellite images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil. **Marine Geodesy**, [s. l.], v. 38, p. 1-25, 2015.
- ATKINSON, J.; ESTEVES, L.S.; WILLIAMS, J. W.; MCCANN, D. L.; BELL, P. S. The application of X-Band Radar for characterization of nearshore dynamics on a mixed sand and gravel beach. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 85, 281-285, 2018.
- BARROS, E.L.; GUERRA, R.G.P.; PINHEIRO.; MORAIS, J.O. 2018. Erosão costeira no litoral leste do Ceará: tendência natural e reflexos dos impactos antropogênicos. In: **XII Simpósio Nacional de Geomorfologia- SINAGEO**, 2018, Crato. Paisagem e Geodiversidade: A Valorização do patrimônio Geomorfológico Brasileiro. Crato: UGB, 1-10.
- BARROS, E. L.; PAULA, D. P.; GUERRA, R. G. P.; SANTOS, J. O. Erosion and coastal structures in Brazilian Metropolises: the case of Fortaleza and its inequalities. In: SINGH, R. B.; CHATTERJEE, S.; MISHA, M.; LUCENA, A. J. **Practices in Regional Science and Sustainable Regional Development**. Singapore: Springer, 2021. p.127-150.
- BAYLE, P. M.; BLENKINSOPP, C. E.; CONLEY, D.; MASSELINK, G.; BEUZEN, T.; ALMAR, R. Performance of a dynamic cobble berm revetment for coastal protection, under increasing water level. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 159, p. 103712, 2020.

BEZERRA, M. O.; PINHEIRO, L.; Morais, J. O. Shoreline change of the Mucuripe harbor zones (Fortaleza-Ceará, Northeast of Brazil) 1972-2003. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 50, p. 1163-1167, 2007.

BEUZEN, T.; TURNER, I. L.; BLENKINSOPP, C. E.; ATKINSON, A.; FLOCARD, F.; BALDOCK, T. E. Physical model study of beach profile evolution by sea level rise in the presence of seawalls. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 136, p. 172-182. 2018.

BOAK, E. H.; TURNER, I. L. Shoreline definition and detection: review. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 21, p. 688–703, 2005.

BRANNSTROM, C.; GORAYEB.; A. MENDES, J. S.; LOUREIRO, C.; MEIRELES, A. J. A.; SILVA, E. V.; FREITAS, A. L. R.; OLIVEIRA, R. F. Is Brazilian wind power development sustainable? Insights from a review of conflicts in Ceará state. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 67, p. 62-71, 2017.

BROMMER, M. B.; BOCHEV-VAN DER BURGH. Sustainable coastal zone management: a concept for forecasting long-term and large-scale coastal evolution. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 25, p. 181-188, 2009.

CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, [s. l.], v. 20, p. 395-403, 1996.

CAMFIELD, F. E.; MORANG, A. Defining and interpreting shoreline change. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 32, p. 129-151, 1996.

CARVALHO, A.M.; DOMINGUEZ, J.M.L.; MAIA, L.P. Interação entre deriva litorânea e potencial de formação de dunas na morfogênese costeira do NW do Ceará. **Mercator (UFC)**, Fortaleza, v. 3, p. 79-94, 2004.

CARVALHO, A.M.; MAIA, L.P.; DOMINGUEZ, J.M.L. A deriva e o transporte litorâneo de sedimentos no trecho entre Cumbuco e Matões – costa noroeste do Estado do Ceará. **Arquivos de Ciências do Mar**, Fortaleza, v. 40, p. 43-51, 2007.

CARVALHO, A.C.; CLAUDINO-SALES, V. Contribuição do transporte eólico no processo de evolução da linha de costa. **Mercator (UFC)**, Fortaleza, v. 15, p.105-115, 2016.

CEARÁ, 2006. Lei Estadual nº 13.796, de 30 de junho.

CEARÁ. **Relatório consolidado do Zoneamento Ecológico-Econômico da zona costeira do Ceará – ZEEC**. Fortaleza: SEMA. 2022.

CELLONE, F.; CAROL, E.; TOSI, L. Coastal erosion and loss of wetlands in the middle Río de la Plata estuary (Argentina). **Applied Geography**, Sevenoaks, v. 76, p. 37-48, 2016.

CIRITCI, D.; TÜRK, T. Analysis of coastal changes using remote sensing and geographical information systems in the Gulf of Izmit, Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 192, p. 341, 2020.

CLAUDINO-SALES, V.; CARVALHO, A.M. Dinâmica costeira controlada por promontórios no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. **Geociências** (São Paulo. Online), v. 33, p. 579-595, 2014.

CLAUDINO-SALES, V.; WANG, P.; CARVALHO, A. M. Interactions between various headlands, beaches, and dunes along the Coast of Ceará State, Northeast Brazil. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 34, 413-428, 2018.

CORRAL, L.R.; SCHLING, M. The impact of shoreline stabilization on economic growth in small island developing states. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 86, p. 210-228, 2017.

COSTA, C. E. B. **Análise descritiva do padrão de ondas no litoral do Ceará através de dados observados**. Monografia (Graduação em Oceanografia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2019. 78f.

DAI, C.; HOWAT, I. M.; LAROURE, E.; HUSBY, E. Coastline extraction from repeat high resolution satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 229, p. 260-270, 2019.

DOLAN R.; HAYDEN B.; HEYWOOD, J. A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 2, p. 21–39, 1978.

DOLAN, R.; FENSTER, M. S.; HOLME, S. J. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 7, p. 723-744, 1991.

DOUGLAS, B. C.; CROWELL, M. Long-term shoreline position prediction and error propagation. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 16, p. 145-162, 2000.

DUARTE, C.R.; MIRANDA, F.P.; LANDAU, L.; SOUTO, M.V.S. SABADIA, J. A. B., SILVA NETO, C.A.; RODRIGUES, L.I.C.; DAMASCENO, A.M. Short-time analysis of shoreline based on RapidEye satellite images in the terminal area of Pecém Port, Ceará, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, 4376-4389, 2018.

ESRI. **Environmental Systems Research Institute**. Software ArcGis Desktop, license type Arcinfo, version 10.2, 2014.

FAIRBRIDGE, R.W. Classification of coasts. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 20, p. 155-165, 2004.

FARIAS, E.G.G.; MAIA, L.P. Uso de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do Estado do Ceará, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, Lisboa, v. 10, p. 521-544, 2010.

FARRAPEIRA NETO, C.A.; MORAIS, J.O. Evolução da linha de costa do município de Camocim, Ceará, Brasil. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, Sobral, v. 16, p. 101-114, 2014.

FITTON, J. M.; HANSOM, J.D.; RENNIE, A.F. A national coastal erosion susceptibility

model for Scotland. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 132, 80-89, 2016.

FORGIARINI, A.P.P.; FIGUEIREDO, S.A.; CALLIARI, L. J.; GOULART, E.S.; MARQUES, W.; TROMBETTA, T.B.; OLEININK, P.H.; GUIMARÃES, R.C.; ARIGONY-NETO, J.; SALAME, C.C. Quantifying the geomorphologic and urbanization influence on coastal retreat under sea level rise. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 230, 106437, 2019.

GARCIA-LOZANO, C.; PINTÓ, J.; DAUNIS-I-ESTADELLA. Changes in coastal dune systems on the Catalan shoreline (Spain, NW Mediterranean Sea). Comparing dune landscapes between 1890 and 1960 with their current status. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 208, p. 235-247, 2018.

GONÇALVES, R.M.; SALEEM, A.; QUEIROZ, H.A.A.; AWANGE, J.L. A fuzzy model integrating shoreline changes, NDVI and settlement influences for coastal zone human impact classification. **Applied Geography**, Sevenoaks, v. 113, p. 102093, 2019.

GOOGLE. Google Earth 7.3, 2020.

GRIFFITHS, D.; HOUSE, C.; RANGEL-BUITRAGO, N.; THOMAS, T. An assessment of areal and transect-based historic shoreline changes in the context of coastal planning. **Journal of Coastal Conservation**, [s. l.], v. 23, p. 315-330, 2019.

GRIGIO, A. M.; AMARO, V. E.; VITAL, H.; DIODATO, M. A. A method for coastline evolution analysis using GIS and Remote Sensing: a case study from the Guamaré City, Northeast Brazil. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 42, p. 412-421, 2005.

HIMMELSTOSS, E. A.; HENDERSON, R. E.; KRATZMANN, M. G.; FARRIS, A. S. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide**. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2018.110p.

JACKSON, C. W.; ALEXANDER, C. R.; BUSH, D. M. Application of the AMBUR R package for spatio-temporal analysis of shoreline change: Jekyll Island, Georgia, USA. **Computers & Geosciences**, [s. l.], v. 41, p. 199-207, 2012.

JAYSON-QUASHING, P.N.; ADDO, K.A.; AMISIGO, B.; WIAFE, G. Assessment of short-term beach sediment change in the Volta Delta coast in Ghana using data from Unmanned aerial Vehicles (Drone). **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 182, p. 1-14, 2019.

KELLY, J.T.; GONTZ, A.M. Rapid assessment of shoreline changes induced by Tropical Cyclone Oma using CubeSat imagery in southeast Queensland, Australia. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 36, p. 72-87, 2020.

KOSZTRA, B.; BÜTTER, G. **Update CLC illustrated nomenclature guidelines**. Wien: European Environment Agency, 2019. 126p.

KRISTENSEN, S.E.; DRØNEN, N.; DEIGAARD, R.; FREDSOE, J. Impact of groyne fields on the littoral drift: a hybrid morphological modelling study. **Coastal Engineering**, v. 111, p. 13-22, 2016.

KULP, S.A.; STRAUSS, B.H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. **Nature Communications**, v. 10, p. 4844, 2019.

LEATHERMAN, S.P. Coastal erosion and the United States National Flood Insurance Program. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 156, p. 35-42, 2018.

LIMA, J.C. LIMA, R.J.R.; BARROS, E.L.; PAULA, D. P. Análise multitemporal da variabilidade da linha de costa do litoral do município de Caucaia, Ceará, Brasil. **Revista Casa da Geografia de Sobral**, Sobral, v. 21, p. 864-884, 2019.

LUO, S.; LIU, Y.; JIN, R.; ZHANG, J.; WEI, W. A guide to coastal management: benefits and lessons learned of beach nourishment practices in China over the past two decades. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 134, p. 207-215, 2016.

MAGALHÃES, D.C.; MEIRELES, A.J.A. Dinâmica geoambiental associada à ponta litorânea em Paracuru – Ceará – Brasil. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, Sobral, v. 18, p. 145-162, 2016.

MAIA, L.P.; JIMENEZ, J.A.; SERRA, J.; MORAIS, J.O. The coastline of Fortaleza city. A product of environmental impacts caused by the mucuripe harbor. **Arquivos de Ciências do Mar**, Fortaleza, v. 31, p. 93-100, 1998.

MANN, T.; WESTPHAL, H. Assessing long-term changes in the beach width of reef islands based on temporally fragmented remote sensing data. **Remote Sensing**, Basel, v. 6, p. 6961-6987, 2014.

MARINO, M.T.R.D., FREIRE, G.S.S. Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, região metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará, Brasil. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, Lisboa, v. 13, p. 113-129, 2013.

MARINO, M. T. R. D.; FERNANDES, D.; MORAES, S. G.; TAJRA, A. A. Vulnerabilidade física de parte do litoral leste do Ceará à erosão. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 38, p. 253-281, 2016. DOI: 10.5380/dma.v38i0.46765.

MARINHA DO BRASIL. Banco Nacional de Dados Oceanográficos. 2021.

MARTINS, K. A.; PEREIRA, P.S. Coastal erosion at Pau Amarelo Beach, Northeast of Brazil. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 71, p. 17-23, 2014.

MASSON-DELMONTTE, V.; ZHAI, A.; PIRANI, S. L.; CONNORS, C.; PÉAN, S.; BERGER, N.; CAUD, Y.; CHEN, L.; GOLDFARB, M. I.; GOMIS, M.; HUANG, K.; LEITZELL, E.; LONNOY, J. B. R.; MATTHEWS, T. K.; MAYCOCK, T.; WATERFIELD, O.; YELEKÇI, R.; YU.; ZHOU, B. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press. 2021. In press.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 17, p. 1425–1432, 1996.

MEIRELES, A.J.A., SILVA, E.V., THIERS, P.R.L. Os campos de dunas móveis: fundamentos dinâmicos para um modelo integrado de planejamento e gestão da zona costeira. **GEOUSP**, São Paulo, v. 10, 101-119, 2006.

MENDES, J.S. **Dinâmica das paisagens da APA do estuário do Rio Mundaú: evolução espaço-temporal e potencialidades ambientais**. 2012. 167 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2012.

MORAIS, J.O.; PINHEIRO, L.; CAVALCANTE, A.A.; PAULA, D.P.; SILVA, R.L. Erosão costeira em praias adjacentes às desembocaduras fluviais: o caso de Pontal de Maceió, Ceará, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, Lisboa, v. 8, p. 61-76, 2008.

MORAIS, J.O.; PINHEIRO, L.S.; PESSOA, P.R.S.; FREIRE, G.S.S.; CARVALHO, A. M.; GUERRA, R.G.P.; BARROS, E.L. 2018. CEARÁ, In: MUEHE, D. (Org.), **Panorama da erosão costeira no Brasil**, Editora do MMA, Rio de Janeiro, pp. 261-287, 2018.

MORAES, M.V.A.R.; FREIRE, G.S.S.; MANSO, V.A.V.; COSTA, S.S.L.; PORTELA, J.P. Variações temporais da linha de costa do município de Acaraú – Ceará – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 8, p. 981-989, 2015.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto**. São José dos Campos, INPE. 2001. 250p.

MOREIRA, T. F.; ALBUQUERQUE, M. G.; ESPINOZA, J. M. A.; PAULA, D. P.; ALVES, D. C. L.; BARROS, E. L.; BENDÔ, A. R. R.; CONCEIÇÃO, T. F. Estudo do comportamento da linha de costa na praia do Icarai (Caucaia, Ceará), a partir dos métodos digital shoreline analysis system e do polígono de mudança. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 13, p. 3395-3411. 2020. DOI: 10.26848/rbgf.v13.07.p3395-3411

MUEHE, D. **Panorama da erosão costeira no brasileiro**. Rio de Janeiro, Editora do MMA. 2018. 759p.

NASCIMENTO, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; SANTOS, A. N.; DOMINGUEZ, J. M. L. Potencial de prejuízos econômicos em função da densidade de urbanização e da sensibilidade à erosão costeira na Costa do Cacau – Bahia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Curitiba, v. 14, p. 261-270, 2013.

NDOUR, A.; LAÏBI, R.A.; SADIO, M.; DEGBE, C.G.E.; DIAW, A.T.; OYÉDÉ, L.M.; ANTHONY, E.J.; DUSSOUILLEZ, P.; SAMBOU, H.; DIËYE, E. H. B. Management strategies for coastal erosion problems in West Africa: analysis, issues, and constraints drawn from the examples of Senegal and Benin. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 156, p. 92-106, 2018.

NGUYEN, Q.H.; TAKEWAKA, S. Land subsidence and its effects on coastal erosion in the Nam Dinh Coast (Vietnam). **Continental Shelf Research**, [s. l.], v. 207, p. 104227, 2020.

OJEDA ZÚJAR, J.; DÍAZ CUEVAS, M. P.; PRIETO CAMPOS, A.; ÁLVAREZ FRANCO, J. I. Línea de costa y sistemas de información geográfica: modelo de datos para la caracterización de indicadores en la Costa Andaluza. **Investigaciones Geográficas**,

Alicante, v. 60, p. 37–52, 2013.

PAGÁN, J.I.; LÓPEZ, I., ARAGONÉS, L.; GARCIA-BARBA, J. The effects of the anthropic actions on the Sandy beaches of Guardamar del Segura, Spain. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 601-602, p. 1364-1377, 2017.

PAULA, D.P.; DIAS, J.M.A.; FERREIRA, Ó.; MORAIS, J. O. High-rise development of the sea-front at Fortaleza (Brazil): perspectives on its valuation and consequences. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 77, p. 14-23, 2013.

PAULA, D. P. Erosão costeira e estruturas de proteção no litoral da região metropolitana de Fortaleza (Ceará, Brasil): um contributo para artificialização do litoral. **REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 9, p. 73-86, 2015.

PENDER, D.; CALLAGHAN, D.P.; KARUNARATHNA, H. An evaluation of methods available for quantifying extreme beach erosion. **Journal of Ocean Engineering and Marine Energy**, [s. l.], v. 1, p. 31-43, 2015.

PEREIRA, A. Q. **Coastal resorts and urbanization in Northeast Brazil**. Cham: Springer, 2020. 74p.

PIKELJ, K.; RUŽIĆ, I.; ILIĆ, S.; JAMES, M.R.; KORDIĆ, B. Implementing an efficient beach erosion monitoring system for coastal management in Croatia. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 156, p. 223-238, 2018.

PINHEIRO, L. S.; MORAIS, J. O.; MAIA, L. P. The Beaches of Ceará. In: Short, A. D. & Klein, A. H. F. **Brazilian Beach Systems**. Springer, pp. 175-199, 2016.

PRANZINI, E. Shore protection in Italy: from hard to soft engineering ... and back. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 156, p. 43-57, 2018.

QUINTELA-FALCÃO, T.O.; MORAIS, J.O.; PINHEIRO, L.S. Morphodynamics of the Curu Estuary Inlet - Brazil. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 64, p. 805-808, 2011.

RANGEL-BUITRAGO, N.; JONGE, V. N.; NEAL, W. How to make integrated coastal erosion management a reality. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 156, p. 290-299, 2018.

RICHARDSON, J. A.; SCOTT, L. C. **The economic impact of coastal erosion in Louisiana on State, Regional, and National Economies**. Baton Rouge: Department of Natural Resources State of Louisiana, 2004. 130p.

SAENGSUPAVANICH, C. Willingness to restore jetty-created erosion at a famous tourism beach. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 178, p. 104817, 2019.

SANTOS, N. A.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; NASCIMENTO, L.; DOMINGUEZ, J. M. L. A ocupação urbana na orla da Costa das Baleias, Estado da Bahia. Susceptibilidade a danos econômicos em função da dinâmica costeira. **Revista Geociências**, Rio Claro, v. 26, p. 173–180, 2007.

SHORT, A. D. 1993. **Beaches of the New South Wales Coast. A guide to their nature, characteristics, surf and safety.** Australian Beach Safety and Management Program. The University Printing Service, University of Sidney. 358p.

SILVA, I. R.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; DOMINGUEZ, J. M. L.; MELLO E SILVA, S. B. Potencial de danos econômicos face à erosão costeira relativo às praias da Costa do Descobrimento – litoral sul do Estado da Bahia. **Revista Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 34, p. 35–44, 2007.

SILVA, M.T.; LOPES, D. N.; REBOUÇAS, I.S.; FREIRES, V.E.; SILVA NETO, C.A.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S. Variação da linha de costa no litoral cearense (1984-2018). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 12, p. 2551-2579, 2019.

SILVA, M. T.; LOPES, D.N.; GRIGIO, A.M.; PARANHOS FILHO, A.C.; DIODATO, M.A. Proposal for improvement of methodology to determine the potential of economic losses due to coastal erosion. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 13, p. 1132-1144, 2020.

SILVA, R.; MARTÍNEZ, M. L.; HESP, P. A.; CATALAN, P.; OSORIO, A. F.; MARTELL, R.; FOSSATI, M.; SILVA, G. M.; MARIÑO-TAPIA, I.; PEREIRA, P.; CIENGUEGOS, R.; KLEIN, A.; GOVAERE, G. Present and future challenges of coastal erosion in Latin America. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 71, p.1-16, 2014.

SOUZA, C.D.; SILVA, R.M.N.; RODRIGUES, L.I.C.; MORORÓ, E.A.A.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S.; SABADIA, J.A.B. Emprego de imagens Landsat na análise temporal da linha de costa da porção Oeste do Estado do Ceará. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 29, 181-194, 2016.

STRAUSS, B. H.; KULP, S. A.; RASMUSSEN, D. J.; LEVERMANN, A. Unprecedented threats to cities from multi-century sea level rise. **Environmental Research Letters**, [s. l.], In press. 2021. DOI: 10.1088/1748-9326/ac2e6b.

TAKAMURA, M.; UDO, K.; SATO, M.; TAKAHASHI, K. Analysis of coastal erosion due to the 2011 Great East Japan Tsunami and its recovery using Ground Penetrating Radar data. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 75, p. 477-481, 2016.

THIELER, E. R.; HIMMELSTOSS, E. A.; ZICHICHI, J. L.; ERGUL, A. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 – An ArcGIS extension for calculating shoreline change.** U.S. Geological Survey. 2009.

TURNER, I. L.; HARLEY, M. D.; DRUMMOND, C. D. UAVs for coastal surveying. **Coastal Engineering**, [s. l.], v. 114, p. 9-24, 2016.

USGS. United States Geological Survey. **Landsat 8.** 2021. Disponível em: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con. Acessado em: 04 mai. 2021.

VENANCIO, K.K.; GARCIA, P.D.; GIRELI, T.Z.; CORRÊA, T.B. Hydrodynamic modeling with scenario approach in the evaluation of dredging impact on coastal erosion in Santos (Brazil). **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 195, p. 105227, 2020.

VICINANZA, D.; GUIDA, A.; FERRANTE, V.; CIAVOLA, P. Performance of a beach dewatering system – Chiaiolella Beach, Procida Island, Italy. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 26, p. 753-761, 2010.

WILLIAMS, A. T.; RANGEL-BUITRAGO, N.; PRANZINI, E.; ANFUSO, G. The management of coastal erosion. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 156, p. 4-20, 2018.

YUE, H.; LIU, Y. Variations in the lake area, water level, and water volume of Hongjiannao Lake during 1986-2018 based on Landsat and ASTER GDEM data. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 191, p. 606, 2019.

ZAHRA, K.A. Assessment of implementation stages of submerged breakwater on the bay and shoreline at Al-Ahram Sea Resort, Northwest Coast, Egypt. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 165, p. 15-32, 2018.

ZARILLO, G. A.; KELLEY, J.; LARSON, V. **A GIS based tool for extracting shoreline positions from aerial imagery (BeachTools) revised**. U.S. Army Engineering Research and Development Center, Vicksburg, MS, 14 pp. 2008.