

Artigo de Pesquisa

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

Maykon Targino da Silva ¹, Débora Nogueira Lopes ², Eduardo Viana Freires ³, Cláudio Ângelo da Silva Neto ⁴, Michael Vandesteem Silva Souto ⁵ e Cynthia Romariz Duarte ⁶

¹ Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, Brasil.

maykontargino@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9486-2714>

² Universidade Federal de Goiás, Curso de Geologia, Aparecida de Goiânia, Brasil. deboranogueira@hotmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3329-0011>

³ Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, Brasil. eduardovgeo@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7010-5260>

⁴ Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, Brasil. claudioasn@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6749-9438>

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geologia, Natal, Brasil. michael.souto@ufrn.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8532-6370>

⁶ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Fortaleza, Brasil. cynthia.duarte@ufc.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0255-4045>

Recebido: 27/06/2022; Aceito: 21/11/22; Publicado: 10/05/2023

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 notória 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 (1984-2020). 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, em três períodos (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 Icaraiá (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 a notorious socioeconomic importance that 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 (1984-2020). 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 Icarai beach (Caucaia) and the mouth of the Curu river (Paracuru), and ii) the degradation in the Pecem Port (Sao 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.

1. Introdução

A zona costeira é um ambiente altamente dinâmico e um fator que contribui para isso é o processo erosivo (FAIRBRIDGE, 2004), que pode ter causas tanto naturais quanto antrópicas (CAMFIELD; MORANG, 1996). A erosão costeira se torna um problema quando alcança áreas com edificações e, conseqüentemente, causa prejuízos econômicos com a destruição de estruturas urbanas (ALEXANDRAKIS; MANASAKIS; KAMPANIS, 2015). Esse processo erosivo vem ocorrendo em várias regiões costeiras ao longo do 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 setores costeiros estão sob processo erosivo (MORAIS et al., 2018), como os recuos da linha de costa 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 setor 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 industriais 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. Ainda no trecho do litoral supracitado, ocorre uma alta concentração populacional, onde também são encontradas comunidades de pescadores tradicionais (PAULA et al., 2013).

Estudar o comportamento da linha de costa em regiões com processos erosivos 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 às 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 de 1984 a 2018, apresentou dados sobre as Praias do Futuro e de Iracema (Fortaleza), de todo o litoral de Caucaia e da foz do rio Curu (Paracuru-Paraipaba). Já Farias e Maia (2010) realizaram uma análise empregando a metodologia DSAS, no período entre 1968 e 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 utilizam 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 a 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.

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 ESE-NNW 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 a 2020, foram: 1,53 m, no Mucuripe, 1,54 m, no Pecém, e, 1,45 m, em Paracuru (MARINHA DO BRASIL, 2021), e a corrente de deriva litorânea tem um sentido de leste a oeste (CEARÁ, 2022). Nessa região existem ondas dos tipos *Sea* e *Swell*, que incidem na costa 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 de 1,66 m, identificada no período de 2016 a 2017 (COSTA, 2019). Sobre os estados morfodinâmicos, na região 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).

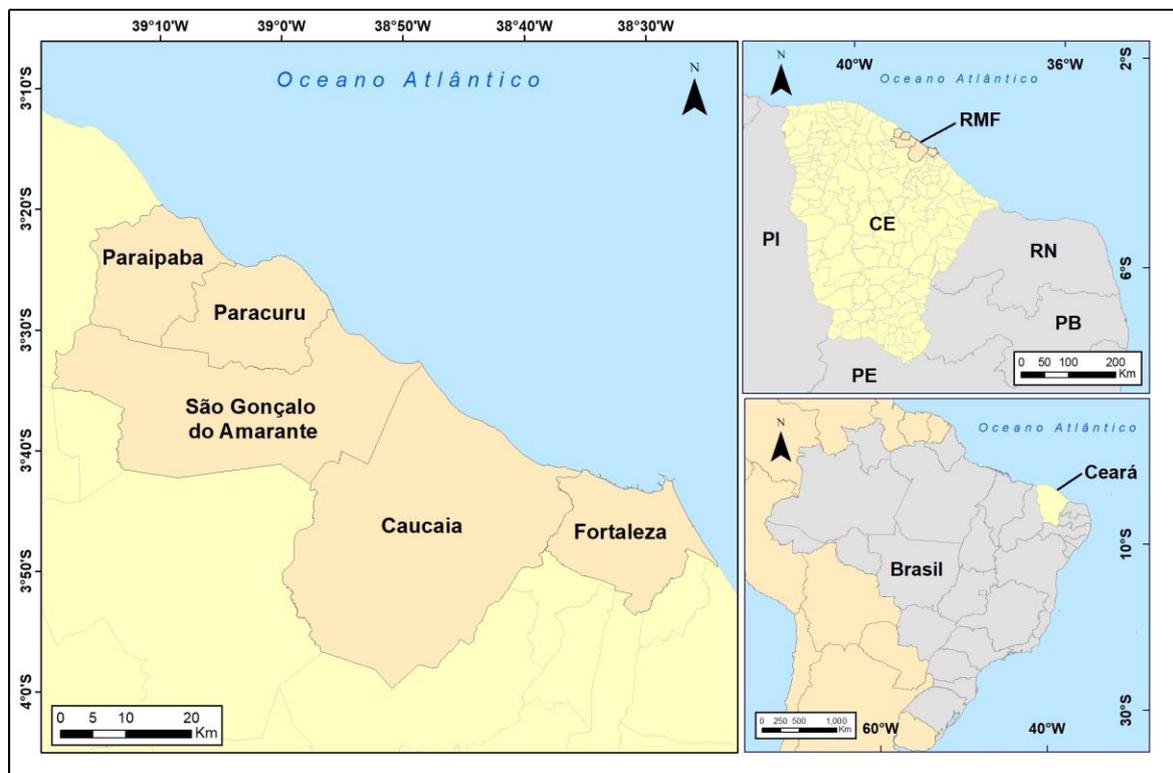


Figura 1. Localização da área de estudo. Datum: SIRGAS 2000. Fonte: elaborado pelos autores.

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 conformada uma base de dados com 18 cenas de imagens de sensores orbitais utilizadas no estudo (Figura 2). Esses dados são originários dos satélites Landsat 5 e 8, dos sensores TM e OLI, respectivamente. Na análise por períodos, foram utilizados os anos de 1984, 1991, 2000, 2008, 2014 e 2020; já para a análise por regressão linear todas as cenas constantes na Tabela 1 foram utilizadas. A escolha desses dois satélites se deveu à 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.

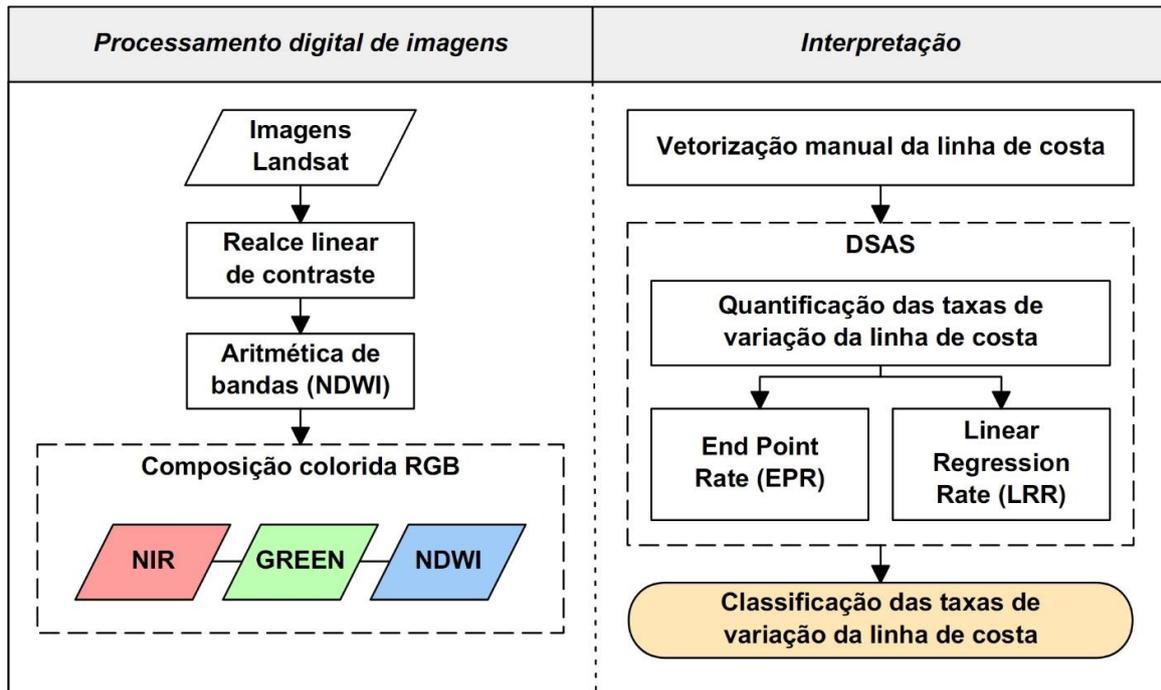


Figura 2. Fluxograma da metodologia. Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 1. Fonte de dados históricos para a extração da linha de costa. Fonte: MARINHA DO BRASIL, 2021; USGS, 2021.

Data/Hora	Maré (cm)	Satélite/Sensor	Órbita/Ponto
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

O requisito principal utilizado na seleção das cenas foi possuir a menor quantidade de nuvens possível ao longo da linha de costa, de modo que sua visualização não fosse prejudicada. Elas ficaram temporalmente entre os

meses de junho a outubro, pois refletem o período de estiagem, onde tradicionalmente a ocorrência de nuvens é menor. É importante mencionar que as cenas não seguem um intervalo fixo de anos entre elas; por exemplo, a cada três, haja vista a inexistência de imagens em alguns períodos ou a presença de nuvens sobre a linha de costa. Todas as cenas foram adquiridas no sítio eletrônico do *United States Geological Survey* (USGS).

Depois de formada a base de dados foram aplicadas técnicas de processamento digital de imagens (PDI), a saber: realce linear de contraste (ampliação histográfica) e álgebra de bandas. A álgebra de bandas foi feita mediante o *Normalized Difference Water Index* (NDWI). Esse 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 a banda correspondente ao comprimento de onda do verde na região do visível, e o NIR corresponde à banda do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (MCFEETERS, 1996). As larguras de bandas correspondentes aos espectros do verde e do NIR para os satélites Landsat 5 e Landsat 8 são, respectivamente, os comprimentos de onda do 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).

O uso do índice anterior quando aplicado em conjunto com as bandas espectrais do verde e do infravermelho próximo na composição colorida RGB NIR-GREEN-NDWI 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 referencial, extraído de imagens de satélites, para ambientes com regimes de micromaré; em vista disso o emprego de tais imagens se torna adequado para o presente estudo, pois a zona costeira aqui abordada tem o regime supracitado. Além da problemática anterior, outra questão nesse tipo de abordagem é o uso de poucas imagens de satélite na composição da série temporal (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) e submersas (corpos d'água). Na sequência, foram aplicadas técnicas de quantificação para avaliar a variação da linha de costa mediante a aplicação do *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), que é uma ferramenta de extensão do *software* ArcGIS (HIMMELSTOSS et al., 2018). Essa quantificação das mudanças foi calculada por meio das estatísticas de mudança entre as linhas de costa que compõem a série temporal. Nessa ferramenta, foi criada uma linha de base *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 linha de base e as linhas de costa, permitindo a obtenção das taxas de variação ao longo de cada transecto.

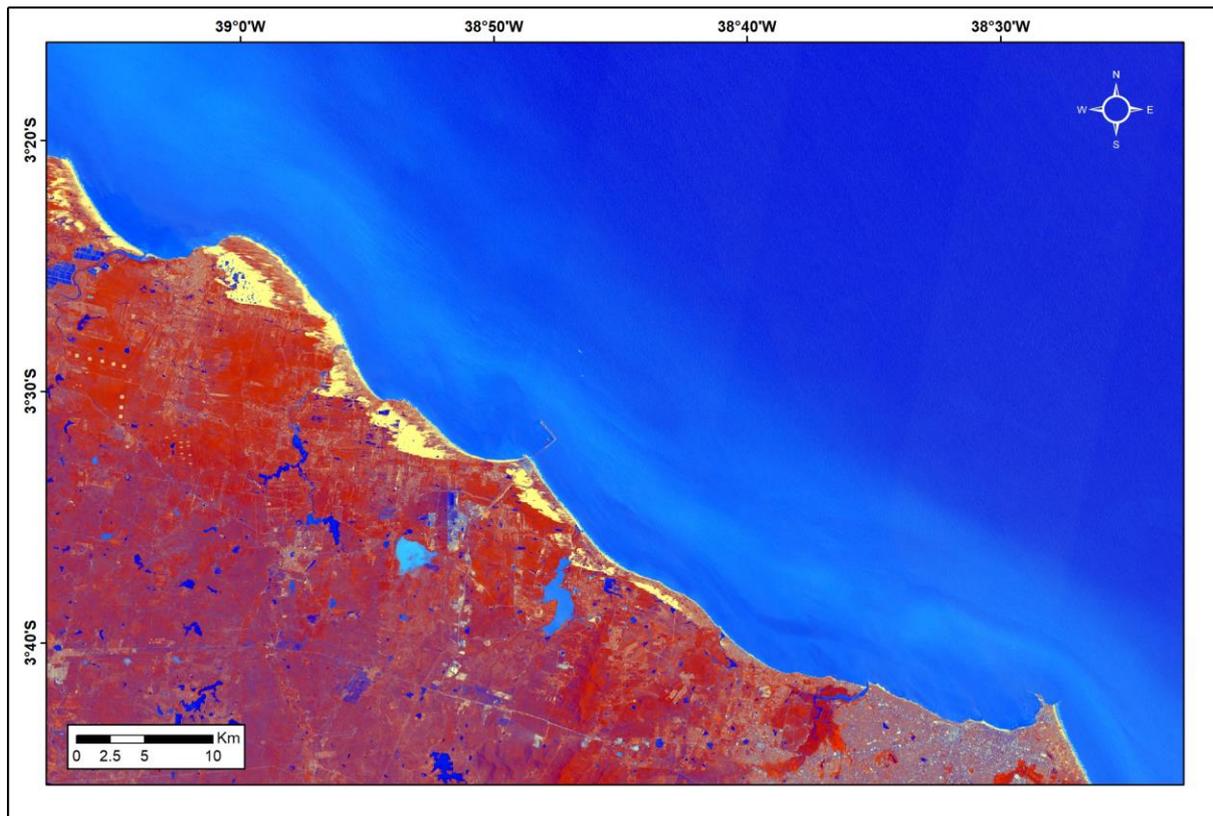


Figura 3. Composição RGB 4-2-NDWI para o LANDSAT 5 (21/09/2008). Datum: SIRGAS 2000. Fonte: elaborada pelos autores.

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 e o intervalo de tempo decorrido (YUE; LIU, 2019). Já 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 assim:

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

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 classes para o EPR e LRR, segmentadas em cinco intervalos, cujos limites 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 para cada transecto: i) acreção alta (> 3,5 m/anono); ii) acreção (1,5 a 3,5 m/anono); iii) estabilidade (-1,5 a 1,5 m/anono); iv) erosão (-1,5 a -3,5 m/anono); e, v) erosão alta (< 3,5 m/anono). Todo o processamento digital de imagens foi feito no *software* SPRING (CAMARA et al., 1996) e os processos vetoriais no ArcGIS 10.5 (ESRI, 2017).

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 forçantes 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 barlamar do espigão 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 por promontórios, com pequenas baías em forma de espiral logarítmica, protegendo áreas situadas a sotamar pela ação de ondas.

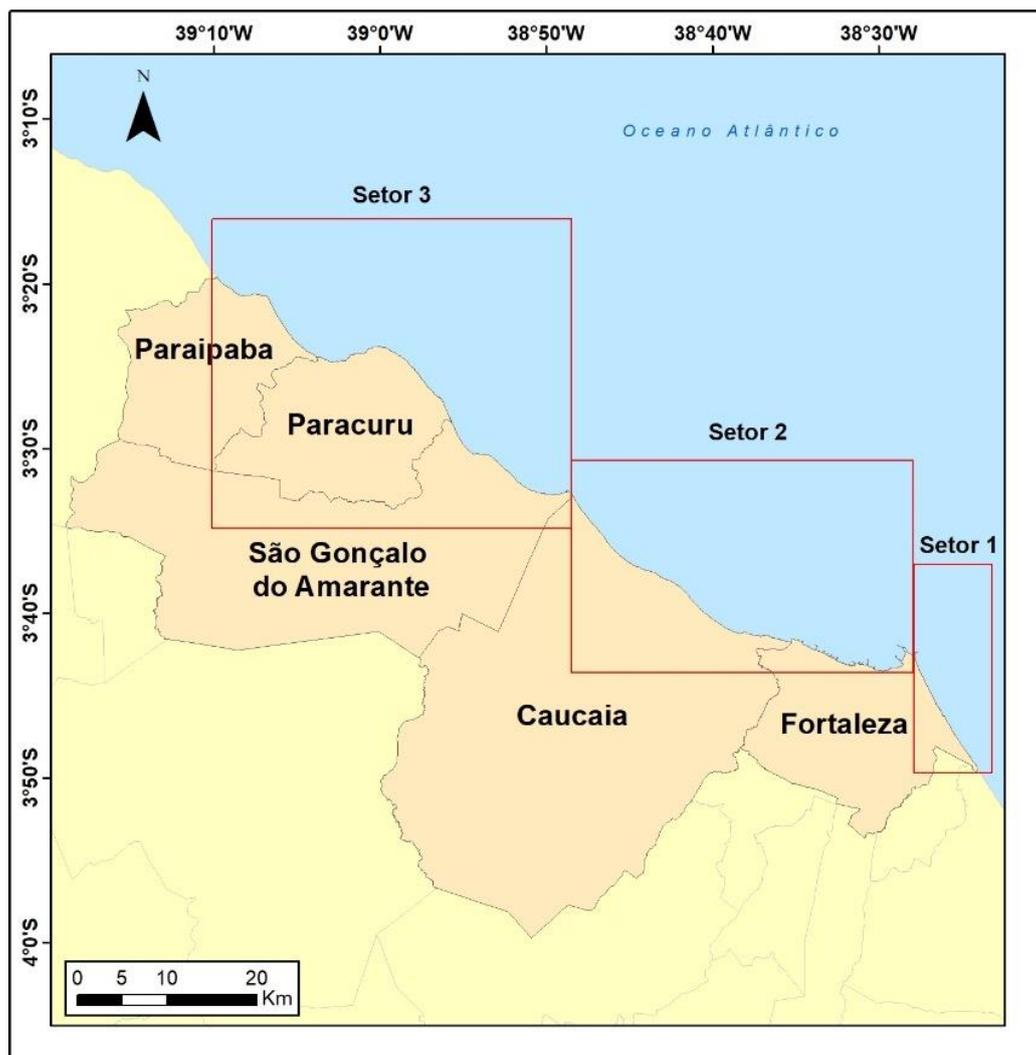


Figura 4. Setorização da área de estudo que incorporou parte da RMF. Datum: SIRGAS 2000. Fonte: elaborado pelos autores.

4.1. Setor 1

Para o setor 1, no período 1984 a 1991, houve predomínio da estabilidade com 56% (Figura 5), o 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/ano (EPR) na região próxima da foz do rio Cocó e a maior taxa de acreção foi de 3,41 m/ano (EPR), localizada próxima do espigão do Titanzinho (Fortaleza) (Figura 6).

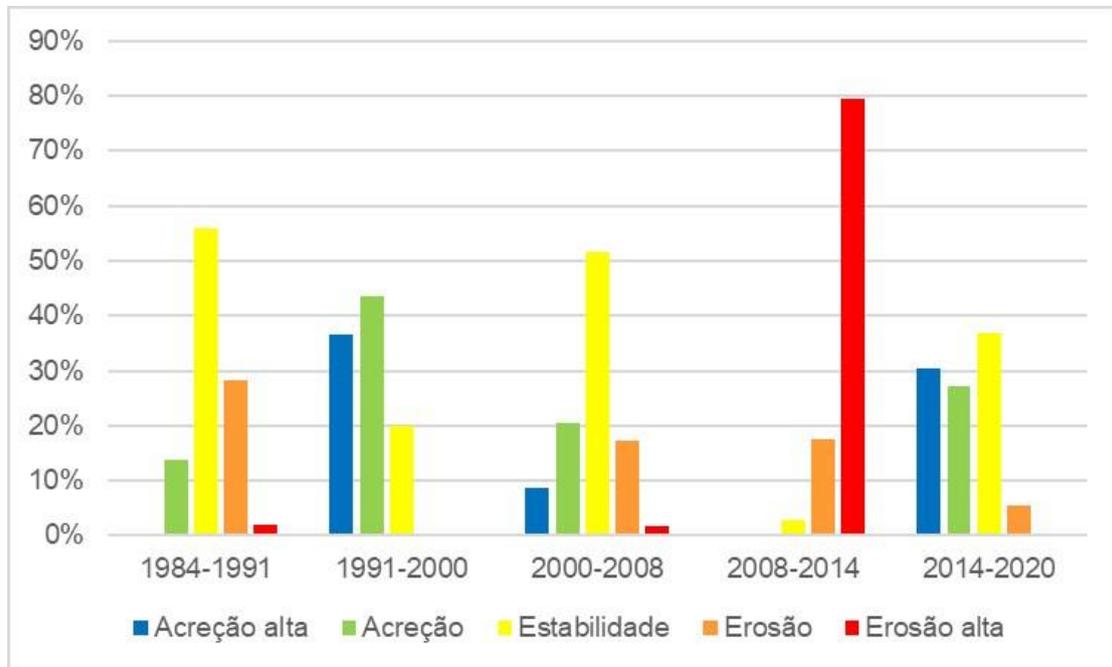


Figura 5. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR para o Setor 1. Fonte: elaborado pelos autores.

Diferente do período anterior (1984 a 1991), o de 1991 a 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/ano (EPR) na praia da Sabiaguaba (Fortaleza) (Figura 6).

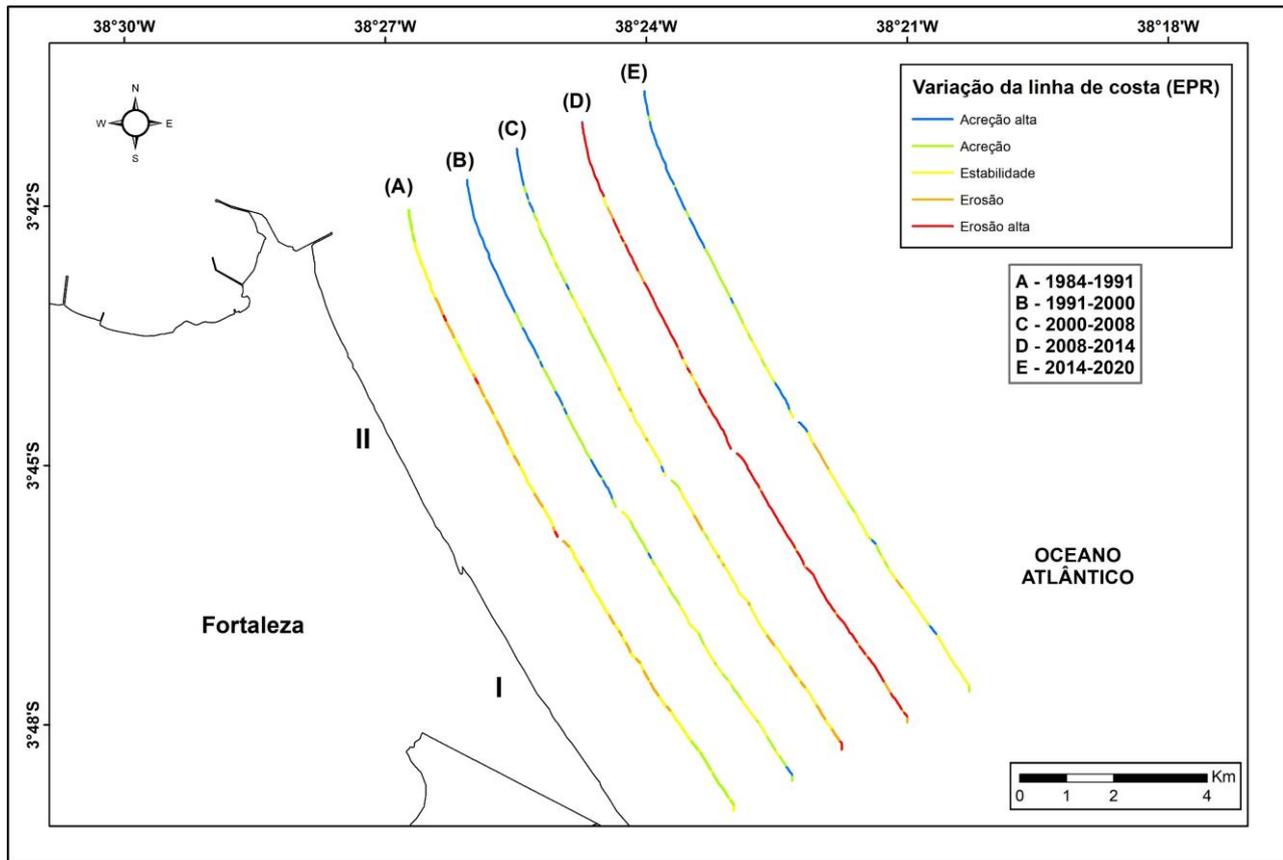


Figura 6. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR, em períodos, para o Setor 1. I – Praia da Sabiaguaba; II – Praia do Futuro. Datum: SIRGAS 2000. Fonte: elaborado pelos autores.

Semelhante ao primeiro período (1984 a 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 a 2000), a praia da Sabiaguaba tinha registrado a maior taxa de acreção, contudo, no presente intervalo ocorreu a maior taxa de retrogradação de -10,48 m/ano (EPR) (Figura 6); já a maior taxa de acreção foi de 6,29 m/ano (EPR), localizada próxima do espigão do Titanzinho.

O período de 2008 a 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/ano) (EPR) (Figura 6).

No período de 2014 a 2020 volta a predominar a deposição, quando somada a acreção com a acreção alta, registrando, 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 ao espigão do Titanzinho registrou a maior taxa de acreção com 9,91 m/ano (EPR), já a maior taxa de erosão foi na praia da Sabiaguaba próxima da foz do rio Cocó com -2,8 m/ano (EPR) (Figura. 6).

Os resultados do período de 1984 a 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/ano para o EPR e 4,09 m/ano 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, de 1984 a 2020, indicaram uma situação de estabilidade nos métodos estatísticos EPR e LRR.

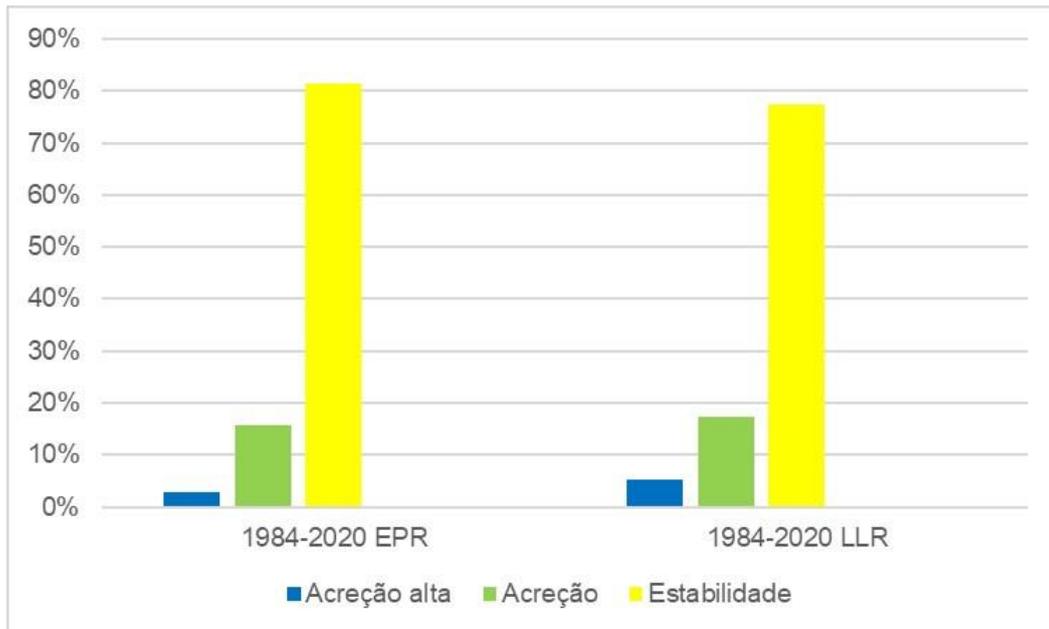


Figura 7. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR e LRR no período 1984-2020 para o Setor 1. Fonte: elaborado pelos autores.

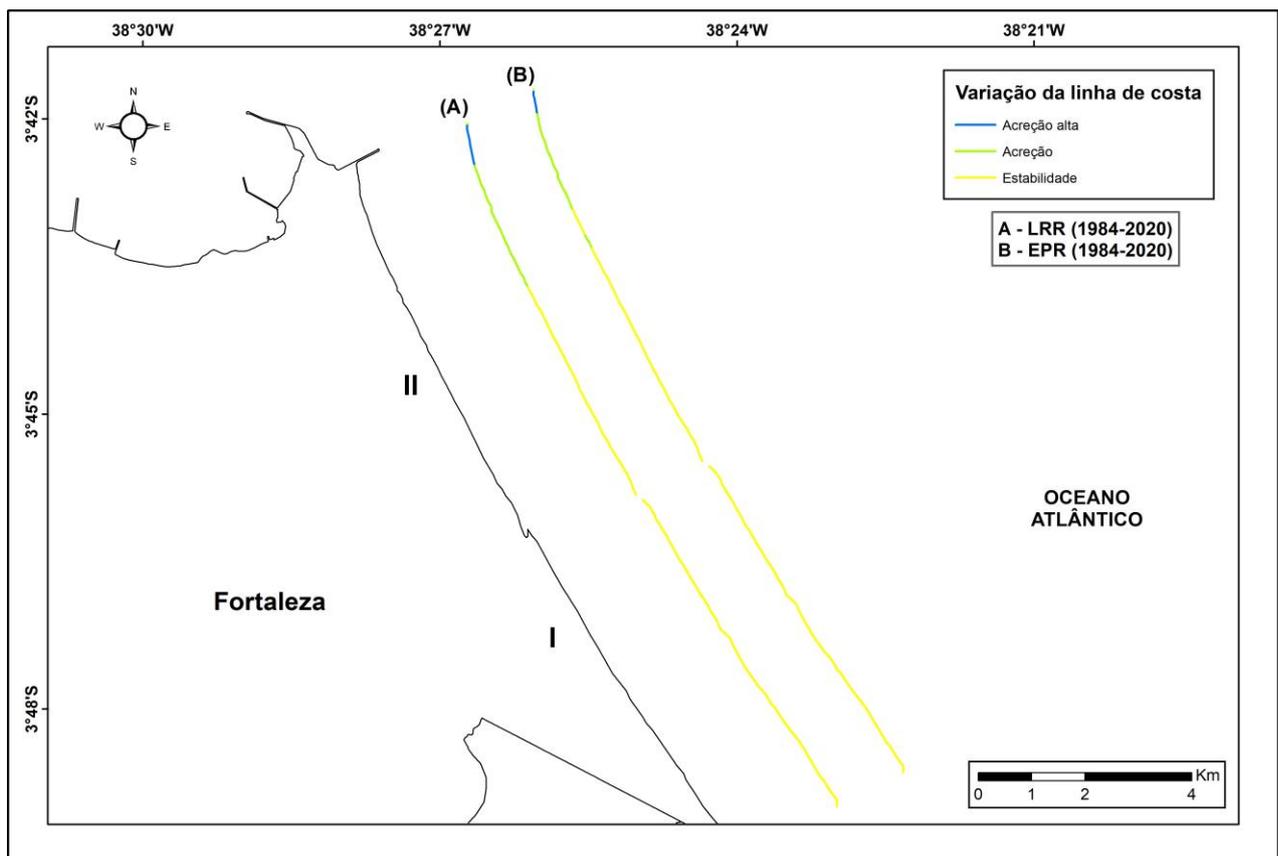


Figura 8. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR e LRR, no período de 1984-2020, para o Setor 1. I – Praia da Sabiaguaba; II – Praia do Futuro. Datum: SIRGAS 2000. Fonte: elaborado pelo autor.

4.2. Setor 2

A classe individual que predominou no primeiro período (1984 a 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/ano (EPR) entre as praias do Pacheco e de Icarai (Caucaia); já a maior taxa de acreção foi 12,9 m/ano (EPR) no trecho entre a praia de Iracema e a Barra do Ceará (Fortaleza) (Figura 10).

Diferente do período anterior (1984 a 1991), o de 1991 a 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/ano (EPR), já a maior taxa de recuo foi de 4,77 m/ano (EPR) nas praias do Pacheco e Icarai (Caucaia) (Figura 10).

Novamente, predominou o recuo da linha de costa, agora para o período de 2000 a 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/ano (EPR), enquanto na praia de Iracema (Fortaleza) ocorreu a maior taxa de acreção com 7,85 m/ano (EPR) (Figura 10).

Idêntico ao período anterior (2000 a 2008), no de 2008 a 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/ano, destaque também para a taxa erosiva na Praia do Pacheco/Praia de Icarai (Caucaia) de 12,5 m/ano; já a maior taxa de deposição foi de 20,23 m/ano no trecho do Porto do Mucuripe (Fortaleza) (Figura 10).

No período entre 2014 e 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). Nas praias do Pacheco e Icarai (Caucaia) a taxa de recuo foi de -7,32 m/ano (EPR), já na praia de Iracema (Fortaleza) ocorreu uma taxa de deposição de 22,97 m/ano (EPR) (Figura 10).

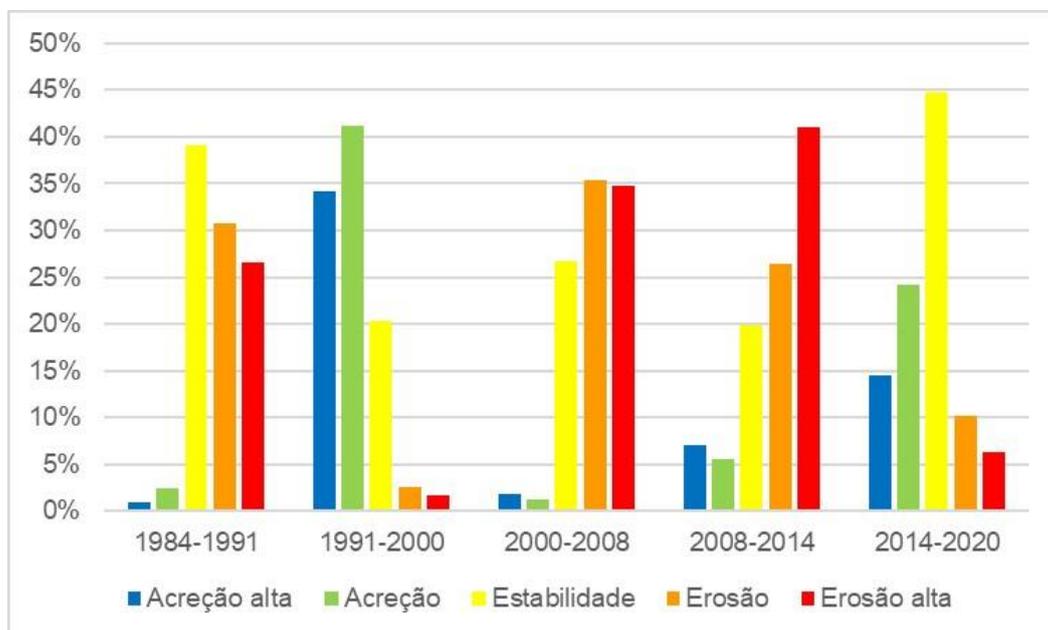


Figura 9. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR para o Setor 2. Fonte: elaborado pelos autores.

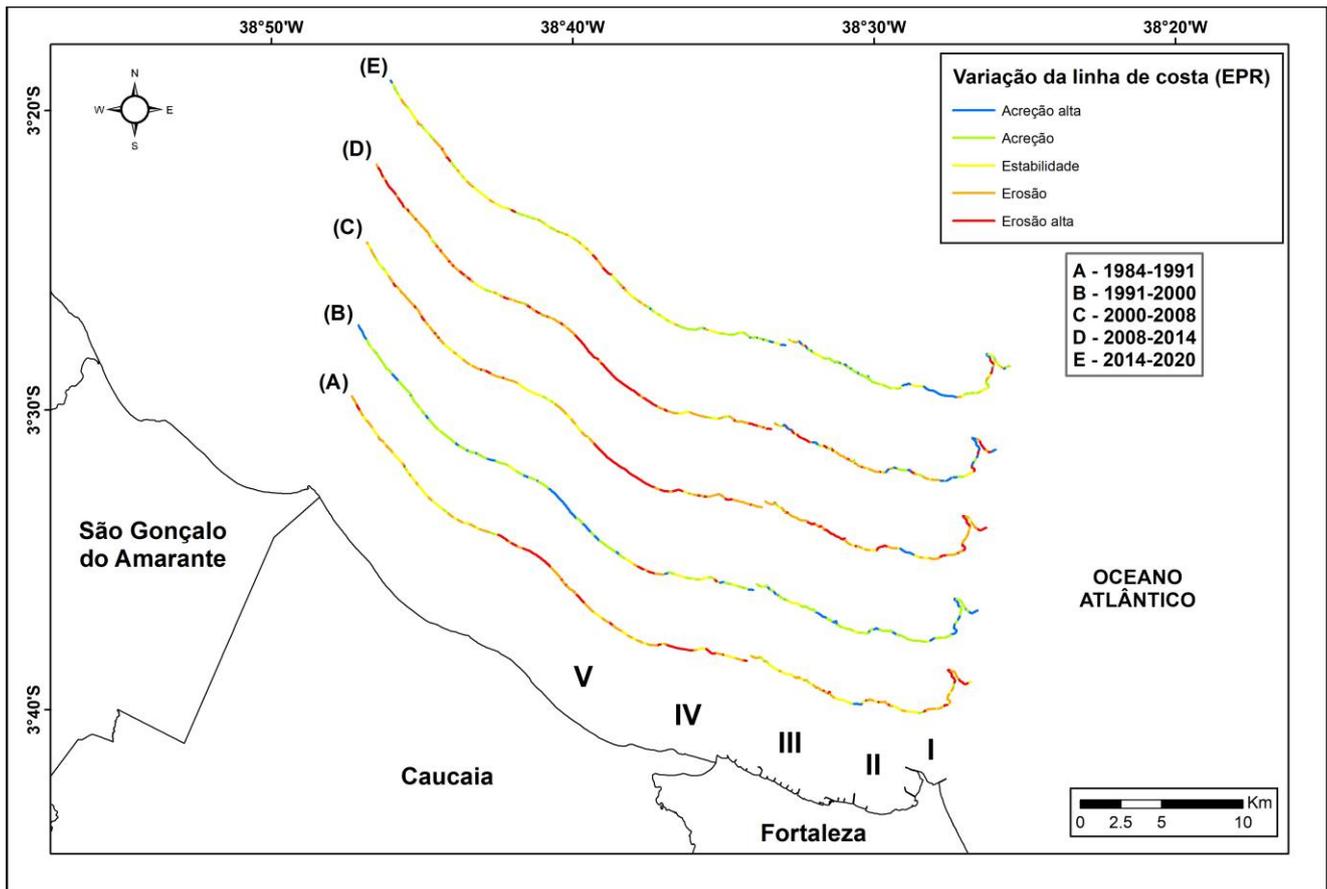


Figura 10. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR em períodos para o Setor 2. I – Porto do Mucuripe; II – Praia de Iracema; III – Barra do Ceará; IV – Praia de Iparana; V – Praia do Pacheco/Praia de Icarai. Datum: SIRGAS 2000. Fonte: elaborado pelos autores.

Semelhante ao Setor 1, no Setor 2 a estabilidade também predominou no período de 1984 a 2020, tanto no EPR como no LRR, sendo, 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/ano, no LRR, enquanto no EPR foi de -3,61 m/ano na praia de Iparana (Caucaia) (Figura 12). Já a maior deposição foi na praia de Iracema (Fortaleza) com 3,94 m/ano, 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 deles (1991-2000) e a estabilidade também em outro (2014-2020). Contudo, idêntico ao Setor 1, a estabilidade predominou no Setor 2 no período de 1984 a 2020 tanto para os valores de LRR como de EPR.

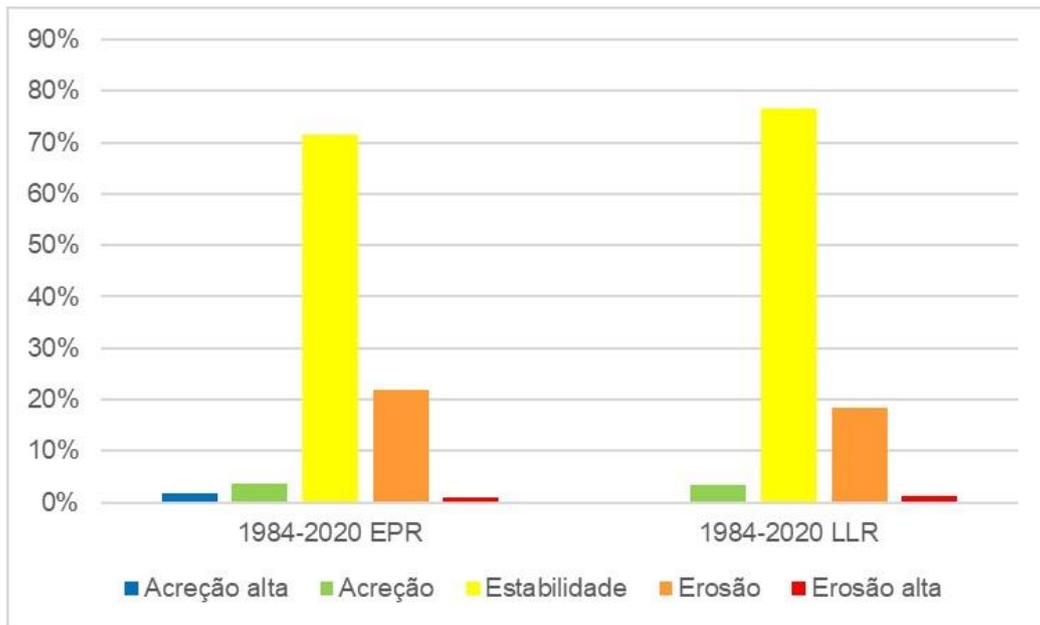


Figura 11. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR e LRR no período 1984-2020 para o Setor 2. Fonte: elaborado pelos autores.

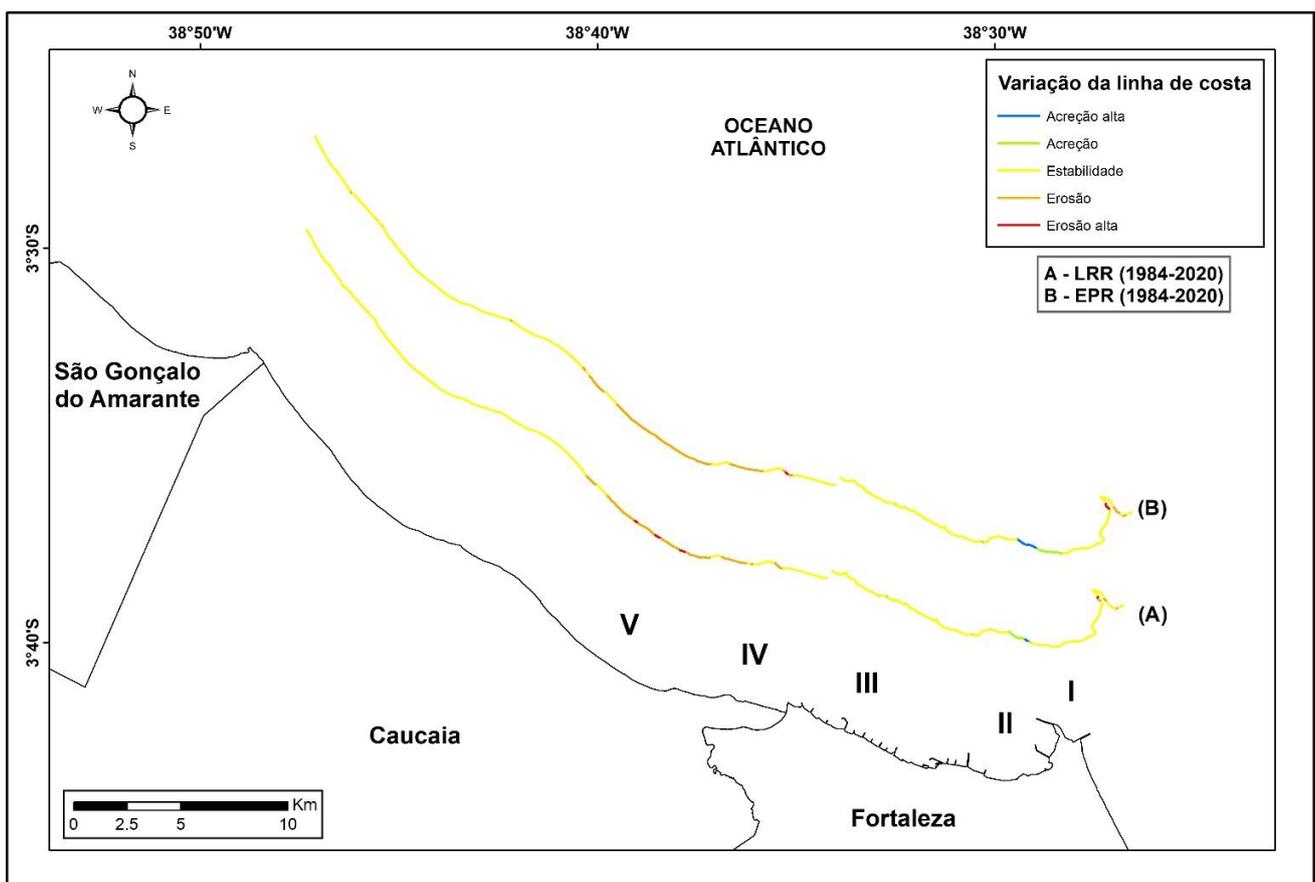


Figura 12. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR e LRR, no período de 1984-2020, para o Setor 2. I – Porto do Mucuripe; II – Praia de Iracema; III – Barra do Ceará; IV – Praia de Iparana; V – Praia do Pacheco/Praia de Icarai. Datum: SIRGAS 2000. Fonte: elaborado pelos autores.

4.3. Setor 3

Idêntico ao que ocorreu no Setor 2, no Setor 3, no período de 1984 a 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/ano (EPR), em Paraipaba, e o recuo teve -33 m/ano (EPR), em Paracuru (Figura 14). Outro trecho que teve recuo significativo foi no Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante) com -15,79 m/ano (EPR).

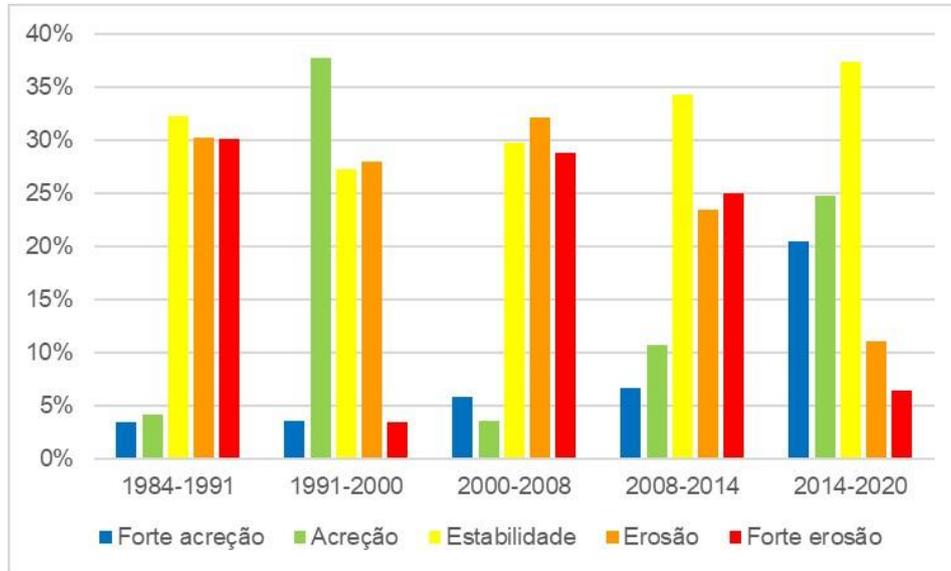


Figura 13. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR para o Setor 3. Fonte: elaborado pelos autores.

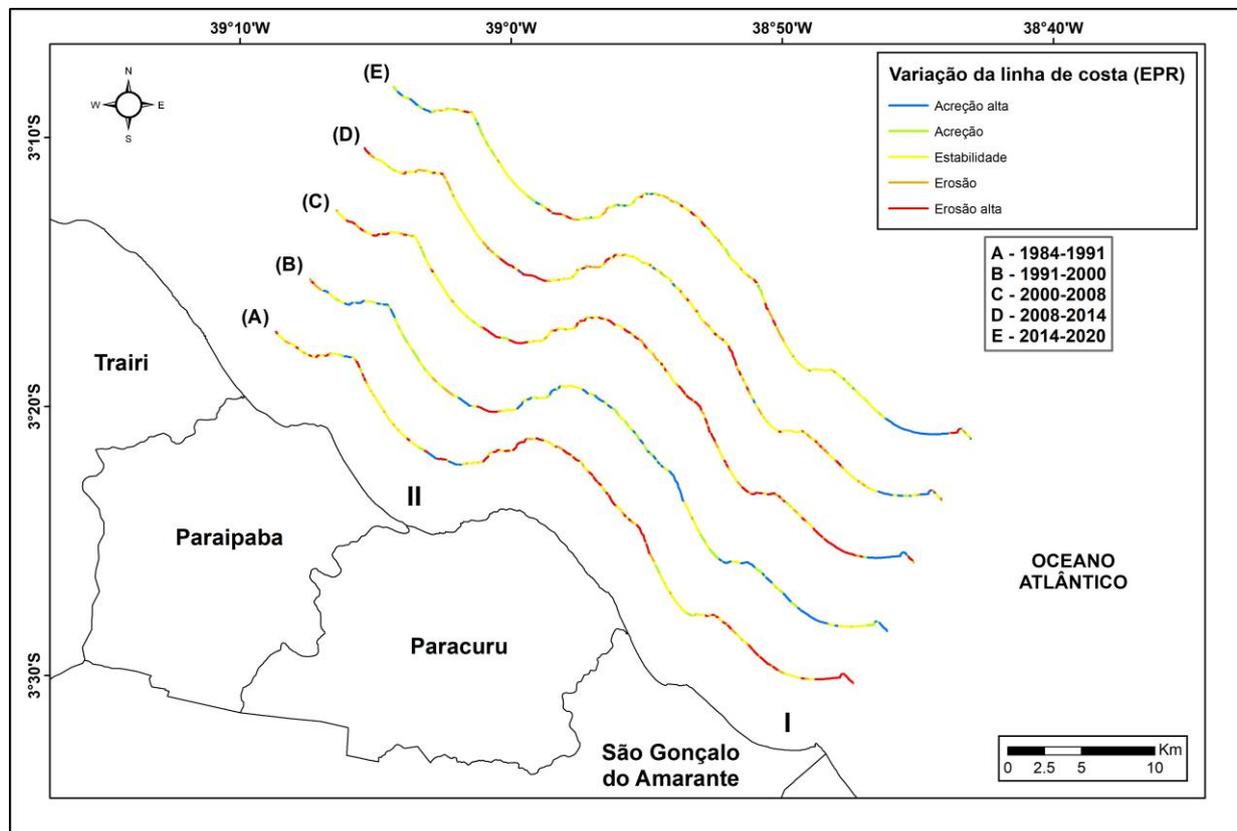


Figura 14. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR em períodos para o Setor 3. I – Porto do Pecém; II – Foz do rio Curú. Datum: SIRGAS 2000. Fonte: elaborado pelos autores.

No período de 1991 a 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/ano (EPR); outra vez próximo da foz do rio Curú (Paracuru) ocorreu a maior taxa de recuo com -10,5 m/ano (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/ano (EPR); já a maior taxa de deposição foi de 45,87 m/ano (EPR) no Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante) (Figura 14).

Igual ao primeiro período (1984 a 1991), no de 2008 a 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/ano (EPR) e -21,32 m/ano (EPR); é relevante mencionar que a segunda maior taxa de recuo ocorreu próxima da foz do rio Curú (Paracuru) com -12,86 m/ano (EPR) (Figura 14).

De novo a estabilidade individualmente prevaleceu, agora para o período de 2014 a 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/ano (EPR); já a maior taxa erosiva foi na foz do rio Curú (Paracuru) com -25,7 m/ano (EPR) (Figura 14).

No Setor 3, a estabilidade prevaleceu no período de 1984 a 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/ano (LRR) e 8,84 m/ano (EPR); já as maiores taxas de deposição foram no trecho do Porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante) com 12,24 m/ano (LRR) e 10,74 m/ano (EPR) (Figura 16).

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.

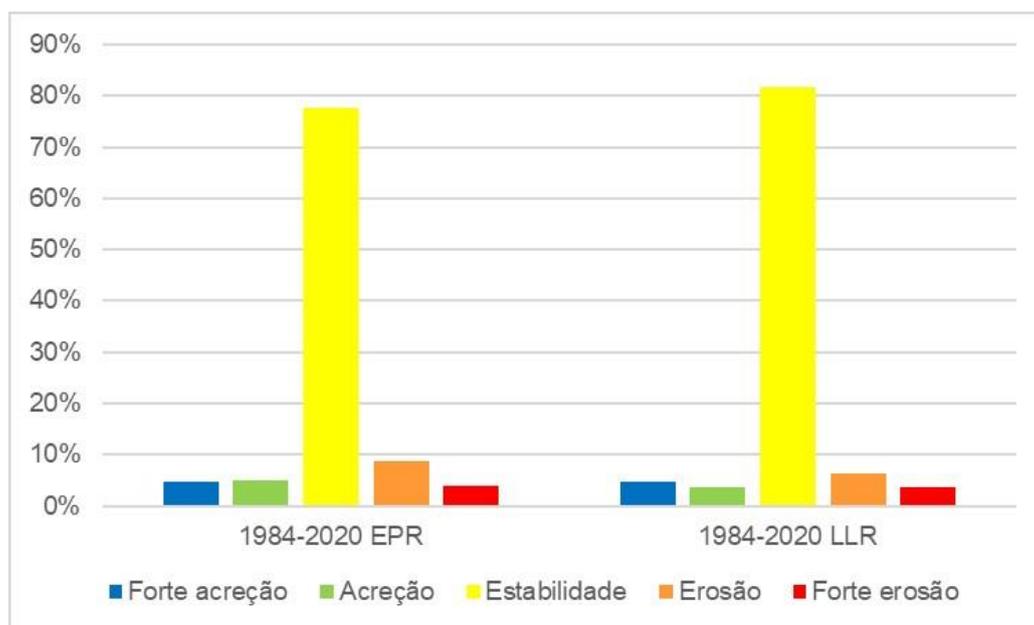


Figura 15. Porcentagem das classes que indicam o comportamento da linha de costa em EPR e LRR, no período 1984-2020, para o Setor 3. Fonte: elaborado pelos autores.

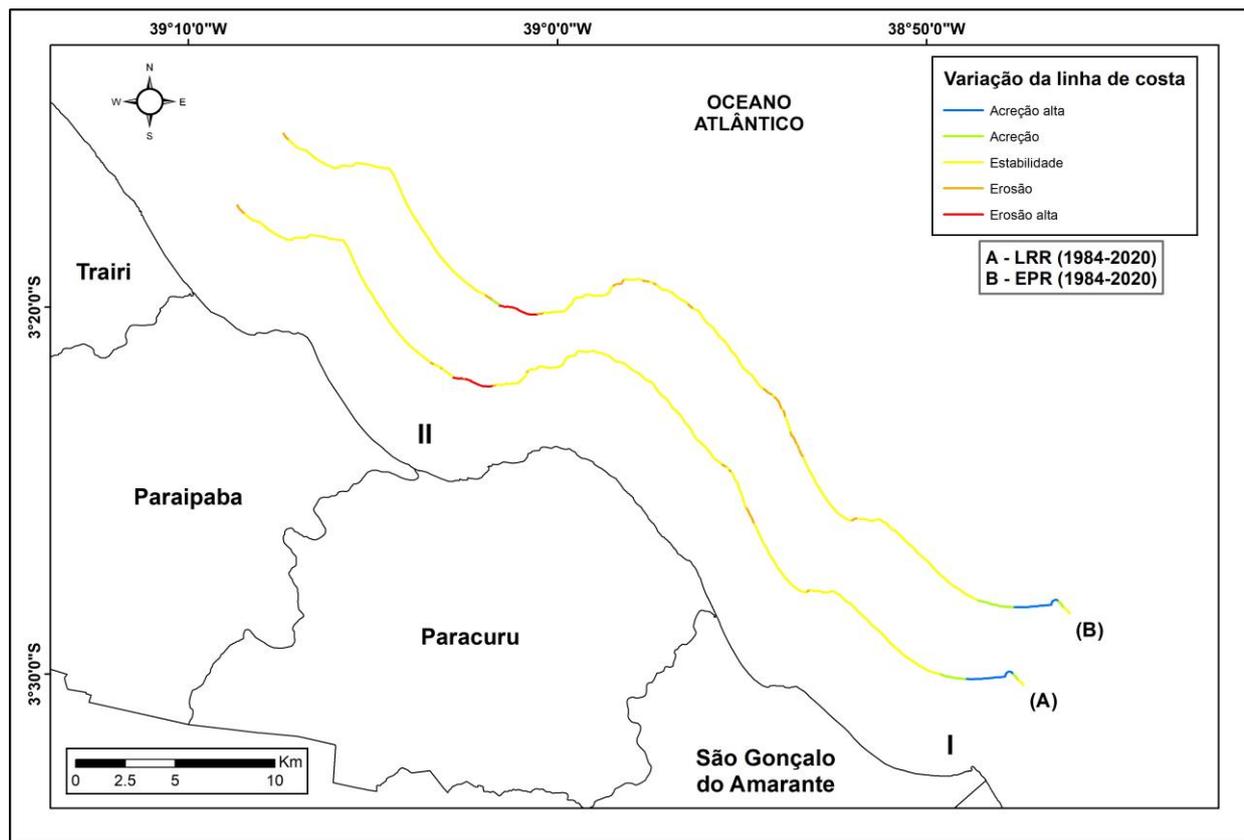


Figura 16. Mapa de variação da linha de costa com valores de EPR e LRR, no período de 1984-2020, para o Setor 3. I – Porto do Pecém; II – Foz do rio Curú. Datum: SIRGAS 2000. Fonte: elaborado pelos autores.

5. Discussão

O trabalho desenvolvido por Silva et al. (2019) contém vários dados sobre o comportamento da linha de costa (Tabela 2) na área compreendida pelo presente estudo. Como mencionado, os autores fizeram uma análise da variação da linha de costa por meio do método de mudança de polígonos com imagens do período de 1984 até 2018. Esse método fornece dados sobre o deslocamento linear da linha de costa e, para uma comparação mais apropriada com o presente estudo, os valores lineares foram transformados em taxas anuais de variação.

Para o Setor 1, Silva et al. (2019) encontraram o predomínio da deposição nos períodos 1984-1991, 1991-2000 e 2000-2008 (Tabela 2); o presente estudo também observou a mesma tendência de acreção nos períodos anteriores, contudo, os valores aqui constatados foram diferentes, pois no primeiro período (1984-1991) foi de 3,41 m/ano, no segundo (1991-2000), de 9,93 m/ano, e, no terceiro (2000-2008), de 9,93 m/ano. Silva et al. (2019) perceberam a prevalência da erosão no período 2008-2018 com uma taxa de -4,8 m/ano, no presente estudo também foi constatada a predominância do processo erosivo, contudo, no período 2008-2014, onde a taxa de recuo foi de -12,24 m/ano. A grande discrepância entre as taxas de erosão dos dois estudos pode ser explicada pela amplitude temporal ser diferente entre eles, no presente estudo foi de 6 anos (2008-2014) e, no de Silva et al. (2019), de 10 anos (2008-2018).

Esse comportamento erosivo pode ser explicado pelo estágio morfodinâmico praiar 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 disso 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.

Tabela 2. Dados de variação da linha de costa extraídos de Silva et al. (2019).

Setor	Taxa de Mobilidade		Período
	Erosão	Acreção	
Setor 1	-	-	-
Litoral leste de Fortaleza	-	+39 m (5,57 m/ano)	1984 - 1991
	-	+71 m (7,88 m/ano)	1991 - 2000
	-	+55 m (6,87 m/ano)	2000 - 2008
	-48 m (4,8 m/ano)	-	2008 - 2018
Setor 2	-	-	-
Litoral oeste de Fortaleza	-	+89 m (12,7 m/ano)	1984 - 1991
	-	+97 m (10,7 m/ano)	1991 - 2000
	-	+82 m (10,2 m/ano)	2000 - 2008
	-	+77 m (7,7 m/ano)	2008 - 2018
Litoral de Caucaia	-118 m (16,8 m/ano)	-	1984 - 1991
	-70 m (7,7 m/ano)	-	1991 - 2000
	-78 m (9,7 m/ano)	-	2000 - 2008
	-70 m (7 m/ano)	-	2008 - 2018
Setor 3	-	-	-
Foz do rio Curú	-	+107 m (15,3 m/ano)	1984 - 1991
	-263 m (29,2 m/ano)	+118 m (16,8 m/ano)	1991 - 2000
	-131 m (16,4 m/ano)	+148 m (18 m/ano)	2000 - 2008
	-44 m (4,4 m/ano)	+274 m (27,4 m/ano)	2008 - 2018

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/ano (EPR) e 4,09 m/ano (LRR). Em um recorte temporal diferente (1972-2010), Marino e Freire (2013) constataram as seguintes taxas de acreção: 3,09 m/ano (EPR) e 3,14 m/ano (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 praial 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/ano, já em Silva et al. (2019) foi de 12,7 m/ano. 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/ano, enquanto no trabalho anteriormente mencionado foi de 7,7 m/ano. Já em um intervalo temporal um pouco maior (1991-2004), Farias e Maia (2010) constataram uma taxa de recuo de 4 m/ano na Praia de Pacheco (Caucaia) que é um pouco menor do que a observada aqui (4,77 m/ano), 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/ano no período de 2004-2014, enquanto aqui, em um período diferente (2008-2014), a taxa de erosão foi de 12,5 m/ano.

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/ano que é superior àquela constatada por Moreira et al. (2020) que foi de 3,7 m/ano. 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, Moraes e Pinheiro (2011) identificaram no período de 2001-2007 uma taxa de recuo de 78,38 m/ano 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/ano. 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/ano (EPR) de acreção no trecho próximo do porto do Pecém; e, b) 10 m/ano (EPR) de recuo em um setor a sotamar do porto do Pecém. Já os valores aqui observados foram de 38,43 m/ano (EPR) e -21,32 m/ano (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 praias dominantes 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 praias (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 praiado (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 (SAENGSPAVANICH, 2019).

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 acreção 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 Icaraí. 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.

Contribuições dos Autores: Maykon Targino da Silva.: concepção, metodologia, software, análise formal, pesquisa, preparação de dados e escrita do artigo. Débora Nogueira Lopes.: análise formal e pesquisa. Eduardo Viana Freires.: análise formal e pesquisa. Cláudio Ângelo da Silva Neto.: metodologia, software, análise formal e pesquisa. Michael Vandesteem Silva Souto.: concepção, metodologia, análise formal, escrita do artigo, revisão e supervisão. Cynthia Romariz Duarte.: revisão e supervisão. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradecimentos: Os autores agradecem aos Professores Doutores Alfredo Marcelo Grigio e Antonio Conceição Paranhos Filho pelas sugestões ao trabalho. Os autores agradecem também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela bolsa de doutorado do primeiro autor.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse, bem como, os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

Referências

1. 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
2. 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
3. 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
4. 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.
5. 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
6. 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
7. 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.
8. 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
9. 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

10. 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
11. 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
12. 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.
13. CEARÁ. **Relatório consolidado do Zoneamento Ecológico-Econômico da zona costeira do Ceará – ZEEC**. Fortaleza: SEMA. 2022.
14. 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
15. 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
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. DAI, C.; HOWAT, I. M.; LAROURE, 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
20. 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
21. ESRI – Environmental Systems Research Institute. Software ArcGis Desktop, version 10.5. 2017.
22. 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
23. 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
24. 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
25. 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
26. 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

27. 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.
28. 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.
29. 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
30. 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
31. 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
32. 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.
33. 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
34. 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.
35. 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
36. MARINHA DO BRASIL. Banco Nacional de Dados Oceanográficos. 2021.
37. 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
38. 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
39. 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
40. 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.
41. 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

42. 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
43. 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.
44. 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 Icaraí (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
45. MUEHE, D.; KLUM-OLIVEIRA. Deslocamento da linha de costa versus mobilidade praial. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 5, p. 121-124, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abequa.v5i2.35884>
46. MUEHE, D., (Org.). **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Rio de Janeiro, MMA. 2018. 759p.
47. 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
48. 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
49. 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
50. 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.
51. PEREIRA, A. Q. **Coastal resorts and urbanization in Northeast Brazil**. Cham: Springer, 2020. 74p. DOI: 10.1007/978-3-030-46593-3
52. 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
53. 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
54. 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.
55. SAENGSPAVANICH, 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
56. SHORT, A. D. 1993. **Beaches of the New South Wales Coast. A guide to their nature, characteristics, surf and safely**. Australian Beach Safety and Management Program. The University Printing Service, University of Sidney. 358p.
57. 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
58. 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
59. USGS. United States Geological Survey. Earth explorer. 2021.

60. USGS. United States Geology Survey. Landsat 5 and Landsat 8. 2022.
61. 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
62. 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
63. 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



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.