

Artigo de Pesquisa

Estimativas das alterações de longo prazo na linha de praia do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil

Estimation of long term shoreline changes along the Eastern Coast of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil

Maria de Fátima Alves de Matos¹, Venerando Eustáquio Amaro², Ada Cristina Scudelari³, Sílvia Baracho Rosado⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, Brasil. E-mail. mfatimaalves.m@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2864-2027>

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil, Natal, Brasil. E-mail. venerando.amaro@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7357-2200>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil, Natal, Brasil. E-mail. adaufnr@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7594-1196>

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Ambiental, Natal, Brasil. E-mail. silviarosado65@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0692-3354>

Recebido: 29/05/2020; Aceito: 31/05/2021; Publicado: 15/01/2022

Resumo: Falésias marinhas ativas e praias arenosas são ecossistemas costeiros altamente dinâmicos, portanto, rápida e intensamente afetados por processos erosivos em escalas temporais de curto a longo prazo, conduzindo a impactos irreversíveis nos demais ecossistemas da orla marítima. Conhecer e quantificar os processos envolvidos nessa dinâmica é de fundamental importância para o eficiente gerenciamento costeiro. Este artigo investiga as modificações ocorridas nas linhas de praia do Litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte nas últimas três décadas (entre 1988 e 2018) e discute os processos costeiros envolvidos, por meio da quantificação de taxas médias e máximas de erosão e acreção na linha de praia, com base no processamento digital de imagens multiespectrais de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informações Geográficas. Na avaliação comparativa das mudanças nas linhas de praia considerou os erros e incertezas inerentes à resolução espacial de imagens de sensoriamento remoto, técnicas de georreferenciamento e procedimentos de extração de cada linha de praia nas análises estatísticas utilizando os módulos do Digital Shoreline Analysis System. Os resultados mostram balanço final erosivo para cerca de 45% das linhas de praia nas três últimas décadas. As taxas médias de variação das linhas de praia indicam recuos da ordem de -1,20 m/ano e acreção de 1,71 m/ano. Logo, a magnitude da erosão é expressiva, com trechos assinalando máximos de acreção em 19,5 m/ano e de erosão da ordem de -2,76 m/ano.

Palavras-chave: Erosão Costeira; Gestão Costeira; Mudanças Climáticas.

Abstract: Active sea cliffs and sandy beaches are highly dynamic coastal ecosystems therefore rapidly and intensely affected by erosive processes on short- to long-term time scales, leading to irreversible impacts on other coastal ecosystems. Knowing and quantifying the processes involved in this dynamic is of fundamental importance for efficient coastal management. This paper investigates the shoreline change that occurred in the shorelines of the Eastern Coast of Rio Grande do Norte state in

the last three decades (between 1988 and 2018) and discusses the coastal processes involved, by quantifying average and maximum erosion and accretion rates on the shoreline, based on digital processing of Remote Sensing multispectral images and Geographic Information System. The comparative assessment of shoreline changes considered the errors and uncertainties inherent to spatial resolution of remote sensing images, georeferencing techniques and extraction procedures of each shoreline in statistical analyses using the Digital Shoreline Analysis System modules. The results illustrate an erosive final average balance for about 45% of the shorelines in the last three decades. The average variation rates of the shorelines point out retreat of about -1,20 m/year and accretion of 1.71 m/year. Thus, the magnitude of erosion is significant with sections that indicate maximum accretion 19.5 m/year and erosion of the order of -2.76 m/year.

Keywords: Coastal Erosion; Coastal Management; Climate Change.

1. Introdução

A Geomorfologia Costeira do Nordeste brasileiro é fortemente variável e interconectada espacialmente, compreendendo diversos tipos de paisagens: falésias marítimas, praias arenosas, sistemas de ilhas barreiras, planícies de maré, deltas e estuários de rios. Todas essas paisagens são presentes e bem representadas na orla marítima do Rio Grande do Norte (RN), objeto deste estudo. As falésias marinhas ocorrem em 52% dos litorais do planeta e estão em retração em pelo menos uma localidade costeira em 33% dos países independentes e em 15% das regiões não independentes, conforme pesquisa detalhada com imagens de satélites realizada por Young e Carilli (2019). Com base em análise de dados similares, Luijendijk et al. (2018) sugeriram que 24% das praias arenosas do mundo estão com taxas de erosão superiores a 0,5m/ano, enquanto 28% estão em acreção e 48% podem ser consideradas estáveis. Em relação as praias arenosas ao redor do mundo, estudos aludem que pelo menos 70% delas já experimentou erosão nos últimos 100 anos e/ou estão em retração (NORDSTROM, 2000; ANTHOFF et al., 2006; BIRD, 2016). Portanto, as falésias marinhas ativas e as praias arenosas são ecossistemas costeiros altamente dinâmicos, logo, rápida e intensamente afetados por processos erosivos em escalas temporais de curto a longo prazo, com impactos irreversíveis nos demais ecossistemas da orla marítima.

Os estudos sobre o comportamento dinâmico de falésias ativas e praias arenosas em regiões tropicais, e fenômenos associados, têm recebido atenção limitada, especialmente diante das evidências de intensificação das mudanças climáticas e dos indicadores de fluxo populacional do interior para as zonas costeiras, como também das zonas rurais para as urbanas, o que aumenta os riscos de desastres (IPCC, 2018). As avaliações globais sobre os impactos do aumento do nível médio do mar estão concentradas, sobretudo, nas inundações costeiras temporárias e na submersão permanente de terras (HINKEL et al.; 2013; MENTASCHI et al., 2018), apesar dos cenários erosivos decorrentes do aumento do nível médio do mar (WONG et al., 2014). Hinkel et al. (2013) avaliaram praias arenosas em retração por efeito da elevação global do nível médio do mar e obtiveram projeções de perdas globais de terras entre 6.000 km² e 17.000 km² no decorrer do século XXI, o que forçaria a migração de 1,6 a 5,3 milhões de pessoas e custos de migração equivalentes a US\$ 300 a 1.000 bilhões. Mentaschi et al. (2018) analisaram o período entre 1984 e 2015 e mostraram perdas de terra em zonas costeiras equivalente a 28.000 km², duas vezes maior que os ganhos de terra que foram de 14.000 km².

A correlação entre o incremento na ocorrência de eventos climáticos extremos, efeito das mudanças climáticas, e a retração das linhas de costa têm sido destacados como as ameaças mais graves aos ecossistemas costeiros e às comunidades que ocupam esses locais (WEF, 2016). Tal fato determinou maior atenção aos estudos sobre as mudanças na linha de costa (DOLAN et al., 1980; BOAK; TURNER, 2005; SYTNIK et al., 2018); os potenciais impactos decorrentes da erosão costeira (BONETTI et al., 2018); a classificação dos tipos de linhas de costa (NYBERG; HOWELL, 2016) e as análises globais de perdas e ganhos de terras costeiras (HINKEL et al., 2013; LUIJENDIJK et al., 2018). Embora tenha ocorrido melhorias na compreensão dos padrões de mudança costeira em escalas locais e regionais, com a inserção de novas técnicas desenvolvidas para monitorar a morfodinâmica costeira, as estimativas disponíveis atualmente variam amplamente e a maneira pela qual a maioria dessas estimativas foi derivada não é clara, na melhor das hipóteses (LUIJENDIJK et al., 2018).

Portanto, a compreensão do comportamento das linhas de costa e dos fatores contribuintes para o processo erosivo é fundamental à gestão costeira integrada na busca de soluções adaptativas e mitigadoras, incluindo

construções de defesas costeiras (REGNAULD et al., 2004) e a valoração ambiental (GOPALAKRISHNAN et al., 2011).

Sobre os métodos de quantificação em análises temporais de curto e longo prazos das mudanças nas linhas de costa têm incidido rigorosos protocolos de processamento de dados e análises estatísticas (DOLAN et al., 1980; LEATHERMAN, 1983; DOLAN; FENSTER; HOLME, 1991; MOORE, 2000; BOAK; TURNER, 2005; THIELER et al., 2009; MENTASCHI et al., 2018) e avaliação dos erros associados às fontes de dados (ANDERS; BYRNES, 1991; THIELER; DANFORTH, 1994; MORTON; MILLER; MOORE, 2004; PARDO-PASCUAL et al., 2018).

No Brasil, cerca de 26,6%, ou pouco mais que um quarto da população, vive em centros urbanos e municípios da zona costeira (IBGE, 2011), onde há evidências de que alterações climáticas amplificarão os riscos de desastres que acometerá essas populações (BRASIL, 2013; BUSMAN; AMARO; SOUZA-FILHO, 2016; MUEHE, 2018). Desde a última década, os estudos que focaram nos prognósticos, até o final do século XXI, dos efeitos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas costeiros e áreas vulneráveis destacaram o aumento no nível médio relativo do mar representado pela maior frequência de inundações provocadas por ondas de tempestades, com a submersão permanente de áreas planas e baixas, a intrusão salina em aquíferos costeiros e parte superior de estuários, a perda e modificações nas zonas úmidas e a intensificação na erosão costeira (CAI et al., 2009; WONG et al., 2014; IPCC, 2018).

Assim, compreender a sinergia entre as forças motrizes e o comportamento das mudanças nas linhas de praia nos diferentes contextos espaciais e temporais é crucial nas tomadas de decisões para diminuição dos riscos e aumento da resiliência nos ecossistemas (HAPKE et al., 2010), sendo fundamental a análise integrada de conjuntos de dados históricos disponíveis (BURNINGHAM; FRENCH, 2017). No entanto, a identificação e a quantificação do comportamento erosivo e deposicional, em diferentes escalas espaciais e temporais, nos diferentes setores do litoral brasileiro ainda são pontuais (MUEHE, 2006; 2018). Também, as tentativas de análise integrada das condições de erosão e acreção, que implicaria na comparação da linha de praia entre os diferentes estados e municípios, frequentemente, tem se mostrado inconsistentes devido ao emprego de materiais de diversas fontes e procedimentos metodológicos que, ou não são absolutamente evidentes ou variam na perspectiva do que está sendo considerado ou quais os erros envolvidos, o que impede integrações para análises de tendências regionais e nacionais.

Este artigo apresenta os cenários da modificação da linha de praia nas últimas três décadas (entre 1988 e 2018) para o Litoral Oriental do RN e discute os processos costeiros envolvidos, por meio da quantificação de taxas médias e máximas de erosão e acreção na linha de praia, consonante à estimativa de incertezas e à avaliação de erros envolvidos na análise espacial de imagens de Sensoriamento Remoto em Sistema de Informações Geográficas (SIG). Com essa longa perspectiva temporal e abordagem espacial integrativa, em escala regional a local, busca-se atender com informações sobre os processos costeiros instalados frente aos desafios enfrentados pelas ações de manejo, adaptativas e mitigadoras, da orla marítima.

2. Caracterização da Área de Estudo

O Litoral Oriental do RN se estende por 187,5 km entre o Município de Baía Formosa no limite sul na fronteira com o estado da Paraíba e o Município de Touros a norte (Figura 1). De geometria com orientação geral NS, com alguns setores NW, é definido por segmentos lineares dominados por falésias marinhas ativas, sobrepostas por campos dunares e com praias arenosas defrontantes ou alternadas em forma de baías parabólicas, ou em 'anzol'. Este arranjo alinhado é interrompido nas desembocaduras de estuários, que formam vales encaixados de relevos planos e baixos, entre os principais rios: Cunhaú-Curimataú, Potengi e Ceará Mirim, onde se abrigam ecossistemas manguezais, complexos lagunares e planícies deltaicas.

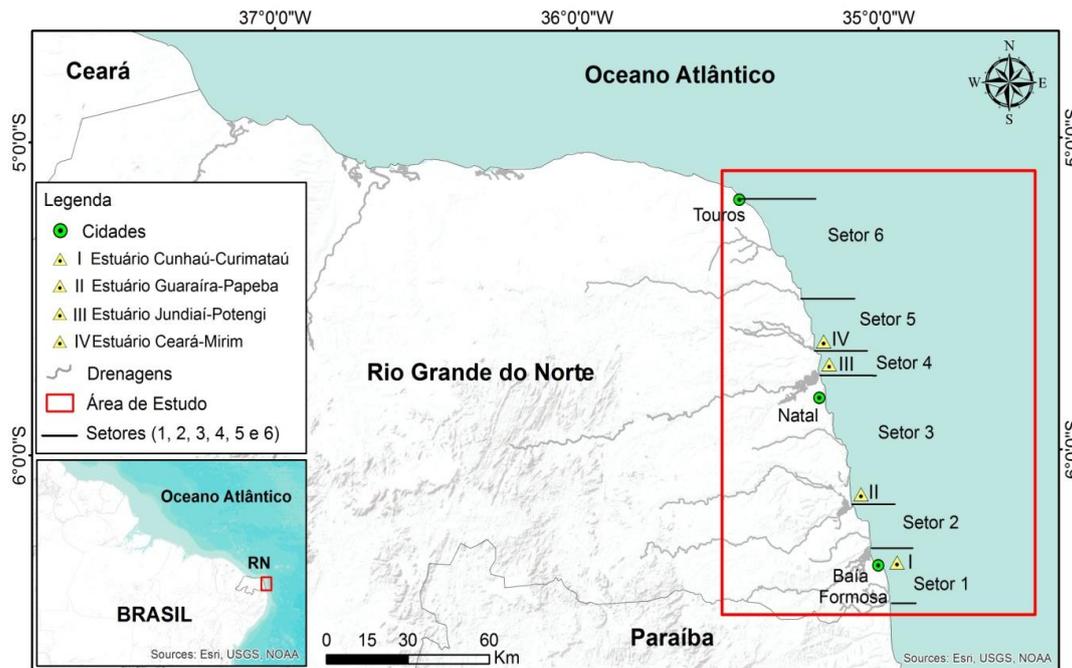


Figura 1. Mapa de localização do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte (RN), com indicação dos principais estuários e da subdivisão sugerida em setores costeiros.

2.1 Aspectos Geológicos e Geomorfológicos

No contexto geológico, o Litoral Oriental do RN é fundado no embasamento cristalino Pré-cambriano, densamente interceptado por extensas zonas de cisalhamento brasileiras, sobreposto por rochas sedimentares da bacia sedimentar Pernambuco-Paraíba do Cretáceo. Estas estão recobertas, discordantemente, pelas litofácies siliciclásticas da Formação Barreiras que, comumente, encontram-se sobrepostos por sedimentos quaternários (BEZERRA; AMARO, 1998; BARRETO et al., 2004).

A costa oriental do Nordeste do Brasil está posta em margem passiva na porção intraplaca da América do Sul, onde a estruturação morfotectônica definiu a compartimentação em conjuntos intercalados de grábens e horsts assimétricos representantes da reativação, iniciada no Cretáceo, de zonas de cisalhamento do Ciclo Brasileiro em pares conjugados de zonas de falhas de direção geral NE e NW. Evidências indicam a continuidade das reativações desse padrão de zonas de falhas por todo o Cenozoico, pelo menos do Mioceno ao Quaternário. Esta estruturação de zonas de falhas é condicionante dos padrões retangulares e paralelos de sistemas de drenagens e lagoas, comuns nos vales encaixados e nos platôs das superfícies aplainadas da Formação Barreiras, e das feições topográficas lineares, como escarpas e alinhamentos de escarpas, que controlam os depósitos sedimentares do Quaternário (BEZERRA; AMARO, 1998; BEZERRA et al., 2001).

Os afloramentos da Formação Barreiras dominam o Litoral Oriental formando os extensos tabuleiros costeiros que terminam na linha de costa em expressivas falésias marinhas ativas. Por vezes, estão recobertos por depósitos siliciclásticos da Formação Potengi descritos como sedimentos eólicos retrabalhados e com contribuições de paleossolos da Formação Barreiras (MARTINS; SANTOS JÚNIOR; CASTRO, 2014). As diferentes propriedades geotécnicas dos estratos sedimentares, a ocorrência de recursos de proteção contra as forças oceânicas, como uma faixa de praias defrontantes e os episódios de precipitações são os principais fatores que controlam o recuo dessas falésias ativas (SANTOS JÚNIOR et al., 2011). A retração das falésias é marcada por tombamentos, deslizamentos e a queda de blocos, constituindo depósitos de tálus no sopé das escarpas, que servem de proteção das escarpas frente à ação abrasiva da energia de ondas e correntes (SANTOS JÚNIOR et al., 2011, CÂMARA et al., 2019).

Alinhados à costa atual, ocorrem faixas de arenito de praia (beachrocks), que assinalam a posição de antigas linhas de praias e que atuam protegendo trechos desse litoral contra a ação direta das ondas (BLANCO-CHAO et al., 2014). As faixas de recife de arenito de praia se sucedem desde as zonas de intermarés, sobretudo, até porções

submersas aflorantes apenas em condições de baixa-mar, variando tanto em forma quanto em tamanho (VIEIRA; ROS, 2006). Os recifes de arenitos estão submetidos a fraturamento gravitacional de orientação NS, paralelo ao acamamento sedimentar e à zona costeira, articulada a outro ortogonal ao acamamento de direções geral EW, e outros dois conjuntos oblíquos NE e NW, que estão relacionados à erosão hidrodinâmica nas camadas de base (BEZERRA et al., 2005).

As praias arenosas estendem-se por 117,2 km de extensão, ou 62,6% do Litoral Oriental, são suavemente planas, de largura variável e, em muitos setores, encontram-se intensamente ocupadas e submetidas às aceleradas alterações de suas características cênicas e aos intensos processos erosivos (AMARO et al., 2014; VITAL et al., 2018). Os componentes morfológicos das praias se apresentam com uma ampla seleção de partículas de areia que varia de muito fina a média na zona do antepraia e na zona do estirâncio, a médio no pós-praia (AMARO et al., 2014; SCUDELARI et al., 2016), classificadas como do tipo dominadas por ondas e modificadas por marés, formando principalmente praias reflexivas a intermediárias (VITAL et al., 2018).

2.2 Processos Costeiros

O Litoral Oriental do RN é dominado pelos sistemas anticiclônico de Alta Pressão do Atlântico Sul (APAS), pelos ventos alísios de leste e sudeste na borda do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e pelos processos costeiros ativos (ondas, marés e correntes, ventos), como agentes modeladores da costa ao longo de todo o ano.

As bases de dados hidrodinâmicos e oceanográficos mais robustos neste litoral ainda são escassas espacialmente e temporalmente. Existem poucas estações de medições meteorológicas e ausência de medições oceanográficas permanentes. A Figura 2 ilustra os registros de dados climáticos e hidrodinâmicos recuperados para este litoral, englobando aqueles obtidos a partir de medições in situ e os de modelos globais, em malhas de dimensões diversas, e distribuídas ao longo do Litoral Oriental do RN.

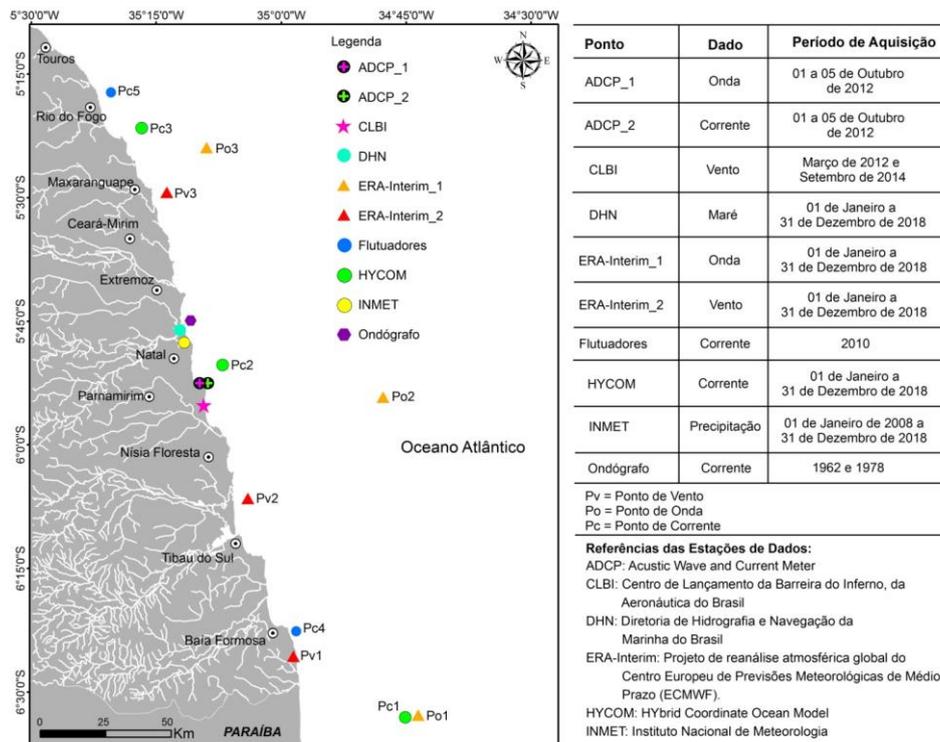


Figura 2. Localização das estações de medições in situ e pontos de modelos globais distribuídos no Litoral Oriental do RN.

Neste litoral, as mesomarés semidiurnas são predominantes, com duas marés altas e baixas desiguais por dia, com amplitudes máximas nas marés de sizígia de 2,7 m e médias em torno de 1,2 m. Nas marés de quadratura as variações estão entre 1,9 m e 0,8 m com amplitude média de 1,1 m.

O Litoral Oriental está submetido à Subcorrente Norte do Brasil (STRAMMA et al., 2003; SCHOTT et al., 2005). No decorrer de 2018, as estimativas de correntes para este setor foram obtidos no modelo oceânico global Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) para três pontos distribuídos em profundidades médias de 4 m (Figura 2). As estimativas fornecidas pelo HYCOM são referentes à média diária para cada profundidade específica (entre 0 e 5.000 m), para cada ponto de grade (intervalos de 0,08°). Além dos valores de correntes, o HYCOM provê ainda: elevação da superfície da água, temperatura da água e salinidade. Os dados do HYCOM foram obtidos através da ferramenta do modelo SisBaHiA, sendo convertidos para o azimute de origem. A Figura 3 indica os valores médios mensais de velocidades de correntes superficiais relativamente baixas, variando entre mínimas de 0,01 m/s e máximas de 0,619 m/s (Pc1), 0,253 m/s (Pc2) e 0,514 m/s (Pc3), com maior intensidade nos meses de maio a agosto, reforçando a importância dos ventos na geração das correntes costeiras. As médias são similares àquelas obtidas por Hazin et al. (2008) com correntógrafo fundeado em área frontal a Natal, cujas correntes variaram entre 0,01 m/s e 0,250 m/s. Cerca de 51% dos valores registrados indicam a maiores velocidades e as mais frequentes nas direções de NNW (especificamente de Az 320° a Az 360°).

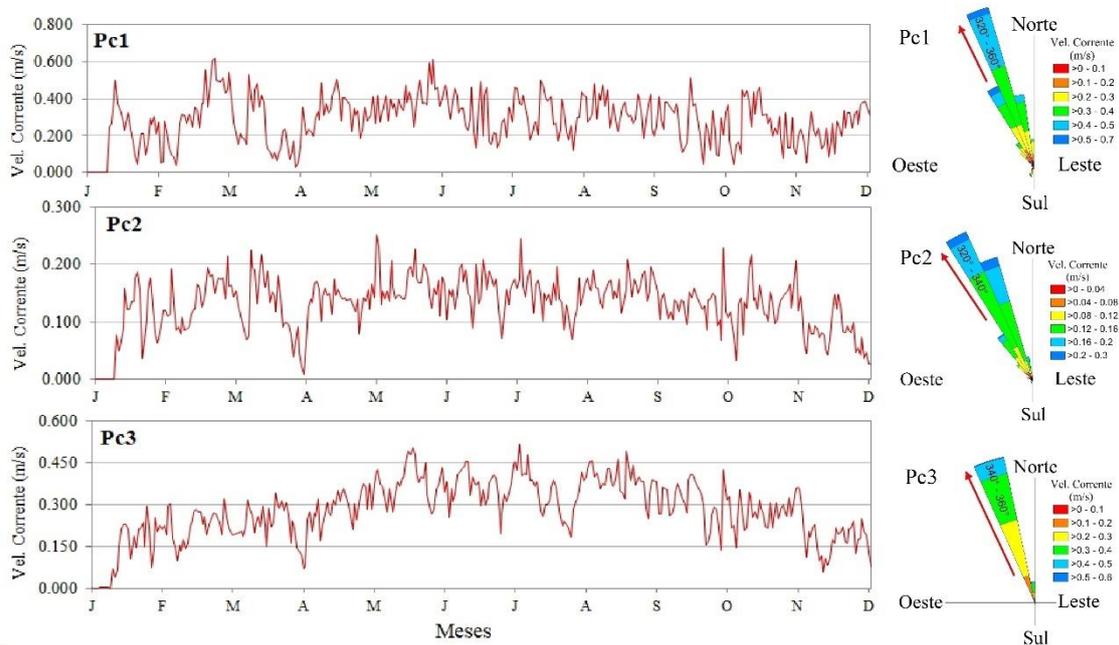


Figura 3. Médias mensais da variação das correntes e da amplitude de maré para os pontos Pc1, Pc2 e Pc3 distribuídos ao longo do Litoral Oriental do RN, conforme a Figura 2. (a) Velocidade das correntes superficiais (m/s) e padrões direcionais (°).

A agitação marítima no Litoral Oriental mostra pouca variabilidade anual de cerca de 1,5m, alcançando intensidade máxima entre os meses de agosto e setembro (INNOCENTINI et al., 2005, ALMEIDA et al., 2015), acompanhando padrões de ventos (SILVA, 2013). A Figura 4 apresenta a série temporal de dados de ondas de 1979 a 2019, para três pontos localizados na zona costeira (Figura 2). As estimativas das ondas foram obtidas por reanálise atmosférica do modelo global ERA-Interim. Ao longo da série temporal, as ondas mais frequentes ocorreram entre as alturas significativas de 1,2 m a 2,0 m para ambos os pontos, com padrões direcionais predominantes variando entre 80° a 120° (E-SE) influenciados, sobretudo pelos distúrbios de leste na componente ESE (Leste - Sudeste). Verificou-se que as ondas acima de 2,0 m, de baixa frequência, possuem padrões direcionais de 120° a 160° (ESE – SSE), que recebem influência dominante dos ventos alísios e da movimentação da Zona de Convergência Intertropical.

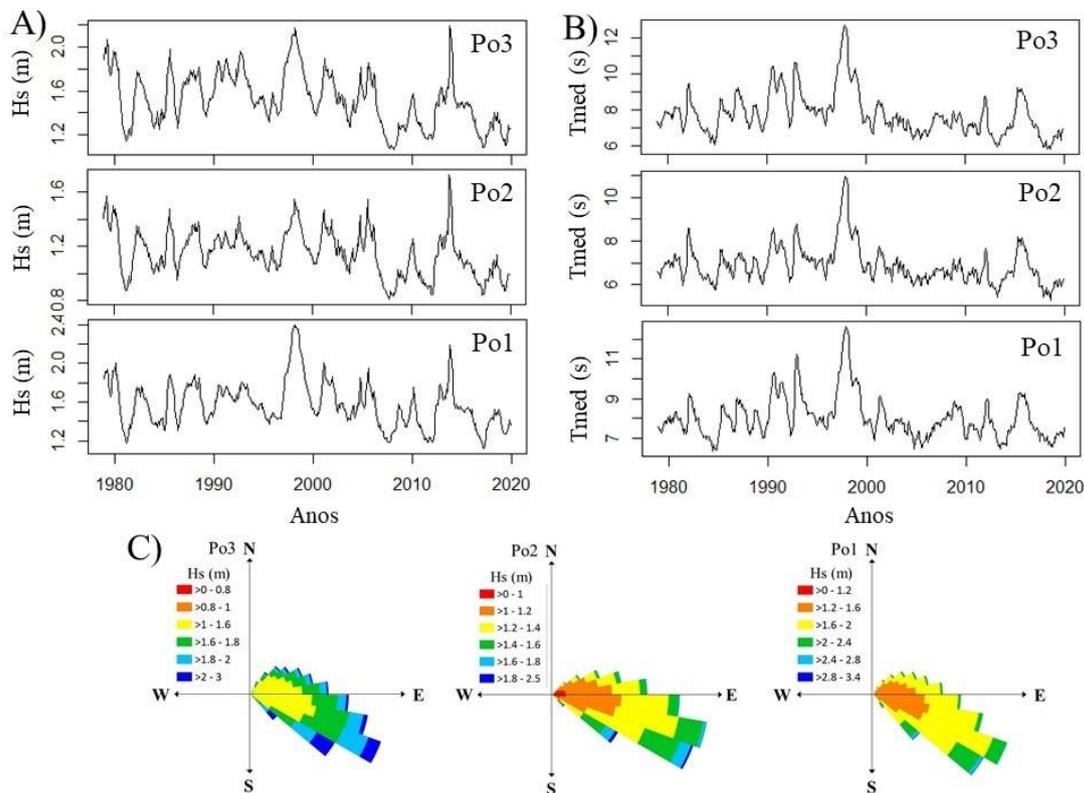


Figura 4. Médias mensais do regime de agitação marítima no Litoral Oriental do RN. (a) Altura significativa e período médio da onda nos pontos Po1, Po2 e Po3, conforme localização dos pontos na Figura 2; (b) Direções média da onda nos pontos Po1, Po2 e Po3.

3. Materiais e Métodos

Neste artigo foi adotado, o termo linha de praia para designar a localização espacial precisa do limite entre porção seca e molhada (SCHWARTZ, 2005) destacado nas praias arenosas pelo alcance da maré mais alta no dia do imageamento pelos sensores remotos (BOAK; TURNER, 2005). Nos setores de predominância das falésias marinhas ativas, a linha de praia foi estabelecida no limite do sopé da escarpa com a face de praia. Trata-se de um argumento geométrico bidimensional, em acordo com a escala de análise baseada nas resoluções espaciais das imagens de satélites, que no contexto geológico registra o processo de erosão, deposição e transporte de sedimentos que esculpe tridimensionalmente a orla marítima (SCHWARTZ, 2005). Esta metodologia permitiu o mapeamento de 172,3 km de extensão do Litoral Oriental, ou cerca de 92%, entre falésias marinhas e praias arenosas, sendo os 8% restantes referentes aos trechos que assinalam as desembocaduras de rios, estuários e do complexo lagunar de Guaraíra.

3.1 Processamento Digital de Imagens

A linha de praia foi usada como referência na avaliação dos processos de erosão e acreção no período temporal de longo prazo, entre os anos de 1988 e 2018. As alterações de erosão e acreção nas linhas de praia foram avaliadas a cada década para o período, abalizadas nos anos 1988, 1998, 2008 e 2018, com imagens multiespectrais (bandas do visível ao infravermelho médio) ortorretificadas do satélite LANDSAT dos sensores Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) e Operacional Land Imager (OLI). As imagens multiespectrais (bandas do visível ao infravermelho próximo) ortorretificadas do sensor RapidEye Earth Imaging System (REIS) da constelação de microssatélites RapidEye foram utilizadas exclusivamente para delineamento em detalhe das faixas de beachrocks e das falésias marinhas ativas, como sumariza a Tabela 1.

Tabela 1. Relação das imagens de satélites-sensores, as fontes, as datas de imageamento e as resoluções espaciais, usadas na distinção das morfologias costeiras do Litoral Oriental do RN.

Fonte	Satélite-Sensor	Data de Imageamento	Resolução Espacial (m)	Delineamento
INPE	LANDSAT 5-TM	05.09.1988	30	Linha de praia
INPE	LANDSAT 7-ETM+	23.10.1998	30	Linha de praia
USGS	LANDSAT 5-TM	05.11.2008	30	Linha de praia
USGS	LANDSAT 8-OLI	28.09.2018	30	Linha de praia
MMA	RapidEye-REIS	08.10.2014	5	Falésias/beachrocks
MMA	RapidEye-REIS	03.06.2014	5	Falésias/beachrocks
MMA	RapidEye-REIS	08.01.2014	5	Falésias/beachrocks
MMA	RapidEye-REIS	31.05.2014	5	Falésias/beachrocks
MMA	RapidEye-REIS	15.09.2015	5	Falésias/beachrocks
MMA	RapidEye-REIS	31.05.2014	5	Falésias/beachrocks
MMA	RapidEye-REIS	11/03.2014	5	Falésias/beachrocks
MMA	RapidEye-REIS	04.05.2014	5	Falésias/beachrocks
MMA	RapidEye-REIS	30.06.2014	5	Falésias/beachrocks

¹ INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; USGS - United States Geological Survey; MMA – Ministério do Meio Ambiente.

Todas as imagens foram georreferenciadas no sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator na Zona 25-Sul e no datum SIRGAS2000, subsidiadas com pontos de referência reconhecidos na imagem de satélite mais recente (LANDSAT 8-OLI de 2018) e na coleta de pontos de controle no terreno (GCP - Ground Control Points) integrantes da Rede Geodésica do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte (FERREIRA; AMARO; SANTOS, 2014), cujas coordenadas geodésicas foram definidas com o geoposicionamento no Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS - Global Navigation Satellite System) pelo método relativo estático a partir das estações RNNA (Natal/RN), RNMO (Mossoró/RN) e RNCG (Campina Grande/PB) da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (RBMC). O número de GCP variou entre 20 e 30, conforme o local, todos bem distribuídos nas imagens, seguindo feições marcantes e pouco mutáveis da paisagem natural ou as infraestruturas no terreno.

Atualmente, mesmo as imagens multiespectrais da série de satélites LANDSAT sendo oferecidas pelo United States Geological Survey (USGS), já no nível de georreferenciamento, considerado adequado para análise de séries temporais (Nível L1T), algumas inconsistências na geolocalização podem interferir na precisão dos resultados comparativos, sobretudo, em se tratado de estudos de variações de linha de praia (PARDO-PASCUAL et al., 2018). A incerteza de geolocalização para as imagens multiespectrais do LANDSAT 8-OLI, por exemplo, alcança 12 m de erro circular. O procedimento metodológico proposto que emprega o erro médio quadrático (RMS), obtida a partir do controle com os GCP e pontos de referência para cada imagem, permitiu alcançar a acurácia geométrica de cerca de 1m, realizado a partir da Eq. (1) (MENESES; ALMEIDA, 2012).

$$RMS = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2} \quad (1)$$

onde: x_i e y_i - são coordenadas transformadas; x_r e y_r - são coordenadas de referência.

3.2 Identificação e Extração da Linha de Praia

Na detecção da linha de praia foi usado o método Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), que emprega a razão normalizada da diferença entre as bandas espectrais do Verde (banda 2 nos sensores TM e ETM+ e banda 3 no OLI) e do Infravermelho Médio dos sensores (banda 5 nos sensores TM e ETM+ e banda 6 no OLI) na série LANDSAT (XU, 2006). Este método mostrou-se vantajoso ao realçar a distinção entre pixels marcadores da presença da água quando comparados aos outros dominados por solo exposto, vegetação e áreas construídas. Após o cálculo do MNDWI para as imagens LANDSAT das décadas selecionadas, foi realizada visualmente a extração vetorizada do posicionamento das linhas de praias em ambiente de SIG.

3.3 Taxa de Evolução da Linha de Praia

As taxas de variações da linha de praia foram calculadas na ferramenta Digital Shoreline Analysis System (DSAS) em ambiente de SIG (THIELER et al., 2009). O cálculo refere-se ao uso de módulos estatísticos End-Point Rate (EPR) e o Linear Regression Rate (LRR) que proveem a taxa média de variação da linha de praia ao longo de um intervalo de tempo, e o Net Shoreline Movement (NSM) que mede a distância de mudança em metros entre a linha de praia mais antiga e a aquela mais recente. A comparação foi feita entre as linhas de praia extraídas nas imagens LANDSAT, representativas para cada década, tendo como referência transectos ortogonais a uma linha base, que descreve a geometria da linha de praia, postos com a seguinte parametrização: posicionamento da linha de base a 500 m onshore; espaçamento entre cada transecto de 100 m; distância de suavização em 500 m, que é útil por ocorrerem linhas de praia curvilíneas (HIMMELSTOSS et al., 2018).

3.4 Incertezas e Análise de Erros

Dois tipos de incertezas são fontes comuns de erros que afetam a acurácia na avaliação histórica das taxas de variação entre linhas de praia: a incerteza posicional e a incerteza de medição (FLETCHER et al., 2003). Tais incertezas são aleatórias e não correlacionadas, mas podem ser integradas por uma única medida (E_t) expressa na Eq. (2), conforme a estratégia de Fletcher et al. (2003), Lira et al. (2016) e Nassar et al. (2018).

$$E_t = \sqrt{E_p^2 + E_g^2 + E_d^2} \quad (2)$$

onde: E_d - erros associados à digitalização da linha de praia; E_p - erro relacionado ao tamanho do pixel; E_g - erro de georreferenciamento da imagem.

Neste artigo, a incerteza total estimada (E_a) foi obtida por meio do cálculo do erro relativo à posição da linha de praia para as quatro datas de imagens LANDSAT, perfazendo o período total de 30 anos (Tabela 2): E1988, E1998, E2008 e E2018, e o período total de análise de erros entre elas (LIRA et al., 2016; NASSAR et al., 2018), como indica a Eq. (3).

$$E_a = \frac{\sqrt{E_{1988}^2 + E_{1998}^2 + E_{2008}^2 + E_{2018}^2}}{\text{Período Total (anos)}} \quad (3)$$

Portanto, o erro considerado na análise da taxa de variação da linha de praia para o período total de análise para as três décadas foi estimado em $\pm 2,30$ m/ano (Tabela 2).

Tabela 2. Estimativas dos erros associados para cada fonte de dados das linhas de praia para os anos de 1988, 1998, 2008 e 2018.

Erros Estimados	1988 (m)	1998 (m)	2008 (m)	2018 (m)
Erro do Pixel (E_p)	± 30	± 30	± 30	± 15
RMSE de erro de georreferenciamento (E_g)	$\pm 0,95$	$\pm 0,91$	$\pm 0,98$	$\pm 0,61$
Erro de digitalização (E_d)	$\pm 22,5$	$\pm 22,5$	$\pm 22,5$	$\pm 16,7$
Erro total (E_t)	$\pm 37,53$	$\pm 37,52$	$\pm 37,53$	$\pm 22,84$
Erro anual para 30 anos (E_a)				

As incertezas da posição da linha de praia entre duas posições em datas distintas (A e B) usadas no cálculo do EPR (EPR_{unc}) é computada automaticamente pelo DSAS (HIMMELSTOSS et al., 2018) segundo a Eq. (4).

$$EPR_{unc} = \frac{\sqrt{(\text{uncy } A)^2 + (\text{uncy } B)^2}}{\text{Date } A - \text{Date } B} \quad (4)$$

onde: uncy A - é incerteza do campo de atributo da linha de praia A; uncy B - é incerteza do campo de atributo da linha de praia B; date A - é a data da linha de praia A (mais recente, expressa em ano); date B - é a data da linha de praia B (mais antiga, expressa em ano).

4. Resultados

4.1. Análise da Intensidade da Erosão lo Litoral Oriental do RN

O Litoral Oriental foi dividido em seis setores, de 1 a 6 e de sul para norte, abalizados na geometria do segmento costeiro entre as desembocaduras dos estuários e a orientação NNW da costa para avaliação dos potenciais efeitos da erosão, acreção e taxas de alteração costeira entre os anos de 1988 e 2018, como mostra a Figura 5.

A magnitude da erosão foi mais acentuada no setor 3, como pode ser observado na Figura 5. A evolução longitudinal das taxas de erosão e acreção, dispostas no gráfico de barras, indica a tendência da magnitude erosiva, que se mostra mais intensa nos setores 1, 2 e 3, embora no setor 1 ocorra um segmento fortemente deposicional, marcado por 3 perfis praias situados na margem sul da desembocadura de estuário Cunhaú-Curimataú, alcançando a maior taxa de todo o período de análise, 19,57 m/ano. Nestes três setores, o percentual erosivo foi sempre superior à deposição, correspondendo a 54%, 51% e 61% dos perfis praias, respectivamente. Nos setores 4, 5 e 6, imediatamente a norte da desembocadura do estuário do rio Jundiá-Potengi, a magnitude deposicional foi superior, representando 81%, 80% e 62% dos perfis por setor, respectivamente.

Assim, a análise por distribuição percentual dos perfis praias ao longo do litoral mostra predominância geral de dois segmentos: ao sul do estuário do rio Jundiá-Potengi, onde há tendência erosiva dominante, e a partir do estuário do rio Jundiá-Potengi para norte, com influente tendência deposicional.

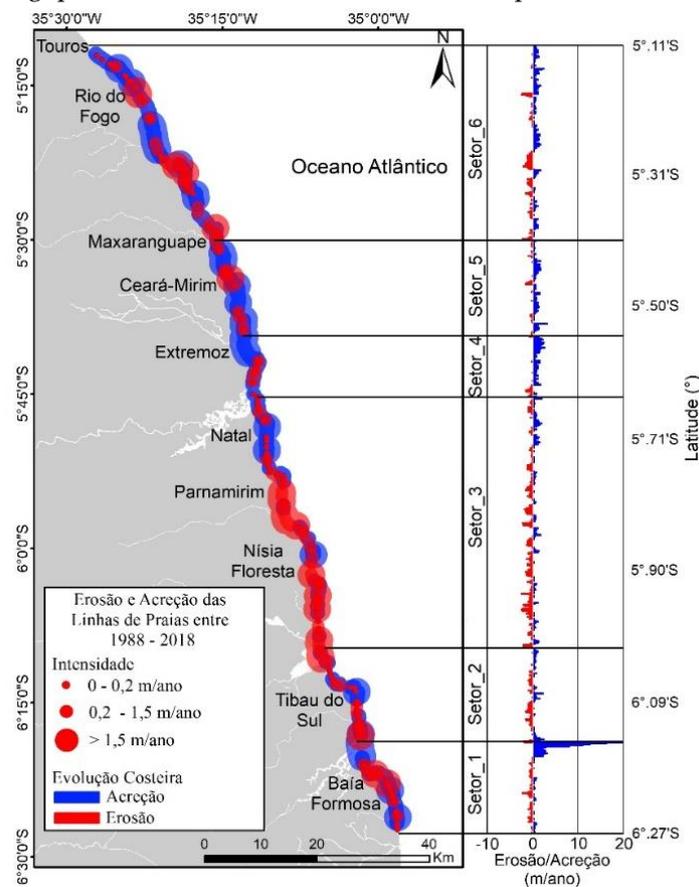


Figura 5. Trechos com maiores taxas de erosão e acreção para os setores do Litoral Oriental do RN. Os círculos indicam as magnitudes de erosão (vermelhos) e de acreção (azuis), para as três classes de dinâmicas da linha praia (0,0 – 0,2 m/ano, 0,2 – 1,5 m/ano e >1,5 m/ano). A barra à direita representa a as taxas de variação das linhas de praia (m/ano) por grau de latitude.

A Tabela 3 exibe as taxas médias de variação de erosão e/ou acreção nas linhas de praia para cada setor no decorrer das últimas três décadas. A análise das taxas médias de variação das linhas de praia no longo prazo para o Litoral Oriental do RN foi baseada em 1.715 transectos, ortogonais a linha de praia, espaçados entre si em 100m. Do total de transectos cerca de 45% indicaram balanço final erosivo para as últimas três décadas, presentes em todos os setores, mas com destaque para os setores 2 e 3. Os setores 2 e 3 tiveram taxas médias de erosão de -0,05 m/ano e -0,18 m/ano, respectivamente. Aproximadamente 43,9 km de extensão desses dois setores estão submetidos a balanço sedimentar negativo nas três décadas. Os setores 1, 4, 5 e 6 mostraram taxas médias de deposição de 0,67 m/ano, 0,55 m/ano, 0,68 m/ano e 0,17m/ano, respectivamente. Os setores 1 e 5 mostraram as maiores taxas médias de deposição, enquanto o setor 6 mostrou-se como o mais estável nas últimas três décadas. Assim, do total avaliado de 172,3 km de extensão do Litoral Oriental, 76,5 km, ou cerca de 45%, esteve submetido a erosão e os demais 95,8 km de extensão indicaram balanço deposicional. Embora alguns trechos mostrassem altas taxas de erosão, o balanço total sugeriu taxa média acrecionária de 0,15 m/ano, ou tendência de acreção moderada.

Tabela 3. Taxa média da variação das linhas de praia entre 1988 e 2018 no Litoral Oriental do RN.

Setores	Taxa da Regressão Linear (m/ano) entre 1988 e 2018				
	Taxa Média (m/ano)	Número de Transectos	Erosão/Extensão (km)	Acreção/Extensão (km)	Extensão Total (km)
Setor 1	0,67	199	10,9	9,0	19,9
Setor 2	-0,05	206	10,5	10,1	20,6
Setor 3	-0,18	550	33,4	21,5	54,9
Setor 4	0,55	100	1,9	8,1	10,0
Setor 5	0,68	193	10,9	8,3	19,2
Setor 6	0,17	467	15,8	31,9	47,7

A Tabela 4 mostra as taxas máximas de variação das linhas de praias identificadas nos principais trechos de cada um dos seis setores, ou seja, os maiores eventos de erosão e acreção. A maior taxa deposicional de sedimentos, de 19,57 m/ano entre 1988 e 2018, foi registrada no setor 1, na margem norte da foz do estuário do rio Cunhaú-Curimataú, no Município de Baía Formosa, o que equivale a 557 m de progradação da linha de praia. O setor 3 teve o registro de maior taxa média de erosão de -3,25 m/ano, ou o análogo ao recuo da linha de praia em 98 m, sucedido na margem norte da foz do complexo lagunar de Guaraíras.

Tabela 4. Taxas máximas de variação da linha de praia entre 1988 e 2018 no Litoral Oriental do RN.

Setores	Varição	Taxa (m/ano)	Localidade
Setor 1	ErosãoMax	-1,93	Porção central da praia urbana de Baía Formosa
	AcreçãoMax	19,57	Margem direita do rio Curimataú, Município de Baía Formosa
	ErosãoMax	-2,38	Margem esquerda do rio Curimataú, Barra do Cunhaú, Município de Canguaretama
Setor 2	AcreçãoMax	2,02	Porção central da praia Barra do Cunhaú, Município de Canguaretama
Setor 3	ErosãoMax	-3,25	Margem esquerda da foz do complexo lagunar de Guaraíras, Município de Senador Georgino Avelino
	AcreçãoMax	1,87	Sul da praia de Pirangi do Sul, Município de Nísia Floresta
Setor 4	ErosãoMax	-2,05	Praia da Redinha, Município de Natal
	AcreçãoMax	2,35	Margem esquerda da Barra do Rio, Município de Extremoz
Setor 5	ErosãoMax	-1,52	Praia de Muriú, Município de Ceará-Mirim
	AcreçãoMax	3,31	Promontório na praia de Pitanguí, Município de Extremoz
Setor 6	ErosãoMax	-2,99	Praia de Perobas, Município de Rio do Fogo
	AcreçãoMax	2,81	Margem direita do rio Punaú, Município de Rio do Fogo

Embora o balanço final de alterações de longo prazo indique, para os 172,3 km de extensão do Litoral Oriental, a tendência deposicional de cerca de 0,17 m/ano, as taxas médias e máximas em cada década revelam comportamento diferenciado, com episódios alternados de transgressão e outros de regressão, conforme a Tabela 5. Verifica-se como balanço geral das taxas de sedimentação que nos setores 1, 3, 4 e 5 a tendência foi transgressiva, enquanto nos setores 2 e 6, embora a tendência tenha sido regressiva nas duas primeiras décadas, na última década a tendência foi transgressiva.

Tabela 5. Taxas máximas e médias das variações das linhas de praia nos intervalos das décadas de 1988 a 1998, 1998 a 2008 e 2008 a 2018, para setores do Litoral Oriental do RN.

Setores	Taxas líquidas (m/ano) e extensão de ocorrência (km) 1988 - 1998						
	Balanço	Erosão			Acreção		
	Geral (m/ano)	T _{Máxima} (m/ano)	T _{Média} (m/ano)	Extensão (km)	T _{Máxima} (m/ano)	T _{Média} (m/ano)	Extensão (km)
Setor 1	4,16	-3,54	-1,29	2,2	25	4,84	17,6
Setor 2	0,74	-4,48	-1,31	5,0	4,65	1,39	15,6
Setor 3	0,90	-3,51	-1,18	13,2	8,76	1,56	41,7
Setor 4	1,22	-2,94	-1,15	1,1	3,94	1,54	8,7
Setor 5	1,31	-3,28	-1,10	5,1	7,41	2,18	14,1
Setor 6	0,87	-8,25	-1,8	15,6	9,24	2,20	31,1
	Taxas líquidas (m/ano) e extensão de ocorrência (km) 1998 - 2008						
Setor 1	1,78	-4,01	-0,86	5,7	17,4	2,85	14,1
Setor 2	1,05	-2,49	-0,74	4,4	7,65	1,54	16,2
Setor 3	0,30	-4,27	-1,01	22,6	10,52	1,21	32,3
Setor 4	0,92	-1,38	-0,47	2,3	5,87	1,36	7,5
Setor 5	0,34	-3,50	-1,13	8,9	4,47	1,09	10,3
Setor 6	1,25	-6,07	-1,07	10,9	6,8	1,94	36,0
	Taxas líquidas (m/ano) e extensão de ocorrência (km) 2008 - 2018						
Setor 1	-1,47	-4,46	-2,08	16,2	2,44	1,10	3,6
Setor 2	-0,70	-12,68	-1,59	13,2	5,12	0,87	7,4
Setor 3	-0,24	-7,68	-1,15	30,9	3,38	0,94	24,0
Setor 4	0,90	-1,43	-0,65	1,6	4,01	1,24	8,2
Setor 5	0,20	-2,55	-1,00	6,5	6,52	1,23	12,7
Setor 6	-0,68	-7,34	-2,04	30,1	6,25	1,78	16,6

4.1. Análise Decadal da Erosão/Deposição por Setor Costeiro

4.1.1. Setor 1

Na década de 1988 a 1998, o balanço geral para o setor 1 foi de 4,16 m/ano, com 17,6 km onde predomina a acreção (tendo-se observado em alguns transectos o valor máximo de 25 m/ano) e 2,2 km de extensão com erosão em alguns transectos com a taxa máxima de -3,54 m/ano. Cerca de 10,1 km de extensão da orla marítima do Município de Baía Formosa apresentou a taxa de acreção de 9,75 m (Figura 6). Nos demais segmentos predominam taxas médias de erosão, sobretudo no trecho correspondente à zona urbana. A acreção ocorreu, em valores máximos para o período, até as proximidades da foz do rio Curimataú (Tabela 5).

Entre 1998 e 2008 a taxa média de acreção reduziu de 4,84 m/ano para 2,85 m/ano e o balanço geral para o setor 1 foi de 1,78 m/ano, inferior à década anterior. O incremento da erosão foi mais acentuado na região sul entre Sagi e Baía Formosa e na área urbana da sede municipal, perfazendo cerca de 5,7 km de extensão com taxa média de erosão de -4,01 m/ano, superior à década anterior.

Na década de 2008 a 2018 ocorreu o avanço significativo da erosão em todo o setor 1 (Figura 6), resultando em 16,2 km de extensão com taxa média de erosão de -2,08 m/ano, com balanço geral erosivo em -1,47 m/ano e com taxa máxima de erosão de -4,46 m/ano.

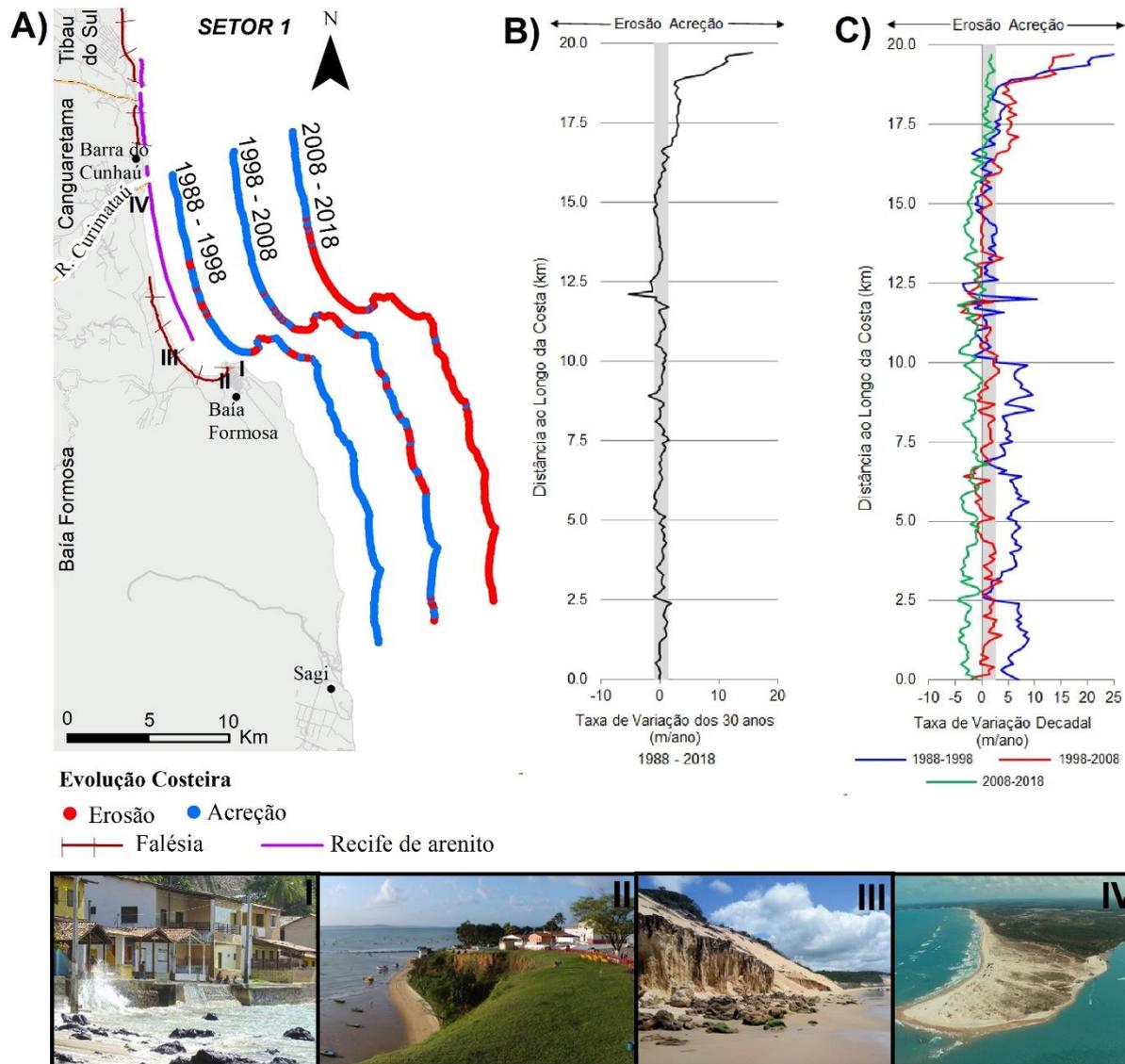


Figura 6. Mapa de evolução costeira do Setor 1. A) Erosão e acreção entre as décadas de 1988-1998/1998-2008 e 2008-2018; B) Taxa de mudança longitudinal às praias de 1988 a 2018; C) Taxas de mudança costeira para as três décadas; I) e II) Casas atingidas pelas marés altas. III) Sede do município instalado no topo da falésia marinha ativa; IV) Erosão das falésias em trechos sem presença de ocupação e/ou atividade antrópica.

4.1.2. Setor 2

O setor 2, localizado entre a foz do rio Curimataú e a desembocadura do complexo lagunar de Guarairas, mostrou balanço geral de 0,74 m/ano, caracterizando a tendência geral deposicional entre 1988 e 1998 (Tabela 5). A taxa erosiva máxima foi de -4,48m/ano, com valor médio de -1,31 m/ano, concentradas na praia de Sibaúma e na praia de Pipa (Figura 7A), em total de 5,0 km de extensão. As taxas de acreção indicaram máximos de 4,65 m/ano e média de 1,39 m/ano, representando cerca de 15,6 km de extensão de linhas de praias em acreção.

Entre 1998 e 2008 nota-se a tendência deposicional, com balanço geral de 1,05 m/ano, redução nas taxas de erosão e, conseqüentemente, aumento significativo nas taxas de acreção (Tabela 5). A taxa máxima de erosão foi de -2,49 m/ano, enquanto a taxa máxima de acreção foi de 7,65 m/ano. No período, houve redução para 4,4 km de extensão de linhas de praia em erosão, comparado à década anterior, enquanto 16,2 km de extensão estavam em acreção, o equivalente a 79% para o setor 2.

Na década de 2008 a 2018, a dinâmica sedimentar foi fortemente marcada pelos processos erosivos (Figura 7), resultando em balanço geral negativo de -0,70 m/ano, com taxa máxima de erosão em -12,68 m/ano, afetando

13,2km de extensão de linhas de praia, com destaque para a área de Barra do Cunhaú onde a erosão representou 131 m de recuo de linha de praia (Tabela 5). A taxa máxima de acreção foi de 5,12 m/ano, com valores médios de 0,87 m/ano, em cerca de 7,4 km de extensão

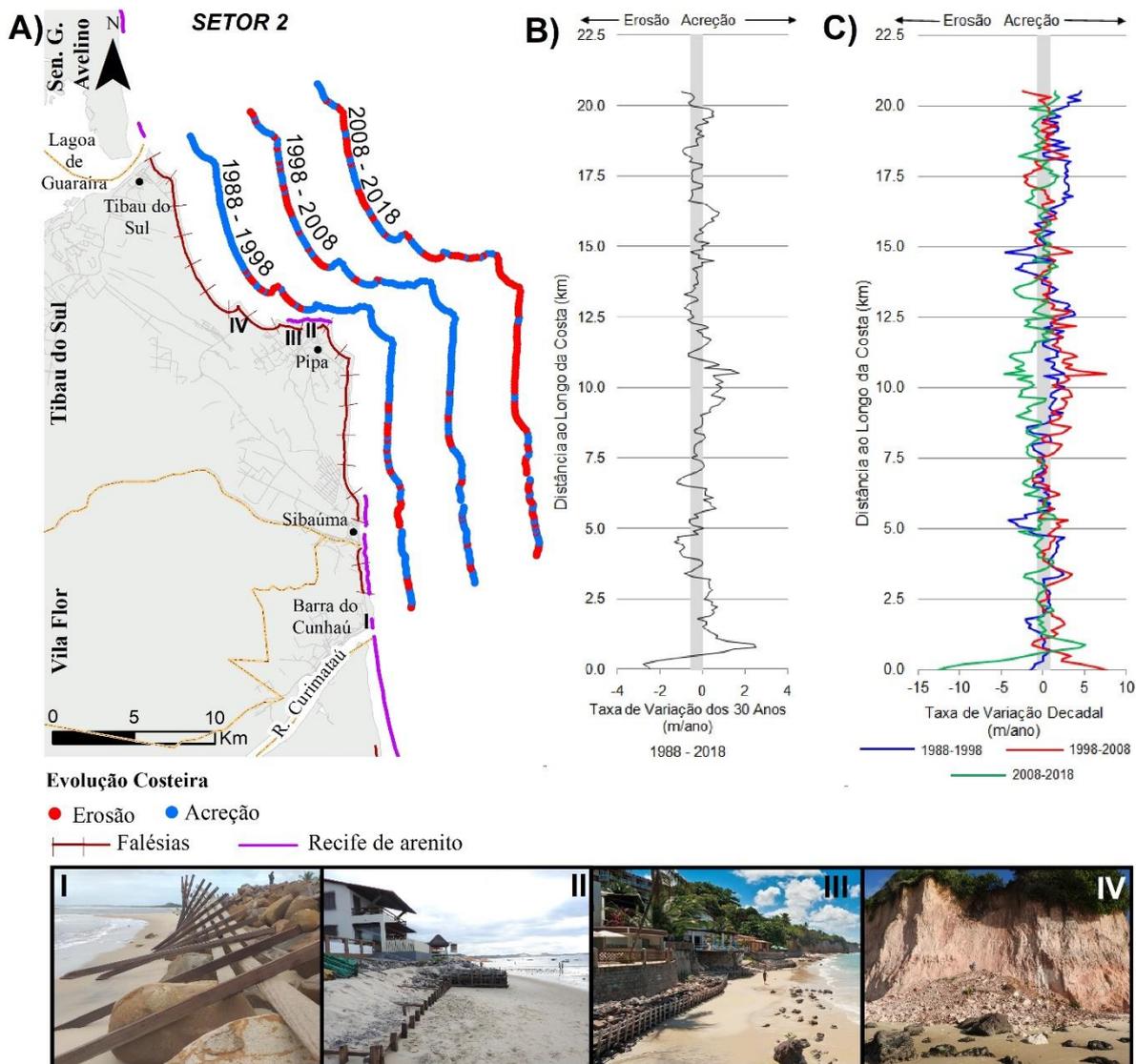


Figura 7. Mapa de evolução costeira do Setor 2. A) Erosão e acreção entre as décadas de 1988-1998/1998-2008 e 2008-2018; B) Taxa de mudança longitudinal às praias de 1988 a 2018; C) Taxas de mudança costeira para as três décadas; I) Estrutura de enrocamento instalados em Barra do Cunhaú como medida emergencial para conter o avanço do mar; II) e III) Gabiões instalados para conter o avanço das marés na praia de Pipa; IV) Colapso e erosão das falésias vivas nas imediações da praia de Pipa.

4.1.3. Setor 3

Situado entre a foz do complexo lagunar de Guarairas e a foz do rio Potengi, é o trecho costeiro mais longo, com 54,9 km de extensão e, sobretudo, com a maior densidade populacional na orla marítima com 20% da população do RN, grande parte no Município de Natal (IBGE, 2019).

No período de 1988 e 1998 os trechos em erosão foram, exatamente, nos locais de maior ocupação na orla marítima, com destaque para as praias: Barreta, Pirangi do Norte, Cotovelo, Ponta Negra, Areia Preta e do Meio (Figura 8A). Tais trechos em erosão correspondem, porém, a apenas 24% do setor 3, onde a erosão máxima registrada foi -3,51 m/ano na praia de Pirangi do Norte, que representou 36,2 m de recuo (Tabelas 5). Nessa década o balanço geral mostrou taxa média de 0,90 m/ano, ou seja, com tendência deposicional (Tabela 5). A taxa média

de acreção nesse período foi de 1,56 m/ano, embora para esse período tenha ocorrido um perfil com taxa máxima de 8,76 m/ano, registrada na praia de Cururu, porção sul do setor 3.

Entre 1998 e 2008 ocorreu acentuada erosão, principalmente entre a foz do complexo lagunar de Guaraíras e a praia de Pirangi do Sul (Figura 8). Nesse período, a taxa máxima de acreção de 10,5 m/ano, com taxa média de 1,21 m/ano, foi identificada na área do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI), acumulando faixa de acreção de 100 m de largura. A taxa máxima da erosão de -4,27 m/ano, ou cerca de 40,8 m de recuo da linha de praia, incidiu na praia do Meio, zona urbana de Natal.

Na década de 2008 e 2018 ocorreu o aumento proeminente da erosão, sobretudo, nas linhas de praias urbanas como: Tabatinga, Pirangi, Cotovelo, Búzios, Ponta Negra e Meio (Figura 8). A taxa máxima da erosão foi de -7,68 m/ano e a taxa média -1,15 m/ano por 31 km de extensão de linha de praia (Tabela 5). A taxa máxima de acreção foi de 3,38 m/ano, o que correspondeu a 34 m avanço na largura de linha de praia (Tabela 5), registrado entre as praias de Tabatinga e Pirangi.

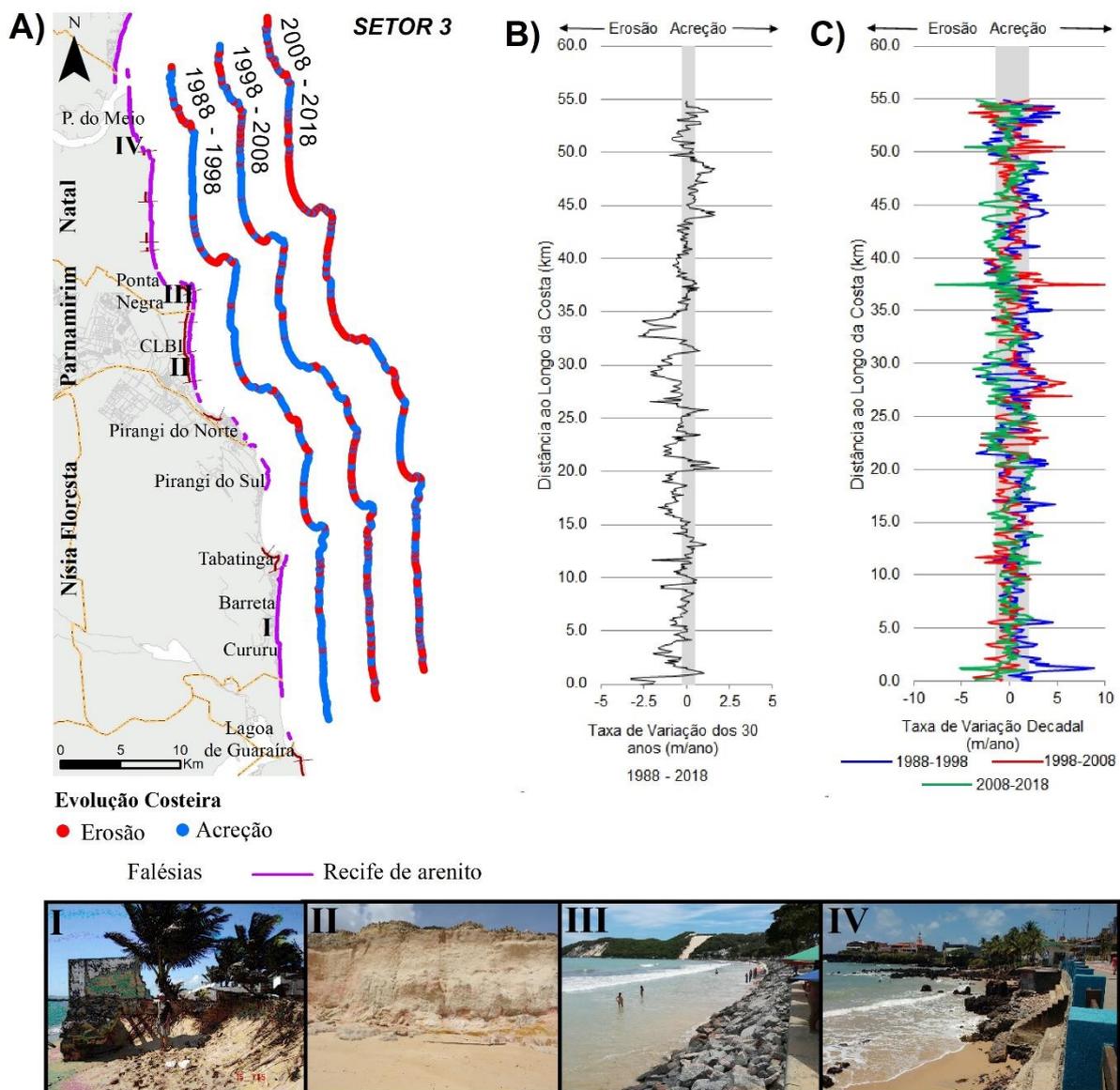


Figura 8. Mapa de evolução costeira do Setor 3. A) Erosão e acreção entre as décadas de 1988-1998/1998-2008 e 2008-2018; B) Taxa de mudança longitudinal às praias de 1988 a 2018; C) Taxas de mudança costeira para as três décadas; I) Casas destruídas pela erosão na praia de Barreta; II) Colapso e erosão da falésia no Centro de Lançamento da Barreira do Inferno; III) Enrocamento de toda extensão da praia urbana de Ponta Negra após, consecutivos episódios de destruição da infraestrutura urbana; IV) Erosão na base do muro de arrimo e calçadão da praia do Meio, em Natal.

4.1.4. Setor 4

O Setor 4 está situado entre a foz do rio Potengi e a Barra do Rio, com maior densidade populacional na zona norte de Natal, entre as praias de Redinha e Genipabu, imediatamente a norte da foz do estuário do rio Potengi. Cerca de 75% dos 10 km de extensão da linha de praia são fronteados por faixas de arenito de praia. Assim, nas análises das evoluções por cada período, o setor 4 apresentou sempre as taxas médias de acreção superiores às taxas médias de erosão, com balanço geral acrecionário de 1,22 m/ano entre 1988 e 1998, 0,92 m/ano entre 1998 e 2008, e 0,90m/ano entre 2008 e 2018 (Tabela 5).

Na década de 1988 a 1998 ocorreram três trechos em erosão, perfazendo apenas 12% da linha de praia do setor 4, com taxa média de erosão de -1,22 m/ano e taxa máxima de -2,94 m/ano, enquanto a taxa máxima de acreção foi de 3,94 m/ano (Tabela 5).

De 1998 a 2008, a taxa média foi de 0,90 m/ano, com registro máximo de acreção de 5,87 m/ano na praia de Santa Rita. A taxa máxima de erosão de -1,38 m/ano foi inferior ao período anterior e aconteceu em segmento da praia da Redinha, com máximo de 13m de recuo da linha de praia (Figura 9).

Entre 2008 e 2018 houve redução no balanço geral acrecionário, mas a acreção sucedeu em 83% das linhas de praia, com taxa máxima de 4,01 m/ano, mas acontecendo igualmente aumento na taxa de erosão para -1,43 m/ano.

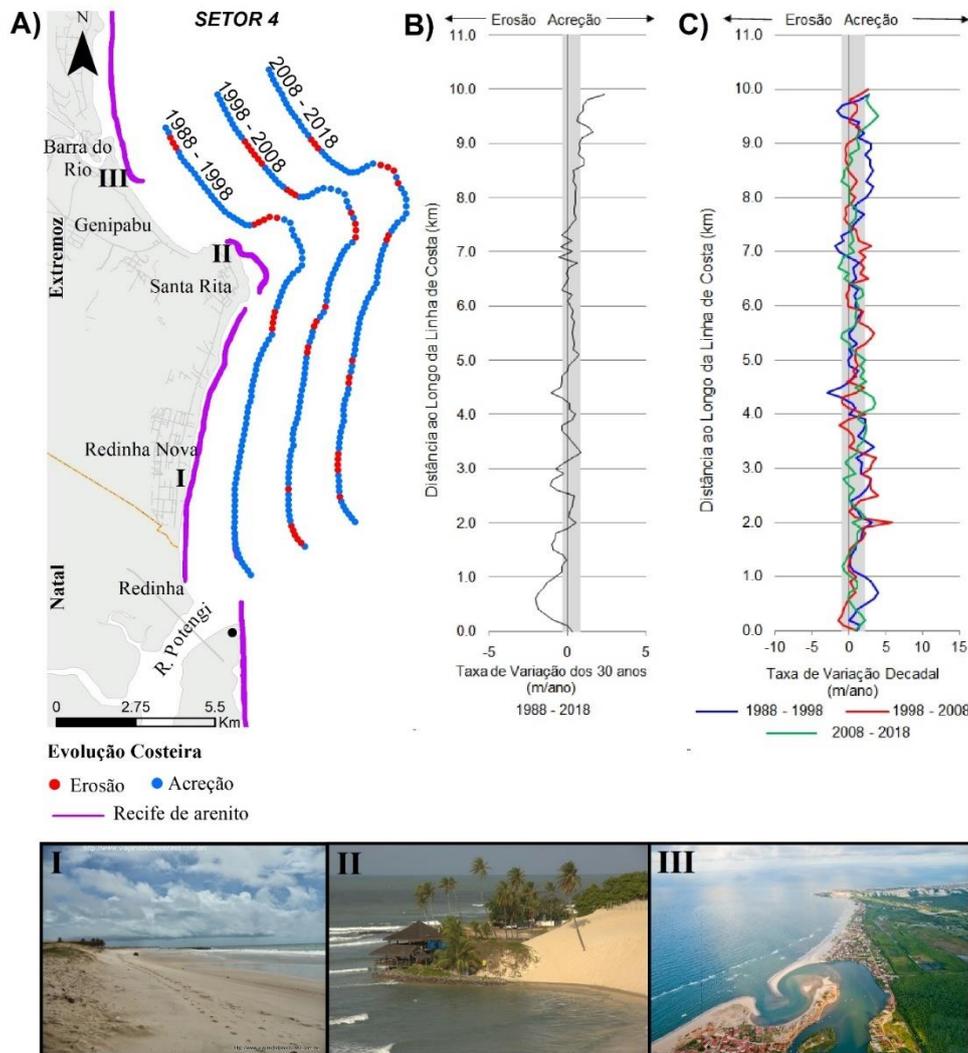


Figura 9. Mapa de evolução costeira do Setor 4. A) Erosão e acreção entre as décadas de 1988-1998/1998-2008 e 2008-2018; B) Taxa de mudança longitudinal às praias de 1988 a 2018; C) Taxas de mudança costeira para as três décadas; I) Praia em condições saudáveis em Redinha Nova; II) Pontal com presença de campo de dunas parcialmente vegetado, mas ocupado por residências; III) Dinâmica sedimentar e ocupação no setor de Barra do Rio, foz do rio Ceará-Mirim.

4.1.5. Setor 5

Este setor possui 19,3 km de extensão de linha de praia situado entre a foz do rio Ceará Mirim e a foz do rio Maxaranguape (Figura 10), sendo as principais praias: Barra do Rio, Pitangui, Graçandu, Jacumã e Muriú. Na zona frontal dessas praias ocorrem faixas de arenitos de praia e igualmente algumas linhas de recifes de corais. Esta configuração geomorfológica compõe importante rota turística no RN e, por isso, recebe significativas visitas ao longo do ano.

Na década de 1988 a 1998, o balanço geral foi acrecionário em 1,31 m/ano, correspondente a 73% das linhas de praia em extensão. A taxa média de acreção foi de 2,18 m/ano e a taxa máxima de 7,41 m/ano, que assinalou acréscimo de 76,4 m de largura na faixa de praia acrescida, ocorrido entre as praias de Barra do Rio e Pitangui (Tabela 5). A taxa média de erosão foi de -1,10 m/ano com taxa máxima de -3,28 m/ano, valor registrado na praia de Jacumã, que apresentou redução em 40 m da faixa de praia (Tabela 5).

Entre 1998 e 2008, embora tenha ocorrido redução no balanço geral comparado à década anterior, ainda foi deposicional em 0,34 m/ano para 66% em extensão da linha de praia do setor 5 (Tabela 5). Contudo, nas praias de Barra do Rio, Pitangui, Graçandú e Muriú a taxa máxima de erosão foi de -3,50 m/ano, significativamente concentrada na praia de Muriú onde ocorreram 33,5 m de recuo no período (Figura 10). A taxa máxima de acreção foi de 4,47 m/ano no trecho referente à praia de Barra do Rio, devido ao aporte de sedimentos provenientes do rio Ceará Mirim que, sazonalmente, exibe a migração do canal na desembocadura, acompanhando a dinâmica sedimentar costeira.

Na década de 2008 a 2018, destaca-se o desequilíbrio no balanço geral deposicional pela intensificação dos processos erosivos (Figura 10). Neste setor, o percentual de perfis negativos foi de 54%. Na taxa média geral ocorreu uma redução para 0,20 m/ano. Em termos erosivos, verifica-se conforme a Tabela 5 que a taxa máxima, mostrou-se inferior a década anterior, com -2,55 m/ano, justificado pelo segmento de maior expressão de erosão ocorrido na praia de Jacumã, cujo recuo foi de 26,3 m. Por outro lado, ocorreu aumento na taxa máxima de acreção, 6,52 m/ano, o correspondente à 67,3 m de avanço em direção ao mar, ocorrido na praia de Graçandú.

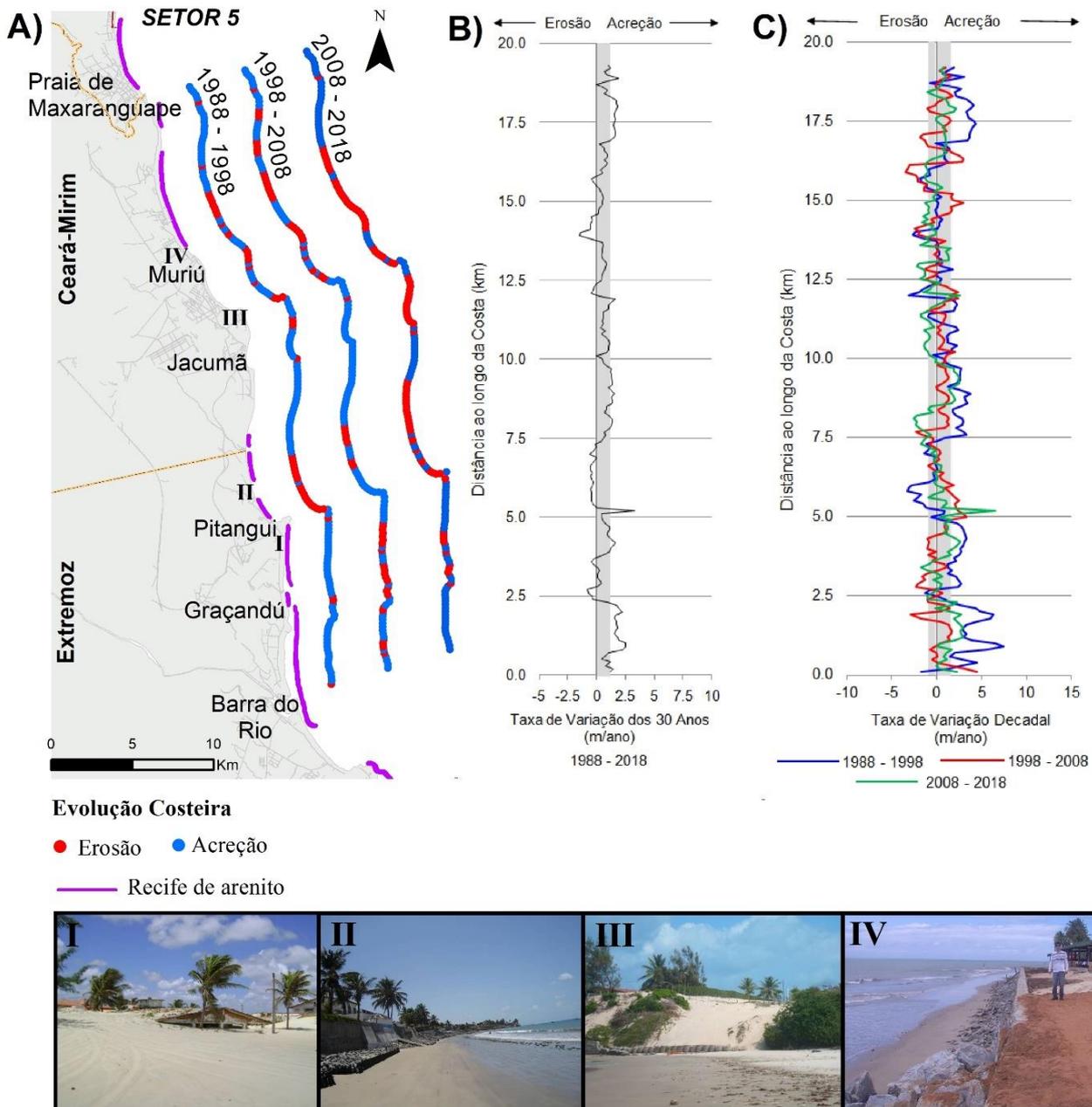


Figura 10. Mapa de evolução costeira do Setor 5. A) Erosão e acreção entre as décadas de 1988-1998/1998-2008 e 2008-2018; B) Taxa de mudança longitudinal às praias de 1988 a 2018; C) Taxas de mudança costeira de longo de curto prazos para as três décadas; I) Soterramento de casas na praia de Pitangui por ação do transporte eólico; II) Enrocamento instalado para conter o avanço das marés na praia de Pitangui; III) Contenção da ação erosiva marinha com sacos de areia na Praia de Jacumã; IV) Estrutura de enrocamento, na orla da praia de Muriú, para contenção do avanço do mar.

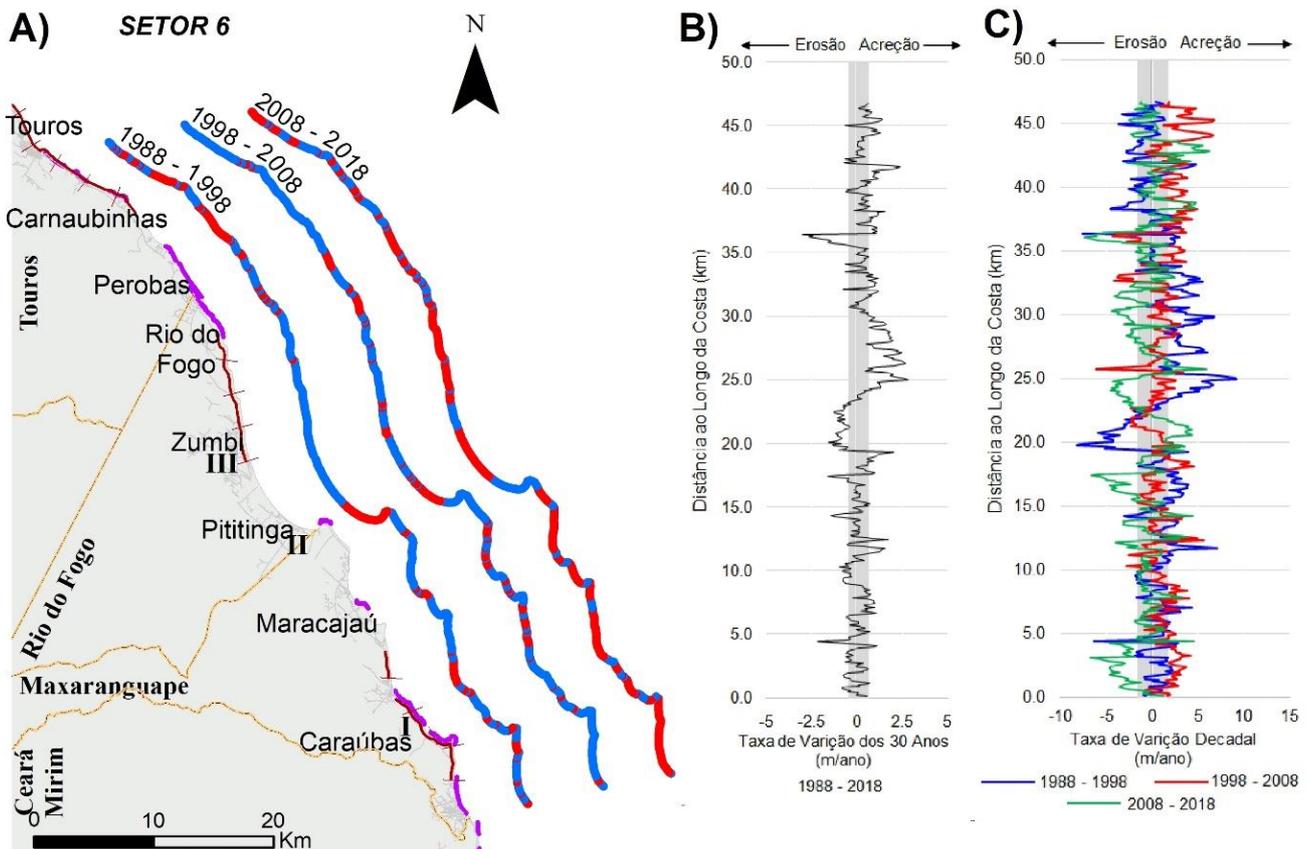
4.1.6. Setor 6

Este setor possui 46,7 km de extensão entre a foz do rio Maxaranguape e a sede municipal de Touros (Figura 11), tendo como principais praias: Caraúbas, Maracajuá, Pititinga, Zumbi, Rio do Fogo, Perobas e Carnaubinhas.

Na década de 1988 a 1998, o balanço geral foi deposicional em 0,87 m/ano para 67% da linha de praia, com taxa máxima de acreção de 9,24 m/ano e destaque para a praia de Zumbi, cujo acréscimo de 96 m na largura da faixa de praia (Tabela 5). A taxa máxima de erosão foi de -8,25 m/ano e a taxa média de -1,8 m/ano, o que correspondeu a 85,3m de recuo de linha de praia nas praias de Pititinga e parte de Carnaubinhas.

Entre 1998 e 2008 houve redução na taxa máxima de acreção para 6,80 m/ano, comparada aos 9,24 m/ano na década anterior, destacando o acréscimo de 64 m em largura na praia de Touros. A taxa máxima de erosão no período foi -6,07 m/ano, com média de -1,07 m/ano, com recuo de 58 m ocorrido na praia de Pititinga.

Na década de 2008 a 2018, predominou o cenário erosivo em todo o setor 6, mesmo nos trechos de praias arenosas abrigadas pela presença de faixas de arenitos de praia defrontantes, como na porção sul do setor 6 e nas praias de Rio do Fogo e Perobas. A taxa máxima de erosão alcançou -7,34 m/ano, enquanto a taxa máxima de acreção foi de 6,25 m/ano. O recuo máximo da linha de praia foi de 75 m na praia de Perobas, enquanto o maior ganho de 65 m de linha de praia ocorreu na praia de Carnaubinhas. Como se observa na Figura 11, para essa década a dinâmica erosiva foi dominante.



Evolução Costeira

- Erosão ● Acreção
- Falésias — Recife de arenito



Figura 11. Mapa de evolução costeira do Setor 6. A) Erosão e acreção entre as décadas de 1988-1998/1998-2008 e 2008-2018; B) Taxa de mudança longitudinal às praias de 1988 a 2018; C) Taxas de mudança costeira para as três décadas. I) Erosão marinha provocando a destruição de casa na praia de Caraiúbas; II) Abertura de canal, por iniciativa da população local, na praia de Pititinga para escoamento das águas fluviais; III) Erosão e dinâmica sedimentar da foz do rio Punaú, com destaque para a destruição de casas.

5. Discussão

Neste estudo efetivado sobre a cerca de 92% da extensão do Litoral Oriental do RN entre Baías Formosa e Touros, excetuando as desembocaduras de rios, estuários e complexo lagunar de Guaraíra, embora em alguns setores as taxas de mudanças da linha de praia apresentem-se relativamente baixas, é preciso considerar-se toda a variabilidade das feições morfológicas. As falésias marinhas ativas com praias arenosas defrontantes e adjacentes são comuns nesse litoral, marcado pela condicionante morfotectônica em alternância de *grábens* e *horsts* de direção geral NE (BEZERRA; AMARO, 1998). Em diversos trechos, as praias arenosas, defrontantes ou não às falésias marinhas, ocorrem abrigadas por faixas de arenitos de praia e recifes de corais, que atuam como proteções naturais contra a energia incidente das forçantes hidrodinâmicas, reduzindo localmente as taxas de erosão. Igualmente, os depósitos de *tálus* acumulados na base das escarpas de falésias marinhas ativas atuam na redução do efeito retrativo decorrente da ação, sobretudo, das ondas. A morfologia das desembocaduras dos rios e estuários evidencia alterações geométricas resultantes dos processos de erosão, transporte e sedimentação que acompanham a geometria do litoral em relação à orientação preferencial de incidência das forçantes hidrodinâmicas, acarretando mudanças no canal principal das fozes de rios.

As atividades antrópicas como o desmatamento dos campos de dunas vegetadas; as obras de engenharia rígida, que causam interrupções no transporte contínuo de sedimentos no sistema praias-dunas; a desconfiguração dos topos e bases de falésias marinhas pela expansão urbana e uso turístico; têm interferido de movimentação natural da célula sedimentar e, por conseguinte, na evolução morfodinâmica do Litoral Oriental, frequentemente acentuando os processos erosivos. A análise de intensidade erosiva por setores (Figura 5) confirmou o setor 3, que abriga áreas urbanas mais expressiva na orla marítima, como aquele com maiores taxas de erosão. Vital et al. (2018) igualmente identificaram para o setor 3, entre os anos de 1973 e 2014, recuos médios de linha de costa da ordem de 60 m, mesmo não particularizando as limitações espaciais do método empregado na análise. Além disso, trata-se do setor que abriga cerca de 30% dos habitantes do RN em estimativas de 2018 e que concentra os municípios com ampla expansão de áreas urbanas e turísticas para o mesmo período (IBGE, 2019). Nos setores 4, 5 e 6, que evidenciaram menores intensidades erosivas, embora ocorram trechos com erosão pronunciada no período, a ocupação costeira se configurou em núcleos urbanos menores e mais espaçados, condição que tem se alterado recentemente, com a expansão desses antigos núcleos urbanos, incluindo a estruturação de condomínios horizontais residenciais e infraestrutura turística, muitos dos quais sobre áreas ambientalmente frágeis e de alta vulnerabilidade à erosão costeira.

Nas duas primeiras décadas analisadas, no setor 1 ocorreu tendência geral acrecionária, enquanto na última década mostrou-se erosiva. A erosão tem evoluído e se agravado no decorrer das três últimas décadas (Figura 8A). Além da intensificação dos processos hidrodinâmicos locais (ALMEIDA et al., 2015; RIBEIRO; PIMENTA; VITAL, 2018), o adensamento populacional na orla marítima tem sido significativo, com expansão de redes de hotéis e resorts instalados sobre os campos de dunas e nas proximidades das escarpas de falésias marinhas ativas. Tais fatos advertem para a necessidade premente de políticas efetivas de ordenamento territorial e gestão adequada para a proteção e conservação da orla marítima no âmbito estadual e municipal. Já sucedem relatos de inundações em áreas urbanas costeiras sob as condições de marés de sizígia (Figura 6-I), independentes de serem trechos de linhas de praias abrigadas por faixas de arenitos de praias (Figura 6A). Além disso, são frequentes os casos de erosão da linha de praia em estágios avançados e recorrentes, com sucessivos danos à infraestrutura instalada, que denota a perda da função protetora das praias arenosas, abrigadas ou não, frente às condicionantes hidrodinâmicas, sobretudo da combinação de preamares, ventos intensos e ondas. Nas escarpas de falésias marinhas ativas são comuns os movimentos gravitacionais de massa (Figura 6-II, 6-III), comprometendo a estabilidade das falésias e das ocupações e usos antrópicos nesse setor (SANTOS JÚNIOR. et al., 2011).

No setor 2 ocorre a maior extensão sequenciada de falésias marinhas no Litoral Oriental do RN e na última década avaliada foi notória a expansão da urbanização, em resposta às demandas socioeconômicas sobre a orla marítima, principalmente das atividades direta e indiretamente relacionadas ao setor turístico. No período aconteceu a ocupação desordenada com residências e infraestruturas em geral nos trechos entre as praias de Sibaúma e Pipa, setores considerados de alto risco a desastres, como nas proximidades das bordas (topo e base) das falésias ativas, sujeitas a movimentos gravitacionais de massa, e nas faixas de face de praia e pós-praia, propensas à erosão da linha de praia e inundação costeira (Figura 7-I a 7-IV). As evidências de erosão ocorrem indiscriminadamente no setor 2, mesmo nos trechos onde as linhas de praia ocorrem abrigadas pela presença de

faixas de arenitos de praia (Figura 7-I) e naqueles onde as falésias marinhas ativas possuem praias arenosas defrontantes (Figura 7-IV).

O Município de Tibau do Sul teve crescimento populacional de 5.964 habitantes em 1988 para 13.916 habitantes em 2018, dos quais 90% densamente concentrados na zona costeira (IBGE, 2019). Diante da reiterada destruição de infraestruturas instaladas causada pela intensificação da erosão costeira em toda a orla marítima do setor 2, têm sido tomadas pelos gestores municipais e estaduais diversas medidas de contenção emergencial da erosão costeira e mitigação dos danos decorrentes da ação das forçantes hidrodinâmicas. Contudo, tais medidas advêm apenas após a ocorrência dos danos, são espacialmente localizadas e carentes da interação entre os diversos atores envolvidos na definição de políticas de uso, ocupação e gestão da orla marítima (Figura 7-I, II e III). Notadamente, as tentativas de controle emergencial da erosão costeira são ineficientes (Figura 7-I), pois além da desarticulação entre os gestores públicos, geralmente são implantadas pela população local, sem quaisquer acompanhamentos por estudos científicos rigorosos e sistemáticos, o que intensifica os efeitos erosivos e os danos. Trata-se de fato preocupante quanto à gestão integrada da orla marítima, sobretudo sob as condições de alterações na frequência e intensidade de eventos extremos climáticos (VOUSDOKAS et al., 2018; MENTASCHI et al., 2018).

Câmara et al. (2019) demonstrou que as falésias marinhas ativas no setor 2 estão submetidas a alto grau de instabilidade geotécnica (Figura 7-IV), provocando a erosão basal, o movimento gravitacional de massa e a consequente retração média das escarpas em cerca de 1,73 m entre 2003 e 2013, considerando-se ainda que o desmatamento dos topos dos tabuleiros costeiros próximos às bordas das falésias amplia os efeitos de erosão pluvial (SEVERO, 2005; SCUDELARI et al., 2005). Portanto, a ausência ou inoperância de planos de ordenamento territorial nos municípios costeiros do setor 2, o acréscimo no contingente populacional, no número de empreendimentos imobiliários e nas infraestruturas turísticas na orla marítima, ocorridos nas últimas décadas, têm conduzido a tentativa de contenção da erosão costeira que comumente amplificam os fatores impactantes, pois desconsideram dados sistemáticos sobre as variáveis condutoras da evolução morfodinâmica da linha de praia.

No setor 3, há evidências de que a ação erosiva tem se agravado nas últimas décadas, em função da intensificação das forçantes hidrodinâmicas (AMARO et al., 2014; ALMEIDA et al., 2015; MOREIRA; GOMES; VITAL, 2020), causando redução na face de praias arenosas, retração em falésias e severas destruições de infraestruturas urbanas, muros de contenção, residências, entre outros (Figuras 8-I e 8-II). Nas praias urbanas de Ponta Negra e Meio, os contornos das linhas médias de preamar já alcançam a base das infraestruturas edificadas, no caso enrocamentos de proteção de equipamentos urbanos contra a ação de ondas, mostrando o desaparecimento da zona de praia emersa (Figuras 8-III e 8-IV).

A praia de Ponta Negra exibiu o maior recuo da linha de praia em cerca de 79,4 m, fato corroborado por outros autores (AMARO et al., 2014). A análise comparativa entre o intervalo de longo prazo total e por cada década (Figura 8B e 8C) indica que o balanço sedimentar com tendência erosiva pode ser irreversível. No trecho urbano dessa praia ocorrerá a primeira intervenção de engenharia costeira com aterro hidráulico (engorda de praia) no RN.

Na maioria dos trechos do setor 3 a erosão é acentuada, mesmo onde ocorrem faixas de recifes de arenitos de praia alinhadas à linha de praia, comprovando a redução de funcionalidade dessas feições como proteção das praias arenosas frente às forçantes hidrodinâmicas (MOREIRA; GOMES; VITAL, 2020). A intensa urbanização da orla marítima no setor 3, em especial a partir da década de 1980, baseada em planejamento urbano costeiro inadequado, permitiu o desmatamento excessivo dos campos de dunas, a remoção indiscriminada de areia do sistema praia-duna, a estendida impermeabilização do solo, a ocupação desordenada áreas de pós-praia e/ou próximas do alcance das linhas médias de marés com infraestruturas públicas e privadas. Tais fatores antropogênicos foram igualmente intensificadores e desencadeadores de processos erosivos, juntamente com os demais aspectos climáticos e oceanográficos. As estratégias de gestão, planejamento e uso dos espaços urbanos costeiros sem a sustentação no entendimento sistemático da complexidade de interações entre os agentes modificadores hidrodinâmicos, mostraram-se drasticamente ineficientes e ampliaram a vulnerabilidade costeira à erosão e, por conseguinte, aos frequentes danos socioeconômicos (AMARO et al., 2014). No setor 3 estão importantes áreas de preservação ambiental, como o Parque das Dunas de Natal e o Centro de Lançamento da Barreira do Inferno, que têm sofrido pressão da urbanização em seus limites, já submetidos à ação de agentes da erosão marinha e continental (ALMEIDA et al., 2015; MOREIRA; GOMES; VITAL, 2020; AMARO et al., 2021).

O setor 4 é relevante ao setor turístico do RN, com destaque para os passeios de *buggy* nas dunas e margens de lagoas da Área de Proteção Ambiental Jenipabu. Embora os resultados indiquem estabilidade deposicional (Figuras 9B e 9C), destaca-se a relevância do manejo sustentável das atividades de recreação e intervenções antrópicas nesse domínio, com vistas à preservação do processo natural de interação sedimentar equilibrada no sistema praia-duna. A localização desse setor à norte da foz do estuário do rio Jundiá-Potengi, no sentido preferencial da deriva litorânea, favorece o suprimento sedimentar costeiro. A contínua faixa de arenitos de praia alinhada às linhas de praia ainda exercem a relevante ação protetora contra o ataque direto do clima ondas, favorecendo balanço geral deposicional na linha de praia (Figuras 9-I, 9-II e 9-III). Mesmo com menor densidade ocupacional na orla marítima que no setor 3, em vários trechos do setor 4 ocorrem intervenções antrópicas danosas que interferem na dinâmica sedimentar costeira, como sobre as zonas de praia, pós-praia, dunas frontais e campos de dunas móveis, feições de alta vulnerabilidade natural e ambiental.

No setor 5 há registros de soterramento de residências, vias públicas e redes elétricas instaladas nas proximidades da linha de praia e sobre o campo de dunas móveis, como resultado do aporte sedimentar eólico, no trecho a norte da foz do rio Ceará Mirim (Figura 10-I). Na década de 2008 a 2018, essa orla marítima sofreu aumento de pressões do mercado imobiliário, com construção de resorts e condomínios residenciais horizontais, acarretando o adensamento urbano e populacional nas praias de Jacumã e Muriú. Por conseguinte, em vários trechos da linha de praia foram construídas estruturas rígidas (enrocamentos e muros de contenção), de modo desordenado, na tentativa de proteção contra o avanço do nível do mar e da erosão costeira (Figura 10-II, 10-III e 10-IV). Em outros trechos de linhas de praia são comuns os soterramentos de infraestruturas públicas e privadas pela intensa movimentação natural das dunas móveis no sistema praia-duna (Figura 10-I). Na análise comparativa entre as três décadas (Figura 10B, 10C) indicaram a evolução severa da erosão, sobretudo nas praias de Graçandu, Jacumã e Muriú, exatamente as áreas de maior ocupação no setor 5. Os efeitos da dinâmica costeira, sobretudo do soterramento eólico e da erosão costeira, agravam continuamente possíveis medidas mitigatórias e adaptativas por parte da gestão pública. Majoritariamente, as tentativas de diminuição de danos costeiros se fundamentam no emprego de obras de engenharia rígida, que se mostram inapropriadas por não considerarem estudos científicos sistemáticos sobre a dinâmica costeira regional e local, desconsiderando a circulação das células sedimentares costeiras entre áreas adjacentes (Figuras 10-I, 10-II e 10-IV).

A análise comparativa das três décadas para o setor 6 apontou o agravamento sucessivo da erosão, como evidenciam os danos às residências pela ação marinha na praia de Caraúbas (Figura 11-I). Igualmente ao ocorrido nas áreas urbanas dos demais setores, são frequentes as ações inadequadas de contenção da erosão costeira e na praia de Pititinga, por exemplo, onde houve barramentos e aberturas de canais para escoamento das águas fluviais e pluviais (Figura 11-II). Tais tentativas de atenuação dos efeitos da erosão costeira têm acarretado problemas nos trechos contíguos de linhas de praia, pois interfere na dinâmica sedimentar natural no sistema praia-duna, como na migração das fozes de rios, em adição ao intenso potencial eólico desse setor (Figura 11-III).

6. Conclusões

A ênfase deste estudo foi quantificar as taxas médias e máximas de erosão e acreção das linhas de praia para o Litoral Oriental do RN no decorrer das três últimas décadas e em cada década (1988 a 1998, 1998 a 2008 e 2008 a 2018), com base no processamento digital de imagens multiespectrais de Sensoriamento Remoto e análises espaciais em SIG. Na avaliação comparativa entre o conjunto de linhas de praia foram apreciados os erros e incertezas alusivos à dimensão dos pixels das imagens de Sensoriamento Remoto (LANDSAT e RapidEye), aos métodos de georreferenciamento e de detecção de cada linha de praia então submetidas ao DSAS. Tais procedimentos metodológicos podem ser adaptados para outras orlas marítimas e escalas espaciais.

Os resultados revelaram as tendências de mudanças das linhas de praia, influenciadas pelas condicionantes naturais (oceânicas e climáticas) e antropogênicas, que agem concomitantemente na modificação da orla marítima. Ainda, que a variabilidade espacial e temporal das linhas de praia, localmente, está relacionada à heterogeneidade dos aspectos geomorfológicos e sedimentológicos costeiros conectados à diversidade de ações antropogênicas que resultam em alterações significativas na morfologia da orla. As principais ações antrópicas são o desmatamento do topo das falésias marinhas ativas, das dunas de pós-praia e campos de dunas, com vistas à expansão urbana, além

de interferências no processo sedimentar natural, como a extração de areia na zona costeira e infraestruturas rígidas de contenção, fatores que aumentam consideravelmente a magnitude da erosão costeira.

Em orlas marítimas de todo mundo, as tendências de erosão e acreção estão condicionadas tanto aos fatores naturais quanto às intervenções antrópicas no sistema sedimentar costeiro, sobretudo em trechos urbanos e cercanias (HAPKE et al., 2010; MUEHE, 2018; OPPENHEIMER et al., 2019). Destaca-se que as dinâmicas naturais de erosão e acreção são influenciadas, e se tornam anômalas, diante de transformações infligidas à zona costeira pela urbanização excessiva, acompanhado pelo crescimento populacional e o desenvolvimento socioeconômico insustentável, implicando na gestão costeira ineficiente (PRASETYA, 2007). Na orla marítima do RN, o agravamento dos efeitos erosivos está relacionado ao aumento relativo do nível médio do mar, à intensificação das energias de ondas e ao incremento de eventos extremos climáticos, somados às ações antropogênicas locais sobre a dinâmica sedimentar natural (AMARO et al., 2014; SCUDELARI et al., 2016). Frequentemente, as tentativas de contenção da erosão costeira e proteção dos locais contra a ação hidrodinâmica tem se focado na utilização estruturas rígidas, que potencializam os efeitos erosivos em áreas adjacentes e comprometem os processos sedimentares naturais em escala regional, resultando na drástica alteração da paisagem costeira (AMARO et al., 2014).

Portanto, a deficiência na gestão estratégica da zona costeira tem conduzido às ações mitigadoras isoladas inapropriadas o que tem contribuído para o agravamento dos efeitos da erosão costeira. Caso as tendências atuais sejam mantidas, incluindo as previsões de incremento de eventos extremos climáticos e do nível relativo médio do mar, mais perdas de praias arenosas ocorrerão, conduzindo ao aumento de riscos às inundações costeiras e problemas decorrentes, como já ocorrem na orla marítima do RN. Tal tendência representa para o futuro, o enfrentamento de severas dificuldades e conflitos para a manutenção das atividades socioeconômicas locais e regionais e, igualmente, das populações na orla marítima. Destaca-se que a maioria das praias referidas neste artigo possui como principal, por vezes única, fonte de arrecadação de receitas o setor turístico e outros setores agregados.

Este artigo oferece uma síntese das particularidades e tendências quantitativas da dinâmica de erosão e/ou acreção das linhas de praia no Litoral Oriental do RN que contribuem para medidas que visem soluções sustentáveis para os efeitos danosos da erosão costeira. Informações sobre as taxas de alterações da linha de praia podem ser usadas para aprimorar as ações de planejamento e gestão da zona costeira, subsidiando na compreensão sobre as fontes, as causas e os efeitos potenciais da erosão e/ou acreção sedimentar, com vistas a auxiliar na seleção das melhores soluções, com gestão costeira integrada e obras de engenharia, na mitigação e adaptação de danos decorrentes da dinâmica costeira.

Contribuições dos Autores: Concepção, M. F. A. Matos, A. C. Scudelari e V. E. Amaro; metodologia, M. F. A. Matos e V. E. Amaro; software, M. F. A. Matos e S. B. Rosado; validação, M. F. A. Matos e S. B. Rosado; análise formal, A. C. Scudelari, V. E. Amaro e M. F. A. Matos; pesquisa, M. F. A. Matos, A. C. Scudelari e V. E. Amaro; recursos, M. F. A. Matos, V. E. Amaro e S. B. Rosado; preparação dos dados, M. F. A. Matos e S. B. Rosado; escrita do artigo, M. F. A. Matos, A. C. Scudelari e V. E. Amaro; revisão, M. F. A. Matos, A. C. Scudelari e V. E. Amaro; supervisão, M. F. A. Matos e A. C. Scudelari; aquisição de financiamento, A. C. Scudelari e V. E. Amaro. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de pesquisa do Programa Nacional de Pós-Doutorado da (PNPD) à primeira autora, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) no apoio ao Projeto GEOTEC-BONFIM (Edital MCTIC/CNPq n.º28/2018, n.º do processo 426932/2018-8).

Agradecimentos: os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC/UFRN) e ao Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (GNOMO/DEC/UFRN) que viabilizaram a estrutura e o apoio técnico do laboratório para a realização da pesquisa.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Referências

1. ALMEIDA, L.R.; AMARO, V.E.; MARCELINO, A.M.T.; SCUDELARI, A.C. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 15, n. 2, p.135-151, 2015. DOI: 10.5894/rgci532

2. 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. **Journal of Marine Geodesy**, v. 38, n. 1: p. 1-25, 2014. DOI: 10.1080/01490419.2014.904257
3. ANDERS, F.J.; BYRNES, M.R. Accuracy of shoreline rates as determined from maps and aerial photographs. **Shore and Beach**, v. 59, n. 1, p. 17-26, 1991.
4. ANTHOFF, D.; NICHOLLS, R.J.; TOL, R.S.J.; VAFEIDIS, A.T. Global and regional exposure to large rises in sea-level: a sensitivity analysis. Tyndall Working Paper 96. Tyndall Centre for Climate Change Research. 2006. http://www.tyndall.ac.uk/sites/default/files/wp96_0.pdf.
5. BARRETO, A.M.F.; SUGUIO, K.; BEZERRA, F.H.R.; TATUMI, S.H.; YEE, M.; GIANNINI, P.C.F. Geologia e geomorfologia do quaternário costeiro do estado do Rio Grande do Norte. **Revista do Instituto de Geociências**, v. 4, n. 2, p. 1-12, 2004. DOI: 10.5327/S1519-874X2004000200001
6. BEZERRA, F.H.R.; AMARAL, R.F.; LIMA-FILHO, F.P.; FERREIRA, A.V.; SENA, E.S.; DINIZ, R.F. Beachrock fracturing in Brazil. **Journal of Coastal Research**, SI 42, p. 319-332, 2005.
7. BEZERRA, F.H.R.; AMARO, V.E. Sensoriamento remoto aplicado à neotectônica da faixa litorânea oriental do estado do Rio Grande do Norte. In: IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 9., 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE. 1998. p. 361-369. ISBN 85-17-00015-3.
8. BEZERRA, F.H.R.; AMARO, V.E.; VITA-FINZI, C.; SAADI, A. Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, n. 1, p. 61-75, 2001. DOI: 10.1016/S0895-9811(01)00009-8
9. BHEEROO, R.A.; CHANDRASEKAR, A.; KALIRAJ, S.; MAGESH, N.S. Shoreline rates and erosion risk assessment along the Trou Aux Biches-Mont Choisy beach on the northwest coast of Mauritius using GIS-DSAS technique. **Environment Earth Science**, v. 75, n. 444, p. 53-68, 2016. DOI: 10.1007/s12665-016-5311-4
10. BIRD, E.C.F. **Coastal cliffs: Morphology and management**. Switzerland: Springer, 2016. 90p.
11. BLANCO-CHAO, R.; PEDOJA, K.; WITT, C.; MARTINOD, J.; HUSSON, L.; REGARD, V.; AUDIN, L.; NEXER, M.; DELCAILLAU, B.; SAILLARD, M.; MELNICK, D.; DUMONT, J.F.; SANTANA, E.; NAVARRETE, E.; MARTILLO, C.; PAPPALARDO, M.; AYALA, L.; ARAYA, J.F.; FEAL-PEREZ, A.; CORREA D.; AROZARENA-LLOPIS, I. The rock coast of South and Central America. In KENNEDY, D.M.; STEPHENSON, W.J.; NAYLOR, L.A. (org.) **Rock Coast Geomorphology: A Global Synthesis**. Geological Society, London: p. 155 – 191, 2014.
12. BOAK, E.H.; TURNER, I.L. Shoreline definition and detection: a review. **Journal of Coastal Research**, v. 21, n. 4, p. 688-703, 2005. DOI: 10.2112/03-0071.1
13. BONETTI, J.; RUDORFF, F.M.; CAMPOS, A.V.; SERAFIM, M.B. Geoindicador-based assessment of Santa Catarina (Brazil) sandy beaches susceptibility to erosion. **Ocean & Coastal Management**, 156: 198-208, 2018. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.08.009
14. BRASIL. **Relatório de gestão de gerência costeira 2010-2012: Gerência Costeira**: MMA, 35p. 2013.
15. BURNINGHAM, H.; FRENCH, J. Understanding coastal change using shoreline trend analysis supported by cluster-based segmentation. **Geomorphology**, v. 282, p. 131-149, 2017. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.12.029
16. BUSMAN, D.V.; AMARO, V.E.; SOUZA-FILHO, P.W.M. Análise estatística multivariada de métodos de vulnerabilidade física em zonas costeiras tropicais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 3, p. 499-516, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i3.912
17. CAI, F.; SU, X.; LIU, J.; LI, B.; LEI, G. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. **Progress in Natural Science**, v. 19, p. 415-426, 2009. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.05.034
18. CÂMARA, M.; SCUDELARI, A.; AMARO, V.; MATOS, M.; RABELO, T. Geotecnologias como subsídio para gestão de ambientes costeiros: análise do recuo em falésias/arribas no estado do Rio Grande do Norte, Brasil, e suas implicações socioambientais. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, v. 16, p. 53-79, 2019. DOI: 10.17127/got/2019.16.003
19. DHN. **Cartas náuticas**. Disponível em: <<http://www.dhn.mar.mil.br/>>. Acesso em: 25 ago 2019.
20. DOLAN, R.; FENSTER, M.S.; HOLME, S.J. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. **Journal of Coastal Research**, v. 7, n. 3, p. 723-744, 1991. ISSN0749-0208.
21. DOLAN, R.; HAYDEN, B.P.; MAY, P.; MAY, S.K. The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. **Shore and Beach**, v. 48, n. 4, p. 22-29, 1980.
22. FERREIRA, A.T.S.; AMARO, V.E.; SANTOS, M.S.T. Geodésia aplicada à integração de dados topográficos e batimétricos na caracterização de superfícies de praia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 1, p. 167-184, 2014.
23. FLETCHER, C.; ROONEY, J.; BARBEE, M.; LIM, S.C.; RICHMOND, B. Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. **Journal of Coastal Research**, SI 38, p. 106-124, 2003. ISSN0749-0208

24. GOPALAKRISHNAN, S.; SMITH, M.D.; SLOTT, J.M.; MURRAY, A.B. The value of disappearing beaches: a hedonic pricing model with endogenous beach width. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 61, n. 3, p. 297–310, 2011. DOI: 10.1016/j.jeem.2010.09.003
25. HAPKE, C.J.; HIMMELSTOSS, E.A.; KRATZMANN, M.G.; LIST, J.H.; THIELER, E.R. **National assessment of shoreline change: historical shoreline change along the New England and Mid-Atlantic Coasts**. U.S. Geological Survey Open-file Report, n° 2010-1118, 57p., 2010.
26. HAZIN, F.H.V.; WOR, C.; OLIVEIRA, J.E.L.; HAMILTON, S.; TRAVASSOS, P.; GEBER, F. Resultados obtidos por meio do fundeio de um correntógrafo na plataforma continental do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 41, n. 1, p. 30-35, 2008.
27. 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, n° 2018-1179, 2018, 110p.
28. HINKEL, J.; NICHOLLS, R.J.; TOL, R.S.J.; WANG, Z.B; KLEIN, R.J.T. A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA. **Global and Planetary Change**, v.111, p.150-158, 2013. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.09.002
29. IBGE. **Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil**. IBGE: Rio de Janeiro, 2011, 176p.
30. IBGE. **Estimativa da população de 2018**. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html>>. Acesso em: 11 jul 2019.
31. INNOCENTINI, V.; ARANTES, F.O.; FERREIRA, R.J.; MICHELETO, R.G. A agitação marítima no litoral nordeste do Brasil associada aos distúrbios africanos de leste. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 367-374, 2005.
32. IPCC Global Warming of 1.5°C. **An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P.R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J.B.R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M.I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. (eds.). In Press. 2018. 630p. Disponível em :< https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf>. Acesso em mai 2020.
33. LEATHERMAN, S.P. Shoreline mapping: a comparison of techniques. **Shore and Beach**, v. 51, p. 28-33, 1983.
34. LIRA, C.P.; SILVA, A.N.; TABORDA, R.; ANDRADE, C.F. Coastline evolution of Portuguese low-lying sandy coast in the last 50 years: an integrated approach. **Earth System Science Data**, v. 8, p. 265-278, 2016. DOI: 10.5194/essd-8-265-2016
35. LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHE, R.; BAART, F.; DONCHYTS, G.; AARNINKHOF, S. The state of the World's Beaches. **Scientific Reports**, v. 8, p. 1 – 11, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-24630-6
36. MARTINS, G.; SANTOS JÚNIOR, O.F.; CASTRO, V.L.L. O arcabouço geológico subsuperficial na Cidade de Natal, nordeste do Brasil: interferências pela interpolação de dados litológicos de poços. **Revista de Geologia**, v. 27, n. 1, p. 7-17, 2014.
37. MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB, 2012. 277p.
38. MENTASCHI, L.; VOUSDOUKAS, M. I.; PEKEL, J. F.; VOUKOUVALAS, E.; FEYEN, L. Global long-term observations of coastal erosion and accretion. **Scientific Reports**, v. 8, p. 1 – 11, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-30904-w
39. MOORE, L.J. Shoreline mapping techniques. **Journal of Coastal Research**, v. 16, n. 1, p. 111-124, 2000. ISSN0749-0208.
40. MOREIRA, D.A.; GOMES, M.P.; VITAL, H. Shallow sedimentation of Natal shelf and coastal erosion implications, NE Brazil. **Geo-Marine Letters**, v. 40, p. 843-851. DOI: 10.1007/s00367-019-00594-y
41. MORTON, R.A., MILLER, T.L.; MOORE, L.J. **National assessment of shoreline change: Part 1, Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the U.S. Gulf of Mexico**. U.S. Geological Survey Open-File Report n°2004-1043, 2004, 45p. disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/of/2004/1043/ofr-2004-1043.pdf>>. Acesso em ago 2019. DOI: 10.3133/ofr20041043
42. MUEHE, D. **Erosão e progradação do litoral Brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. 475 p.
43. MUEHE, D. **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. 759 p.
44. NASSAR, K.; MAHMOD, W.E.; FATH, H.; MASRIA, A.; NADAOKA, K.; NEGM, A. Shoreline change detection using DSAS technique: case of North Sinai coast, Egypt. **Marine Georesources & Geotechnology**, p. 81-95, 2018. DOI: 10.1080/1064119X.2018.1448912
45. NORDSTROM, K.F. **Beaches and dunes of developed coasts**. Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 356p. DOI: 10.1017/CBO9780511549519
46. NYBERG, B.; HOWELL, J.A. Global distribution of modern shallow marine shorelines. Implications for exploration and reservoir analogue studies. **Marine and Petroleum Geology**, v. 71, p. 83-104, 2016. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.11.025

47. OPPENHEIMER, M.; GLAVOVIC, B.C.; HINKEL, J.; VAN DE WAL, R.; MAGNAM, A.K.; ABD-ELGAWAD, A.; CAI, R.; CIFUENTES-JARA, M.; DeCONTO, R.M.; GHOSH, T.; HAY, J.; ISLA, F.; MARZEION, B.; MEYSSINGNAC, B.; SEBESVARI, Z. Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities. In PÖRTNER, H.O.; ROBERTS, D.C.; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E.; MINTENBECK, K.; ALEGRÍA, A.; NICOLAI, M.; OKEM, A.; PETZOLD, J.; RAMA, B.; WEYER, N.M. (eds.) **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**, Cambridge University Press, Cambridge, p. 321-445, 2019.
48. PARDO-PASCUAL, J.E.; SÁNCHEZ-GARCÍA, E.; ALMONACID-CABALLER, J.; PALOMAR-VÁZQUEZ, J.M.; SANTOS, E.P.; FERNANDEZ-SARRÍA, A.; BALAGUER-BESER, Á. Assessing the accuracy of automatically extracted shoreline on microtidal beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 Imagery. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 1-20, 2018. DOI: 10.3390/rs10020326
49. PRASETYA, G. Protection from coastal erosion. Thematic paper: the role of coastal forests and trees in protecting against coastal erosion. In: BRAATZ, S.; FORTUNA, S.; BROADHEAD, J.; LESLIE, R. (eds.), **Coastal protection in the aftermath of the Indian Ocean tsunami: What role for forests and trees?** FAO: Bangkok, p. 103-130, 2007.
50. REGNAULD, H.; PIRAZZOLI, P.A.; MORVAN, G.; RUZ, M. Impacts of storms and evolution of the coastline in western France. **Marine Geology**, v. 210, n. 1, p. 325-337, 2004. DOI: 10.1016/j.margeo.2004.05.014
51. RIBEIRO, F.; PIMENTA, F.M.; VITAL, H. Inner shelf currents of Ponta Negra beach, Natal, RN, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 36, n. 1, p. 43-58, 2018. ISSN 0102-261X.
52. SANTOS JÚNIOR, O.F.; SCUDELARI, A.C.; COSTA, Y.D.; COSTA, C.M. Sea cliffs retreat mechanisms in Northeastern Brazil. **Journal of Coastal Research**, SI 64, p. 820-824, 2011. ISSN 0749-0208.
53. SCHOTT, F.A.; DENGLER, M.; ZANTOPP, R.; STRAMMA, L.; FISCHER, J.; BRANDT, P. The shallow and deep western Boundary circulation of the South Atlantic at 5°-11°S. **American Meteorological Society**, v. 35, p. 2031-2053, 2005. DOI: 10.1175/JPO2813.1
54. SCHWARTZ, M. **Encyclopedia of coastal science**. Switzerland: Springer, 2005. 1211p.
55. SCUDELARI, A.C.; BRAGA, K.G.; COSTA, F.A.A.; SANTOS JÚNIOR, O.F. Estudo dos processos erosivos instalados na praia de Pipa-RN. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 9, n. 1, p. 31-37, 2005. DOI: 10.14210/bjast.v9n1.p31-37
56. SCUDELARI, A.C.; NEVES, C.F.; AMARO, V.E.; SANTOS, O.F. Ponta Negra beach, Natal, Brazil: a roll and rock story. **Journal of Coastal Research**, v. 75, p. 815-819, 2016. DOI:10.2112/SI75-164.1
57. SEVERO, R.N.F. **Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa-RN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2005. 156p.
58. SILVA, P.E.D.S. **Caracterização do padrão de ondas na costa do Brasil por meio de modelagem numérica**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2013. 231p.
59. STRAMMA, L.; FISCHER, J.; BRANDT, P.; SCHOTT, F. Circulation, variability and near-equatorial meridional flow in the central tropical Atlantic. In GONI, G.J.; MALANOTTE-RIZZOLI **Elsevier Oceanography Series**, v. 68, p. 1-22, 2003. DOI: 10.1016/S0422-9894(03)80141-1
60. SYTNIK, O.; RÍO, L.D.; GREGGIO, N.; BONETTI, J. Historical shoreline trend analysis and drivers of coastal change along the Ravenna coast, NE Adriatic. **Environment Earth Sciences**, v. 77, n. 779, p. 1-20, 2018. DOI: 10.1007/s12665-018-7963-8
61. THIELER, E.R.; DANFORTH, W.W. Historical shoreline mapping (I): improving techniques and reducing positioning errors. **Journal of Coastal Research**, v. 10, n. 3, p. 549-563, 1994. ISSN 0749-0208
62. 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, Open-File Report n° 2008-1278, 83p. 2009. DOI: 10.3133/ofr20081278
63. VIEIRA, M.M.; ROS, L.F. Cementation patterns and genetic implications of Holocene beachrocks from Northeastern Brazil. **Sedimentary Geology**, 192: 207-230, 2006. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2006.04.011
64. VITAL, H.; SILVEIRA, I.M.; LIMA, Z.M.C.; TABOSA, W.F.; SILVA, A.G.A.; SOUZA, F.E.S.; CHAVES, M.S.; GOMES, M.P. (2018). Rio Grande do Norte. In: Muehe, D. (org.) **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 289-326.
65. VOUSDOKAS, M. I.; JEVREJEVA, S.; JACKSON, L.P.; FEYEN, L. Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal food hazard. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p.1-12, 2018. DOI: 10.1038/s41467-018-04692-w
66. WEF. **Global Risks Report**. Edition WEF n° 11, 103p, 2016. Disponível em: < http://www3.weforum.org/docs/GRR/WEF_GRR16.pdf>. Acesso em: 15 dez 2019.

67. WONG, P.P.; LOSADA, I.J.; GATTUSO, J.-P.; HINKEL, J.; KHATTABI, A.; MCINNES, K.L.; SAITO, Y.; SALLENGER, A. Coastal systems and low-lying areas. In: FIELD, C.B., BARROS, V.R.; DOKKEN, D.J.; MACH, K.J.; MASTRANDREA, M.D.; BILIR, T.E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K.L.; ESTRADA, Y.O.; GENOVA, R.C.; GIRMA, B.; KISSEL, E.S.; LEVY, A.N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P.R.; WHITE, L.L. (eds.). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, New York, p. 361-409, 2014.
68. XU, H. Modification of normalized difference water index (MNDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006. DOI: 10.1080/01431160600589179.
69. YOUNG, A.P.; CARILLI, J.E. Global distribution of coastal cliffs. **Earth Surface Process and Landforms**, v. 44, n. 6, p. 1309–1316, 2019. DOI: 10.1002/esp.4574



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.