

Análise geoespacial aplicada ao estudo da variação da linha de costa da praia de Parajuru, nordeste brasileiro

RESUMO

Filipe Maciel de Moura

filipemacie192@yahoo.com

orcid.org/0000-0002-6608-8223

Universidade Estadual do Ceará (UECE),
Fortaleza, Ceará, Brasil.

Fábio Perdigão Vasconcelos

fabioperdigao@gmail.com

orcid.org/0000-0002-0388-4628

Universidade Estadual do Ceará (UECE),
Fortaleza, Ceará, Brasil.

A investigação e a quantificação das alterações históricas da geometria litorânea é um dos principais parâmetros utilizados na detecção da erosão e deposição costeira. O conhecimento do comportamento morfosedimentar, em especial da variação da linha de costa, é determinante na gestão do território visando à atenuação e prevenção de riscos costeiros. Nesse contexto, a aplicação da análise geoespacial é de suma importância, pois fornece uma análise espaço-temporal, possibilitando inclusive a projeção de cenários futuros. Partindo desses pressupostos, objetivamos neste trabalho a medição, quantificação, cálculo e monitoramento das taxas de variação da geometria litorânea associada à foz do rio Pirangi. A área de estudo localiza-se no litoral Lesteleste do Ceará – Nordeste do Brasil, e utilizaram-se dados multitemporais enquadrados em uma escala decadal, entre os anos de 1979 e 2014. Foram individualizados dois setores com base em critérios morfológicos, setor um setor de face praial exposta e outro de face praial abrigada. O primeiro setor corresponde ao spit arenoso, situado na desembocadura do rio Pirangi, e o segundo setor corresponde à linha de costa da praia de Parajuru, disposta em direção oeste ao referido spit arenoso. Foram utilizadas imagens de satélite da série Landsat 2, 5 e 8 para aplicação da ferramenta de análise Digital Shoreline Analysis System – DSAS, que possibilitou a determinação dos parâmetros estatísticos para o cálculo das taxas de variação da linha de costa. O setor referente ao spit arenoso apresentou uma variação média anual de -3,843 m/ano, taxa de tendência de variação anual de -4,759 m/ano e uma variação absoluta entre -268,95 e 51,23 m. Por sua vez, o setor referente à linha de costa da praia de Parajuru apresentou uma variação média anual de -5,002 m/ano, taxa de tendência de variação anual de -5,996 m/ano e uma variação absoluta entre -562,38 e 287,89 m. Deste modo, os processos erosivos têm predominado em ambos os setores (praia e spit arenoso), sendo mais expressivos no setor da linha de costa. Contudo, vale ressaltar que o spit arenoso teve sua extensão E-W acrescida de 1,53 km no ano de 1979, para 14,44 km no ano de 2014. A tendência erosiva generalizada para a área de estudo está provavelmente relacionada ao estabelecimento de barragens e estruturas físicas para carcinicultura ao longo do leito fluvial do rio Pirangi, principalmente a partir da década de 1980, diminuindo o aporte de sedimentação continental realizada através do rio. Além disso, o avanço da urbanização e das atividades econômicas realizadas na zona costeira, como o turismo, interfere diretamente nos fluxos sedimentares, contribuindo para a intensificação dos processos erosivos.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos Espaciais. Dado Multiespectrais. Zona Costeira.

INTRODUÇÃO

A zona costeira tem passado por alterações morfológicas e ambientais cada vez mais intensas, com grandes variações no espaço e no tempo. Esse dinamismo é resultado das relações complexas entre os diversos componentes dos ambientes costeiros, envolvendo inúmeros processos dinâmicos que modelam a linha de costa, constituindo os processos erosivos e deposicionais. Esses processos resultam da ação diferenciada de inúmeros fatores naturais como ondas, marés, correntes e regime de ventos, sofrendo ainda influência da ação antrópica, principalmente no que diz respeito à erosão costeira (DAVIS & FITZGERALD, 2004; TESSLER & GOYA, 2005; BIRD, 2008).

A dinâmica fluvial e a oceanográfica atuam de maneira conjunta formando um complexo sistema ambiental que engloba desde variados sistemas deposicionais costeiros até intrincadas redes e componentes bióticos relacionados aos estuários. É neste ponto que o sistema fluvial ao se conectar com o sistema marinho, através da desembocadura, contribui para a construção e remodelamento de formas deposicionais como as barras e ilhas fluviais, os spits arenosos, as ilhas barreira, além dos deltas.

A disposição, extensão e até mesmo a existência dessas formas deposicionais estão relacionadas a processos cíclicos relacionados, sobretudo, aos componentes oceanográficos, hidráulicos, morfodinâmicos e hidroclimáticos, resultando em um equilíbrio dinâmico entre os padrões de construção, destruição e reconstrução morfosedimentar. Contudo, esse caráter cíclico pode ser rompido em função da atuação de eventos de alta energia, como furacões, ciclones, ondas de tempestade e overwash. Tais eventos possuem alto poder destrutivo, ocasionando na maioria das vezes alterações bruscas e desconfiguração dos ambientes e ecossistemas costeiros, através, por exemplo, da erosão, além da destruição da infraestrutura instalada (COOPER, 2002; 2004).

Desse modo, o entendimento das variações espaço-temporais dos ambientes costeiros é de suma importância por permitir o entendimento da dinâmica e da evolução desses ambientes, bem como por permitir a indicação das áreas mais vulneráveis às alterações morfológicas e ambientais, possibilitando a adoção de medidas de prevenção de riscos costeiros advindos dessas alterações.

A destruição de estruturas residenciais e comerciais estabelecidas na zona costeira impactam, sobretudo, o turismo comunitário e a pesca artesanal, que representam muitas vezes a única fonte de renda para a subsistência da população residente em comunidades litorâneas. Estes riscos são intensificados a partir das intervenções na zona costeira que ocorrem sem estudos prévios e/ou que não consideram efeitos de curto e longo prazo, como os barramentos de leitos fluviais e a fixação e/ou impermeabilização de dunas costeiras. A respeito disso, diversos estudiosos, a nível nacional e internacional, desenvolveram importantes estudos, como os trabalhos de Mclaughlin; Mckenna & Copper (2002); Muehe (2006); Tessler & Goya (2005).

Tendo conhecimento deste quadro natural complexo e extremamente sensível, deve-se recorrer às ferramentas para gestão e prevenção de riscos na zona costeira, que consideram o comportamento evolutivo destes ambientes.

Nesse sentido, muitos métodos e técnicas têm sido desenvolvidos para o melhor conhecimento da evolução e dinâmica dos ambientes costeiros, dentre os

quais se destacam a análise geoespacial e a geoestatística, que possibilitam, a partir de dados multiespectrais, a representação espacial e numérica de variáveis diversas do quadro físico-natural.

Partindo desses pressupostos, este trabalho objetivou a medição, a quantificação, o cálculo e o monitoramento das taxas de variação da linha de costa da praia de Parajuru, localizada no município de Beberibe, Litoral leste do Estado do Ceará – Nordeste do Brasil, a partir de dados multitemporais analisados em escala decadal, considerados desde o ano de 1979 até o ano de 2014.

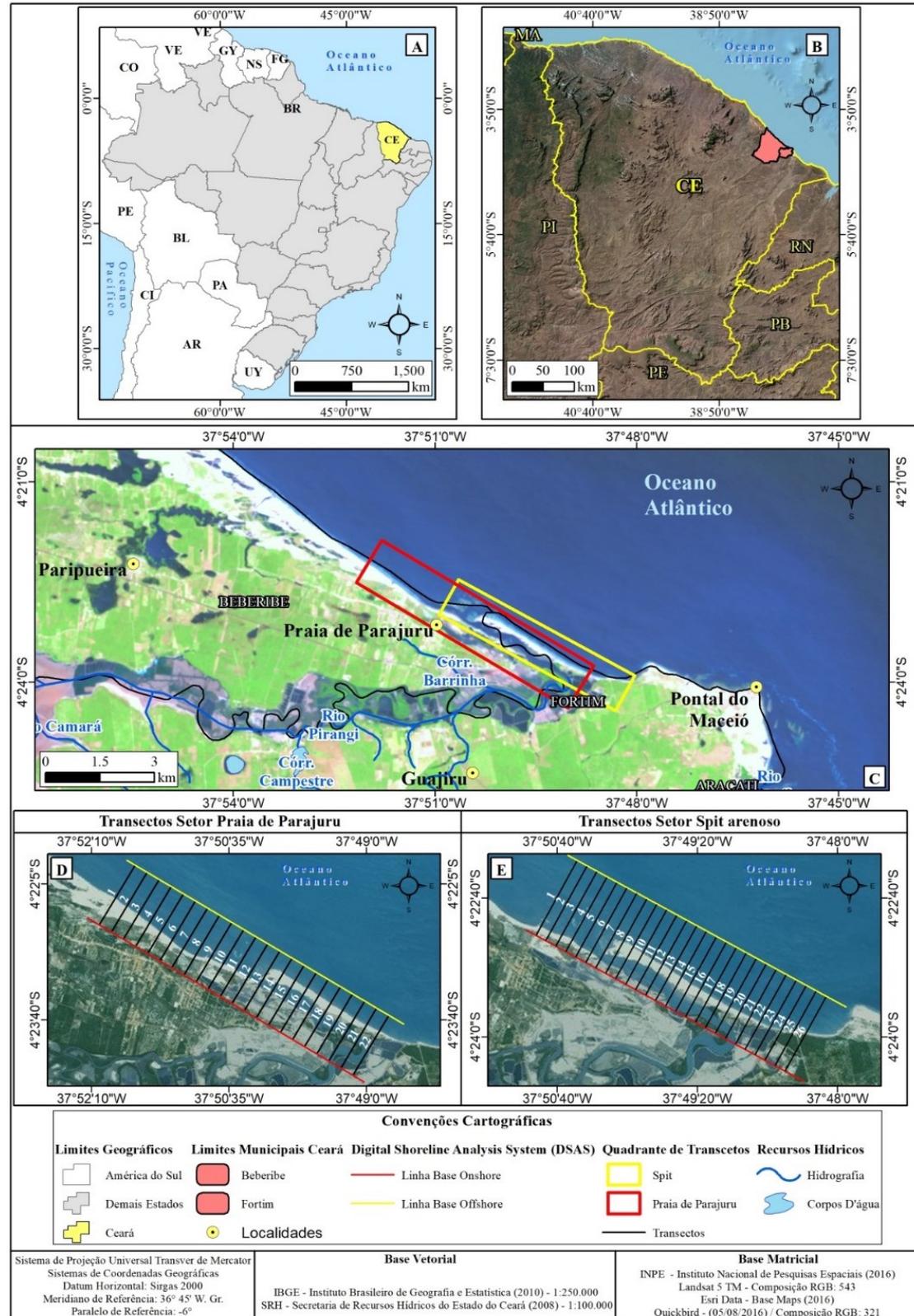
LOCAL DE ESTUDO

A área selecionada para o desenvolvimento deste estudo foi o trecho costeiro situado entre a desembocadura do rio Pirangi e a praia de Parajuru, no município de Beberibe, Litoral Leste do Estado do Ceará, a aproximadamente 110 km da capital, Fortaleza. Esse curso hídrico tem suas nascentes em uma região de pouca altitude e relevo moderado no município Quixadá, no sertão cearense, na cota de elevação de 200m.

Esse setor costeiro sofre maior influência de fatores climáticos locais, como latitude e maritimidade. Em virtude da baixa latitude, aproximando-se dos 4° 24'66" em relação ao Equador, há alta incidência de radiação solar, com temperaturas elevadas durante o ano inteiro, sendo afetadas pela maritimidade, que disponibiliza maior umidade e a atenuação das temperaturas. O clima da área é o Tropical Quente Semiárido Brando, com pluviosidade entre 850 a 1000 milímetros anuais, e temperaturas médias anuais entre 24°C e 26° C. O período de maior precipitação concentra-se entre os meses de fevereiro e maio (FUNCEME, 2009).

Foram individualizados dois setores para a área de estudo, com base em critérios morfológicos. O primeiro setor corresponde ao spit arenoso, situado na desembocadura do rio Pirangi, com área total de 6000 m², e o segundo setor corresponde à linha de costa da Praia de Parajuru, em direção oeste ao referido spit arenoso, com área total de 9230 m² (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo - (A) Estado do Ceará no contexto da América do Sul (B) Municípios de Beberibe e Fortim, no contexto do Ceará (C) Localização dos setores de análise no contexto do estuário do rio Pirangi (D) Transectos da praia de Parajuru (E) Transectos do spit arenoso



MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução e aplicação do método Digital Shoreline Analysis System – DSAS na área de estudo, os procedimentos utilizados foram organizados em duas etapas:

- Etapa de Gabinete: foram realizadas revisões de literatura, análise e processamento dos dados satelitais; elaboração de mapas representativos; obtenção e tratamento de dados geoestatísticos; interpretação e análise da variação da linha de costa;
- Etapa de Campo: foram realizadas visitas *in situ* para averiguação da realidade local e registro fotográfico da área de estudo.

A descrição e o detalhamento dos procedimentos metodológicos e operacionais adotados neste estudo são discutidos nos itens a seguir.

DELIMITAÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA

A linha de costa sempre representou um ambiente de extrema importância em função das muitas atividades nela praticada, tais como a pesca artesanal, turismo, recreação e infraestrutura portuária. Além disso, ela se destaca também por concentrar, em muitas regiões do planeta, os maiores contingentes populacionais.

O conceito de linha de costa é bastante complexo, pois abrange diversos critérios de análise. No âmbito fisiográfico, como ressalta Crowell (1991), corresponde à linha de interface entre a terra e a água. Logo, este conceito deve ser entendido como um perímetro flutuante, isto é, que possui um posicionamento geográfico variável na escala espaço-temporal.

Ainda de acordo com Crowell (1991), a definição comumente adotada para caracterizar a posição da linha de costa em áreas costeiras arenosas, tem sido a utilização da “linha” que marca o limite atingido durante a preamar de sizígia, em que há uma mudança nítida de tonalidade nas areias da praia, de fácil identificação nas fotografias aéreas e imagens de sensoriamento remoto.

Nesse contexto, a detecção da linha de costa da área de estudo considerou a seleção de um indicador de melhor aproximação com a realidade constante nos dados orbitais disponíveis. Deste modo, foi utilizado o limite da interface terra/água (continente/oceano), considerando-se o limite máximo dos sedimentos molhados em função da preamar (maré mais alta), identificável nas imagens de satélite (Figura 2). Além disso, há uma melhor resposta espectral para detecção da posição da linha de costa através desse método, conforme constatado por Stockdon et al., (2002).

Figura 2 – Delimitação da linha de costa para o setor da praia de Parajuru (vermelho) e para o spit arenoso (amarelo), conforme método desenvolvido por Crowell (1991)



Fonte: Autoria própria (2021).

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ESPAÇOTEMPORAL DA LINHA DE COSTA

As análises espaciais e estatísticas foram realizadas na extensão Digital Shoreline Analysis System (DSAS), desenvolvida por Thieler et al. (2009) e já amplamente utilizada em estudos no litoral do estado do Ceará, como nos trabalhos de Farias e Maia (2010), Marino e Freire (2013) e Souza, Leite & Meireles (2016). Essa ferramenta atua como complemento no software ArcGis®, e realiza operações geométricas baseada na biblioteca MATLAB® Component Runtime (MCR).

A sua aplicação neste estudo obedeceu às seguintes etapas: a) definição de transectos (extensão da linha e espaçamento entre as linhas), b) definição do limite onshore e offshore, c) definição das linhas de costa em períodos distintos e d) definição dos parâmetros estatísticos, possibilitando a determinação de seis resultados distintos: 1- Shoreline Change Envelope (SCE); 2- Net Shoreline Movement (NSM); 3 - End Point Rate (EPR); 4 - Linear Regression (LRR); 5 - Weighted Linear Regression (WLR); e 6 - Least Median of Squares (LMS).

Nesse estudo foram utilizados somente os parâmetros NSM e EPR, que fornecem as seguintes informações:

- Net Shoreline Movement (NSM) - Distância entre a linha de costa mais recente e a mais antiga (m);
- End Point Rate (EPR) - Distância em metros da linha de costa mais antiga para a mais nova, dividido pelo período da análise (m/ano).

Acerca dos parâmetros básicos de entrada, estes foram definidos seguindo as especificações descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros básicos de entrada (DSAS)

Setor	Espaçamento (m)	Comp. dos Transectos (m)	Comp. da Linha de Costa (m)
<i>Spit</i> Arenoso	200	1500	5,579
Praia de Parajuru	300		6,877

Fonte: Autoria própria (2021).

PROCESSAMENTO DE DADOS MATRICIAIS E ANÁLISE MULTITEMPORAL DA LINHA DE COSTA

Para a realização das análises foram selecionadas imagens da série Landsat 2, 5, 8, disponibilizadas pela Divisão de Geração de Imagens (DGI), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cujos dados satelitais são apresentados na Tabela 2.

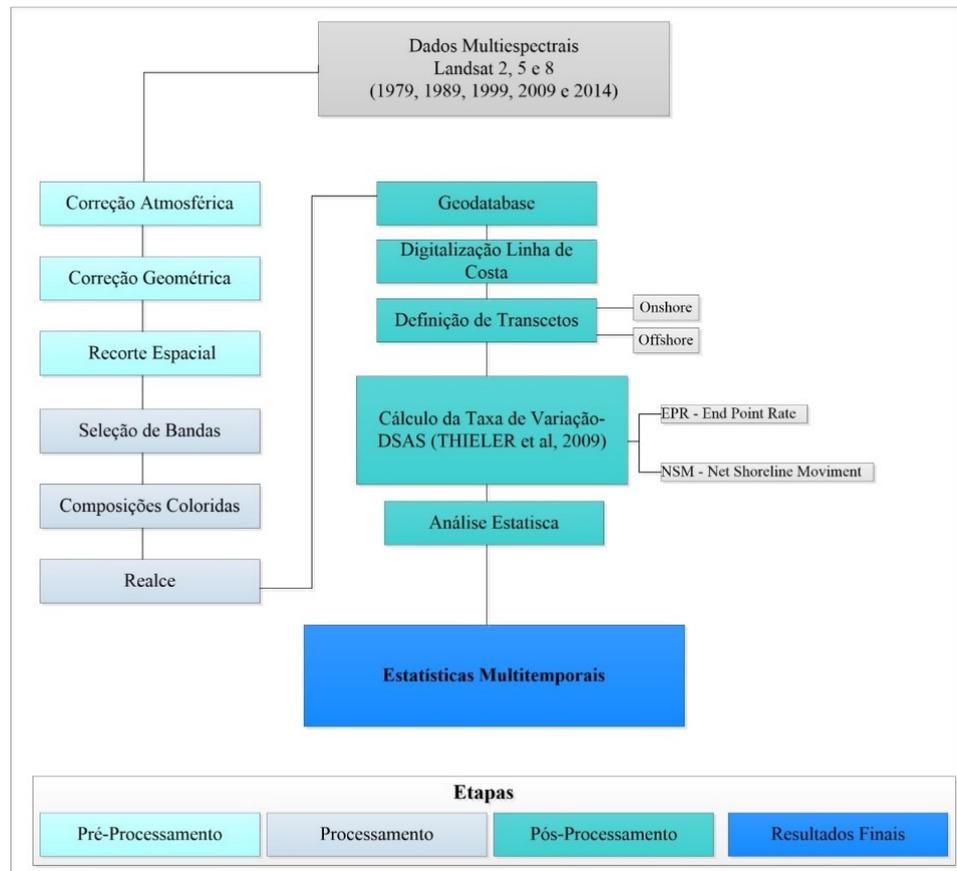
Os procedimentos de preparação dos dados matriciais para as análises espaciais e estatísticas foram agrupadas em quatro etapas, apresentadas na Figura 3, e discutidas detalhadamente nos próximos tópicos.

Tabela 2 – Dados satelitais utilizados (1979 – 2014)

Data	Satélite	Sensor	Bandas	Res.Espacial	(RGB)
17/06/1979	Landsat 2	MSS	4-7	80 m	546
09/06/1989	Landsat 5	TM	1-7	30 m	543
02/06/1999					
27/06/2009					
25/06/2014	Landsat 8	OLI	1-9 PAN	15 m	654 + Pan (8)

Fonte: Adaptado INPE.

Figura 3 – Diagrama de fluxo da detecção da mudança espaço-temporal da linha de costa.



Fonte: Autoria própria (2021).

PRÉ-PROCESSAMENTO

Inicialmente, ocorreu a seleção das imagens a serem analisadas. Durante a seleção, foram identificadas as características hidroclimáticas referentes à estação do ano para cada período da imagem selecionada, de modo a se considerar condições hidroclimáticas similares. Foram utilizadas imagens orbitais da série Landsat: 2 – sensor MSS; Landsat 5 - sensor TM; e Landsat 8 - sensor OLI, referentes a cinco datas distintas..

Posteriormente, no software ArcGis® versão 10.0, foi realizada a correção atmosférica em todos os dados, com o intuito de excluir o conjunto de erros eletrônicos originados pelo sensor de coleta e sua interação com as propriedades físicas da atmosfera, esse processo foi feito através do caminho ArcMap>ArcToolbox>MapAlgebra>RasterCalculator. Em seguida, procedeu-se a correção geométrica através do georreferenciamento dos dados, permitindo a comparação/integração entre as imagens.

Além disso, os dados foram reprojutados para o sistema de projeção cartográfica UTM (Universal Transversa de Mercator), Datum SIRGAS 2000 – Zona 24S. Na correção geométrica tomou-se como base o mosaico controlado Geocover da NASA, utilizando-se utilizando-se uma série de pontos de controles para o melhor ajuste espacial dos dados, esse processo foi realizado através do caminho ArcMap>Georeferencing>Fit To Display>Add Control Points>Update Georeferencing. Para a adequação dos dados ao datum oficial seguiu-se a seguinte rotina ArcMap>Data Management Tools>Project and Transformations>Project.

PROCESSAMENTO

Nesta etapa, as imagens Landsat passaram por um Processamento Digital de Imagens – PDI (composições coloridas em RGB 546, 543 e 654). A elaboração das composições coloridas consistiu na associação de três bandas espectrais, cada uma inserida num canal de cor, dentro do sistema RGB (Red, Green e Blue). Esse processo foi realizado através do caminho ArcMap>Data Management Tools>Raster>Raster Processing>Composite Bands.

PÓS-PROCESSAMENTO

Foram realizadas as etapas no DSAS, inicialmente com a criação do banco de dados padrão do software ArcGis® (Geodatabase) para cada setor de análise; digitalização das linhas de costa para os anos elencados; definição da equidistância dos transectos e das linhas base onshore e offshore, cálculo das taxas de variação (EPR e NSM).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com a aplicação do DSAS indicam um cenário preocupante para a área do litoral analisado, em que os processos de retrogradação (perda sedimentar), originados por fortes processos erosivos, vêm se sobrepondo aos processos de progradação (ganho sedimentar).

Para os 35 anos analisados (1979-2014), a variação média linear referente ao setor do spit arenoso apresentou valor de -111,2 m, enquanto o setor da praia de Parajuru apresentou valor de -175,08 m. Já o maior recuo da linha de costa foi de -562,38 m no setor da praia de Parajuru, e de -268,95 m no setor do spit arenoso, indicando assim uma forte tendência erosiva em ambos os setores (Tabela 3).

Tabela 3 – Estatísticas da evolução da linha de costa (os valores estão expressos em taxas anuais e em recuo/avanço linear, sendo os valores positivos relativos à acresção sedimentar e os valores negativos relativos à erosão sedimentar).

Setor	N° de Transectos	Taxa de Variação (m/ano) – EPR			Recuo (-) e Avanço (+) da linha de		
		1979 - 2014					
		Méd.	Mín.	Máx.	Méd.	Mín.	Máx.
Spit Arenoso	26	-3,84	-10,76	10,25	-111,2	-268,95	51,23
Praia de Parajuru	22	-5	-16,07	8,23	-175,08	-562,38	287,89

Fonte: Autoria própria (2021).

Como evidências da intensificação dos processos erosivos, observa-se na região da praia de Parajuru a construção de estruturas de proteção costeira, como enrocamentos e bagwall (Figura 4), com o objetivo de salvaguardar as estruturas dispostas ao longo do litoral (residências, estabelecimentos comerciais, rede hoteleira) dos processos de avanço do mar.

Figura 4 – Estruturas de proteção costeira construídas na área de estudo- (A) enrocamento (B) bagwall.



Fonte: Autoria própria (2021).

Contudo, essas intervenções têm se mostrado insuficientes para controlar o avanço dos processos erosivos na região de Parajuru, uma vez que a dinâmica morfosedimentar e hidrodinâmica local têm sofrido significativas alterações,

através da instalação de barramentos fluviais ao longo do leito do rio Pirangi e do rio Jaguaribe (maior bacia hidrográfica do Estado do Ceará, exercendo forte influência no aporte de sedimentação terrígena na área de estudo).

Essas alterações, apesar de serem implantadas com o intuito de salvaguardar a costa, modificam o balanço sedimentar natural do sistema praia-continente e causam a artificialização do litoral, contribuindo para a perda das funções naturais e fragilizando os processos de resiliência dos ambientes costeiros, como identificou Paula (2015). Além disso, há também forte atuação da carcinicultura na região, que também contribui para alterações no regime sedimentar, através da infraestrutura instalada ao longo do baixo curso do rio Pirangi, conforme analisado por Paula & Pinheiro (2007) e Silva & Silva (2012).

Além destes barramentos, há um parque eólico instalado sobre a área de pós-praia na praia de Parajuru (Figura 5), cuja instalação das torres eólicas e a construção de estruturas rígidas e das vias de acesso, afetam diretamente os fluxos sedimentares que ocorrem na zona de bypass, realidade de outros setores do litoral do estado do Ceará, conforme estudos de Gorayeb et al. (2016), Meireles et al. (2013) e Meireles (2011). As evidências de processos erosivos que têm ocorrido na praia de Parajuru podem ser observadas na destruição de estruturas dispostas ao longo da faixa de praia (Figura 13).

Figura 5 – Parque eólico instalado na praia de Parajuru



Fonte: A autoria própria (2021).

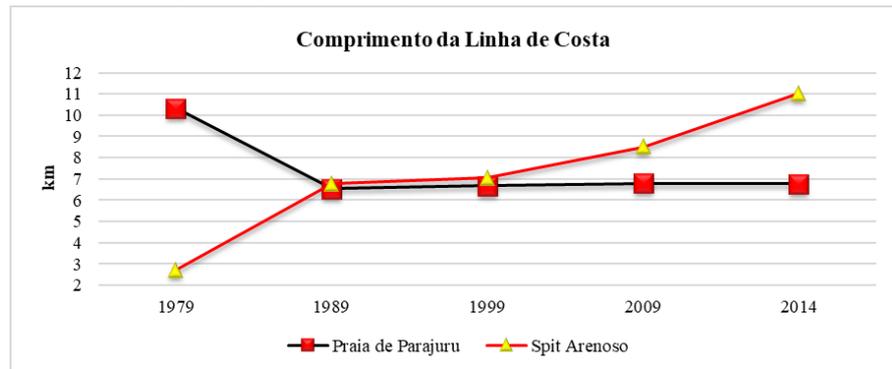
No que se refere ao comprimento da linha de costa para os dois setores analisados, apesar da predominância generalizada dos processos erosivos, registrou-se um processo de alongamento (crescimento) lateral do spit arenoso no sentido E-W, com amplitude de + 8,33 km. Já na praia de Parajuru, ocorreu retração no sentido N-S, com amplitude de – 3,56 km (Gráfico 1). Há, portanto, o predomínio do recuo da linha de costa, com valores entre 73% e 85% ao longo dos transectos, o que explica a predominância dos processos erosivos (Tabela 4).

Tabela 4 – Discretização das estatísticas por setor de análise

Setor	Total Transectos	End Point Rate (EPR)						Net Shoreline Movement (NSM)					
		Erosivos (< 0)		Estáveis (= 0)		Progradantes (> 0)		Erosivos (< 0)		Estáveis (= 0)		Progradantes (> 0)	
		Transectos	%	Transectos	%	Transectos	%	Transectos	%	Transectos	%	Transectos	%
Spit Arenoso	26	22	85%	2	8%	2	8%	19	73%	5	19%	2	8%
Praia de Parajuru	22	16	73%	1	5%	5	23%	16	73%	1	5%	5	23%

Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 1 – Variação temporal do comprimento da linha de costa na foz do rio Pirangi



Fonte: Autoria própria (2021).

Na área do spit arenoso os processos erosivos têm predominado no setor central, entre os transectos 6 e 24. Nas extremidades, as áreas dos transectos demonstraram-se estáveis, com pouco ou nenhum ganho sedimentar. A ação de ondas e marés, a atuação de eventos de alta energia, a ação hidráulica exercida pelo rio Pirangi são, ao que tudo indica, os principais agentes erosivos na área do spit arenoso (Figura 6 e 7). Os processos eólicos também podem estar relacionados a estes eventos erosivos, atuando em conjunto com os demais agentes. Acerca da ação dos processos eólicos na dinâmica deposicional costeira, Souza et al. (2016), detectaram, porém, na praia de Ponta Grossa, litoral de Icapuí - Ceará, sua influência como agentes propulsores da dinâmica progradacional, ou seja, de ganho sedimentar.

Figura 6 – Evidências de processos erosivos no spit arenoso em decorrência da ação hidráulica do rio Pirangi



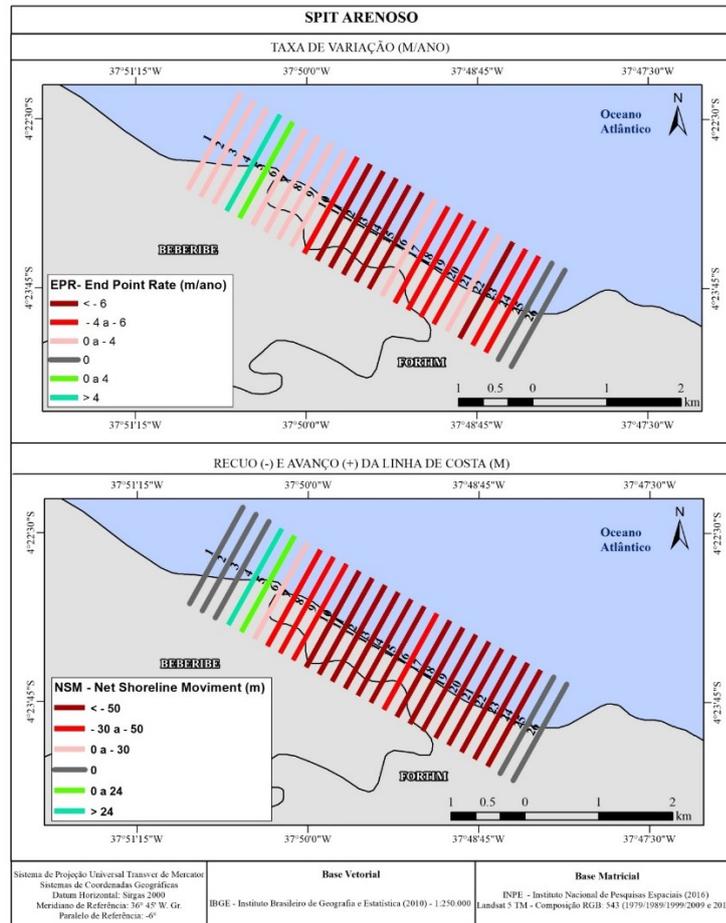
Figura 7 – Em detalhes, desmonte do setor praial devido à ação erosiva das ondas



Fonte: Autoria própria (2021).

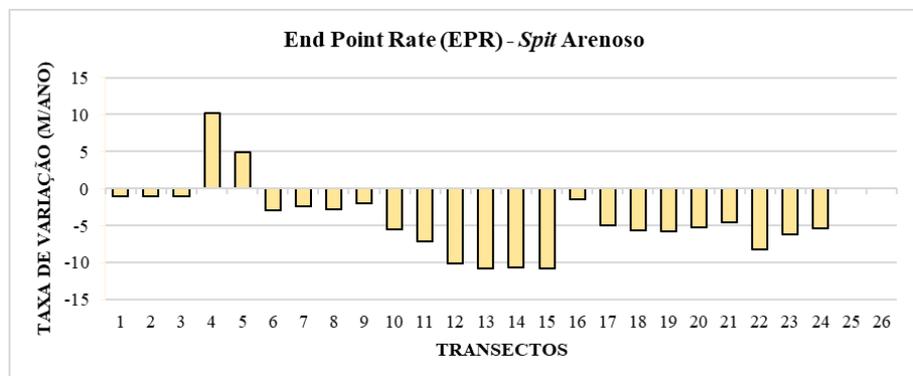
A taxa de variação (representada pela relação m/ano) referente ao spit arenoso, indicou erosão máxima de -10,07 m/ano no transecto nº13, localizado na desembocadura do rio Pirangi, enquanto que a acreção máxima foi de +10,25 m/ano no transecto nº4, localizado próximo à extremidade do spit arenoso (Figura 8 e Gráfico 3).

Figura 8 – Espacialização dos parâmetros EPR E NSM referente ao setor do spit



Fonte: Autoria própria (2021).

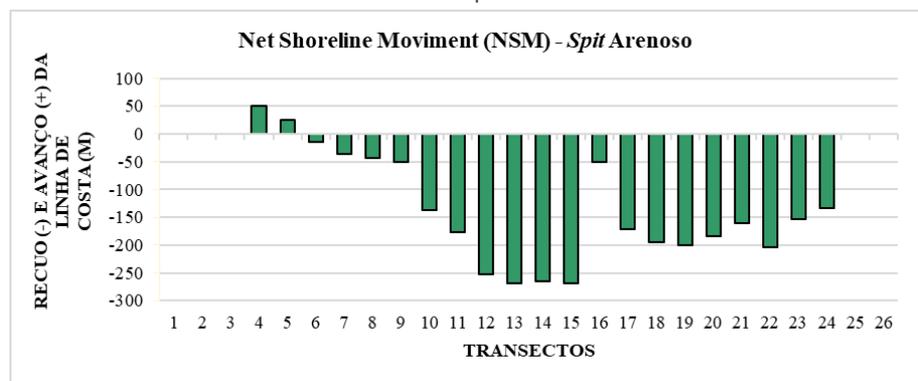
Gráfico 2 – Distribuição da taxa de variação (m/ano) – EPR referente ao setor do spit arenoso



Fonte: Autoria própria (2021).

Por sua vez, a amplitude referente aos valores mínimos e máximos do recuo da linha de costa foi de 217,72 m. Os processos de recuo foram registrados em 19 transectos, ambos localizados no setor central do spit arenoso. Como constatado na variável anterior, o transecto n° 13 foi o que registrou maior recuo, enquanto o transecto n° 4 registrou a maior acreção (Gráfico 3).

Gráfico 3 – Distribuição do Recuo (-) e Avanço (+) da linha de costa (m) – NSM referente ao setor do spit arenoso



Fonte: Autoria própria (2021).

A evolução morfológica do spit arenoso está provavelmente condicionada à ação efetiva das ondas e correntes, conforme evidenciado pelo contínuo retrabalhamento morfosedimentar responsável pelo seu alongamento no sentido oeste, em direção à praia de Parajuru, tendo sido observados cinco estágios evolutivos (Figura 9).

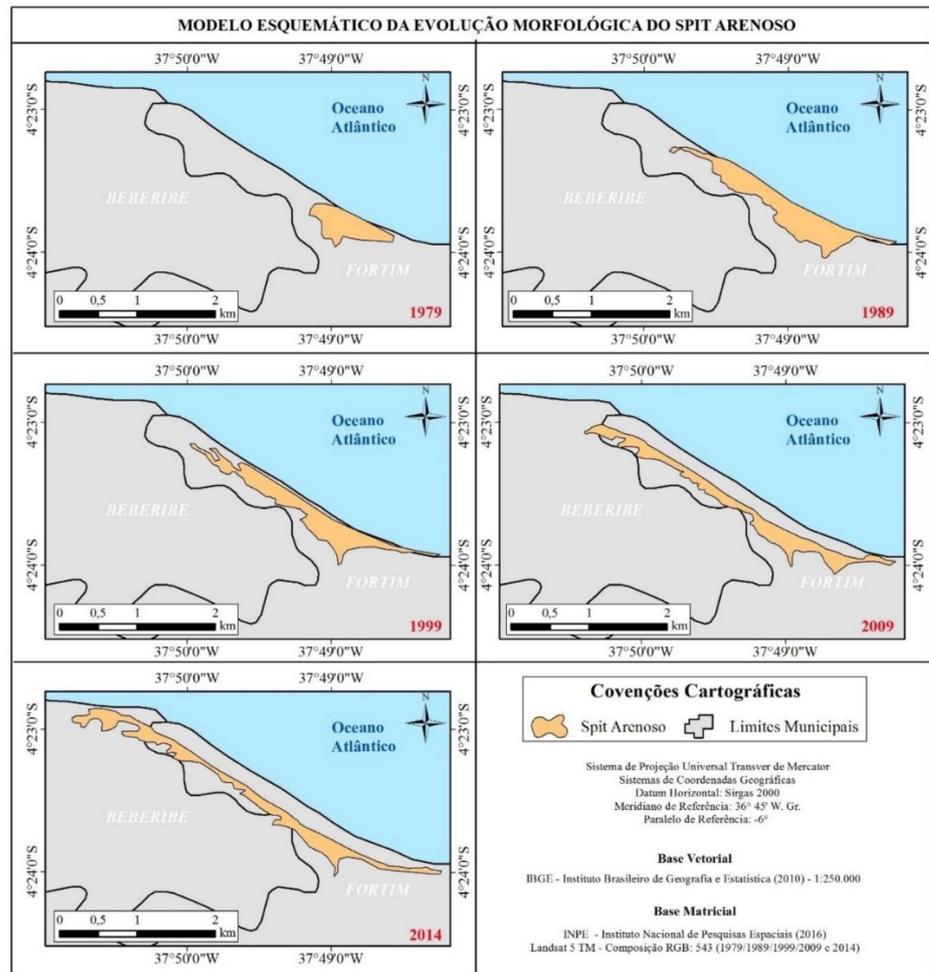
O primeiro estágio corresponde ao ano de 1979, representando a fase inicial em que o spit arenoso possui formas e dimensões totalmente diversas das atuais. Nesse estágio, há o início da deposição sedimentar a partir de fontes fluviais e marinhas, dando contornos ao spit arenoso, que apresentou um comprimento total no sentido E-W de 1239 m e uma largura máxima N-S de 433,87 m.

O segundo estágio corresponde ao ano de 1989, e indica significativa alteração no padrão morfológico em relação à década anterior. O efetivo alongamento lateral do spit arenoso se deu no sentido E-W e foi da ordem máxima de 3107 m. A largura se manteve praticamente constante, atingindo 465,08 m. Evidencia-se nesse estágio a migração da extremidade do spit arenoso para NE-SW, em direção à Praia de Parajuru, evidenciado a ação efetiva das ondas e correntes costeiras no seu remodelamento.

O terceiro estágio corresponde ao ano de 1999, no qual se observa o alinhamento do spit arenoso em direção SE-NW. Seu processo de progradação parece ter maior relação com a migração da desembocadura do rio Pirangi, que registrou uma largura da ordem de 540 m.

O quarto estágio corresponde ao ano de 2009, e indica a retomada dos processos de ondas e correntes como agentes dinâmicos dominantes na evolução morfológica do spit arenoso, com um recuo de 240 m no sentido N-S, em relação ao estágio anterior. Foi possível observar também o realinhamento da extremidade desconectada no sentido SE-NW, e um crescimento de 4311 m no sentido E-W do spit arenoso.

Figura 9 – Modelo esquemático da evolução morfológica do spit arenoso



Fonte: Autoria própria (2021).

O quinto estágio corresponde ao ano de 2014, e indica o crescimento máximo do spit arenoso (5250 m), apresentando, porém, intenso recuo (200 m) no sentido N-S. Seu maior estreitamento e aspecto mais entrecortado reforçam a ideia de que as forçantes oceanográficas, como ondas e correntes, principalmente durante eventos de alta energia (com maior poder destrutivo) tem atuado de maneira mais intensa no período mais recente. O principal resultado parece ser a atuação de processos erosivos de maneira mais recorrente no spit arenoso e linha de costa associada.

A predominância dos processos erosivos em relação aos processos progracionais, seu modelo de evolução morfológica e sua associação ao modelo de Dan et al. (2011), indicam que o spit arenoso possui duas tendências evolutivas principais. A primeira tendência é a do spit arenoso se conectar ao continente, incorporando-se à linha de costa, em função de processos de hidrodinâmicos e oceanográficos que induzam à deposição cada vez maior em direção ao continente.

A segunda tendência é a de haver um rompimento do setor central do spit arenoso, em função da ação continuada e potencialmente destrutiva de eventos de alta energia, como o overwash. Estes eventos, além de provocarem sensíveis perdas sedimentares, podem mudar a configuração do spit arenoso (com uma

extremidade conectada ao continente e a outra livre) para a ilha-barreira (as duas extremidades livres), com consequências para toda a linha de costa associada.

No setor referente à praia de Parajuru, os efeitos do recuo da linha de costa foram mais significativos, o que se torna evidente através dos resquícios de construções, como residências que foram destruídas em função do avanço do mar e podem ser observadas ao longo do litoral. Isso indica mudanças expressivas no posicionamento da linha de costa e, portanto, o avanço dos processos erosivos nessa área da costa cearense (Figura 10).

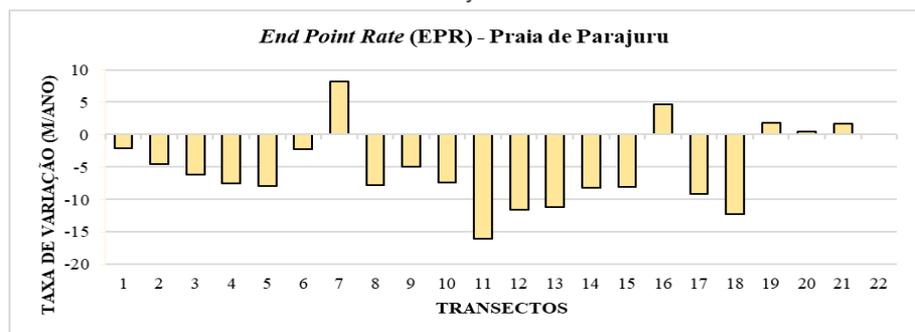
Figura 10 – Resquícios de edificações destruídas pelo avanço do mar na praia de Parajuru



Fonte: Autoria própria (2021).

Os transectos que registraram maior potencial erosivo estão associados à área situada na retaguarda e na extremidade oeste do spit arenoso. As áreas erodidas representam 72,2%, as progradantes representam 22,7%, enquanto as áreas sem modificação somam apenas 4,5% (Gráfico 4).

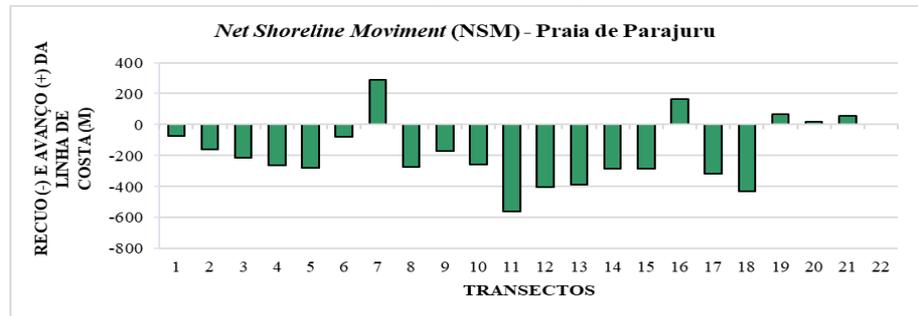
Gráfico 4 – Distribuição da taxa de variação (m/ano) – EPR referente ao setor da praia de Parajuru



Fonte: Autoria própria (2021).

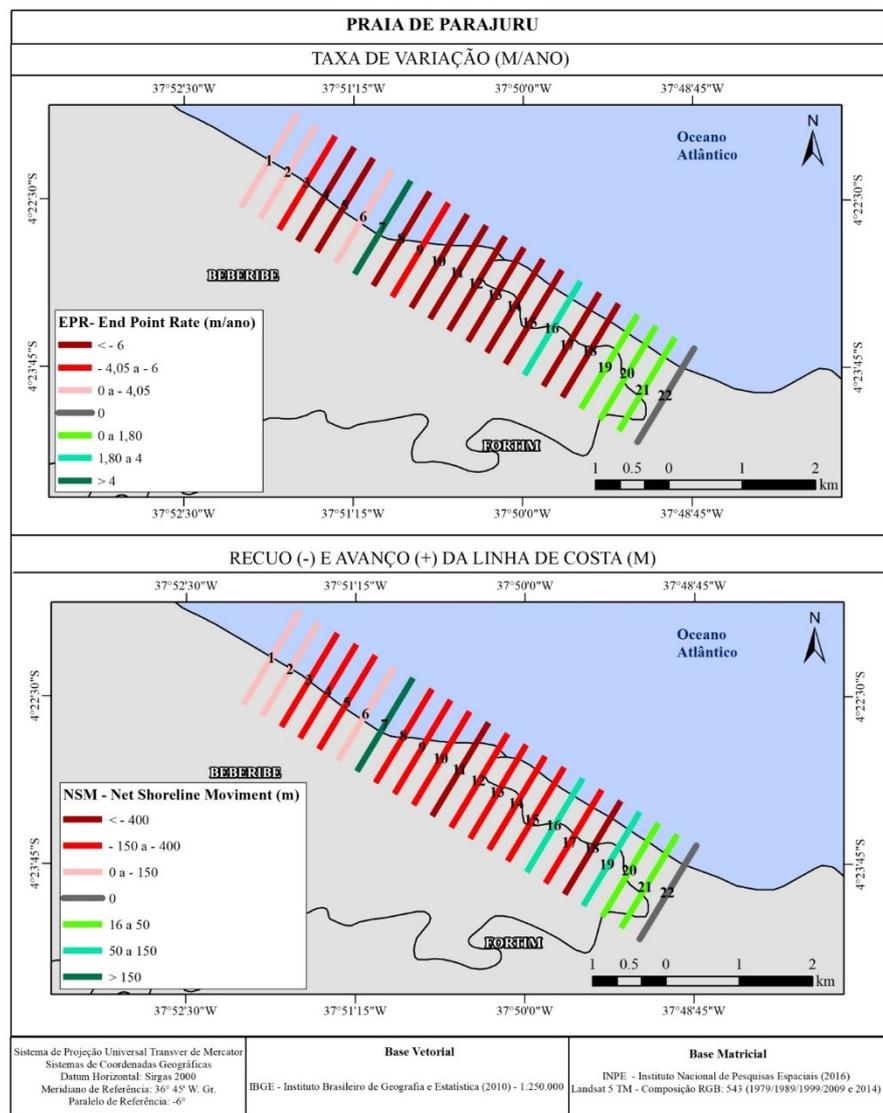
A amplitude referente aos valores mínimos e máximos do recuo da linha de costa foi de 274,49 m, sendo pouco superior ao que foi verificado no setor do spit arenoso. Os processos de recuo foram detectados na ordem máxima de -562,38 m e uma acreção máxima de 287,89 m. Essa tendência erosiva se apresentou em 16 transectos dos 22 analisados (Gráfico 5 e Figura 11). Vale ressaltar, que o transecto com maior potencial erosivo situa-se na área do parque eólico, o que reforça a ideia de que sua localização interfere diretamente no bypass de sedimentos da praia de Parajuru, a partir do barramento e fixação das áreas de retroalimentação sedimentar.

Gráfico 5 – Distribuição do Recuo (-) e Avanço (+) da linha de costa (m) – NSM referente ao setor da praia de Parajuru



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 11 – Espacialização dos parâmetros EPR E NSM referente ao setor da praia de Parajuru



Fonte: Autoria própria (2021).

Observou-se que a predominância dos processos erosivos que ocorrem no setor praial, pode estar relacionada não apenas aos processos de bloqueio dos fluxos de retroalimentação sedimentar, mas também à atuação de eventos

hidrodinâmicos de alta energia, como ondas de tempestade e overwash, que ocorrem na praia de Parajuru e no spit arenoso, ocasionando perdas sedimentares mais significativas em curtos intervalos de tempo. Apesar de fortes evidências erosivas, o spit arenoso tem se prologado lateralmente, com crescimento no sentido E-W.

Desse modo, nessa área do litoral cearense há a predominância dos processos erosivos em ambos os setores analisados (praia e spit arenoso). O avanço e a intensificação dos processos erosivos têm originado situações de risco para as comunidades locais e atividades econômicas desenvolvidas, como a pesca e o turismo comunitário

CONCLUSÃO

O estudo da variação da linha de costa da praia de Parajuru, em Beberibe-Ceará, demonstrou que há significativa predominância dos processos erosivos em relação aos processos deposicionais.

A evolução morfológica do spit arenoso parece estar mais condicionada às forçantes oceanográficas, seguindo uma tendência unidirecional de crescimento lateral, porém com intensificação dos processos erosivos em alguns trechos.

A evolução morfológica da praia de Parajuru demonstrou que os processos erosivos são mais intensos nesse trecho do litoral, com áreas de erosão presentes em 86% dos transectos desse setor. Vale ressaltar que o transecto que registrou maior recuo da linha de costa está situado no início da faixa de praia exposta, fora da área abrigada pelo spit arenoso, apresentando, portanto, maior vulnerabilidade aos eventos erosivos e de alta energia que atingem a costa.

A aplicação do método DSAS como ferramenta de análise geoespacial da variação da linha de costa se mostrou eficaz e pode ser aplicado em estudos similares, de modo a contribuir com o entendimento da dinâmica evolutiva da zona costeira.

A escala temporal utilizada como base para a análise da variação da linha de costa se mostrou adequada à compreensão dos fenômenos investigados.

A integração dos dados obtidos com a aplicação do DSAS com outros dados, como hidrodinâmicos, oceanográficos e hidroclimáticos, a exemplo da vazão fluvial, regime de ondas, correntes e marés, séries históricas de precipitações e regime de ventos, podem fornecer resultados ainda mais significativos para a análise da variação da linha de costa.

Em função da carência de estudos dessa natureza na região de Parajuru, este artigo contribui para o melhor conhecimento da dinâmica do litoral por meio da aplicação de método pouco oneroso, rápido e com bons resultados para a análise da variação da linha de costa.

Geospace analysis applied to the study of the variation of the shoreline of Parajuru beach, northeastern Brazil

ABSTRACT

The investigation and quantification of historical alterations in coastal geometry is one of the main parameters used in the detection of coastal erosion and deposition. The knowledge of the morphosedimentary behavior, especially the variation of the coastline, is crucial in the management of the territory aiming at the mitigation and prevention of coastal risks. In this context, the application of geospatial analysis is of paramount importance, as it provides a space-time analysis, even enabling the projection of future scenarios. Based on these assumptions, we aim in this work to measure, quantify, calculate and monitor the rates of variation of the coastal geometry associated with the mouth of the Pirangi River. The study area is located on the east coast of Ceará - Northeast Brazil, and multitemporal data framed on a decadal scale were used, between the years 1979 and 2014. Two sectors were individualized based on morphological criteria, sector one sector with exposed beach side and another with sheltered beach side. The first sector corresponds to the sandy spit, located at the mouth of the Pirangi River, and the second sector corresponds to the coastline of Parajuru beach, facing west to the aforementioned sandy spit. Satellite images from the Landsat 2, 5 and 8 series were used to apply the Digital Shoreline Analysis System – DSAS analysis tool, which made it possible to determine the statistical parameters for calculating the shoreline variation rates. The sector referring to the sandy spit presented an average annual variation of -3.843 m/year, annual variation trend rate of -4.759 m/year and an absolute variation between -268.95 and 51.23 m. In turn, the sector referring to the coastline of Parajuru beach presented an average annual variation of -5.002 m/year, a trend rate of annual variation of -5.996 m/year and an absolute variation between -562.38 and 287.89 m. Thus, erosion processes have predominated in both sectors (beach and sandy spit), being more expressive in the coastline sector. However, it is worth mentioning that the E-W extension of the sandy spit increased from 1.53 km in 1979 to 14.44 km in 2014. The generalized erosive trend for the study area is probably related to the establishment of dams and physical structures for shrimp farming along the riverbed of the Pirangi River, mainly from the 1980s onwards, reducing the contribution of continental sedimentation carried out through the river. In addition, the advance of urbanization and economic activities carried out in the coastal zone, such as tourism, directly interferes with sedimentary flows, contributing to the intensification of erosive processes.

KEYWORDS: Spatial Models. Multispectral Data. Coastal Zone.

REFERÊNCIAS

- BIRD, E. **Coastal geomorphology: an introduction**. Second Edition, P. Cm. Jonh Wiley & Sons, Ltd. Geostudies, 2008.
- COOPER, J.A.G. The role of extreme floods in estuary-coastal behaviour: contrasts bewtween river-and tide dominated microtidal estuaries. *Sedimentary Geology*. 150:123-137, 2002. Data. **Journal of Coastal Research**, v.18, n.3, p. 502-513.
- COOPER, J.A.G.; PILKEY, O.H. Sea level rise and shoreline retreat: Time to Abandon the Bruun Rule. **Global and Planetary Change**, Vol. 43, p. 157-171, 2004.
- CROWELL, M., S.P. LEATHERMAN, M.K. BUCKLEY (1991) Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, Vol. 7, Nº 3, pp. 839-852. Data. **Journal of Coastal Research**, v.18, n.3, p. 839-852.
- DAN, S.; WALSTRA, D.J.R.; STIVE, M.J.F.; PANIN, N., Processes controlling the development of a river mouth spit. **Marine Geology**, 280, p. 116–129, 2011.
- DAVIS Jr., A. R.; FITZGERALD, D. M. *Beaches and Coasts*. Blackwell Publishing. Pp. 115-166. 2004.
- FARIAS, E. G. G.; MAIA, L. P. Uso de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do Estado do Ceará, Brasil. **Revista de Gestão Integrada da Zona Costeira**, v. 10, n. 4, p. 521-544, 2010.
- FUNCEME. *Compartimentação Geoambiental do Estado do Ceará*. Funceme: 2009.
- GORAYEB, A; MENDES, J. S.; MEIRELES, A. J. A.; BRANNSTROM, C.; SILVA, E. V.; FREITAS, A. L. R.. Wind-energy Development Causes Social Impacts in Coastal Ceará State, Brazil: The Case of the Xavier Community. **Journal of Coastal Research**, v. 75, p. 383, 2016.
- 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. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v.13, n.1, p.113-129, 2013.
- MCLAUGHLIN, S; MCKENNA, J; COOPER, J.A.G. Socio-Economic Data in coastal Vulnerability Indices: Constraints and Opportunities. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, Florida, v. 36 p. 487-497, 2002.

MEIRELES, A. J. A.; GORAYEB, A. ; SILVA, D. F. R.; LIMA, G. S. Socio-environmental impacts of wind farms on the traditional communities of the western coast of Ceará, in the Brazilian Northeast. **Journal of Coastal Research**, v. 65, p. 81-86, 2013.

MEIRELES, A. J. A. Danos socioambientais originados pelas usinas eólicas nos campos de dunas do Nordeste brasileiro e critérios para definição de alternativas locais. **Confins (Paris)**, v. 11, p. 1-23, 2011.

MUEHE, D. Erosão e progradação do litoral brasileiro. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

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.

PAULA, D. P.; PINHEIRO, L. S. Análise das influências antrópicas e naturais na qualidade ambiental do rio Pirangi-Ceará. In: VII Encontro Nacional da Pós-Graduação em Geografia - ANPEGE, 2007, Niterói. Espacialidades Contemporâneas: o Brasil, a América Latina e o Mundo. Niterói: Editora da UFF, 2007. v. 1. p. 1-10.

SILVA, J.M.O; SILVA, E.V. Análise geoambiental do baixo curso da bacia hidrográfica do rio Pirangi -CE. **Revista GeoNorte**, v. 3, p. 593-605, 2012

SOUZA, W. F.; LEITE, N. S.; MEIRELES, A. J. A. ; SILVA, E. V. O uso de SIG na análise da evolução de linha de costa controlada por promontório: trecho entre as praias de Ponta Grossa e Retiro Grande, Icapuí-Ceará. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, v. Especial, p. 20-35, 2016.

STOCKDON, H.F.; SALLENGER, A.H.; LIST, J.H.; HOLMAN, R.A. 2002. Estimation of Shoreline Position and Change Using Airborne Topographic Lidar Data. **Journal of Coastal Research**, v.18, n.3, p. 502-513.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. Processos costeiros condicionantes do litoral brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia**, Universidade de São Paulo, São Paulo, v. 17, p. 11-23, 2005.

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, 2009. p.2008-1278. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1278/>.

Recebido: 19 out. 2021

Aprovado: 20 out. 2022

DOI: 10.3895/rbgeo.v10n3.14833

Como citar: MOURA, F. M.; VASCONCELOS, F. P.. Análise geoespacial aplicada ao estudo da variação da linha de costa da praia de Parajuru, nordeste brasileiro. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 10, n. 3, p. 201-221, jul./set. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Filipe Maciel de Moura

Avenida Dr. Silas Munguba, 1700, CEP: 60714-903, Itaperi: Fortaleza – Ceará - Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

