



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Dinâmica da linha de costa na Zona Costeira Amazônica: estudo de caso na ilha de Atalaia (Salinópolis, PA).

Ewerton Müller da Silva Souza¹, Milena Marília Nogueira de Andrade²

¹Geógrafo. Mestrando do Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGEO). Universidade federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01, Campus: Básico, Belém, Pará, Brasil - CEP 66075-110. E-mail: ewertonmuller30@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4360-0685>; ²Doutora em ciências com área de concentração em Desenvolvimento Socioambiental pelo Núcleo de Altos Estudos Amazônicos (NAEA/UFPA), docente da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Instituto Ciberespacial, Pós-Graduação em Gestão de Risco e Desastre na Amazônia (Instituto de Geociências/UFPA) e da Pós-graduação em Geografia (IFCH/UFPA), Universidade Federal Rural da Amazônia. Avenida Perimetral, 2501, Prédio da Engenharia Ambiental, Terra Firme, CEP - 66077830, Belém, Pará, Brasil. E-mail: milena.andrade@ufra.edu.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5799-7321>.

* Artigo recebido em 16/01/2024 e aceito em 29/06/2024

RESUMO

O estudo dos ambientes costeiros é de extrema importância para a gestão pública, já que muitos brasileiros residem em áreas litorâneas. Apesar da vasta zona costeira do Brasil, a urbanização e a pressão demográfica têm impactado negativamente os sistemas costeiros. No Pará, promulgou-se uma lei para o gerenciamento costeiro descentralizado e planejamento efetivo de políticas adequadas. Como parte da zona costeira amazônica, Salinópolis, especialmente a Ilha de Atalaia, enfrenta questões socioambientais, como acúmulo de resíduos, falta de tratamento de esgoto, redução dos manguezais e ocupações irregulares na planície costeira em uma linha de costa dinâmica e com processos erosivos. Desse modo, a análise de variações na linha de costa através de imagens de satélite permite a identificação de processos erosivos e acrecionais em uma escala temporal. A dinâmica da erosão é essencial para compreender a modificação costeira local e subsidiar ações adequadas de ocupação e de gestão. Nesta pesquisa, realizou-se uma avaliação multitemporal (20 anos) da variação da linha de costa em Atalaia, utilizando o método Digital Shoreline Analysis (DSAS) e imagens de satélite Landsat. Entre 2002 e 2022, houve um recuo médio linear de 84,80 metros e um avanço linear de 230,54 metros. As áreas em erosão representam 21,81% da costa e são as mais expostas ao oceano, onde há uma intensa urbanização. A deposição de sedimentos na linha de costa é influenciada pela carga sedimentar dos estuários. É imprescindível que as autoridades utilizem esses resultados para fundamentar medidas adequadas de gestão e planejamento, preservando a integridade dos ambientes costeiros e garantindo a sustentabilidade local.

Palavras-chave: Zona costeira. Geoprocessamento. Erosão. Amazônia

Coastline dynamics in the Amazon Coastal Zone: A case study on Atalaia Island (Salinópolis, PA).

ABSTRACT

many Brazilians reside in coastal areas. Despite Brazil's extensive coastal zone, urbanization and demographic pressure have negatively impacted coastal systems. In Pará, a law was enacted for decentralized coastal management and effective planning of appropriate policies. As part of the Amazon coastal zone, Salinópolis, especially Atalaia Island, faces socio-environmental issues such as waste accumulation, lack of sewage treatment, reduction of mangroves, and irregular occupations in the coastal plain in a dynamic coastline with erosive processes. Thus, the analysis of coastline variations through satellite images allows for the identification of erosive and accretional processes on a temporal scale. Understanding erosion dynamics is essential for comprehending local coastal modifications and supporting appropriate occupancy and management actions. In this research, a multitemporal (20 years) assessment of coastline variation in Atalaia was conducted using the Digital Shoreline Analysis (DSAS) method and Landsat satellite images. Between 2002 and 2022, there was an average linear retreat of 84.80 meters and a linear advance of 230.54 meters. Erosion-affected areas represent 21.81% of the coast and are the most exposed to the ocean, where there is intense urbanization. Sediment deposition along the coastline is influenced by the sediment load from estuaries. It is imperative that authorities use these results to underpin appropriate management and planning measures, preserving the integrity of coastal environments and ensuring local sustainability.

Keywords: Coastal zone. Geoprocessing. Erosion. Amazon.

Introdução

A região costeira é um espaço caracterizado por diversas interações, envolvendo fatores físicos provenientes da terra, do mar e da atmosfera. Essa complexa dinâmica resulta em contínuas transformações na morfologia, vegetação e composição sedimentar desta área. Há aspectos físicos, como a disposição e localização da costa, a influência estuarina, a litologia do substrato, a ocorrência de vegetação e o tipo de desague na foz dos rios que demonstram o caráter integrado e dinâmico dos agentes e processos costeiros e litorâneos. Esses processos dinâmicos são marcados por transporte, erosão, sedimentação (Prestes et al., 2020). Esses processos também são influenciados pelos usos dos recursos naturais e intervenções antrópicas na costa (Prestes et al., 2020).

A costa brasileira possui aproximadamente 9000 km de extensão, representando 32% das fronteiras nacionais. Nesse espaço, compreendem-se feições geomorfológicas, climas e ecossistemas que destacam a diversidade e a dinâmica latente deste ambiente (Lins-de-Barros, 2020). O limite que demarca a interface entre o oceano e o continente, onde as ondas e marés alcançam sua máxima influência, é conhecida como linha de costa (LC). Esta linha está em constante mutação morfodinâmica, devido às interações complexas entre processos oceânicos (como ondas, marés e correntes), fatores continentais (como movimentos neotectônicos, descarga fluvial e degelo), condições climáticas/meteorológicas (incluindo ventos, precipitação e tempestades) e influências humanas (como a degradação dos ecossistemas costeiros) (Silva et al., 2004).

Esses fenômenos moldam a linha de costa ao longo do tempo, resultando em momentos de erosão e outros de progradação em várias partes do litoral. Portanto, a linha de costa é vista como um limite em constante movimento, e sua posição pode flutuar em diversas escalas (Boak & Turner, 2005). As mudanças de longo (>60 anos) e de médio prazo (10 a 60 anos) são entendidas como mudanças progressivas que envolvem fases de progradação e retrogradação relacionadas ao questões da mobilização de sedimentos relacionadas a flutuações relativas no nível do mar e/ou de neotectônica. As mudanças de curto prazo, consideradas entre 1 a 10 anos, refletem flutuações cíclicas que podem estar relacionado a padrões cíclicos a exemplo de: ação do vento, ondas e marés que influenciam no balanço sedimentar, intensidade de tempestades, alternância entre períodos chuvosos e secos (Stive et al., 2002). Essa movimentação

causa uma problemática da erosão em áreas costeiras urbanizadas resulta frequentemente em respostas de contenção, como a construção de muros, espigões, barreiras de sacos de areia, entulho, pedras, plantação de árvores, entre outras medidas.

Diante desse paradoxo de causa e efeito, estudiosos como Muehe (2005) e Souza (2009) argumentam que a erosão sofrida por essas estruturas atua como indicador de eventos erosivos mais intensos, causados pela influência energética dos agentes físicos que moldam e transformam a costa.

Compreender a movimentação da erosão costeira auxilia em avaliações de risco à erosão. A indicação de áreas com potencial erosivo é considerada uma ferramenta importante na gestão da zona costeira. Já que, locais com tendência a erosão podem em curto prazo causar danos materiais à moradores (Siyal et al., 2022). Convencionalmente, o mapeamento da linha costeira em escala de detalhe é feito diretamente em campo com diferentes métodos de levantamento (Bartlett e Smith, 2005). É possível, também, mapear elementos que indicam processo erosivo em campo com o uso de geoindicadores (Bush et al., 1999).

Contudo, atualmente, devido a quantidade de dados de satélite e avançadas técnicas de processamento digital de imagem e sensoriamento remoto, estas imagens são amplamente utilizadas na detecção de alterações na costa (Mujbar e Chandrasekar, 2013). Benefícios associados a este método incluem a gratuidade, ampla cobertura de dados, alta resolução temporal e espacial, e menos recurso econômico em comparação com as técnicas convencionais (Qunag et al., 2021). Outra técnica para fazer a análise da dinâmica da linha de costa tem sido com uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Ferramentas para suporte de visualização, vetorização e cálculo de mudanças na linha de costa tem utilizado o Digital Shoreline Analysis System (DSAS) (Quang et al., 2021). A partir dos resultados é possível verificar tendências de acreção e erosão e combinar com outros métodos de identificação da dinâmica costeira (Thieler et al., 2003).

Ranieri e El-Robrini (2015) indicam que as taxas médias de variação de LCs constituem um bom índice para a determinar as tendências evolutivas de qualquer trecho do litoral. Essa tendência, se erosiva aponta para o diagnóstico e prognóstico de impactos potenciais na costa, caso haja elementos construídos expostos à erosão.

Embora o modelo aponte para um resultado, a relação causa-efeito precisa ser analisada com cautela. Pois, dependem da escala espacial e temporal, da época do ano e suas variações biofísicas e da variabilidade do trecho costeiro estudado (Ranieri e El-Robrini, 2016). Adicionalmente a forma de realizar esses estudos temporalmente precisa ser feita com o uso de imagens de satélite de diferentes anos, com baixa condições de nuvens e com a condição de maré baixa.

A Zona Costeira Amazônica (ZCA) e toda a paisagem ao longo da costa estão atreladas a processos antigos, como mudanças no Nível Médio do Mar (NMM) e condições climáticas passadas (Braga, 2019). Essa complexidade é influenciada por fatores como as macromarés semidiurnas e a dinâmica das correntes litorâneas.

A configuração geomorfológica atual foi esculpida pela dinâmica costeira, influenciada por fatores naturais quanto pela intervenção humana. As unidades de relevo são caracterizadas por planícies lamosas, canais de maré, praias, bancos de areia, dunas e falésias (Muehe e Nicolodi, 2008). Os manguezais colonizam parte da planície lamosa, e, as outras unidades de relevo são palco para uma diversidade de atividades e pressões humanas, tais como recreação, transporte, moradia, indústria e geração de energia (Hayachi et al., 2019). Toda essa diversidade de ocupação ocasiona a construções de riscos ambientais (Barreto e Pimentel, 2023). Como resultado, os ecossistemas de restinga e manguezais são os mais impactados devido a atividade humana (Hayashi et al., 2023) e a processos erosivos.

O município Salinópolis está situado na Costa Atlântica Paraense, Brasil. É conhecido por ser um importante polo de turismo em função da riqueza ambiental presente no ambiente, sendo um dos principais pontos de preservação da biodiversidade da região, abriga sistemas costeiros como manguezais, restingas, praias e ilhas, que são habitats para uma ampla variedade de espécies animais e vegetais (Braga, 2019). Estes, são fundamentais para o equilíbrio ambiental da região, desempenhando serviços ecossistêmicos importantes na proteção da costa contra a erosão, na regulação do clima e na preservação da biodiversidade (Pereira e Andrade, 2023).

Braga (2007) analisou elementos oceanográficos em Salinópolis, destacando marés de grande amplitude, superiores a 4m, ocorrendo duas vezes ao dia. As correntes de maré desempenham um papel crucial na dinâmica costeira, predominando ao longo do litoral, e

correntes litorâneas também influenciam o transporte de sedimentos da plataforma continental para a região costeira. Em paralelo, Ranieri (2016) descreve características geográficas distintivas de Salinópolis, especialmente na região pós-praia, que varia de manguezais a planícies de areia com vegetação de restinga, indicando terrenos arenosos e salinos cobertos por plantas herbáceas.

A ocupação humana em Salinópolis com empreendimentos turísticos e residenciais, tem gerado desafios socioambientais, incluindo riscos de erosão costeira e problemas relacionados à gestão (Ranieri, 2016, 2020; Braga 2019). Ranieri e El Robrini (2016) destacam, também, os efeitos da ocupação na faixa litorânea de Salinópolis, verificando que a porção costeira mais impactada atualmente abrange as praias da Ilha do Atalaia. Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é analisar a dinâmica da linha de costa da Ilha do Atalaia, localizada no município de Salinópolis, estado do Pará, entre 2002 e 2022 para contribuir com estratégias e soluções em um planejamento costeiro integrado contribuindo para cenários atuais e futuros.

Background sobre a gestão costeira

As ações de gestão costeira são relevantes à temática, sendo um instrumento político para as atividades de planejamento e gerenciamento das zonas costeiras. No Brasil, a gestão costeira começou a ganhar âmbito pela Lei nº. 7.661, de 16 de maio de 1988, instituindo o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), cujos detalhamentos e operacionalização foram objeto da Resolução nº 01/90 da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), de 21/11/90 (MMA, 2018). Segundo o Artigo 2º da Lei nº. 7.661, o PNGC visa especificamente orientar a utilização dos recursos na Zona Costeira Brasileira, de forma a contribuir para elevar a qualidade da vida de sua população, e a proteção do seu patrimônio natural, histórico, étnico e cultural (Brasil, 1988).

Nesse sentido, iniciativas científicas relacionadas a zona costeira ganham uma importância maior a partir da instrumentação legal de compreensão dessas áreas para fins de gestão costeira. Nesse cerne, o estudo da erosão costeira realizado em Brasil (2018) destaca-se pela concatenação das informações acerca da ZCP.

A Zona Costeira Paraense (ZCEP) apresenta um ambiente de alta energia, influenciado por macromarés semidiurnas, ondas geradas pelos ventos alísios de NE e correntes de maré de vazante de SE-NW e de enchente de NW-SE (Brasil, 2018).

A suscetibilidade a erosão ocorre especialmente devido às marés equinociais de sizígia, intensificando a energia das ondas. A erosão afeta toda a costa, sendo mais pronunciada no Setor Costa Atlântica, nas áreas centrais das ilhas ou municípios, devido à forma arqueada da costa e à intensidade do processo hidrodinâmico causado por ondas e marés robustas (Ranieri e El-Robrini, 2016).

O estudo em ambiente costeiro sobre alterações morfológicas e identificação de áreas erosivas, deposicionais ou preservadas são pertinentes, pois servem como ferramenta e subsídio para políticas de gerenciamento costeiro, bem como o planejamento e desenvolvimento de atividades humanas mais sustentáveis numa região. (Rosa *et al.*, 2021)

Não obstante, pesquisas relacionadas ao estudo da dinâmica costeira têm ganhado relevância nos últimos anos e, em especial na Amazônia (Ranieri e El-Robrini, 2016; Braga *et al.*, 2019, De Souza Negrão *et al.*, 2022), principalmente atrelados à erosão, a qual é um problemático presente no litoral, ocasionados tanto por mudanças antrópicas nos sistemas ambientais, quanto de fatores naturais que alteram os padrões ambientais, acarretando a perda de moradias, danos financeiros e colocando a população em risco.

Os estudos costeiros realizados na costa amazônica relacionados a dinâmica costeira apresentam avanços significativos na produção de mapeamentos detalhados e informações pertinentes para gestão e gerenciamento costeiro (Rosa *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2019; Hayashi *et al.*, 2019). Contudo, tendo como parâmetro as diretrizes na lei Estadual n.9°.064/2020, é pertinente a produção científica fundamentada nas pesquisas realizadas para integração político-administrativa na zona costeira paraense em diversas escalas.

Neste cerne, a problemática da erosão costeira é um desafio significativo para a gestão de zonas costeiras no Brasil e no mundo. Estudos recentes indicam que a aceleração das mudanças climáticas exacerba esses processos, aumentando a frequência e intensidade de eventos extremos, como tempestades e elevação do nível do mar (IPCC, 2021). No contexto da Amazônia, onde a combinação de fatores naturais e antrópicos é particularmente complexa, a compreensão detalhada das dinâmicas costeiras é crucial para desenvolver estratégias eficazes de mitigação e adaptação.

A falta de planejamento urbano adequado e

a degradação ambiental são fatores que agravam a erosão costeira na região de Salinópolis. A ocupação irregular e a construção de infraestruturas em áreas vulneráveis aumentam a exposição aos riscos, resultando em danos materiais significativos e colocando em risco as populações locais (Serrão, 2023). Além disso, a perda de habitats críticos, como manguezais e restingas, reduz a resiliência natural da costa, dificultando a recuperação dos ecossistemas após eventos erosivos.

Estudos em outras regiões costeiras, como as realizadas em partes da Ásia, revelam padrões semelhantes de suscetibilidade desses ambientes perante o cenário de mudanças climáticas e consequente alterações do nível dos oceanos. (Saengsupavanich *et al.*, 2023). Este estudo, elenca ainda, desafios semelhante aos da zona costeira paraense, estes podem ser resumidos como a rápida urbanização e a construção de infraestruturas ao longo da linha de costa, o aumento do nível do mar como consequência das alterações climáticas, o quadro inadequado de planejamento e gestão da zona costeira, déficit de abastecimento de sedimentos em comparação com as taxas de erosão, e enfrentar restrições na termos de recursos financeiros e técnicos para a gestão da erosão costeira.

A metodologia empregada neste estudo, utilizando o Digital Shoreline Analysis System (DSAS) e imagens de satélite Landsat ao longo de 20 anos, proporciona uma análise robusta e detalhada das variações na linha de costa. Este tipo de abordagem permite identificar tendências de longo prazo e avaliar a eficácia das medidas de gestão implementadas. A integração de dados multitemporais é fundamental para entender os processos dinâmicos em curso e prever cenários futuros, auxiliando na elaboração de estratégias de mitigação mais eficazes.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo – A área de estudo corresponde a Ilha do Atalaia localizada a norte do município de Salinópolis (Figura 1). O município integra a Mesorregião do Nordeste Paraense, situa-se entre as latitudes 0° 35' 28.12" e 0° 51' 0.89" sul e entre as longitudes 47° 29' 14.53" e 47° 14' 7.00" oeste. Ao Norte, limita-se com o Oceano Atlântico; a Leste com o município de São João de Pirabas; ao sul e a oeste, com o município de Maracanã. Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município possui área territorial de 223 km² e população de 40.675

peessoas, apresentando uma densidade demográfica de 157,40 hab/km². Sua sede dista 212 km da capital Belém.

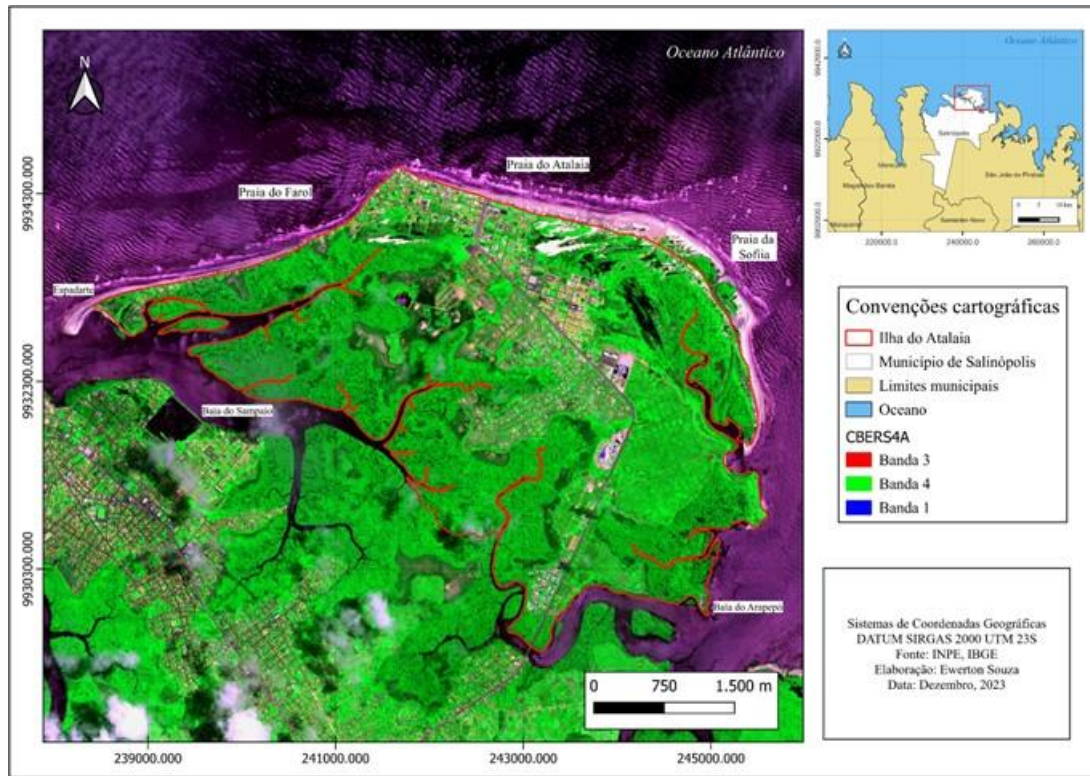


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo

Geologicamente são predominantes a Formação Barreira, a Formação Pirabas, os Sedimentos Pós-Barreiras e os sedimentos do quaternário (Mácola e El-Robrini, 2004). Sob a perspectiva da geomorfologia, Salinópolis faz parte do macrocompartimento do Litoral de Rias Pará-Maranhão, que se estende da Baía de Marajó até a Baía de São Marcos no Maranhão. Conforme o Projeto Radam (1973), o Litoral de Rias apresenta um primeiro trecho constituído por uma costa recortada bordejada por terras altas (tabuleiros costeiros), que se estende desde a Baía de Marajó até a embocadura do rio Maracanã, e um segundo trecho de costa baixa (planícies) recortada e colonizada por manguezais. Estes penetram pelos vales fluviais afogados (rias) em direção de montante até o limite de influência das águas salobras, no interior do continente.

O Litoral de Reentrâncias ou Rias, no qual o município está inserido, é resultante da

progradação lamosa, que ressalta a irregularidade da linha de costa, configurando um litoral afogado pela transgressão marinha, caracterizado por uma sucessão de pequenos estuários e acréscimos sedimentares que, em conjunto, dão um aspecto de rias, razão da denominação de “reentrâncias” (Muehe e Nicolodi, 2008).

O município apresenta duas unidades morfológicas distintas, o planalto costeiro e a planície fluviomarinha no planalto costeiro estão as áreas mais elevadas, nos baixos platôs têm cotas entre 6 a 15 m, enquanto os tabuleiros possuem cotas entre 16 e 25 m, já as colinas são áreas com elevação entre 26 e 34m (Furtado *et. al*, 2014). Os baixos platôs e tabuleiros são formas tabulares com superfícies aplainadas ou pouco onduladas e gradientes suaves em contato com as planícies. As colinas são de topo aplainado ou convexado com vertentes convexas e se localizam nas cotas mais elevadas (Figura 2).

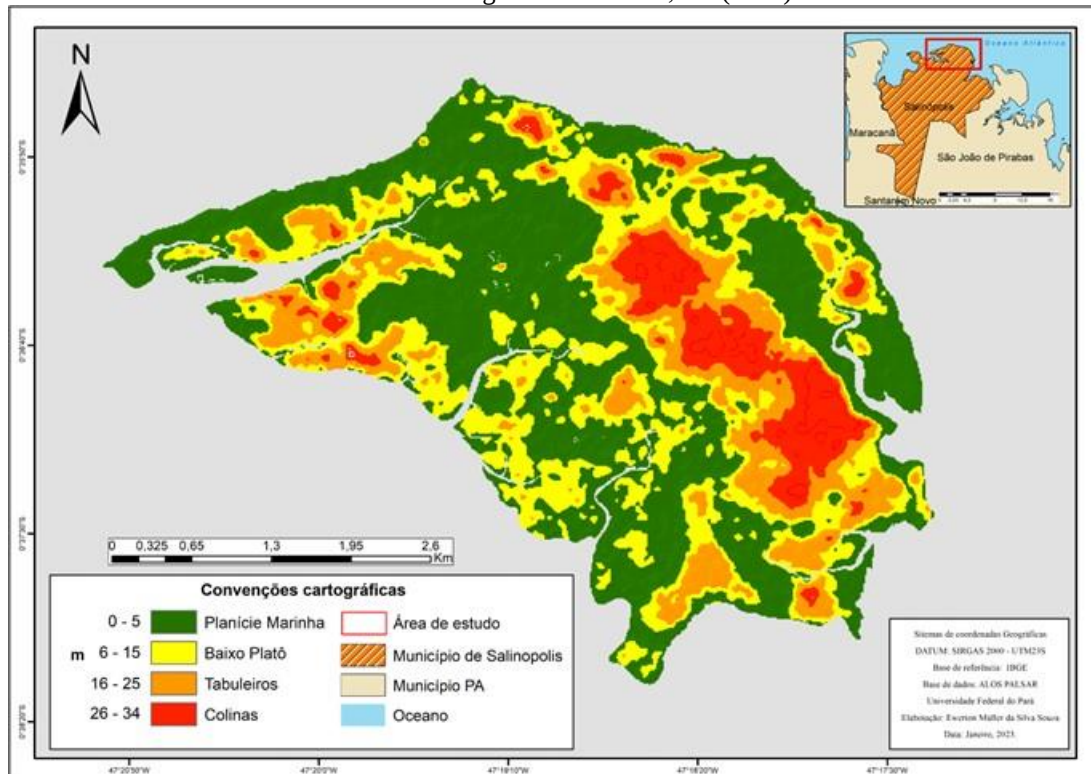


Figura 2. Mapa morfométrico da ilha de Atalaia, Salinópolis, PA.

A planície fluviomarinha é compartimentada em: planície aluvial, planície estuarina, e planície costeira; esta última contendo os ambientes de campos salinos, planície de maré lamosa e arenosa, dunas costeiras, deltas de mares, praias barreiras e cheniers (Mácola e El-Robrini, 2004). Na ilha de Atalaia, porção setentrional de Salinópolis, zona de contato com o mar, são identificadas planícies fluviomarinhas, que correspondem às áreas de acumulação quaternária, onde se inserem depósitos sedimentares gerados por ondas, marés e ventos (Ranieri, 2016).

O município de Salinópolis, registra diariamente variação de maré incidente sobre os ambientes naturais e estruturas artificiais, provocando erosão e acreção (Ranieri 2016). Quando essa ação coincide com marés de sizígia, a ação energética do mar intensifica o processo erosivo e provoca inundações costeiras, cujos maiores impactos são sentidos pelas populações mais vulneráveis socialmente, ou seja, as que possuem baixa renda e habitam setores de baixa topografia desprovida de condições básicas de saneamento para contornar os impactos sofridos pela dinâmica costeira associada às alterações humanas do espaço (Ranieri & El-Robrini, 2016).

A área de estudo também está inserida na zona costeira paraense, no litoral norte do Brasil ou

litoral amazônico. Possui clima tropical úmido, em latitudes próximas ao Equador, aspecto geográfico que lhe confere um período menos chuvoso de junho a dezembro e, período de maior pluviosidade de dezembro a maio, enquanto a temperatura média anual é 26,4 °C e 2.863 mm é o valor da pluviosidade média anual (INMET, 2021).

As dinâmicas de maré da praia do Atalaia, segundo a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) associada à Marinha do Brasil, indica o nível médio da maré em 2,75 m e picos de 5,40 m para o ano de 2021. Em março e abril ocorrem as maiores alturas de maré devido à associação de dois fatores principais: meses de maiores concentrações de chuva e a ocorrência do equinócio de outono, em 23 de março. As ondas, na localidade de estudo, são influenciadas a partir dos ventos alísios. Estes cruzam a plataforma continental em direção nordeste, gerando trens de ondas incidentes. Associados à morfologia de fundo, ocasionam correntes de deriva litorânea para noroeste (Ranieri, 2016).

A cobertura vegetal da ilha de Atalaia é diversa e acompanha as características topográficas e hidrológicas. Nos substratos das planícies marinhas, sob influência marinha e fluviomarinha, onde os solos estão em processos recentes de formação, desenvolvem-se as vegetações pioneiras.

Neste caso, as restingas (diretamente relacionadas à influência marinha) recobrem os campos de duna e os mangues possuem predominância na franja costeira (Braga, 2019).

As feições vegetais predominantes na região da costa atlântica paraense são halófila, psamófila reptante, brejo herbáceo, campo de dunas, formação aberta de moitas e floresta de restinga (Amaral *et al.*, 2008). Estas feições, estão presentes na Ilha de Atalaia, e são mais expressivas na porção leste da ilha atreladas a geomorfologia da área.

Procedimentos Metodológicos

A metodologia adotada nesta pesquisa iniciou-se com uma revisão de literatura abrangente, visando fundamentar teoricamente os conceitos de zona costeira, linha de costa e susceptibilidade à erosão. Essa etapa foi essencial para formular questões relevantes e direcionar a investigação. Em seguida, processos em laboratório envolveram a aquisição, tratamento e interpretação de imagens de satélite. Utilizamos ferramentas de software específicas para analisar a variação da linha de costa ao longo do tempo, permitindo a construção de gráficos e mapas temáticos que ilustram as mudanças observadas.

Por fim, aplicamos técnicas adicionais para compreensão da dinâmica as variações da linha de

costa em diferentes períodos, o que possibilitou a avaliação e quantificação das áreas de erosão e deposição. Dividimos a análise em setores específicos, garantindo uma compreensão detalhada das mudanças na linha de costa ao longo do tempo.

Desse modo, o estudo sobre a variação da posição da linha de costa (LC) como um indicador físico de erosão, foi conduzida em laboratório e, a delimitação da LC fora realizada partir da linha limítrofe entre a vegetação e das dunas ou dos mangues e os cordões arenosos praias (França, 2020). Para melhor análise dos resultados a linha de costa foi dividida no setor A (Praia do Farol Velho/Espadarte), setor B (Praia do Atalaia) e setor C (Praia da Sofia) (Figura 3).

Ao longo dos anos, a LC pode mudar de localização em decorrência de alterações nos processos de erosão, transporte e acúmulo de sedimentos. Sendo assim, a variação da posição da linha de costa é um dos mais importantes indicadores geomorfológicos de dinâmica costeira. É o reflexo da ação erosiva ou deposicional dos agentes costeiros, tais como as marés, ondas, correntes e ventos. Isso resulta em mudança nas formas de relevo, na cobertura vegetal, nos solos e na ocupação (Ranieri et al. 2015).

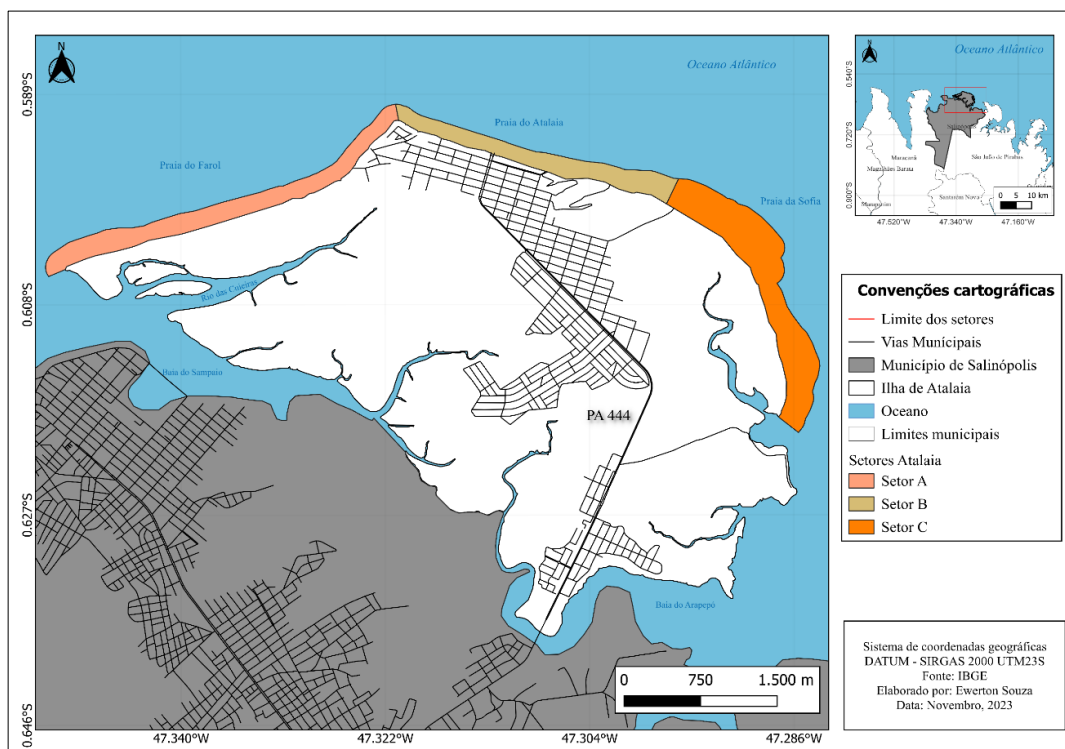


Figura 3.Divisão geográfica dos setores pesquisados

A primeira etapa da pesquisa consiste na consulta de referências em produções científicas como forma de sustentação teórica para os principais conceitos abordados ao longo deste trabalho (zona costeira, linha de costa, susceptibilidade a erosão), assim como auxiliam na construção de questões a serem trabalhadas na atualização de informações e assim alcançar os objetivos da pesquisa. Por conseguinte, desenvolveu-se a etapa de laboratório a qual

consistiu na aquisição e no tratamento e interpretação de imagens, análise e interpretação de resultados, confecção de gráficos e de mapas temáticos. Foram adquiridas gratuitamente imagens georreferenciadas do satélite LANDSAT 7 ETM + pancromática para o ano de 2002 e LANDSAT 8 OLI + pancromática para o ano de 2022, oriundas do site do United States Geological Survey (USGS). Dessa maneira, foi realizada a análise da variação da linha de costa para ilha de Atalaia (Quadro 1).

Quadro 1. Dados das imagens LANDSAT utilizadas na pesquisa.

Satélite	Sensor	Data de aquisição	GMT	Órbita/ponto	Resolução espacial
Landsat 7	ETM	07/09/2002	13:10:40	223/60	Multiespectral: 30m ; Pancromática: 15m
Landsat 8	OLI e TIRS	02/12/2013	13:24:19	223/60	Multiespectral: 30m ; Pancromática: 15m
Landsat 8	OLI e TIRS	02/06/2022	13:22:42	223/60	Multiespectral: 30m ; Pancromática: 15m

As imagens LANDSAT foram manipuladas no software ArcMap 10.5. O primeiro passo consistiu na composição RGB das bandas 5, 4 e 3 do sensor ETM e nas bandas 4, 5, 6 do sensor OLI, a fim de serem realçadas as feições superficiais que auxiliam a interpretação das imagens. Ademais, as imagens foram fusionadas através da ferramenta *pansharpenig*, assim, a resolução espacial destas

fora de 15m. Os metadados de cada imagem mostram os erros de georreferenciamento, utilizados para fazer os cálculos supracitados onde 1 pixel equivalente a 15m para o cálculo linear e 225m² para cálculo de área (Quadro 2). Deste modo são calculados os erros geométrico lineares e de área das imagens, e os respectivos erros acumulativos.

Quadro 2. Erros geométricos das imagens LANDSAT

Satélite	Ano	Erro/pixel	Erro geométrico linear	Erro geométrico de área
Landsat 7	2002	0,341	5,1m	76,7m ²
Landsat 8	2013	0,609	9,1m	137m ²
Landsat 8	2022	0,639	9,5m	143m ²
Erro geométrico acumulativo			23,8m	356,7m ²

$1 \text{ Pixel} - 15\text{m}$ $x = 5,1$ $x = \frac{5,1}{15}$ $x = 0,341 \text{ pixel}$ Erro geométrico linear	$1 \text{ Pixel} - 225\text{m}^2$ $0,341 - x$ $x = 0,341 \cdot 225$ $x = 76,7\text{m}^2$ Erro geométrico areolar
--	--

Com base na interpretação visual das imagens a LC foi vetorizada ao longo dos setores A, B e C. Esses vetores foram sobrepostos e comparados. Isso permitiu a identificação de áreas onde houve avanço e recuo da posição da LC e, consequentemente, de setores progradacionais e retrogradacionais. Para a análise da variação da linha de costa utilizou-se a DSAS 5.0 (Digital Shoreline Analysis System), esta é uma extensão que amplia as funcionalidades do software ArcMap 10.5 permitindo a automatização de grande parte das tarefas relacionadas com a análise quantitativa

das tendências de erosão e deposição através de uma série estatística de tempo e posições múltiplas da linha de costa. Assim, a partir de uma série temporal de dados vetoriais de linha de costa, o DSAS gera transectos ortogonais à linha de costa com espaçamento definido pelo usuário e calcula estatísticas de taxas de mudança da linha de costa a partir de vários índices (Himmelstoss, 2018). Os índices utilizados na ferramenta DSAS nesta pesquisa foram NSM (Net Shoreline Movement), EPR (End Of Point Rate), SCE (Shoreline Change Envelope).

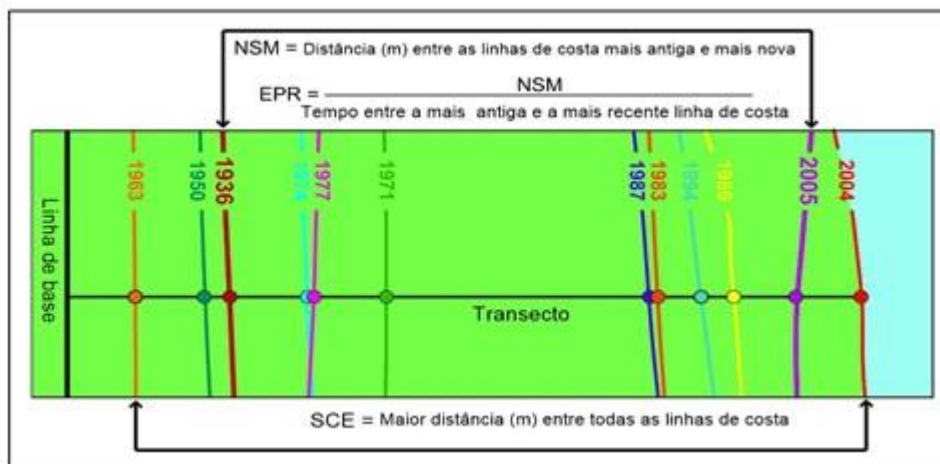


Figura 4. Ilustração de estatística das linhas costeiras com as indicies NSM, EPR e SCE. Fonte: Himmelstoss, 2018.

O EPR (End of Point Rate) é calculado dividindo a distância do movimento da linha costeira pelo tempo decorrido entre a linha costeira mais antiga e a mais recente. O SCE (Shoreline Change Envelope), implica em um envelope de mudança da linha costeira em metros, não uma taxa. O valor SCE representa a maior distância entre todas as linhas costeiras que cruzam um determinado transecto, como a distância total entre

duas linhas costeiras não tem sinal, o valor para SCE é sempre positivo (Himmelstoss, 2018).

O NSM (Net Shoreline Movement) implica no movimento líquido da linha da costa, ou seja, é a distância entre a linha da costa mais antiga e a mais nova para cada transecto, portanto, as unidades estão em metros. Se esta distância for dividida pelo tempo decorrido entre as duas medições da posição da costa, o resultado é a taxa de ponto final

Outra técnica aplicada neste trabalho para medir as variações da linha de costa é o Método de Mudança de Polígonos (Apostolopoulos, D., & Nikolakopoulos, K., 2021), que considera as áreas, em vez de valores pontuais, para calcular os percentuais de erosão ou deposição. Este método usa duas linhas de costa de períodos diferentes para a avaliação e quantificação das áreas de erosão e deposição. Esta análise foi dividida em dois períodos, de 2002 a 2013 e 2013 a 2022. A partir dessa premissa, foi realizada a vetorização dos polígonos e efetuado o cálculo de área em metros quadrados (m^2). Com a consolidação das taxas

gerais de erosão e progradação, detalhou-se a análise por setores, A (Praia do farol velho/Espadarte), B (Praia do Atalaia) e C (Praia da Sofia).

No trecho costeiro analisado efetuou-se um total de 101 transectos com espaçamento de 100 m ao longo da extensão das praias distribuídos no sentido leste-oeste. O Setor A corresponde aos transectos 1 a 39, o Setor B aos transectos 40 a 68 e o Setor C aos transectos 69 a 101. A linha de base (baseline), que é utilizada na referência espacial de todos os anos, consistiu numa linha paralela a LC na direção offshore.

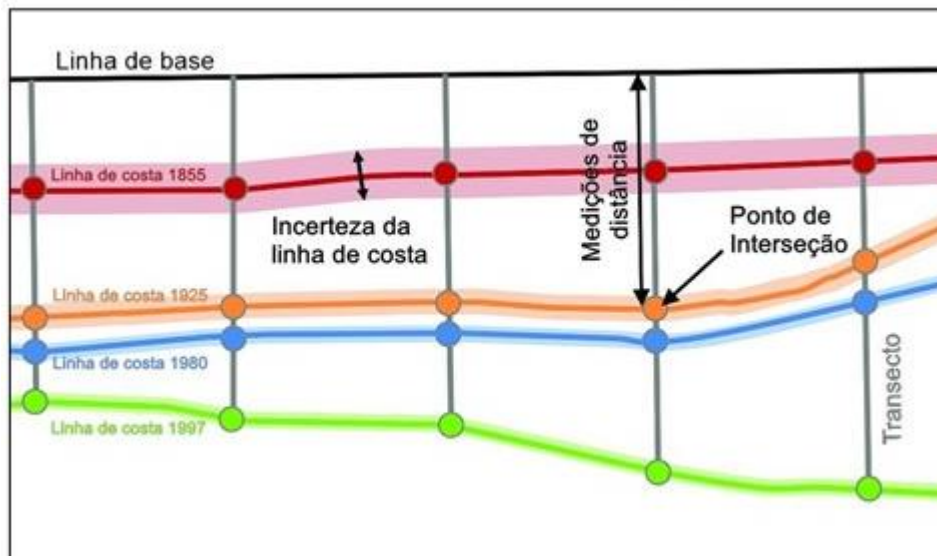


Figura 5. Distância de medição da linha base a cada ponto de interseção. Fonte: Himmelstoss, 2018.

Resultados

Para o período de 20 anos, a variabilidade, no que tange a progradação linear média, para toda área foi de 368,75 m, o que indica uma tendência de progradação nos transectos investigados. Nesse bojo, a taxa de progradação linear foi de 18,43 m/ano no período analisado. Além disso, o total de

áreas de progradação é de 825.719 m^2 , o que implica uma taxa de 41.285 m^2 /ano. Por outro lado, a retrogradação da LC também foi observada, com um recuo linear médio de 87,80 m, indicando uma taxa de 4,39 m/ano. O total de áreas em retrogradação foi de 230.546 m^2 , a uma taxa de 11.527 m^2 /ano (Quadro 3).

Quadro 3. Resultados quantitativos referentes à mobilidade da linha de costas e às áreas progradacionais e retrigradacionais da ilha de Atalia, no intervalo de 2002 aa 2022

PROGRADAÇÃO		RE TROGRADAÇÃO	
Avanço linear médio da LC (m)368,75 m	Total de áreas de progradação (m²) 825.719	Recuo linear médio da LC (m)87,80 m	Total de áreas em retrogradação (m²) 230.546
Taxa 18,43 m/ano	Taxa 41.285 m²/ano	Taxa 4,39 m/ano	Taxa 11.527 m²/ano

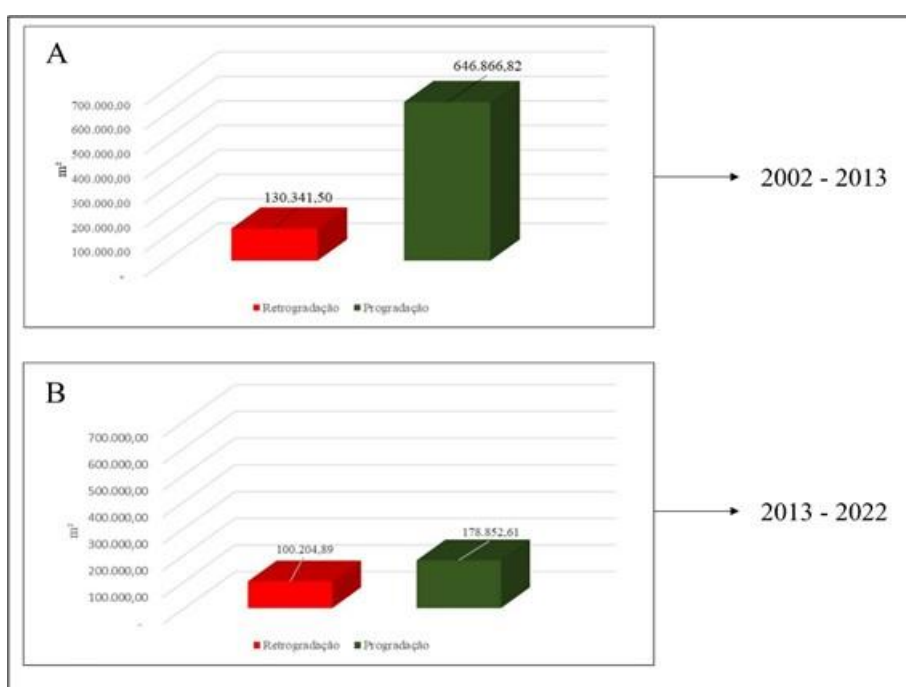


Gráfico 1. Taxas de progradação e retrogradação entre 2002 e 2022, Ilha de Atalaia, Salinópolis

A análise de mudanças de polígonos teve como resultado principal dinâmicas de progradação na área de estudo. São registrados 130.341m² de áreas de retrogradação, enquanto 646.866m² de áreas em processos de progradação de 2002 à 2013 (Gráfico 1A). Não obstante, o período em questão, é importante para compreensão dos processos dinâmicos do início dos anos 2000 os quais posteriormente podem ser relacionados com dados atuais.

O processo de progradação da linha de costa continua sendo predominante na segunda década de investigação da pesquisa (Gráfico 1B). São registrados 100.204 m² de áreas em retrogradação, enquanto 178.852 m² são áreas em progradação. No

entanto, observação que, em relação as duas décadas estudadas (2002, 2013/ 2013, 2022) a proporção do último intervalo em comparação ao primeiro é menor. A análise por setor indica que entre 2002 e 2013 o Setor A em seu extremo oeste contou com áreas progradacionais na Ponta do Espadarte de 60.475m² e em uma área de 28.843m² na porção central da Praia do Farol. O Setor B da Praia do Atalaia teve

No intervalo entre 2013 e 2022 o Setor A da Praia do Farol teve uma inversão de dinâmica a passou a ter áreas com predominância de retrogradação em uma área de 100.202m². O Setor B da Praia do Atalaia teve uma tendência de progradação em uma área de 87.747m². E o Setor C

na Praia da Sofia apresentou uma tendência a retrogradação com 226.480m² e uma área ao norte do mesmo setor, bem como na porção central de

acresção, representando 87.115m² (Figura 6B, Figura 7C).



Figura 7. Indicadores de erosão nos setores da ilha de Atalaia. A) Área central do setor A (praia do farol) com construções danificadas pela erosão presente na área. B) Setor B (praia de Atalaia) com presença de estruturas de contenção à erosão. C) Setor C (praia da Sofia) com presença de “Paleomangue”, feição essa condizente com as características erosivas desta área específica

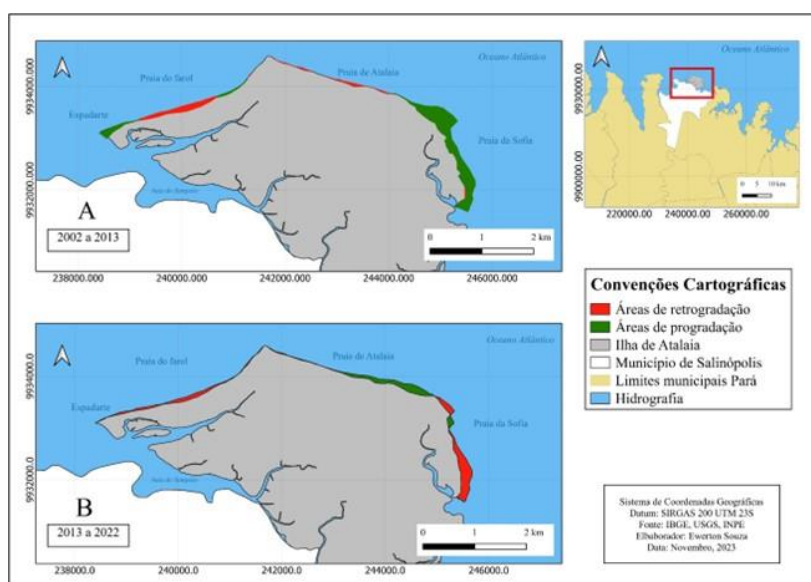


Figura 6. Mapa de áreas de progradação e retrogradação de 2002 a 2022, Ilha de Atalaia, Salinópolis, PA.

Os resultados dos índices apontam que para o Net Shoreline Moviment (NSM) há uma predominância da progradação, principalmente no Setor C da Praia da Sofia, onde é evidente o processo de sedimentação no período de 2013 a

2022 (Figura 7A). No Setor B da praia do Atalaia os valores são predominantemente negativos com uma taxa média de -80,7m, o que indica o caráter erosivo desta área. Os dados do índice NSM estão distribuídos em 17% negativo, o que indica uma

baixa variação total da linha de costa mais antiga para a mais recente. Os resultados apontam que 36,63% dos dados são de pouca variabilidade, salienta-se que estes indicam valores que estão dentro da margem de erro linear explicitada no trabalho. Dos dados de progradação 45,54% da LC tivera processos de acreção na ponta do Espadarte, extremo oeste do Setor A e no Setor C.

A análise realizada pelo índice End of Point Rate (EPR) apontam para taxas variação anual média dos transectos (m/ano), sendo o os valores negativos de -6,57 a -3,15 (retrogradação), em maior evidência no Setor A. Já a distribuição de valores entre -0,1 a 1,8m/ano, estão identificados na porção central do setor B. Enquanto a progradação, com valores sempre positivos entre 1,9 e 17,40 são notáveis no Setor C da Praia da Sofia (Figura 8B).

O resultado do índice Shoreline Change Envelope (SCE), mostram que as maiores variabilidades entre as LC estão localizadas no Setor C (Praia da Sofia), sendo constatados valores entre 222,96m a 408,32m, nesta área (Figura 8C). Já as menores variabilidades estão presentes,

principalmente, no setor B (praia do Atalaia), com valores entre 1,7m a 67,9m.

Portanto, a análise por setores revela disparidades significativas na dinâmica costeira, com o Setor C apresentando as maiores taxas de progradação, enquanto o Setor A apresenta as maiores taxas de erosão. Esses padrões são cruciais para o planejamento de medidas de adaptação específicas para cada região. A variabilidade observada nos índices NSM, EPR e SCE destaca a complexidade dos processos costeiros da ilha de Atalaia, sugerindo que intervenções de manejo devem ser adaptadas às características geomorfológicas e ambientais locais. A identificação de áreas de maior suscetibilidade a erosão, especialmente nas zonas urbanizadas, sublinha a necessidade de políticas públicas focadas na proteção e recuperação de ecossistemas costeiros, que podem atuar como barreiras naturais contra a erosão.

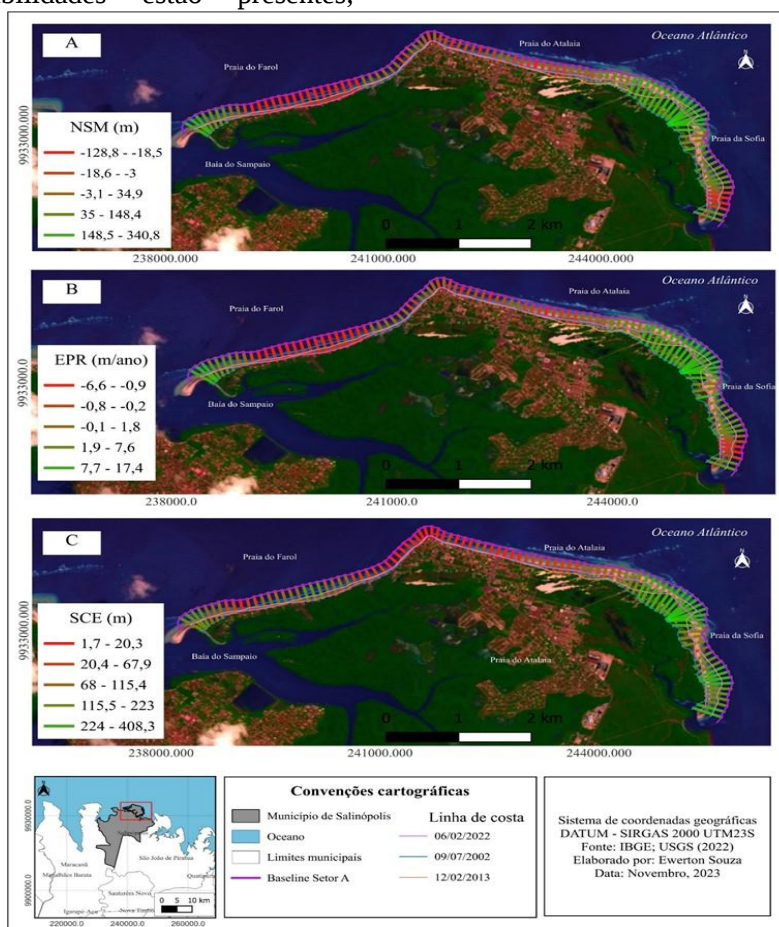


Figura 8 – Distribuição das taxas lineares (A) – Net Shoreline Movement; (B) – End of Point Rate; (C) Shoreline Change Envelope, analisadas no DSAS, ilha de Atalaia, Salinópolis.

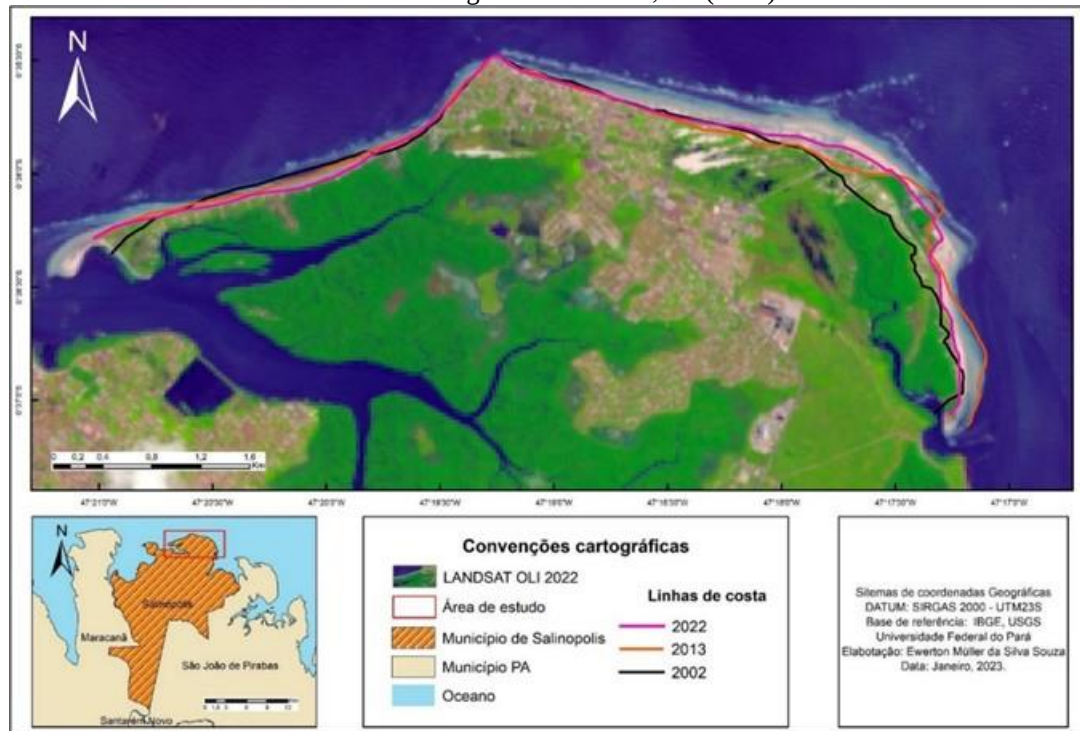


Figura 9. Mapa da Variação da posição da linha de costa entre os anos de 2002, 2013 e 2022, da Ilha de Atalaia, Salinópolis-PA

Discussão

A região central do Setor A da Praia do Farol foi a que manteve uma tendência erosiva ao longo de todo o período estudado (2002-2022). Essa área de erosão costeira possui estruturas de contenção artificial e descontínua ao longo da praia. São, portanto, áreas desprovidas de proteções naturais da região como dunas, manguezal e vegetação de restinga (Nascimento et al., 2013; Hayashi et al., 2023). Juntamente com o Setor B da praia da Atalaia (entre 2013 e 2022) compõem uma LC urbanizada contínua. Estudos anteriores de Braga *et al.* (2019) também aponta para essas áreas de erosão, identificando-as como localidades vulneráveis. Ademais essa área é categorizada como em fase de urbanização, caracterizando-se pela ocupação direta da praia, notadamente por hotéis, pousadas e amplas residências de veraneio, com média concentração de edificações (Ranieri e El Robrini, 2016).

Com relação aos aspectos naturais, as tendências erosivas estão em áreas mais expostas aos processos dinâmicos de maré, como a refração de ondas as quais originam correntes longitudinais e conseqüentemente, tendem a diminuir no final da faixa praial, ocasionando deposição de sedimento transportados longitudinalmente (Braga et al.,

2019b). Ranieri e El-Robrini (2016b) analisaram o aspecto da influência das correntes no transporte dos sedimentos e concluíram que para o Setor B, Praia do Farol Velho, o balanço de sedimentos transportados transversalmente foi de 80 g (durante a vazante) e de 690g (durante a enchente). Este resultado foi identificado para a estação menos chuvosa.

A tendência de erosão também é condicionada pela morfologia praial. De acordo com Ranieri e El-Robrini (2020) os maiores declives estão no Setor C, na praia do Farol Velho. Há trechos com ocorrência de afloramentos rochosos, no formato de terraços exumados o que configuram topografia levemente mais acentuada na face praial”. Embora devido a dinâmica costeira, em praias de macromarés a declividade praial pode ter variações e ter momentaneamente um padrão mais refletivo (Calliari et al., 2013).

Os “paleomangues” mencionados na área da praia da Sofia, são evidenciados em trabalhos anteriores, delineando-se um indicativo de processos erosivos (De Aguiar e El-Robrini, 2012). Na Ilha do Atalaia essa feição foi identificada no Setor C com uma extensão aproximada de 500 m. Feição está com raízes de manguezais expostas.

Evidências de erosão do Setor A e B são as estruturas de contenção existentes, em diversos

graus de bom funcionamento. De acordo com Braga et al. (2019b), as ondas nas praias do Farol Velho e Atalaia, dissipam energia potencial de 11.387,91 w/m e 6,405,48 w/m, respectivamente. E dada as construções para fins comerciais e residenciais estarem ocupando a praia, a pós-praia e estirâncio tem-se como consequências as evidências da erosão da costa nestas construções.

A tendência a deposição tende a ocorrer pela sedimentação nas extremidades de cada faixa litorânea, onde se evidencia uma maior acumulação. Ranieri (2015), também identificara predominantemente eventos de acreção costeira nas extremidades das áreas em análise, notadamente na planície lamosa e na região de praia, respectivamente. Nessas extremidades, a inclinação deposicional torna-se mais nitidamente perceptível, influenciada pela proximidade das margens dos estuários e canais de marés, onde se verifica a presença de deltas de maré vazante na desembocadura (Ranieri e El-Robrini, 2020). Outra hipótese para a áreas de acumulação podem estar relacionadas com a baixa antropização nas exterminadas da área investigada. Tanto a localidade do espadarte no Setor A, no extremo oeste do setor da praia do farol, quanto a área da praia da Sofia, Setor C, possuem tal característica. Em praias que não são muito dotadas de infraestrutura para turismo, a região do pós-praia, do estirâncio e das dunas não sofrem impactos intensos provenientes da ocupação (Braga et al., 2019). Entre o Setor B e C, existe uma Unidade de Conservação o Monumento Natural do Atalaia que visa proteger objetivo de proteger parte do ambiente costeiro onde estão localizados lagos, dunas e manguezais (SEMAS, 2014).

As localidades que apresentaram menor variabilidade, estão sobre áreas construídas e de orla urbanizada do Setor A, dessa forma apresentam pouca variação em função das estruturas de contenção existentes para a utilização comercial da orla. Os efeitos da urbanização na costa atlântica paraense, passam a ser mais evidentes na última década. Embora desde a década de 60, período este onde Salinópolis torna-se Estância hidromineral (Decreto/Lei 3.786/66), o município passou a receber investimentos em infraestrutura e incentivo ao turismo (Rosa et al., 2021).

Nos últimos 20 anos, o município de Salinópolis e, em especial, a ilha de Atalaia, sofrera com a diminuição das áreas de manguezal, avanço da cunha salina sobre o aquífero, aumento da erosão costeira, lixo, esgoto sem tratamento, contaminação de águas subterrâneas, conflitos fundiários e

ocupações irregulares em área de proteção costeira (Braga et al., 2019). Especialmente na ilha de Atalaia, é evidente que a interferência humana, está cada vez mais consolidada com construções irregulares de hotéis em áreas de dunas e residências de veraneio sobre os terraços que limitam a linha de costa (Ranieri, 2016). O conhecimento sobre a dinâmica costeira é um subsídio para a melhoria de políticas públicas de gestão e ordenamento territorial para as paisagens costeiras amazônicas.

Na ilha de Atalaia, os resultados indicam que a progradação predominante observada no Setor C da Praia da Sofia pode ser atribuída à sedimentação favorecida pela ação das marés e correntes marítimas que redistribuem os sedimentos ao longo da costa. Este processo é potencializado pela morfologia local que facilita a deposição de sedimentos nas extremidades da faixa litorânea.

Por outro lado, a erosão significativa observada no Setor A da Praia do Farol está diretamente relacionada à ausência de proteções naturais como dunas e vegetação de restinga. A construção desordenada de infraestruturas urbanas ao longo da costa também contribui para a intensificação da erosão, conforme evidenciado pelas estruturas de contenção danificadas e a ocupação direta da praia por hotéis e residências.

Os estudos comparativos indicam que a combinação de fatores naturais e antrópicos desempenha um papel crucial na dinâmica costeira. A compreensão detalhada desses processos é vital para o desenvolvimento de estratégias de mitigação eficazes e para a elaboração de políticas públicas que garantam a sustentabilidade das áreas costeiras.

O estudo de Silva et al. (2021) sobre a Ilha Comprida, no Brasil, utilizou sensoriamento remoto para quantificar a distribuição de progradação e erosão ao longo de uma linha costeira moderna, identificando fatores dinâmicos que afetam essas mudanças. Este estudo destaca a importância de fatores naturais como a ação das marés e correntes na redistribuição de sedimentos, similar aos processos observados na Praia da Sofia em Atalaia, onde foi registrada uma predominância de progradação.

Outro estudo relevante é o de Zuchuat et al. (2023), que investigou os mecanismos ativos que controlam a morfodinâmica de uma barreira costeira. Eles identificaram que a retrogradação e progradação são influenciadas por características geomorfológicas locais e eventos de tempestades. Esses achados podem ser correlacionados com a tendência erosiva observada no Setor A da Praia do Farol em Atalaia, onde a ausência de vegetação de

restinga e estruturas de contenção inadequadas contribuem para a erosão costeira.

Além disso, a pesquisa de Karle et al. (2021) no Mar de Wadden central analisou o desenvolvimento da paisagem costeira durante o Holoceno em resposta à elevação do nível do mar, observando deslocamentos multifacetados de progradação e retrogradação. Este estudo é relevante para entender as variações temporais na dinâmica da linha de costa em Atalaia, especialmente nos setores com alta variabilidade como o Setor C.

As variações na linha de costa em Salinópolis têm implicações significativas na qualidade de vida das comunidades locais. A erosão costeira, exacerbada por eventos climáticos extremos, resulta na perda de infraestrutura crítica, como estradas, pontes e residências. Este fenômeno não só desloca famílias, como também reduz o valor das propriedades e eleva os custos de seguros (Freitas et al., 2020; Pais-Barbosa & Marto, 2023). Em termos econômicos, a erosão afeta diretamente o turismo, uma das principais fontes de renda da região. A perda de praias e a degradação das paisagens naturais diminuem a atratividade turística, reduzindo o fluxo de visitantes e, consequentemente, a renda gerada por essa atividade.

Além disso, as atividades de subsistência de muitas famílias são alteradas pela destruição de habitats como os manguezais, que servem como áreas de reprodução e crescimento de várias espécies marinhas. A redução desses habitats afeta negativamente as comunidades locais, bem como das espécies marinhas que utilizam esse sistema para reprodução natural. (Ankrah et al., 2023).

Os sistemas costeiros de Salinópolis, incluindo manguezais e restingas, são altamente vulneráveis às mudanças na linha de costa. A erosão costeira e a subida do nível do mar levam à perda desses habitats, resultando em uma diminuição da biodiversidade. Os manguezais, por exemplo, atuam como barreiras naturais contra tempestades e como filtros de poluição, além de serem locais de alimentação e reprodução para diversas espécies. Sua perda aumenta a vulnerabilidade da costa a eventos extremos e diminui a resiliência dos ecossistemas locais (Freitas et al., 2020; Ankrah et al., 2023).

Conclusões

As análises das áreas durante o processamento das imagens permitiram a investigação dos processos ocorrentes na LC da ilha

de Atalaia em dois períodos. O primeiro de 2002 a 2013 e outro de 2013 a 2022. O estudo das áreas progradação e retrogradação da área de apontam uma mudança significativa no Setor B e C, sendo identificado nessa área um significativo recuo e um avanço da LC, respectivamente. Embora, em termos constata-se que houve o predomínio geral da progradação da linha de costa da ilha de Atalaia. Os dados demonstram que ocorreu um total de 230.546 m² de áreas onde o fenômeno erosivo atuou com taxa anual de 11.527 m². No mesmo sentido, o recuo linear médio, no intervalo considerado, foi de 87,80m, traduzido por uma taxa de 4,39 m/ano. Em contrapartida, as áreas de avanço da linha de costa somaram um total de 825.719m² a uma taxa média anual de 41.285m²/ano.

A dinâmica da linha de costa analisadas por meio dos índices NSM, EPR e SCE permitiram uma análise detalhada dos fenômenos que fazem parte da localidade estudada. O nível de detalhamento dos dados por intermédio do ferramental geotecnológico utilizado foi possível identificar as áreas com potenciais erosivos de Setor B na praia do Atalaia. O estudo da variação da linha de costa na ilha de Atalaia, Salinópolis, demonstrou um cenário alta variabilidade, principalmente no setor C, localizado na parte Oeste da ilha, porção esta com características físicas regionais particulares como a formação geomorfológica da costa com dunas móveis e vegetação de restinga.

Os setores A e B das praias do Farol e Atalaia, respectivamente, correspondem a uma área com pouca variabilidade linear bruta. Estas áreas são compostas por uma faixa urbanizada e núcleos urbanos que estão em contato com mar na faixa de orla. Este tipo de ocupação está susceptível a danos por processos de erosão. Esse processo de ocupação na ilha de Atalaia, evidencia a supressão do sistema costeiro local proporciona uma menor proteção do litoral e dificulta o processo de progradação da linha de costa.

Os resultados das análises realizadas demonstraram as dinâmicas de erosão e progradação na linha de costa da ilha de Atalaia ao longo dos períodos estudados. A investigação detalhada utilizando imagens de satélite e índices geoespaciais revelou mudanças significativas em diferentes setores da ilha, particularmente nos setores B e C. Essas mudanças têm implicações diretas na gestão costeira e no planejamento urbano, destacando a necessidade urgente de medidas de mitigação e adaptação.

Os dados indicam que as áreas mais urbanizadas, especialmente nos setores A e B, são as mais suscetíveis à erosão devido à falta de proteções naturais, como dunas e vegetação de restinga. Este cenário destaca a importância de implementar políticas de conservação e restauração de sistemas costeiros para aumentar a resiliência das áreas urbanas contra processos erosivos. A introdução de barreiras naturais e a revegetação podem proporcionar uma proteção mais eficaz e sustentável do que as estruturas artificiais atualmente utilizadas.

Para mitigar esses impactos, é fundamental que as autoridades locais implementem políticas públicas baseadas em dados científicos robustos. Estudos indicam que a utilização de abordagens participativas e integradas para a gestão costeira, que envolvem comunidades locais no processo de tomada de decisão, é essencial para o sucesso das medidas de adaptação e mitigação (Pais-Barbosa & Marto, 2023). A adoção de soluções baseadas na natureza, como a restauração de manguezais e dunas, pode aumentar a resiliência das áreas costeiras e proteger tanto os ecossistemas quanto as comunidades humanas.

Os resultados apresentados sublinham a necessidade de uma abordagem integrada e multidisciplinar na formulação de políticas públicas para a gestão da zona costeira de Salinópolis. A utilização de ferramentas geotecnológicas, como o DSAS, permitiu uma compreensão detalhada das dinâmicas costeiras, essencial para a elaboração de estratégias de gestão baseadas em evidências. É imperativo que as autoridades locais utilizem esses dados para desenvolver planos de uso do solo que considerem a variabilidade da linha de costa e os potenciais riscos de erosão.

Agradecimentos

Ao programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pela infraestrutura e suporte ao estudante durante o processo de pesquisa. Este trabalho faz parte do projeto Observatório da Gestão Costeira vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Geografia. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo subsídio como bolsista do primeiro autor, bem como do fomento a pesquisa e desenvolvimento científico na Amazônia.

Referências

- Amaral, D. D. D., Prost, M. T., Bastos, M. D. N. D. C., Neto, S. V. C., & Santos, J. U. M. D. (2008).
- Ankrah, J., Monteiro, A., & Madureira, H. (2023). Shoreline Change and Coastal Erosion in West Africa: A Systematic Review of Research Progress and Policy Recommendation. *Geosciences*, 13(2), 59. DOI: 10.3390/geosciences13020059
- Apostolopoulos, D., & Nikolakopoulos, K. (2021). A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. *European Journal of Remote Sensing*, 54(1), 240-265.
- Barreto, C. E. C., & da Silva Pimentel, M. A. (2023). O risco socialmente construído em uma cidade da zona costeira amazônica, dinâmica ambiental e ocupação do solo em Vigia de Nazaré/PA, Brasil. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)*, 58(2), 192-202.
- Bartlett, D., & Smith, J. (2004). GIS for coastal zone management. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420023428>.
- Boak, E.H. & Turner, I.L. 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(4): 688-703.
- Braga, R. C., & Pimentel, M. A. S. (2019). Índice de Vulnerabilidade Diante da Variação do Nível do Mar na Amazônia: Estudo de Caso no Município de Salinópolis-Pará (Index of vulnerability faced with the variation of the sea level in the Amazon: case study in the municipality of salinópolis-Pará). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(2), 534-561.
- BRASIL, C. N. (2018). Panorama da erosão costeira no Brasil.
- Bush, D. M., Neal, W. J., Young, R. S., & Pilkey, O. H. (1999). Utilization of geoinicators for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation. *Ocean & Coastal Management*, 42(8), 647-670. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(99\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(99)00027-7).
- Calliari, L. J., Muehc, D., Hoefel, F. G., & Toldo Jr, E. (2003). Morfodinâmica praial: uma breve revisão. *Revista brasileira de oceanografia*, 51, 63-78.
- Da Costa, A. M. S., de Lima, A. M. M., & de Andrade, M. M. N. (2019). Alterações na Paisagem e seus Efeitos Sobre as Áreas de Preservação Permanente em Bacias Hidrográficas no Nordeste do Estado do Pará.

- Revista Brasileira de Geografia Física, 12(07), 2729-2740.
- De Aguiar, P. F., El-Robrini, M., Freire, G. S. S., & de Carvalho, R. G. (2012). Mudanças morfológicas na linha de costa das praias de almofala e da barreira em médio período (1958-2004) utilizando técnicas de sensoriamento remoto. *Revista GEONORTE*, 3(5), 1612-1623.
- De França, C. F., Pereira, R. R., Júnior, J. L. D. A. F., & de Araújo, F. A. (2020). Erosão da orla costeira grande-bispo, ilha de Mosqueiro, Belém-PA, através da análise de indicadores. *Geografia Ensino & Pesquisa*, e20-e20.
- De Souza Negrão, Y., Sousa, H. C., & Ranieri, L. A. (2022). Vulnerabilidade à erosão costeira em praias amazônicas e a ocupação populacional em áreas de riscos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(2), 1264-1284.
- Freitas, A., Achete, F., & Vinzón, S. B. (2020). Characterization of the Coastal Environment as a Baseline for Alternative Tourism Segments Development in Salinópolis, Pará. *World*, 1(3), 227-238. DOI: 10.3390/world1030017
- Furtado, A. M. M., & da Ponte, F. C. (2014). Mapeamento de unidades de relevo do estado do Pará. *Revista GeoAmazônia*, 1(02), 56-67.
- Hayashi, S. N., Souza-Filho, P. W. M., & Fernandes, M. E. (2023). Status of mangroves land use on the Brazilian Amazon coast from RapidEye imagery and GEOBIA approach. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 95, e20210468.
- Hayashi, S. N., Souza-Filho, P. W. M., Nascimento Jr, W. R., & Fernandes, M. E. (2019). The effect of anthropogenic drivers on spatial patterns of mangrove land use on the Amazon coast. *PLoS One*, 14(6), e0217754.
- Himmelstoss, E., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2018). Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.0 user guide (No. 2018-1179). US Geological Survey.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Karle, M., Bungenstock, F., & Wehrmann, A. (2021). Holocene coastal landscape development in response to rising sea level in the Central Wadden Sea coastal region. *Netherlands Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1017/njg.2021.10>
- Lins-de-Barros, F. M., & Milanés, C. (2020). Os limites espaciais da zona costeira para fins de gestão a partir de uma perspectiva integrada. *Gestão Ambiental e sustentabilidade em áreas costeiras e marinhas: conceitos e práticas*, 1, 22-50.
- Mácola, G., & EL-Robrini, M. (2004). Ilha dos Guarás (Mariteua)-Município de Curuçá (NE do Pará): aspectos físicos, meteorológicos e oceanográficos. Belém: Convênio Departamento Nacional de Produção Mineral/Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais.
- Muehe, D. (2005) - Aspectos gerais da erosão costeira no Brasil. *Mercator* (ISSN: 1984-2201), 4/7: 97-110, Fortaleza, CE, Brasil. <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/113>
- Muehe, D. (2006) - Erosão e progradação no litoral brasileiro. 476p., Ministério Meio Ambiente, Brasília, Brasil.: 2006. 476 p. ISBN 857738-028-9.
- Muehe, D. (Ed.). (2008). Nicolodi, J. L. Geomorfologia. In: Zamboni, A.; Nicolodi, J. L. (Eds.). *Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil*. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. p. 23-41.
- Pais-Barbosa, J., & Marto, M. (2023). Assessing Coastal Erosion and Climate Change Adaptation Measures: A Novel Participatory Approach. *Environments*, 10(7), 110. DOI: 10.3390/environments10070110
- Pereira, C. B., Andrade, M. M. N. (2023). Geodiversity in the Pará Coastal Zone: Mapping and Analysis of Ecosystem Services in Salinópolis, PA. In G. Seabra (Ed.), *Terra: paisagens & sociobiodiversidade* (Vol. 2, pp. 277-289). Ituiutaba: Barlavento.
- Prestes, Y.O.; da Costa, B.T.A.; da Silva, A.C.; Rollnic, M. A discharge stationary model for the Pará-Amazon estuarine system. *J. Hydrol-Reg Stud.* 2020, 28, 100668. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100668>.
- QUANG, Dinh Nhat et al. Long-term shoreline evolution using dsas technique: A case study of Quang Nam province, Vietnam. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 9, n. 10, p. 1124, 2021. <https://doi.org/10.3390/jmse9101124>.
- Radambrasil, P. (1973). Levantamento de recursos naturais. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Projeto Radambrasil.

- Ranieri, L. A., & El-Robrini, M. (2016). Condição oceanográfica, uso e ocupação da costa de Salinópolis (Setor Corvina–Atalaia), Nordeste do Pará, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 16(2), 133-146.
- Ranieri, L. A., & El-Robrini, M. (2020). Morfologia e Sedimentação em Praias Oceânicas da Amazônia Oriental durante a Variação Anual de Chuvas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(05), 2086-2102.
- Ranieri, L. A., & El-Robrini, M. R. (2015). Evolução da linha de costa de Salinópolis, Nordeste do Pará, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 42(3), 207-226.
- Rosa, A. G., de Andrade, M. M. N., da Silva Pinheiro, C. D. P., & de Sousa, A. M. L. (2021). Avaliação da dinâmica de ocupação da terra em Salinópolis/PA com base no modelo Pressão-Estado-Impacto-Resposta (PEIR). *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 12(7), 414-432.
- Saengsupavanich, Cherdvong et al. Current challenges in coastal erosion management for southern Asian regions: examples from Thailand, Malaysia, and Sri Lanka. *Anthropocene Coasts*, v. 6, n. 1, p. 15, 2023. <https://doi.org/10.1007/s44218-023-00030-w>
- SEMAS. Pará. (2014). Estudo de Criação do Monumento Natural da Atalaia. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará. https://www.semas.pa.gov.br/wp-content/uploads/2014/11/2014_Estudo_Criacao_MN_Atalaia_17112014.pdf
- Serrão, I. C. G. (2023). Forçantes naturais e antrópicas sobre os manguezais de Salinópolis - Pará. 1 CD-ROM. <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/16229>
- Silva, C. V., Santos, I. R., Bezerra, P. E. S., & de Andrade, M. M. N. (2021). Análise multitemporal da dinâmica da paisagem e da área de preservação permanente (app) da ilha de mosqueiro/PA.
- Silva, C.G., Patchineelam, S.M., Baptista Neto, J.A. & Ponzi, V.R.A. 2004. Ambientes de Sedimentação Costeira e Processos Morfodinâmicos Atuantes na linha de Costa. In: Baptista Neto, J.A., Ponzi, V.R.A., Sichel, S.E. (Ed). *Introdução à geologia marinha*. Rio de Janeiro, Interciência, p. 175-218.
- Silva, M. S., Guedes, C. C. F., Silva, G. A. M. D., & Ribeiro, G. P. (2021). Active mechanisms controlling morphodynamics of a coastal barrier: Ilha Comprida, Brazil. *Ocean and Coastal Research*, 69, e21004. <https://doi.org/10.1590/2675-2824069.20-338mss>
- Siyal, A. A., Solangi, G. S., Siyal, P., Babar, M. M., & Ansari, K. (2022). Shoreline change assessment of Indus delta using GIS-DSAS and satellite data. *Regional Studies in Marine Science*, 53, 102405. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102405>.
- Souza, C.R. (2009) - A Erosão Costeira e os Desafios da Gestão Costeira no Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada* 9(1):1737. DOI: 10.5894/rgci147.
- Stive, M. J., Aarninkhof, S. G., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K. M., ... & Capobianco, M. (2002). Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal engineering*, 47(2), 211-235. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00126-6).
- Zuchuat, V., Poyatos-Moré, M., & Sagar, L. L. (2023). Use of remote-sensing to quantify the distribution of progradation/erosion along a forced-regressive modern coastline: driving factors and impact on the stratigraphic record. *The Sedimentary Record*. <https://doi.org/10.2110/001c.70239>