



Dinâmica demográfica e erosão costeira no litoral centro de Sergipe: Uma análise integrada sob a perspectiva da teoria geral dos sistemas

Demographic dynamics and coastal erosion on the central coast of Sergipe: An integrated analysis from the perspective of general systems theory

F. C. Guerra¹; A. T. S. Ferreira^{1,2}; G. P. da Silva¹; R. C. Oliveira¹;
R. D. Gonçalves^{3*}

¹Departamento de Geografia/Núcleo de Estudos Ambientais e Litorâneos/Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 13083-855, Campinas-São Paulo, Brasil

²Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo 05508-120, Brasil

³Departamento de Geologia/Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

*roger.dias@academico.ufs.br

(Recebido em 02 de agosto de 2025; aceito em 14 de outubro de 2025)

Este estudo investiga a relação entre a dinâmica demográfica e os processos de erosão costeira no Litoral Centro de Sergipe entre os anos de 2000 e 2022, com ênfase nos municípios de Aracaju e Barra dos Coqueiros. Adota-se uma abordagem integrada, fundamentada na Teoria Geral dos Sistemas (TGS), que comprehende o espaço geográfico como um sistema aberto, no qual componentes naturais e antrópicos interagem de forma contínua, formulada por Bertalanffy (1968). Foram utilizados dados censitários (IBGE), imagens de satélite Sentinel-2 processadas no Google Earth Engine com aplicação do índice MNDWI, e mapas temáticos de uso e cobertura do solo (MapBiomas), geologia, solos e geomorfologia e a análise conduzida em múltiplas escalas (regional, local e setorial). Os resultados evidenciam associação espacial entre áreas com maior densidade populacional e trechos com recuo acentuado da linha de costa, sobretudo em zonas urbanizadas sobre terrenos frágeis, caracterizados por solos arenosos e depósitos holocénicos. Observa-se, ainda, a perda de cobertura vegetal natural e o avanço da urbanização sobre ecossistemas sensíveis, como manguezais e planícies fluvio-marinhais. A análise integrada demonstra que a ausência de planejamento territorial e a ocupação inadequada (ponto de vista da paisagem) ampliam a vulnerabilidade ambiental (risco associado) da zona costeira. Conclui-se que a gestão costeira deve considerar a articulação entre variáveis físicas, demográficas e espaciais, adotando instrumentos como o Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro e o monitoramento sistemático por sensoriamento remoto. O estudo contribui para o aprimoramento das estratégias de adaptação e mitigação frente às mudanças climáticas e ao crescimento urbano em áreas litorâneas.

Palavras-chave: gestão territorial, uso do solo, gestão costeira.

This study investigates the relationship between demographic dynamics and coastal erosion processes along the Central Coast of Sergipe from 2000 to 2022, with emphasis on the municipalities of Aracaju and Barra dos Coqueiros. We adopt an integrated approach grounded in General Systems Theory (GST), which conceives geographic space as an open system in which natural and anthropogenic components interact continuously, as formulated by Bertalanffy (1968). We used census data (IBGE), Sentinel-2 satellite imagery processed in Google Earth Engine with application of the MNDWI index, and thematic maps of land use/land cover (MapBiomas), geology, soils, and geomorphology, and conducted the analysis across multiple scales (regional, local, and sectoral). The results reveal a spatial correlation between areas of higher population density and shoreline reaches exhibiting pronounced retreat, especially in urbanized zones over fragile terrains characterized by sandy soils and Holocene deposits. We also observed the loss of natural vegetation cover and the advance of urbanization over sensitive ecosystems such as mangroves and fluvio-marine plains. The integrated analysis shows that the absence of territorial planning and unsuitable land occupation (from a landscape perspective) increases the environmental vulnerability (associated risk) of the coastal zone. We conclude that coastal management should articulate physical, demographic, and spatial variables, adopting instruments such as Ecological-Economic Coastal Zoning and systematic remote-sensing monitoring. The study contributes to improving adaptation and mitigation strategies in the face of climate change and urban growth in coastal areas.

Keywords: land use, territorial management, coastal governance.

1. INTRODUÇÃO

A região do Litoral Centro de Sergipe tem vivenciado um processo de expansão urbana acelerada desde meados da década de 1980, impulsionado pelo crescimento demográfico e pela demanda por recursos alimentares e habitacionais. Entre 1985 e 1998, observou-se a ampliação das áreas agropecuárias e urbanas, enquanto a partir de 1999, áreas de reflorestamento passaram a crescer, acompanhando a redução relativa das atividades agropecuárias. Esses padrões refletem as pressões antrópicas sobre ecossistemas sensíveis da região [1-3].

O Litoral Centro de Sergipe abriga 13 municípios, incluindo Aracaju, Barra dos Coqueiros, Nossa Senhora do Socorro e São Cristóvão, que formam a Região Metropolitana (Figura 1). Essa região concentra cerca de 53% da população estadual e 84% da população da zona costeira, segundo o Censo de 2022 do IBGE [4]. Esta é uma área de importância estratégica para o planejamento ambiental e urbano, caracterizada pela presença de manguezais, restingas e fragmentos de Mata Atlântica, que cumprem importantes funções ecológicas.

Apesar do seu valor ecológico e socioeconômico, o litoral sergipano enfrenta desafios relacionados à pressão antrópica, ao adensamento urbano inadequado e à fragilidade dos instrumentos de ordenamento territorial. Estudos como os de Abreu et al. (2017) [5] e Santos e Silva (2021) [6] apontam que a ocupação não planejada de zonas costeiras tem acelerado processos de erosão, poluição e perda de biodiversidade. Entretanto, persiste uma lacuna na integração de análises temporais detalhadas sobre uso do solo, variáveis demográficas e processos costeiros em escalas compatíveis com a gestão territorial.

As transformações observadas entre 1985 e 2022 foram aqui analisadas a partir de dados do MapBiomass (Coleção 8) [7], com o uso de técnicas de processamento digital de imagens em ambiente SIG, metodologia consagrada no estudo de mudanças de uso e ocupação do solo. Paralelamente, dados do Censo Demográfico (IBGE, 2010 e 2022) e imagens Sentinel-2 processadas no *Google Earth Engine* com o índice MNDWI foram utilizados para identificar variações na densidade populacional e no recuo da linha de costa. Essa abordagem permite delimitar padrões espaciais entre adensamento urbano, supressão de vegetação e processos erosivos em setores críticos da região.

A confiabilidade das análises espaciais aplicadas neste estudo se apoia em abordagens consolidadas na literatura recente. Martins et al. (2025) [8] demonstraram forte correlação entre o NDVI derivado de imagens Sentinel-2 e os dados de censo arbóreo urbano em Aracaju, validando o uso de índices espectrais como ferramenta de apoio ao planejamento urbano e à gestão ambiental. Tal evidência reforça a aplicabilidade do sensoriamento remoto para identificar padrões de uso do solo e alterações ambientais em escala intraurbana e regional, como proposto nesta análise integrada do Litoral Centro de Sergipe.

Estudos recentes vêm demonstrando o potencial do sensoriamento remoto multitemporal e da análise de grandes volumes de dados orbitais na caracterização da dinâmica costeira e na identificação de padrões erosivos e deposicionais em regiões tropicais, especialmente quando integrados a modelos estatísticos e geoespaciais [9]. Essas técnicas se mostram promissoras para apoiar o planejamento territorial costeiro diante das pressões antrópicas e dos impactos das mudanças climáticas.

Apesar de avanços na literatura sobre erosão costeira no Brasil, são escassas as abordagens que integram dados populacionais, uso da terra e recuo da costa com séries temporais e ferramentas geoespaciais. Em Sergipe, as pesquisas de Jesus e Andrade (2018) [10] e Santos et al. (2022) [11] demonstram taxas significativas de recuo, mas não exploram a interface com a dinâmica demográfica. Essa lacuna metodológica compromete a formulação de políticas públicas baseadas em evidências. Neste cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar, de forma integrada, a relação entre a variação da densidade demográfica e os processos de erosão costeira no Litoral Centro de Sergipe, entre os anos de 2000 e 2022, com base em sensoriamento remoto e indicadores geoespaciais.

As zonas costeiras representam ambientes de grande complexidade e dinamismo, onde os processos naturais interagem intensamente com as atividades humanas [12-14]. Essa interação contínua, muitas vezes inadequada, resulta em uma série de impactos e conflitos socioambientais, evidenciando a fragilidade desses espaços e a vulnerabilidade de suas populações [15]. Para

compreender a relação entre sociedade e natureza nesses cenários, a abordagem sistêmica emerge como um campo essencial de investigação, permitindo maior integração para entender formas (elementos) e processos (relações) que compõem seus subsistemas [12]. Inspirada pelos princípios da Geocologia da Paisagem e da Teoria Geral dos Sistemas [13], essa perspectiva busca analisar as estruturas, funções e dinâmicas que caracterizam a interconexão holística dos elementos biofísicos e socioeconômicos, oferecendo subsídios em análises de impacto ambiental e no planejamento ambiental e territorial [12].

A interpretação da dinâmica social e ambiental no Litoral Centro de Sergipe exige uma abordagem sistêmica, que considere a interdependência entre os componentes naturais e antrópicos da paisagem costeira. Sob a perspectiva da Teoria Geral dos Sistemas (TGS), formulada por Bertalanffy (1968) [13], o espaço geográfico é entendido como um sistema aberto e dinâmico, composto por subsistemas que interagem em diferentes escalas. Essa visão permite compreender a zona costeira como um geossistema vulnerável, sujeito a pressões que afetam diretamente sua resiliência.

Nesse contexto, as transformações antrópicas decorrentes do crescimento populacional, da expansão urbana e da intensificação do uso da terra representam forças exógenas que desequilibram os processos naturais. A conversão de vegetação nativa em áreas urbanas ou agropecuárias reduz a capacidade de regulação ecológica, amplia a impermeabilização do solo e potencializa os riscos de erosão costeira. Cabral e Cândido (2019) [16] reforçam que o adensamento urbano em zonas litorâneas tende a agravar conflitos territoriais e impactos ambientais.

A erosão costeira, por sua vez, é resultado da interação entre fatores naturais (ondas, marés, regime fluvial, topografia, entre outros) e pressões humanas. Em climas tropicais, como o do litoral nordestino brasileiro, a dinâmica sedimentar é particularmente sensível a alterações na cobertura do solo e à ocupação de planícies costeiras. Bittencourt et al. (2006) [17] destacam que a estabilidade da linha de costa depende da manutenção de vegetação protetora, da integração entre bacias hidrográficas e zonas de deposição, e da adoção de instrumentos de regulação territorial.

Tais fatores comprometem a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas costeiros, resultando em um aumento alarmante da vulnerabilidade social e ambiental das comunidades e infraestruturas locais a eventos extremos, incluindo erosão costeira, inundações e ressacas do mar [15]. Diante deste cenário complexo e multifacetado, emerge a necessidade premente de adotar uma abordagem sistêmica da paisagem.

Esta abordagem vai além da simples mitigação de riscos, buscando fortalecer a capacidade das comunidades e dos ecossistemas para absorver, adaptar-se e recuperar-se de impactos, mantendo um estado saudável, produtivo e sustentável [15]. Inspirada nos princípios da Gestão Baseada em Ecossistemas (GBE), a abordagem sistêmica exige uma visão holística, transdisciplinar e transescalar na gestão [14, 18]. Ela integra conhecimentos científicos e tradicionais, considera as interdependências entre os sistemas naturais e sociais em múltiplas escalas, e promove a participação de diversos atores para a formulação de políticas públicas eficazes e adaptativas que garantam o bem-estar humano e a sustentabilidade a longo prazo do ambiente costeiro [14].

Nesse contexto, a Gestão Costeira Integrada (ICZM/MIZC) emerge como um instrumento fundamental e multifacetado para o planejamento ambiental e territorial [19]. Sua importância reside não apenas na capacidade de mitigar processos erosivos e reduzir riscos de desastres socioambientais, protegendo vidas e patrimônios, mas também em promover a sustentabilidade ao harmonizar o uso dos recursos naturais e marinhos com a conservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos [20-22].

Por meio da integração de dados e informações geoespaciais, da coordenação interinstitucional e da participação social, a ICZM/MIZC aprimora a tomada de decisões, orienta o planejamento urbano e as intervenções de engenharia, e permite o monitoramento contínuo e a adaptação frente aos desafios ambientais globais, como a elevação do nível do mar e eventos extremos, tornando-se essencial para a construção de um modelo de desenvolvimento urbano mais equitativo e ambientalmente benéfico [20].

Assim, ao integrar dados geoespaciais, análise multitemporal e indicadores ambientais sob a ótica da Teoria Geral dos Sistemas, este estudo, pode contribuir para aprimorar e aprofundar o

conhecimento regional sobre a implementação da ICZM/MIZC fortalecendo a gestão adaptativa e consequentemente a segurança alimentar e subsistência de populações tradicionais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo adota uma abordagem quantitativa, descritiva e geoespacial, orientada pelos princípios da Teoria Geral dos Sistemas, aplicada à análise integrada da paisagem. A pesquisa tem como recorte espacial o Litoral Centro de Sergipe (Figura 1), com foco nos municípios de Aracaju e Barra dos Coqueiros, e busca compreender como a variação da densidade demográfica entre 2000 e 2022 se relaciona com os processos de erosão costeira em setores críticos da região.

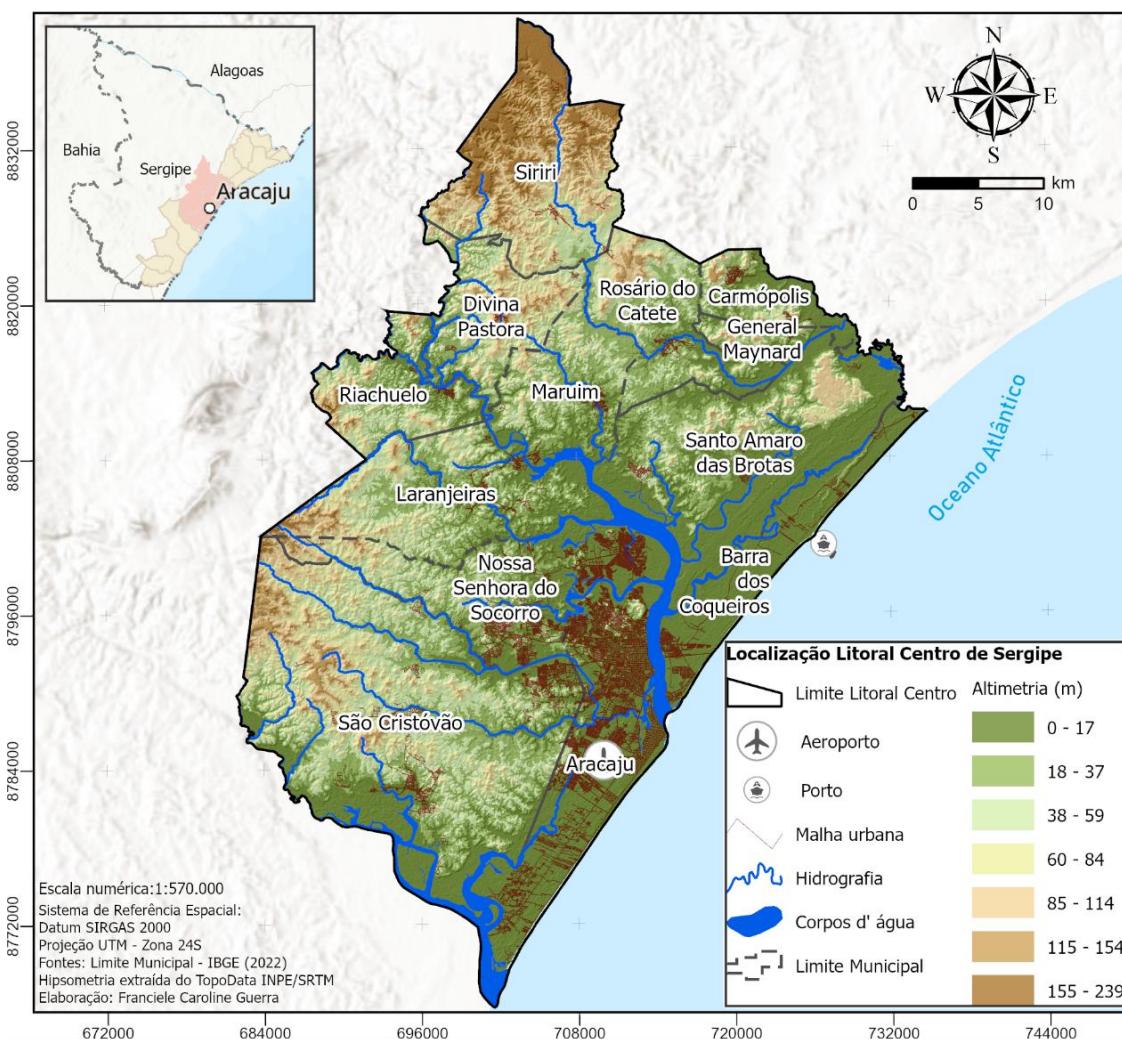


Figura 1. Localização e características fisiográficas do Litoral Centro de Sergipe, destacando limites municipais, rede hidrográfica e altimetria extraída do modelo digital TopoData (SRTM/INPE).

Foram empregadas técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, aplicadas à análise temporal e espacial de dados do Censo Demográfico (IBGE, 2010 e 2022) e imagens orbitais Sentinel-2, processadas na plataforma *Google Earth Engine* (GEE). O índice espectral MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) foi utilizado para detectar alterações na linha de costa entre 2013 e 2023.

As transformações no uso e cobertura da terra foram analisadas com base nos dados da Coleção 8 do Projeto MapBiomas [7] (anos de 1985 e 2022), utilizando o software ArcGIS Pro (versão 3.2.2). Os dados raster foram reprojetados para o sistema UTM, *Datum SIRGAS 2000* (Zona

24S), e reclassificados em cinco classes: (1) floresta, (2) formação natural não-florestal, (3) agropecuária, (4) área não vegetada e (5) corpos d'água; e posteriormente agrupadas em três categorias analíticas: (i) natural, (ii) antrópica e (iii) água.

Para detecção de mudanças, foi aplicado o método "*Categorical Change Detection*", que permitiu quantificar as transições entre as classes nos dois períodos, gerando mapas temáticos e uma matriz de transição. As alterações foram agrupadas em seis categorias: inalterado, natural, desflorestamento, reflorestamento, antrópico e água.

Para estimar taxas de erosão/acreção da linha de costa no período 1984–2021, utilizou-se medianas anuais de imagens Landsat 5/TM, 7/ETM+ e 8/OLI (30 m; revisita ~16 dias), em TOA (*Top of Atmosphere*) e processadas no *Google Earth Engine* (GEE) [23-27]. A interface terra-mar foi mapeada via MNDWI = (Green–SWIR1) / (Green+SWIR1), calculado com B2 (Green) e B5 (SWIR1) para Landsat 5/7 e B3 (Green) e B6 (SWIR1) para Landsat 8 [28]. Para cada ano, gerou-se uma máscara binária (água=1; não-água=0) e aplicamos filtragem espacial por moda para reduzir ruído [29]. As taxas derivam da diferença entre a posição da linha de costa 2021 e a data de referência 1985, dividida pelo intervalo de tempo, usando transectos equidistantes (1 km × 1 km) e as máscaras binárias provenientes de Landsat 5, 7 e 8 [30]. A separação água/terra não empregou limiar fixo; adotou-se a classificação supervisionada *Random Forest* (RF; 100 árvores) usando MNDWI como preditor e amostras de água/não-água (partição 70/30 para treino/teste), seguida de filtro de moda (kernel Manhattan, raio 1) e reamostragem a 30 m. A linha de costa foi obtida do contato entre classes, dispensando threshold numérico no MNDWI.

A acurácia foi avaliada via matriz de confusão, acurácia global e índice Kappa [31-33]. Ao todo, foram processadas 1.530 imagens: 537 entre 2013 e 2022, derivadas do Landsat 8; 459 entre 2000 e 2013, do Landsat 7; e 534 entre 1984 e 1999, do Landsat 5. Não foi realizada a seleção por marés similares nem normalização explícita; haja vista que as composições anuais representam a condição da mediana de cada ano/periódo analisado [9]. A média, desvio-padrão e o Intervalo de Confiança a 95% (IC95%) da taxa de recuo da linha de costa (m/ano) foram calculados via teste *t* de Student, de modo que a mediana e IC95% foram estimadas via *bootstrap* [34]. Dessa forma os perfis foram separados em: recuo (Taxa < 0) e progradação (Taxa ≥ 0) [9].

A análise foi conduzida em múltiplas escalas (regional, local e setorial), permitindo avaliar a associação espacial entre variações populacionais e recuos da linha de costa em contextos de vulnerabilidade ambiental. Complementarmente, foram integradas informações sobre unidades de conservação, infraestrutura urbana, geologia, solos e comportamentos geomorfológicos, a fim de sustentar uma leitura sistêmica da dinâmica territorial e suas implicações para a gestão costeira.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise integrada dos resultados obtidos no Litoral Centro de Sergipe revela transformações expressivas no uso e cobertura da terra, na dinâmica demográfica e nos processos de erosão costeira entre 1985 e 2022, especialmente nos municípios de Aracaju e Barra dos Coqueiros. Esta seção apresenta os principais resultados, organizados de forma sistêmica a partir das inter-relações entre os subsistemas naturais (geologia, solos, relevo, ecossistemas) e antrópicos (ocupação do solo, densidade populacional, infraestrutura urbana).

Como visto na Figura 1, que apresenta a localização e caracterização fisiográfica da região estudada, ressalta-se também a presença de planícies costeiras, terraços fluviomarinhos e tabuleiros. Estas unidades geomorfológicas estão associadas a solos do tipo Espodossolos e Neossolos, com textura predominantemente arenosa, que conferem alta fragilidade à erosão [35].

A Figura 2 apresenta as transformações no uso e cobertura da terra no Litoral Centro de Sergipe entre os anos de 1985 e 2022, destacando a intensa expansão da mancha urbana, particularmente ao longo da faixa litorânea e em áreas de planície costeira. Observa-se a substituição expressiva de áreas vegetadas por superfícies não vegetadas, além de modificações nos usos agropecuários, evidenciando um processo contínuo de pressão antrópica sobre ecossistemas naturais. O desflorestamento se configura como uma das dinâmicas mais preocupantes, refletindo a conversão de áreas originalmente protegidas em zonas destinadas à agricultura ou à urbanização.

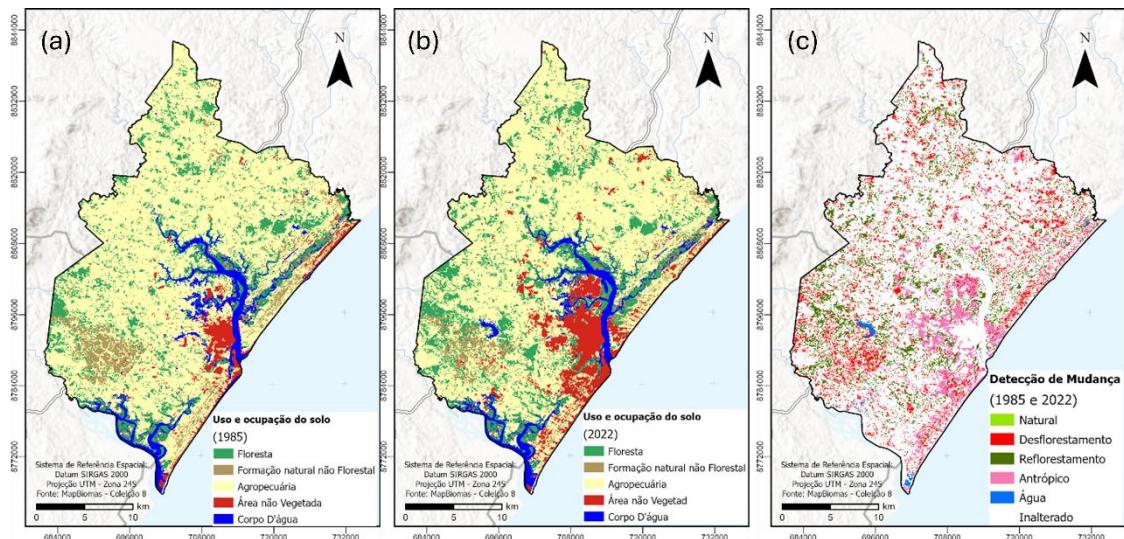


Figura 2. Comparação do uso e cobertura da terra e detecção de alterações entre 1985 e 2022 na Região Litorâneo Centro de Sergipe. A análise evidencia a intensificação do processo de urbanização, sobretudo nos municípios de Aracaju e Barra dos Coqueiros, com substituição de áreas vegetadas por áreas não vegetadas e alterações nos usos agropecuários. Dados extraídos da Coleção 8 do Projeto MapBiomass, reclassificados para fins de análise temática; (a) uso e cobertura da terra em 1985; b) uso e cobertura da terra em 2022; c) detecção de alterações no período estudado, destacando as áreas de reflorestamento, desflorestamento, áreas antrópicas e inalteradas).

Em especial, os municípios de Aracaju e Barra dos Coqueiros têm vivenciado um crescimento urbano impulsionado também pela especulação imobiliária, contribuindo para a verticalização e ocupação de terrenos em zonas naturalmente suscetíveis a exposição de perigos, como planícies de inundação e encostas, que por consequência, coloca comunidades locais em risco [36]. A acurácia na detecção dessas mudanças, sobretudo em ambientes urbanizados, foi corroborada por Martins et al. (2025) [8], que identificaram forte correlação espacial entre os valores do NDVI obtidos por sensoriamento remoto e os dados de censo arbóreo em Aracaju, reforçando a eficácia dos índices espectrais na análise da cobertura vegetal urbana.

Essa tendência de urbanização acelerada acompanha o crescimento populacional observado na região, como revelam os dados censitários de 2010 e 2022 (Figura 3), os quais apontam para o adensamento das áreas urbanas e a interiorização da ocupação em setores ecologicamente sensíveis.

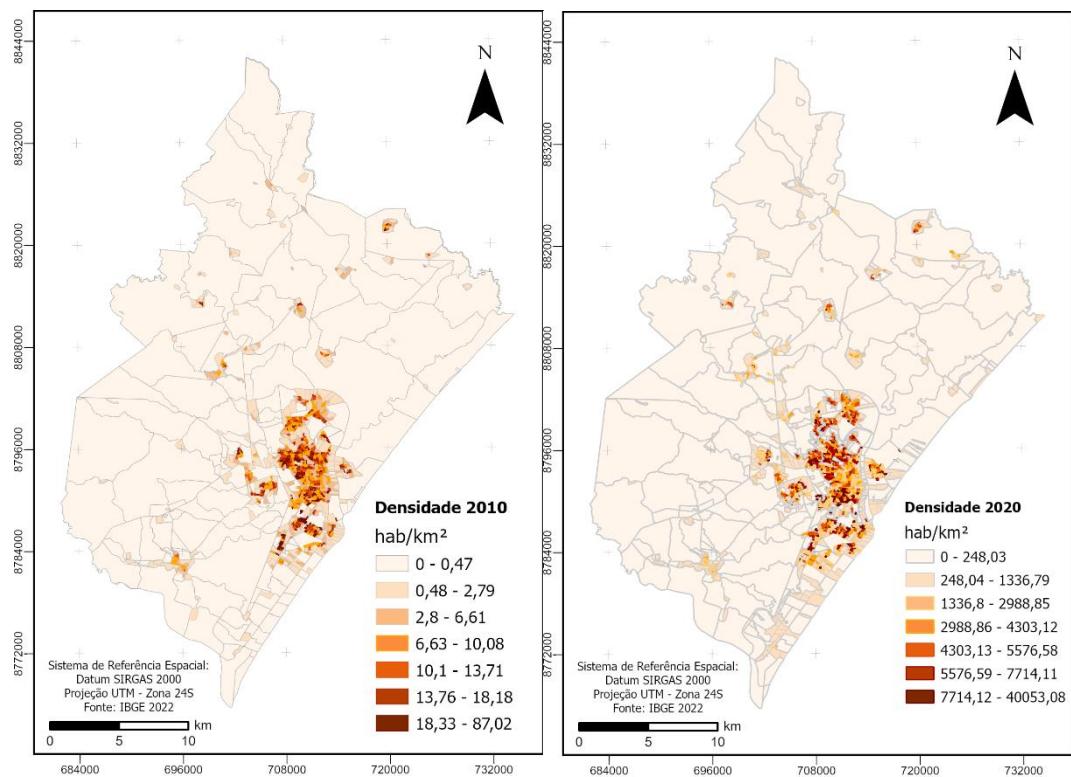


Figura 3. Distribuição da densidade demográfica (hab/km²) no Litoral Centro de Sergipe nos anos de 2010 e 2022, com base nos dados censitários do IBGE.

Paralelamente, observa-se a redução de vegetação natural, com destaque para a perda de floresta e formações naturais não florestais, substituídas por usos antrópicos ou em menor escala por áreas de reflorestamento (Tabela 1 e Tabela 2). O desmatamento das margens fluviais e das zonas de transição entre ecossistemas acarreta não apenas na perda de biodiversidade, mas também na intensificação de processos erosivos e alagamentos.

Tabela 1. Transições de categorias no uso e cobertura da terra no Litoral Centro de Sergipe.

Transições	Categorias de transição	Classes	Descrição
Natural => Natural	Natural	1,2	Estabilidade em áreas naturais indica boas práticas de conservação.
Antrópico => Antrópico	Antrópico	3,4	Continuidade no uso antrópico pode refletir desenvolvimento sustentável ou intensificação da exploração.
Água => Antrópico	Antrópico	5>3,4	Alteração preocupante, indicando potencial perda de ecossistemas aquáticos.
Antrópico => Água	Água	3,4>5	Pode refletir esforços de recuperação de áreas aquáticas ou criação de reservatórios.
Natural => Antrópico	Desflorestamento	1,2>3,4	Desflorestamento, preocupante do ponto de vista ecológico.
Natural => Água	Desflorestamento	1,2>5	Pode indicar alterações hidrológicas naturais ou impactos antrópicos.
Água => Natural	Reflorestamento	5>1,2	Recuperação de áreas naturais a partir de zonas úmidas é positiva.
Antrópico => Natural	Reflorestamento	3,4>1,2	Reflorestamento ou recuperação de áreas naturais mostra consciência ecológica.
Inalterado	same	No Change	A maioria das áreas permanece inalterada, refletindo estabilidade ou estagnação.

Tabela 2. Síntese das transições de uso da terra.

Transição	Envolvidos	Classes	Dinâmicas
1 Estabilidade e Conservação de áreas naturais (Natural => Natural)	Floresta, Formação natural não Florestal	1, 2	Apresenta manutenção de áreas naturais. Implica de forma positiva na diversidade e na saúde dos serviços ecossistêmicos.
2 Estabilidade em Áreas Antrópicas (Antrópico => Antrópico)	Agropecuária, Área não vegetada	3, 4	A estabilidade do uso antrópico nestas áreas reflete práticas agrícolas e urbanização. É importante o monitoramento para prevenir a degradação.
3 Transformação de Áreas Aquáticas em Antrópicas (Água => Antrópico)	Corpos d'água convertidos para uso antrópico	5>3,4	Afeta a regulação hídrica e biodiversidade aquática, podendo aumentar a susceptibilidade às inundações.
4 Conversão de Áreas Antrópicas em Aquáticas (Antrópico => Água)	Áreas antrópicas transformadas em corpos d'água	3,4>5	Pode representar esforços de restauração ecológica ou criação de corpos hídricos para gestão de recursos.
5 Desflorestamento para Uso Antrópico e Aquático (Natural => Antrópico, Natural => Água)	Florestas e formações naturais convertidas para agropecuária ou áreas urbanas	1,2>3,4; 1,2>5	O desflorestamento para uso antrópico ou conversão em áreas aquáticas implica na perda de habitats e alteração dos ciclos hídricos.
6 Reflorestamento e Recuperação de Áreas Naturais (Água => Natural, Antrópico => Natural)	Recuperação de áreas naturais a partir de usos prévios antrópicos ou aquáticos	5>1,2; 3,4>1,2	O reflorestamento e a recuperação de áreas degradadas indicam restauração do ecossistema.

A Figura 4 apresenta a distribuição da área alterada por categoria, evidenciando o predomínio de áreas inalteradas, seguido pelos processos de reflorestamento e desflorestamento, com destaque para o aumento expressivo de áreas antrópicas.

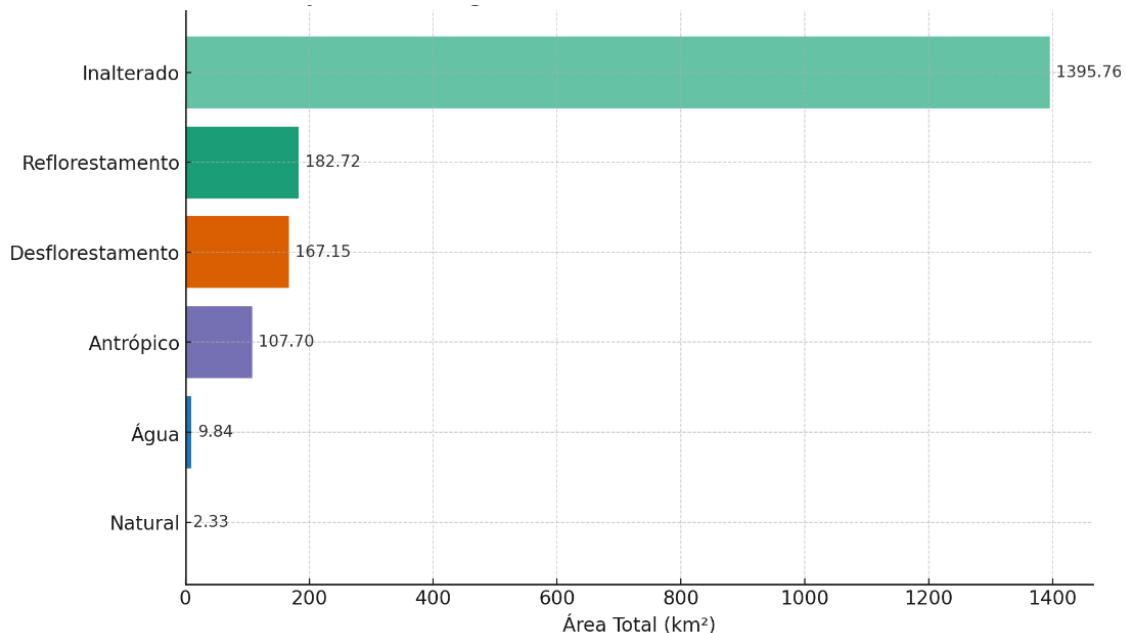


Figura 4. Distribuição das categorias de uso e cobertura da terra (1985-2022).

A Figura 5, gerada a partir do índice MNDWI, evidencia a variação da linha de costa entre 1984 e 2021. Os trechos mais críticos de recuo (> 630 m) coincidem com setores urbanizados

sobre terrenos de baixa coesão, como ocorre na foz do rio Sergipe e no litoral de Barra dos Coqueiros. Por outro lado, observa-se avanço em algumas áreas de deposição, especialmente ao norte de Pirambu, provavelmente associado a dinâmicas sedimentares naturais e menor intervenção antrópica [37].

A linha de costa é a interface entre o continente e o oceano, e sua posição varia conforme a intensidade de agentes costeiros como ondas, marés e correntes costeiras. No litoral de Aracaju e Barra dos Coqueiros, as ondas predominantes vêm de leste, nordeste e sudeste, com alturas que variam de 1 a 3 metros, dependendo da estação. As marés são do tipo meso-marés e semi-diurnas [10]. A corrente longitudinal de sedimentos no litoral de Sergipe é predominantemente de nordeste para sudoeste, embora ocorra uma inversão local do sentido do transporte (de NE-SW para SW-NE) nas praias dos Artistas e da Atalaia [38].

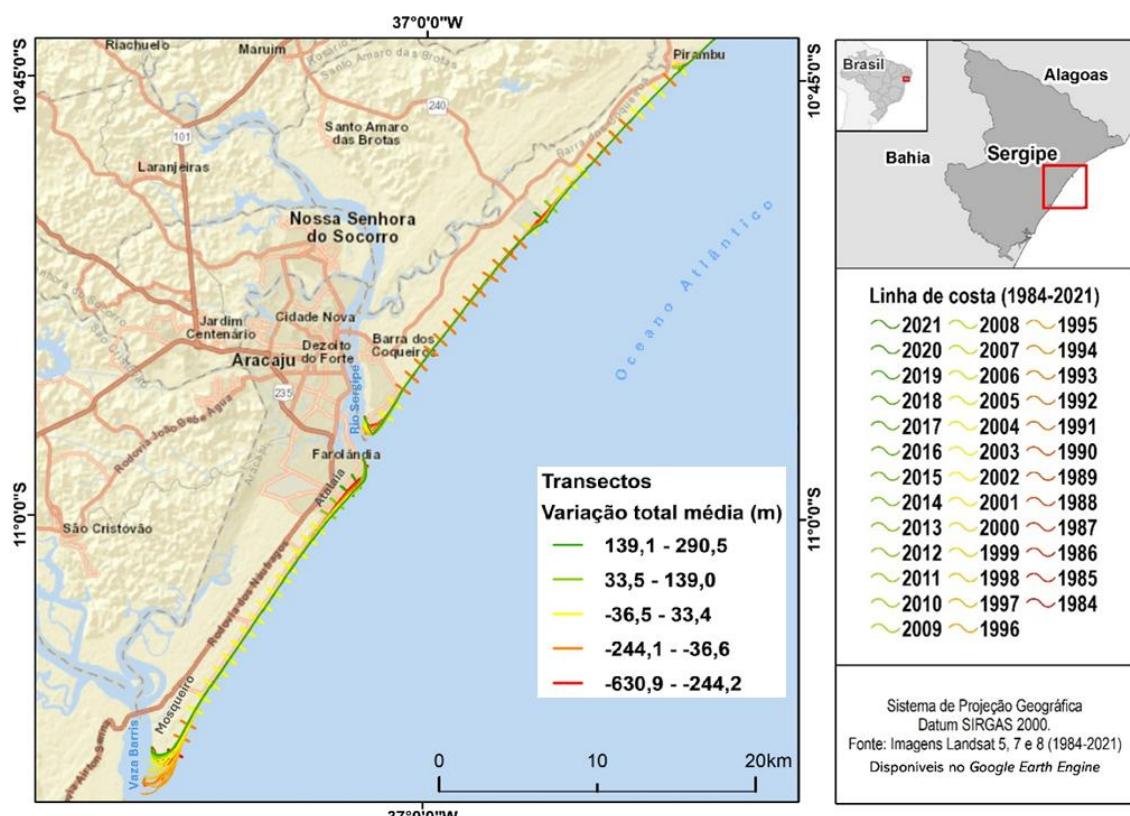


Figura 5. Análise espaço-temporal da variação da linha de costa no Litoral Centro de Sergipe entre 1984 e 2021, com base em imagens Landsat processadas no Google Earth Engine (scripts das métricas disponíveis em https://code.earthengine.google.com/a75b0f389989fb0b95e3435d9f70abb2?accept_repo=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit , https://code.earthengine.google.com/f89ecff73b8680a78dd1a29fd256d83?accept_repo=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit , https://code.earthengine.google.com/328e14ac740a60ec4203360d77256ca7?accept_repo=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit, e aplicação do índice espectral MNDWI.

A análise da linha de costa na área de estudo, que compreende a região entre Mosqueiro (sul de Aracaju) e Pirambu (ao norte de Barra dos Coqueiros), com foco nas desembocaduras fluviais, do rio Vaza Barris (próxima ao Mosqueiro) e rio Sergipe (que influencia as praias dos Artistas e Atalaia), revela uma interação complexa entre processos geomorfológicos naturais instáveis e intensas ações antrópicas [38-39]. A compreensão dessa dinâmica é fundamental para a compreensão da fragilidade ambiental e da vulnerabilidade social na região.

A morfologia costeira é fortemente influenciada pela dinâmica dos deltas de maré vazante, que são acumulações de areia na foz dos rios [38]. Esses deltas podem migrar e se unir à linha de costa, favorecendo a progradação (avanço da linha de costa).

Rodrigues et al. (2015) [38] e Melo e Souza, Santos (2016) [39] indicam, em seus estudos realizados nas planícies de marés nas desembocaduras dos rios Sergipe e Vaza Barris, uma redução das feições geomorfológicas em ambas as áreas, embora por processos diferenciados, principalmente por ações antrópicas, notadamente a urbanização da Coroa do Meio em Aracaju/SE. Desde a década de 1970, houve uma expansão da ocupação humana, com o aterramento de grande parte do substrato para a implantação de edificações destinadas a moradia e lazer. Isso resultou em uma redução de cerca de 48% na área total da planície de maré até 2014.

Embora a área total da planície de maré tenha diminuído em aproximadamente 68% até 2014, a área de mangue, surpreendentemente, aumentou em 0,23 km², o que pode estar relacionado à estabilização do ambiente da planície de maré, permitindo a fixação e desenvolvimento do manguezal [38]. Ainda de acordo com os autores [38], a área também sofreu com processos erosivos de médio prazo devido a mudanças na direção do talvegue do rio Sergipe, associadas à dinâmica dos deltas de maré vazantes, processos esses em grande parte influenciados por intervenções humanas.

O avanço da urbanização sobre as praias immobiliza faixas que fazem parte do processo morfodinâmico natural [14], este é um exemplo do caso da forte intervenção antrópica na Coroa do Meio impedindo a resiliência natural do ambiente, pois a intervenção humana se tornou fundamental para a diminuição da área total da planície de maré [38]. Já no rio Vaza Barris, a redução da planície de maré foi ocasionada por mudanças no posicionamento da linha de costa devido à dinâmica fluviomarinha, e não por impactos antrópicos, que se mostraram inexistentes até 2014 [38]. Apesar da redução na área total da planície de maré, a área colonizada por mangue aumentou em quase 68%.

Esse aumento da área de mangue, mesmo diante da redução da planície de maré e das mudanças na dinâmica fluviomarinha, demonstra a resistência e resiliência do ecossistema manguezal nesse local [38]. A análise da evolução de planícies de marés e manguezais é de extrema relevância para avaliar as respostas dos ambientes costeiros a mudanças costeiras em escalas locais e globais, e sua importância como estabilizadores das regiões costeiras [38].

A associação espacial observada entre densidade demográfica (Figura 3) e recuo da linha de costa (Figura 4) reflete um ciclo sistêmico negativo de retroalimentação: a ocupação inadequada e a supressão da cobertura vegetal comprometem a estabilidade das dunas e restingas, reduzindo a resiliência natural frente à elevação do nível do mar e à intensificação dos eventos extremos. Sob a perspectiva da Teoria Geral dos Sistemas, essas interações configuram um sistema costeiro em estado de tensão, em que os subsistemas natural e social encontram-se acoplados por fluxos desequilibrados de energia, matéria e informação.

A literatura sobre erosão costeira no Brasil tem avançado na caracterização dos processos físicos e na identificação de áreas críticas, mas ainda são escassas as abordagens que integram indicadores de densidade populacional com métricas geomorfológicas e ambientais de forma sistemática. O processo de variação da linha de costa pode ser tanto evolutivo (longo prazo) quanto episódico (rápido, curto prazo, por eventos extremos) [40].

A ação antrópica constitui um dos principais vetores de alteração da linha de costa em escala global, sendo responsável, no contexto brasileiro, pelo predomínio dos processos erosivos em relação aos de acreção. Entre os fatores que contribuem para esse cenário, destacam-se a construção de barragens em bacias hidrográficas, que reduzem significativamente o aporte de sedimentos aos ambientes costeiros, a mineração de areias, e a instalação de estruturas rígidas como molhes e enrocamentos. Estas obras, quando implementadas sem o devido embasamento técnico-científico, tendem a interromper o transporte longitudinal de sedimentos, intensificando os processos erosivos em setores adjacentes ou a jusante. Além disso, práticas como a extração intensiva de areia e a exploração de aquíferos costeiros agravam o déficit sedimentar e favorecem a subsidência do solo, comprometendo a estabilidade geomorfológica da linha de costa [14].

Ecossistemas como manguezais, marismas, recifes de coral, bancos de grama marinha e dunas são vitais para a proteção costeira e são setores ecologicamente sensíveis [18]. A intensificação da urbanização, muitas vezes de modo inadequado, tais como, a remoção de dunas e manguezais,

causam degradação e desequilíbrio do ecossistema, da capacidade de fixar o solo e de filtrar poluentes, comprometendo sua estabilidade [39].

A análise integrada evidencia a necessidade urgente de implementação de instrumentos de planejamento territorial como o Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro (ZEEC), articulados ao monitoramento contínuo por meio de tecnologias de sensoriamento remoto. Entre as estratégias fundamentais para a mitigação dos impactos da urbanização acelerada no Litoral Centro de Sergipe, destaca-se a adoção de zonas tampão, que funcionam como faixas de transição entre áreas antrópicas e ecossistemas sensíveis.

Essas zonas atuam como barreiras naturais, promovendo a filtragem de poluentes, a contenção da erosão, a manutenção da conectividade ecológica e o aumento da resiliência frente às mudanças climáticas. A criação e preservação dessas faixas são particularmente relevantes em territórios marcados pela ocupação inadequada e pela presença de solos frágeis e suscetíveis à degradação, como é o caso da Região Metropolitana de Aracaju.

Estudos recentes indicam que a expansão urbana sobre áreas de risco tem contribuído para a intensificação de eventos extremos, como inundações e deslizamentos, especialmente em setores com infraestrutura precária e vegetação suprimida [38]. Nesse contexto, o controle do adensamento urbano, aliado à restauração de ecossistemas costeiros degradados, revela-se essencial para assegurar a sustentabilidade socioambiental do litoral sergipano diante das crescentes pressões antrópicas e das transformações climáticas em curso.

Eventos extremos, como tempestades e ventos fortes, associados à elevação do nível do mar e à acidificação dos oceanos, têm intensificado a erosão costeira, especialmente em áreas com baixa altitude e solos arenosos, como Aracaju e Barra dos Coqueiros. A escassez de informação e a frágil articulação entre ciência e política pública dificultam a adoção de estratégias eficazes de conservação e gestão.

4. CONCLUSÃO

Os resultados revelam que, embora parte da região tenha permanecido inalterada, ocorreram transformações relevantes, entre 1985 e 2022, com conversões de áreas naturais para usos antrópicos, refletindo o avanço urbano e agropecuário sobre ecossistemas costeiros sensíveis. As mudanças mais expressivas concentram-se nos municípios de Aracaju e Barra dos Coqueiros, onde a expansão urbana sobre solos arenosos e compartimentos geomorfológicos frágeis tem intensificado o recuo da linha de costa. Apesar de haver iniciativas localizadas de reflorestamento, estas ainda são insuficientes para conter os efeitos da pressão antrópica. Observou-se que os processos erosivos estão fortemente relacionados à ocupação inadequada, à supressão da vegetação e à carência de infraestrutura urbana adequada.

Diante desse cenário, torna-se urgente a integração entre planejamento urbano e gestão costeira, por meio de instrumentos regulatórios como o Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro (ZEEC), planos diretores municipais e estratégias de restauração ecológica, ancorados em dados geoespaciais atualizados. A abordagem metodológica fundamentada na Teoria Geral dos Sistemas mostrou-se eficaz para compreender a complexidade das interações entre os subsistemas físico-naturais e socioeconômicos, reforçando a necessidade de uma gestão territorial adaptativa e intersetorial.

A integração entre tecnologias de sensoriamento remoto, modelagem espacial e ferramentas participativas deve ser fortalecida na perspectiva da Gestão Costeira Integrada (GCI), atuando em três níveis complementares: no plano social, ao compreender os usos do território e a percepção de risco pela população local; no plano ambiental, ao correlacionar a fragilidade natural com a dinâmica dos processos erosivos; e no plano governamental, ao promover a articulação entre atores institucionais e comunitários para a formulação e implementação de estratégias de mitigação e adaptação. Esse pode ser um caminho para a construção de uma gestão costeira equitativa, com respeito aos territórios, maretórios e de usos sagrados tradicionais, bem como aos protocolos de consulta prévia, assegurando paridade na governança e ampla participação dos povos e comunidades locais e tradicionais.

5. AGRADECIMENTOS

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior– Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 CAPES e ao CNPq Nº 32/2023 Doutorado-Sanduíche no País – SWP pelo financiamento de parte deste trabalho (processo n. 317938/2023-1).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Lima E, Rafael LM. Dinâmica da cobertura e uso da terra de Aracaju – Sergipe. *Rev Contexto Geogr.* 2024;9:34-43. doi: 10.28998/contegeo.9i.19.17355.
2. Vilar JWC, Araújo HM, Santos JAS. Geografia do litoral sergipano. Aracaju (SE): IFS; 2022.
3. Oliveira LS, Andrade ACS. A inserção antrópica no modelamento da paisagem costeira da Zona de Expansão do município de Aracaju/SE. *Rev Bras Geogr Fís.* 2015;8:391-401. doi: 10.26848/rbgf.v8.2.p391-401
4. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo Demográfico 2022 [Internet]. Rio de Janeiro (RJ): IBGE; 2022 [citado em 13 out 2025]. Disponível em: <https://basedosdados.org/dataset/08a1546e-251f-4546-9fe0-b1e6ab2b203d?table=cf9537b5-6198-455f-a8b0-7c762e94d79c>.
5. Abreu FL, Vasconcelos FP, Albuquerque MFC. A diversidade no uso e ocupação da zona costeira do Brasil: a sustentabilidade como necessidade. *Conex Ciênc Tecnol.* 2017 Dec 22;11(5):8. doi: 10.21439/conexoes.v11i5.1277
6. Santos VC, Silva IR. Territórios costeiros do Nordeste do Brasil. Aracaju (SE): Editora IFS; 2021.
7. MapBiomass. Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil, Coleção 8 (1985-2022) [Internet]. São Paulo (SP): MapBiomass; c2024 [acesso em 2 maio 2024]. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/map/colecao-8/>.
8. Martins CFV, Guerra FC, Ferreira ATS, Gonçalves RD. Application of an orbital remote sensing vegetation index for urban tree cover mapping to support the tree census. *Earth.* 2025;6(3):87. doi: 10.3390/earth6030087
9. Ferreira ATS, Oliveira RC, Ribeiro MCH, Grohmann CH, Siegle E. Coastal dynamics analysis based on orbital remote sensing big data and multivariate statistical models. *Coasts.* 2023;3(3):160-74.
10. Jesus LV, Andrade ACS. Taxa de variação da linha de costa e faixas de proteção nas áreas contíguas à desembocadura do rio Sergipe. *Pesqui Geociênc.* 2018;45:1-17. doi: 10.22456/1807-9806.91389
11. Santos JPS, Lima CM, Costa RM, Santos MM. Erosão costeira e faixas de recuo em praias arenosas do sul de Sergipe, Brasil. *Geociências.* 2022;40(4):1047-61. doi: 10.5016/geociencias.v40i04.15561
12. Ribeiro ADS, Oliveira RC. Geoeletricidade da paisagem: a construção de uma abordagem geossistêmica pela geografia para análise ambiental. *Bol Paul Geogr.* 2025;1(113):36-62. doi: 10.61636/bpg.v1i113.3650.
13. von Bertalanffy L. General system theory: foundations, development and applications. New York (US): George Braziller; 1968.
14. Muehe D, Lins-de-Barros FM, Pinheiro LS, editores. Geografia marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos. 1st ed. Rio de Janeiro (RJ): Caroline Fontelles Ternes; 2020.
15. Horta P, Pinho PF, Gouveia L, Grimaldi G, Destri G, Mueller CM, et al. Climate change and Brazil's coastal zone: socio-environmental vulnerabilities and action strategies. *Sustentab Debate.* 2020;11:405-44. doi: 10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33845
16. Cabral LN, Cândido GA. Urbanização, vulnerabilidade, resiliência: relações conceituais e compreensões de causa e efeito. *Urbe Rev Bras Gest Urb.* 2019;11:e20180063. doi: 10.1590/2175-3369.011.002.AO08
17. Bittencourt ACSP, Dominguez JML, Oliveira MB. Erosão e progradação do litoral brasileiro – Sergipe. In: Muehe D, organizador. Erosão e progradação do litoral brasileiro. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente; 2006. p. 213-8.
18. Corrêa MR, Xavier LY, Gonçalves LR, Andrade MM, Oliveira M, Malinconico N, et al. Desafios para promoção da abordagem ecossistêmica à gestão de praias na América Latina e Caribe. *Estud Av.* 2021;35:219-36. doi: 10.1590/s0103-4014.2021.35103.012
19. Brasil. Estado de Sergipe. Lei nº 8.634, de 27 de maio 2019. Institui o Plano e o Sistema Estadual de Gerenciamento Costeiro, cria o Conselho Estadual de Gerenciamento Costeiro - CEGC, e dá providências correlatas. Aracaju (SE): Diário Oficial do Estado de Sergipe; 2019. Disponível em: <https://aleselegis.al.se.leg.br/Arquivo/Documents/legislacao/html/l86342019.html>.
20. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Zoneamento ambiental municipal: o meio ambiente contribuindo para o planejamento urbano. Brasília (DF): MMA; 2018.

21. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Programa Nacional para a Conservação da Linha de Costa (PROCOSTA). Brasília (DF): MMA; 2018.
22. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED). Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012. 2nd ed., rev. e ampl. Florianópolis (SC): CEPED/UFSC; 2013.
23. Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens Environ.* 2017;202:18-27. doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031
24. Storey JC, Choate MJ, Lee K. Landsat 8 operational land imager on-orbit geometric calibration and performance. *Remote Sens.* 2014;6(11):11127-52. doi: 10.3390/rs6111127
25. Teillet PM, Barker JL, Markham BL, Irish RR, Fedosejevs G, Storey JC. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets. *Remote Sens Environ.* 2001;78(1-2):39-54. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00248-6
26. U.S. Geological Survey. Landsat 8 Data Users Handbook. Reston (VA): USGS; 2016.
27. U.S. Geological Survey. Landsat Collection 1 Level-1. Reston (VA): USGS; 2019 Apr.
28. Xu H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int J Remote Sens.* 2006;27(14):3025-33. doi: 10.1080/01431160600589179
29. Diniz C, Cortinhas L, Pinheiro ML, Sadeck L, Fernandes Filho A, Baumann LRF, et al. A large-scale deep-learning approach for multi-temporal aqua and salt-culture mapping. *Remote Sens.* 2021;13(8):1415. doi: 10.3390/rs13081415
30. Himmelstoss EA, Henderson RE, Kratzmann MG, Farris AS. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0—User Guide. Reston (VA): U.S. Geological Survey; 2018. doi: 10.3133/ofr20181179
31. Congalton RG. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens Environ.* 1991;37(1):35-46.
32. Congalton RG, Green K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. Boca Raton (FL): CRC Press; 2019.
33. Pontius RG, Millones M. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *Int J Remote Sens.* 2011;32(15):4407-29. doi: 10.1080/01431161.2011.552923
34. Efron B, Tibshirani RJ. An Introduction to the Bootstrap. New York (NY): Chapman & Hall; 1993. (Monographs on Statistics and Applied Probability; 57).
35. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Projeto RADAMBRASIL. Folhas SC.24 e SC.25: geologia, geomorfologia e pedologia do Estado de Sergipe. Recife (PE): CPRM; 2017.
36. Guerra FC, Gonçalves RD, Oliveira RC. Expansão urbana e susceptibilidade a inundações e deslizamentos na Região Metropolitana de Aracaju. *Sci Plena.* 2024;20(8):089905. doi: 10.14808/sci.plena.2024.089905
37. Diniz MT, Silva DS, Santos JR, Souza RM, Silva JP. Variation of the coastline between the years of 1984 and 2017 in the State of Sergipe, Northeast Region, Brazil. *J Coast Res.* 2020;95(Suppl 1):458. doi: 10.2112/SI95-089.1
38. Rodrigues TK, Jesus LV, Silva MG, Pereira DAS, Feitosa ESS, Andrade ACS, et al. Deltas de maré vazante e erosão costeira na Atalaia Velha e no Mosqueiro, Aracaju (SE), no período de 1965 a 2008. *Sci Plena.* 2015;11(1):015301.
39. Melo e Souza R, Santos GC. Evolução recente das planícies de marés nas desembocaduras dos rios Sergipe e Vaza-Barris, Sergipe. *Cad Geogr.* 2016;26(Supl 2):326. doi: 10.5752/p.2318-2962.2016v26nesp2p326
40. Lima CO, Bonetti J, Gandra TBR, Bonetti C, Scherer MEG. Multiscale analysis of coastal social vulnerability to extreme events in Brazil. *Nat Hazards.* 2023;120:1163-84. doi: 10.1007/s11069-023-06246-w