

Use of the Coastal Risk Assessment Framework (CRAF) to map the relative sensitivity of the coast of the port municipality of São Gonçalo do Amarante, Ceará, Brazil

Débora Lopes*, Javier Benavente Gonzalez**, Maykon Targino da Silva ***

* deboranogueira@hotmail.com.br

** deboranogueira@hotmail.com.br

*** maykontargino@hotmail.com

Received 03 September; accepted 08 October.

ABSTRACT

The study carried out in the coastal municipality of São Gonçalo do Amarante, in Ceará, Brazil, used the "Coastal Risk Assessment Framework" (CRAF) methodology, developed by Van Dongeren et al. (2018) in the RISC-KIT project, and based on the Coastal Vulnerability Index (Gornitz et al., 1994). CRAF, applied in places such as the north and northwest coast of Italy, the Catalan coast in Spain and the north of England, seeks to map coastal sensitivity, assess risks and identify priority areas for adaptation and coastal management actions. The methodology involved the analysis of demographic and environmental data, crossing variables such as population density, land use and flood risks. The results indicated a low coastal risk rating for the region, with areas of lower vulnerability identified mainly due to the presence of healthy coastal ecosystems and a lower concentration of critical infrastructure. It was found that there is no immediate need to move on to a more detailed analysis (Step 2), justifying the decision based on the conclusion of Step 1. The simplicity and effectiveness of the methodology adopted demonstrate its usefulness for future assessments in other coastal regions.

Keywords: Coastal Vulnerability, Coastal Risk Assessment Framework (CRAF), São Gonçalo do Amarante.

Uso da metodologia *Coastal Risk Assessment Framework* (CRAF) para mapear a sensibilidade relativa da costa do município portuário de São Gonçalo do Amarante, Ceará, Brasil

RESUMO

O estudo realizado no município litorâneo de São Gonçalo do Amarante, no Ceará, Brasil, utilizou a metodologia "Coastal Risk Assessment Framework" (CRAF), desenvolvida por Van Dongeren et al. (2018) no projeto RISC-KIT, e baseada no Índice de Vulnerabilidade Costeira (Gornitz et al., 1994). A CRAF, aplicada em locais como a costa norte e noroeste da Itália, a costa catalã na Espanha e o norte da Inglaterra, busca mapear a sensibilidade costeira, avaliar os riscos e identificar áreas prioritárias para ações de adaptação e gestão costeira. A metodologia envolveu a análise de dados demográficos e ambientais, cruzando variáveis como densidade populacional, uso da terra e riscos de inundação. Os resultados indicaram uma baixa classificação de risco costeiro para a região, com áreas de menor vulnerabilidade identificadas principalmente devido à presença de ecossistemas costeiros saudáveis e menor concentração de infraestrutura crítica. Constatou-se que não há necessidade imediata de avançar para uma análise mais detalhada (Etapa 2), justificando a decisão com base na conclusão da Etapa 1. A simplicidade e eficácia da metodologia adotada demonstram sua utilidade para futuras avaliações em outras regiões costeiras.

Palavras-chave: Vulnerabilidade Costeira, Coastal Risk Assessment Framework (CRAF), São Gonçalo do Amarante

1. Introdução

As cidades costeiras tendem a crescer rapidamente devido à sua localização estratégica e

ao acesso ao mar (Patterson & Hardy, 2008), o que resulta em pressões significativas sobre os ecossistemas costeiros e as áreas naturais

circundantes (Crossland *et al.*, 2005). Os riscos de erosão e inundações representam uma séria ameaça para as zonas costeiras e esta tendência irá piorar no futuro (Bruno *et al.*, 2021) devido às alterações climáticas e ao crescimento populacional e econômico (Crossland *et al.*, 2005).

Essas regiões costeiras enfrentam desafios específicos, as atividades humanas, como a rápida urbanização, a industrialização, a degradação dos ecossistemas costeiros e a poluição marinha, bem como o aumento do nível do mar devido às mudanças climáticas, precipitação, erosão do vento e das ondas (Ferreira *et al.*, 2021) representam uma ameaça significativa para essas regiões. Esses desafios agravam a necessidade de conservar as áreas naturais (Neumann *et al.*, 2015).

Segundo o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), uma das projeções de médio a longo prazo (2041-2100) para as áreas costeiras é que aproximadamente um bilhão de pessoas estarão em risco devido a riscos climáticos relacionados à costa em todos os cenários do IPCC. Em países com uma extensa faixa litorânea, como o Brasil, onde 54,18% (111,28 milhões de pessoas) da população nacional vive na faixa litorânea (até 150km da costa), o mapeamento e a monitorização dos recursos naturais costeiros podem ser desafiadores devido à sua vasta extensão geográfica (IBGE, 2022).

Entre os principais obstáculos estão a heterogeneidade dos ecossistemas, a diversidade socioeconômica das comunidades que habitam essas regiões e a limitada infraestrutura de pesquisa e monitoramento. A costa brasileira é caracterizada por uma variedade de ambientes, incluindo manguezais, estuários, praias e recifes, cada um com suas particularidades e vulnerabilidades. A diversidade biológica e cultural exige abordagens adaptadas a cada contexto local.

Além disso, a escassez de dados confiáveis e atualizados é um desafio significativo. Muitas áreas costeiras, especialmente as mais remotas, carecem de informações adequadas sobre suas condições ecológicas, sociais e econômicas. Isso pode dificultar a implementação de políticas públicas eficazes e a mobilização de recursos para a mitigação de riscos.

As mudanças climáticas exacerbam os riscos enfrentados pelas áreas costeiras. O aumento do nível do mar, a intensificação de eventos climáticos extremos, como tempestades e inundações, e a acidificação dos oceanos são algumas das ameaças que podem impactar gravemente as comunidades litorâneas. No Brasil, essas mudanças já estão sendo sentidas em várias

regiões, com relatos de erosão costeira, salinização de aquíferos e impactos na pesca e na agricultura.

Esses riscos não afetam apenas o meio ambiente, mas também a economia local e a segurança alimentar. Muitas comunidades costeiras dependem da pesca e do turismo como principais fontes de renda, tornando-as particularmente vulneráveis a mudanças ambientais. A perda de habitat e a degradação dos ecossistemas costeiros podem reduzir a capacidade dessas comunidades de se adaptarem e prosperarem (Areia *et al.*, 2023).

Diante desse cenário, o mapeamento e o monitoramento dos recursos naturais costeiros tornam-se imprescindíveis. O uso de tecnologias avançadas, como métodos e ferramentas baseadas em GIS (Hinkel & Klein, 2009; Van Dongeren, *et al.*, 2018) desempenha um papel crucial juntamente com sensores remotos, como, satélites, aeronaves e drones que permitem a obtenção de imagens e dados de uma vasta extensão de território em curtos períodos de tempo. Isso é essencial para identificar ao longo do tempo alterações na cobertura terrestre, erosão costeira, mudanças no uso da terra e outros fatores que afetam a biodiversidade e a sustentabilidade.

As informações obtidas por meio do Sensoriamento Remoto podem ser complementadas por dados de campo, permitindo uma compreensão mais completa das condições costeiras (Boori & Amaro, 2010). A combinação de dados de sensoriamento remoto e dados de campo é valiosa para validar e calibrar as informações. E além de avaliar fatores físicos, as técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento também podem ser usadas para analisar fatores sociais, econômicos e ambientais. Fator importante para uma compreensão abrangente das áreas costeiras.

O equilíbrio do meio ambiente e a qualidade de vida da população costeira estão intrinsecamente ligados. A degradação ambiental pode ter impactos diretos na saúde e no bem-estar das comunidades locais, bem como nas atividades econômicas que dependem dos recursos costeiros.

Assim, é necessária uma abordagem sistêmica e colaborativa que considere a interconexão entre todos os elementos que compõem o ambiente costeiro, incluindo os aspectos físicos, sociais, econômicos e ambientais (Turner, 2000; Nicholls *et al.*, 2008). Isso ajuda a entender como as mudanças em um componente afetam os outros e permite a identificação de soluções holísticas. As áreas costeiras são especialmente sensíveis às mudanças climáticas e aos eventos climáticos extremos. Portanto, é

essencial adotar abordagens de planejamento adaptativo que possam se ajustar às mudanças ambientais e às necessidades em evolução das comunidades costeiras.

Nesse sentido, o conceito de risco dentre as diversas definições estabelecidas por instituições internacionais e nacionais (IPCC, 2014; Van Dongeren *et al.*, 2014; BRASIL, 2017; Rangel-Buitrago *et al.*, 2020) refere-se à probabilidade de ocorrência de eventos adversos ou desastres que afetam uma região e suas comunidades, que desempenha um papel fundamental na compreensão e na gestão de desastres, especialmente em áreas costeiras e outras regiões propensas a eventos adversos. Ou seja, o risco concerne como sendo as perdas esperadas, abrangendo vidas humanas, feridos, danos materiais e interrupção das atividades econômicas, resultantes de uma ameaça específica em uma área geográfica determinada e em um período de tempo de referência (CRED, 2018).

Segundo Castro (2008), estudos técnicos para avaliar a probabilidade de um evento adverso ocorrer e causar impacto em uma determinada região, é denominado de estudo de vulnerabilidade, definida como a suscetibilidade costeira lida com os ambientes naturais de uma área, levando em consideração o contexto socioeconômico (Anfuso *et al.*, 2021). A vulnerabilidade, está relacionada ao nível de insegurança inerente a um cenário de desastre em face de um evento adverso específico. Já a definição da ONU (2004) amplia a compreensão da vulnerabilidade ao destacar que ela é resultado de uma interação complexa de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais. Isso significa que a vulnerabilidade não é apenas uma característica estática de uma área geográfica, mas é dinâmica e resulta das condições e circunstâncias presentes.

Em resumo, a vulnerabilidade está intrinsecamente ligada à capacidade de uma área ou população lidar com eventos adversos (Cardona *et al.*, 2012). Ela é influenciada por uma variedade de fatores. Compreender e avaliar a vulnerabilidade é fundamental para a adoção de medidas de redução de riscos e para a promoção da resiliência das comunidades em face de ameaças e desastres naturais. Em áreas costeiras, onde os riscos ambientais são significativos, a análise da vulnerabilidade desempenha um papel crucial na gestão sustentável dessas regiões.

Inicialmente, os índices de avaliação de risco costeiro (Gornitz, 1990), continham apenas alguns indicadores relacionados aos perigos costeiros, como geomorfologia, declive, mudança no nível do mar, erosão e amplitude das marés. No

entanto, ao longo dos anos, houve um aumento significativo no número de indicadores utilizados nesses índices. E o aumento no número de indicadores é explicado pela necessidade de avaliar múltiplos riscos costeiros. Isso significa que os índices agora levam em consideração uma gama mais ampla de ameaças, como secas, ondas e ciclones, além dos perigos originais.

Além dos indicadores de perigo, os índices também passaram a incluir indicadores socioeconômicos e ambientais. Isso significa que fatores como o uso da terra, a população local, o patrimônio cultural e outros aspectos relacionados ao contexto social e ambiental são considerados na avaliação de risco costeiro. Os índices também começaram a incorporar indicadores de resiliência e resistência. Isso significa que são levados em consideração elementos como a presença de abrigos, defesas costeiras e o conhecimento da comunidade sobre a gestão de riscos. No entanto, o aumento no número de indicadores e a combinação deles podem apresentar desafios.

Atualmente, existem alguns desafios quanto a aplicação dessa metodologia, como equilibrar a complexidade da avaliação de riscos costeiros com a aplicabilidade prática. A complexidade excessiva pode tornar o quadro difícil de usar e reduzir a confiança nos resultados, enquanto a simplicidade excessiva pode levar a uma seleção inadequada de pontos críticos de risco. Outra tarefa desafiadora para muitos locais em todo mundo, é com relação ao uso e disponibilidade de uma grande quantidade de dados para essas regiões costeiras (PAZINI *et al.*, 2022).

O município de São Gonçalo do Amarante, situado na costa cearense, na qual é foco desse estudo, enfrenta desafios significativos em relação à vulnerabilidade costeira, impulsionados por fatores como mudanças climáticas, erosão e aumento do nível do mar. Nos últimos anos, estudos têm se intensificado, buscando compreender e mitigar os riscos associados a esses fenômenos. Neste contexto, a metodologia do Índice de Vulnerabilidade Costeira, conforme proposta por Gornitz *et al.* (1994), tem se mostrado um recurso valioso para a análise das condições locais e a formulação de estratégias de adaptação.

Em uma abordagem mais abrangente, o "*Coastal Risk Assessment Framework*", desenvolvido por Van Dongeren *et al.* (2018) no projeto RISC-KIT, proporciona uma estrutura robusta para a avaliação de riscos costeiros. Essa metodologia foi aplicada em diversas regiões ao redor do mundo, incluindo a costa norte e noroeste da Itália (Armaroli & Duo, 2017; De Angeli *et al.*,

2017), onde possibilitou a identificação de áreas críticas e a elaboração de planos de ação eficazes.

Este *framework* foi criado para oferecer uma estrutura integrada que considera múltiplos fatores, incluindo a vulnerabilidade socioeconômica, os aspectos ambientais e as dinâmicas físicas da costa. A metodologia é projetada para ser aplicada em diferentes contextos e geografias, permitindo a adaptação às particularidades de cada região. Essa abordagem multifacetada permite não apenas a identificação de áreas de risco, mas também a compreensão das interações complexas entre os fatores naturais e humanos que influenciam a resiliência costeira. Essa visão holística é crucial para desenvolver soluções que não apenas mitiguem os riscos, mas que também promovam um uso sustentável e consciente dos recursos costeiros.

Além das referências internacionais, o Brasil tem se destacado em estudos relacionados à vulnerabilidade costeira, com pesquisas recentes de Pazini *et al.* (2022) e Sfreddo *et al.* (2023) que abordam aspectos similares em diferentes regiões do país. Essas pesquisas demonstram a relevância do contexto brasileiro, que, assim como São Gonçalo do Amarante, apresenta particularidades que exigem atenção e ações específicas. A comparação entre diferentes localidades brasileiras e internacionais pode enriquecer o entendimento sobre os riscos costeiros e as melhores práticas de gestão.

Em São Gonçalo do Amarante, a aplicação dessas metodologias não só contribui para a avaliação da sensibilidade da costa, mas também auxilia na identificação de áreas prioritárias para intervenções. O mapeamento da vulnerabilidade pode revelar regiões mais suscetíveis à erosão e ao impacto de eventos climáticos extremos, permitindo que gestores e autoridades desenvolvam políticas públicas mais eficientes. Este processo de adaptação e gestão costeira é crucial, especialmente em um cenário de crescente urbanização e pressão sobre os recursos naturais.

A necessidade de um planejamento integrado é fundamental para garantir a resiliência das comunidades costeiras. A experiência acumulada em outras localidades, como a costa catalã na Espanha (Jimenez, 2017), no norte da Inglaterra (Christie *et al.*, 2017) e na Índia (Abijith *et al.*, 2023), pode servir como referência para as estratégias a serem implementadas em São Gonçalo do Amarante. Essas abordagens demonstram que a colaboração entre diferentes setores e a participação da comunidade são

essenciais para o sucesso das iniciativas de gestão costeira.

Por fim, é evidente que a vulnerabilidade costeira em São Gonçalo do Amarante requer uma abordagem multidimensional e colaborativa. A integração de metodologias consagradas com o conhecimento local é a chave para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas. Mas, embora o *framework* ofereça uma base sólida para a avaliação de riscos, sua implementação enfrenta desafios, como a necessidade de dados locais confiáveis e a participação ativa da comunidade. Além disso, é fundamental que haja uma articulação entre diferentes níveis de governo e setores da sociedade para que as estratégias de adaptação sejam eficazes.

2. Metodologia

A metodologia utilizada para a avaliação de riscos costeiros em São Gonçalo do Amarante, Ceará, é baseada no CRAF (*Coastal Risk Assessment Framework*) e é estruturada em duas etapas interligadas, projetadas para fornecer uma compreensão abrangente dos desafios enfrentados pelas comunidades costeiras em um cenário de mudanças climáticas e aumento do nível do mar. O foco principal é identificar as vulnerabilidades das populações, a dinâmica da linha costeira e os impactos potenciais decorrentes de fenômenos climáticos extremos.

Na Etapa 1, o foco está na triagem inicial da costa do município utilizando o Índice Costeiro (IC). Esse índice combina indicadores de risco de inundação, como erosão e elevação do nível do mar, com avaliações de exposição que consideram a densidade populacional e a distribuição de domicílios. A metodologia envolve a análise de dados de satélite para identificar variações na linha de costa ao longo de um período de 39 anos. Esse processo de vetorização e análise morfológica permite classificar as áreas em diferentes níveis de risco, destacando hotspots que necessitam de atenção prioritária. Além disso, a escolha criteriosa dos setores censitários, que são as menores unidades territoriais para coleta de dados demográficos, garante que a análise seja representativa e focada nas áreas mais vulneráveis.

Já a Etapa 2, a metodologia é aprimorada com um enfoque mais detalhado na avaliação de perigos e impactos. Nessa fase, são aplicados modelos de avaliação de impacto e análises multicritério, permitindo uma identificação mais precisa das áreas críticas. Essa etapa não apenas reitera a importância dos hotspots

identificados anteriormente, mas também analisa a interdependência entre os fatores de risco e a resiliência das comunidades. A aplicação contínua de monitoramento e adaptação é central nesta fase, com a meta de desenvolver estratégias de mitigação que sejam flexíveis e adaptáveis às mudanças nas condições costeiras.



MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

1:250000
Datum: SIRGAS 2000
Fonte: IBGE, 2015
Imagem: USGS, 2024

2.1 Área de estudo

O município de São Gonçalo do Amarante localiza-se na porção Norte do Estado do Ceará,

Figura 1. Mapa de Localização do município de São Gonçalo do Amarante, CE

Caracterizada por uma topografia suave e pouco dissecada da Depressão Sertaneja, com altitudes inferiores a 200m, esse município possui uma área de 842,63 km², constituído de 8 distritos: Pecém, Taíba, Siupé, Umarituba, Croatá, Serrote, Cágado e a sede São Gonçalo do Amarante sendo 27,6% dessa área urbanizada (IBGE, 2019). E com uma extensão litorânea de extensão de 18,5 km e é composta por dunas, praias e pós-praias.

O clima é tropical, do tipo Aw segundo a classificação de Koppen, com estações chuvosas no verão e invernos secos. As temperaturas médias são em torno de 27 °C, com uma média pluviométrica anual de 989mm. A influência da porção oceânica eleva as precipitações médias anuais para mais de 750mm, o que contribui para a presença de vegetação característica da região, caatinga arbustiva densa

Brasil (Figura 1), a cerca de 60 km da capital Fortaleza. Sua localização estratégica o coloca na mesorregião Metropolitana de Fortaleza e na microrregião de Fortaleza, no município está localizado o Terminal Portuário do Pecém, e a

Companhia Siderúrgica do Pecém que desempenha um papel fundamental na economia local.

ao sul e na porção litorânea, a norte do município a vegetação de mangue.

A geologia do município é predominantemente de depósitos eólicos costeiros Holocênicos, rochas do embasamento cristalino do Grupo Ceará e sedimentos do Grupo Barreiras. Os solos de maior ocorrência são o Gleissolos e Neossolos Quartzarênicos.

No último censo demográfico de 2022, São Gonçalo do Amarante possui uma população de 54.143 habitantes (IBGE, 2022), com um número de 10.253 habitantes maior que o censo demográficos de 2010 (IBGE, 2010). E ainda segundo o IBGE (2010) não há nenhum dado de exposição ao risco a população do município, ou seja, no município não há áreas vulneráveis a inundações, enxurradas e deslizamentos, não estando, portanto, contabilizada entre os municípios considerados críticos a desastres naturais no Brasil e monitorados pelo Centro

2.2 CRAF

A metodologia CRAF (Coastal Risk Assessment Framework), é um sistema desenvolvido para avaliar e gerenciar os riscos associados às zonas costeiras, uma iniciativa que se concentra na gestão de riscos costeiros, especialmente em relação às mudanças climáticas e ao aumento do nível do mar (Ferreira *et al.*, 2017; Viavattene *et al.*, 2017; Van Dongeren *et al.*, 2018; Pazini, 2021). Ela foi projetada para ajudar governos, autoridades locais, pesquisadores e outros interessados a compreender e mitigar os riscos costeiros.

A metodologia CRAF envolve e considera uma variedade de fatores, incluindo: a identificação inicial de ameaças costeiras, como tempestades, erosão costeira, inundação devido ao aumento do nível do mar e outros eventos relacionados ao clima em escala regional. Também é importante avaliar os componentes costeiros em risco, como infraestrutura, comunidades e ecossistemas. Ajuda a identificar áreas e componentes que são mais vulneráveis aos riscos costeiros, denominados de *hotspots*, que são locais específicos dentro da área costeira que apresentam um risco significativamente maior em comparação com outras áreas (Viavattene *et al.*, 2017).

Esses *hotspots* são áreas prioritárias para intervenção e gerenciamento de riscos (Viavattene *et al.*, 2017). Posteriormente, ocorre a avaliação dos impactos potenciais dos riscos costeiros nas comunidades, economias e meio ambiente. Isso ajuda a quantificar os custos e as consequências associadas aos eventos extremos nas zonas costeiras. Com base nas informações coletadas anteriores, é possível desenvolver estratégias para mitigar os riscos costeiros. Isso pode incluir a implementação de medidas de adaptação, como a construção de barreiras costeiras, planejamento de evacuações e a gestão sustentável da costa.

A gestão de riscos costeiros é um processo contínuo. Portanto, essa metodologia enfatiza a importância do monitoramento constante das condições costeiras, a revisão periódica das estratégias de mitigação e a adaptação às mudanças nas ameaças e vulnerabilidades.

A metodologia CRAF é uma ferramenta valiosa para lidar com os desafios que as zonas costeiras enfrentam devido às mudanças climáticas e outros fatores. Ela ajuda a orientar a tomada de decisões e a promover a resiliência

costeira, protegendo comunidades e recursos valiosos. É importante notar que a implementação da metodologia CRAF pode variar de acordo com as necessidades locais e as condições específicas de cada região costeira.

Baseado nisso, a metodologia aplicada foi fragmentada em duas etapas (Etapa 1 e Etapa 2). A primeira etapa é chamada de "Etapa 1" e utiliza um índice de vulnerabilidade costeira para realizar uma triagem inicial de toda a costa do município de São Gonçalo do Amarante, Ceará. Nessa etapa é utilizado um Índice Costeiros (IC) para realizar uma triagem inicial de toda a costa. Essa fase é crucial para identificar áreas de alto risco ao longo da costa, eliminando áreas de baixo risco (Viavattene *et al.*, 2017).

Ou seja, na Etapa 1 foi examinado sistematicamente a costa em setores e utiliza-se uma abordagem simples que combina indicadores com base no **risco de inundação** e a **avaliação de exposição** com pesos iguais em uma média geométrica de raiz quadrada seguindo Gornitz (1994) e outras abordagens (Thieler e Hammer-Close, 2000). Esses indicadores são combinados em um índice costeiro, e posteriormente os são classificados em áreas de potenciais pontos críticos de risco, denominados de *hotspots* (Viavattene *et al.*, 2017).

Os **riscos de inundação** foram calculados com base em uma análise multitemporal de 39 anos (1984-2023) da linha de costa, na qual, foi efetuado o Processamento Digital das Imagens (PDI) utilizando imagens de satélite da série Landsat disponibilizadas pelo *United State Geological Survey* (USGS). Após o PDI, procedeu-se à vetorização manual das linhas costeiras com base na demarcação entre áreas úmidas e secas, seguindo a abordagem proposta por Dolan *et al.* (1980). Além disso, foi gerada uma linha de base de referência baseada na configuração atual da linha costeira (linha de base *offshore*). Em seguida, para a análise e quantificação da linha costeira vetorizou-se as linhas costeiras, gerando transectos perpendiculares com espaçamento de 10 metros entre eles.

Assim, com os vetores das linhas costeiras, a linha de base e os diversos transectos gerados automaticamente pelo *Digital Shoreline Analysis System 5.0* (DSAS) (Himmelstoss *et al.*, 2018), foi possível realizar o cálculo das variações ao longo de um período de 39 anos (1984-2023). Isso foi feito por meio de uma matriz numérica que permitiu avaliar o comportamento morfológico das linhas costeiras em relação à linha de base, considerando as situações de erosão, acreção e

equilíbrio gerando a seguinte classificação de risco de inundação (Tabela 1) variando de -3,5 (menor gravidade) a 3,5 (maior nível de perigo):

Tabela 1. Classificação de risco de inundação com base na variação da linha de costa dos últimos 39 anos

Classe de risco de Inundação	Categoria	Variação
Acreção alta	1	>3,5m/ano
Acresção	2	1,5 a 3,5m/ano
Estabilidade	3	-1,5 a 1,5m/ano
Erosão	4	-1,5 a -3,5m/ano
Erosão alta	5	<3,5m/ano

Já os indicadores para **avaliação de exposição** foram selecionados para caracterizar os potenciais impactos não tangíveis para a população (Viavattene *et al.*, 2017) costeira. Para isso foi delimitado a área de estudo com base nos setores censitários da porção costeira de São Gonçalo do Amarante de acordo com o último censo demográfico (IBGE, 2024).

O setor censitário é reconhecido como a menor unidade territorial para fins de controle cadastral da coleta. Esses setores são definidos com base em diversos critérios. Primeiramente, a área e o número de domicílios do setor devem ser projetados de forma que um único recenseador consiga percorrê-los e visitá-los em um período de tempo razoável. Além disso, o recorte do setor deve ser representativo em relação à população local, garantindo que as características demográficas sejam adequadamente refletidas. Por fim, é necessário que o setor contenha um número suficiente de domicílios para que os dados agregados possam ser divulgados sem comprometer o sigilo dos moradores. Esses critérios asseguram a eficácia e a confiabilidade do processo censitário.

O município possui 112 setores censitários, mas apenas o foco foi em apenas os 16 setores censitários que se encontram na porção costeira do município, pertencentes aos distritos de Pecém e Taíba, somando um total de 33,76 km² de área (Figura 2).

Usar uma escala para diferentes impactos podem ser problemáticos e desafiador em tal abordagem de triagem, já que os impactos variam em natureza e não pode ser facilmente expressa pela mesma unidade. Portanto, foram selecionados os seguintes indicadores para a área de estudo (Tabela 3) Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil, (Projeto MapBiomas, 2021) com uma escala de 30m, e os dados do censo demográfico de 2022: densidade demográfica, densidade de domicílios particulares e densidade de domicílios coletivos. infraestruturas-chave e impacto na economia, ou seja, quanto mais próximos de 5 o valor atribuído, maior sensibilidade a perda e a impactos

Tabela 3. Indicador de avaliação de exposição da área de estudo

Para os dados do Projeto MapBiomas e da base cartográfica do IBGE (2023) cada classe de exposição foi avaliada e atribuída um valor entre 1 e 5, baseado na perda de ativos e valor da terra, saúde e impactos financeiros na população, impactos em Indicador de avaliação de exposição	Classe	Descrição	Valor
Uso e Cobertura da Terra			
Floresta	Formação Florestal	Tipos de vegetação com predomínio de dossel contínuo - Savana-Estépica Florestada, Floresta Estacional Semi-Decidual e Decidual.	2,0
	Formação Savânica	Tipos de vegetação com predomínio de espécies de dossel semi-contínuo - Savana-Estépica Arborizada, Savana Arborizada.	3,0
	Mangue	Formações florestais, densas, sempre-verdes, frequentemente inundadas pela maré e associadas ao ecossistema costeiro de Manguezal.	5,0
Formação Natural não Florestal	Formação campestre	Tipos de vegetação com predomínio de espécies herbáceas (Savana-Estépica Parque, Savana-Estépica Gramíneo-Lenhosa, Savana Parque, Savana Gramíneo-Lenhosa) + (Áreas inundáveis com uma rede de lagoas interligadas, localizadas ao longo dos cursos de água e em áreas de depressões que acumulam água, vegetação predominantemente herbácea a arbustiva)	3,0
Agropecuária	Pastagem	Áreas de pastagem predominantemente plantadas, diretamente relacionadas à atividade agropecuária. As áreas de pastagem natural, por sua vez, são predominantemente caracterizadas como formações campestres ou campo alagado, podendo ser submetidas ou não a práticas de pastejo.	2,0
	Outras lavouras perenes	Áreas ocupadas com cultivos agrícolas de ciclo vegetativo longo (mais de um ano), que permitem colheitas sucessivas, sem necessidade de novo plantio. Nessa versão, o mapa abrange majoritariamente áreas de caju, no litoral do nordeste.	2,0

	Mosaico de usos	Áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura.	2,0
Área não vegetada	Praia e Duna e Areal	Cordões arenosos, de coloração branco brilhante, onde não há o predomínio de vegetação de nenhum tipo.	5,0
	Área urbanizada	Áreas com significativa densidade de edificações e vias, incluindo áreas livres de construções e infraestrutura.	5,0
	Outras Áreas não Vegetadas	Áreas de superfícies não permeáveis (infra-estrutura, expansão urbana ou mineração) não mapeadas em suas classes.	3,0
Corpos D'água	Rio, Lago e Oceano	Rios, lagos, represas, reservatórios e outros corpos d'água.	1,0
Censo Demográfico	Classe	Descrição	Valor
Densidade demográfica	Alta	Mais de 1000 habitantes por quilometro quadrado (hab/km ²)	5,0
	Média	Entre >500 e <1000 habitantes por quilometro quadrado (hab/km ²)	4,0
	Baixa	Entre >150 e <500 habitantes por quilometro quadrado (hab/km ²)	4,0
	Muita baixa	Entre <150 e >0,0 habitantes por quilometro quadrado (hab/km ²)	2,0
	Nenhuma	Ausência de habitantes	0,0
Densidade de domicílios particulares	Alta	Mais de 1000 domicílios particulares por quilometro quadrado (dom/km ²)	5,0
	Média	Entre >500 e >1000 domicílios particulares por quilometro quadrado (dom/km ²)	4,0
	Baixa	Entre >100 e >500 domicílios particulares por quilometro quadrado (dom/km ²)	4,0
	Muita baixa	Entre <100 e >0,0 domicílios particulares por quilometro quadrado (dom/km ²)	2,0
	Nenhuma	Ausência de domicílios particulares	0,0
Densidade de domicílios coletivos	Alta	Mais de 30 domicílios coletivos por quilometro quadrado (hab/km ²)	5,0
	Média	Entre >20 e >30 domicílios coletivos por quilometro quadrado (dom/km ²)	4,0
	Baixa	Entre >10 e >20 domicílios coletivos por quilometro quadrado (dom/km ²)	4,0
	Muita baixa	Entre <10 e >0,0 domicílios coletivos por quilometro quadrado (dom/km ²)	2,0
	Nenhuma	Ausência de domicílios coletivos	0,0

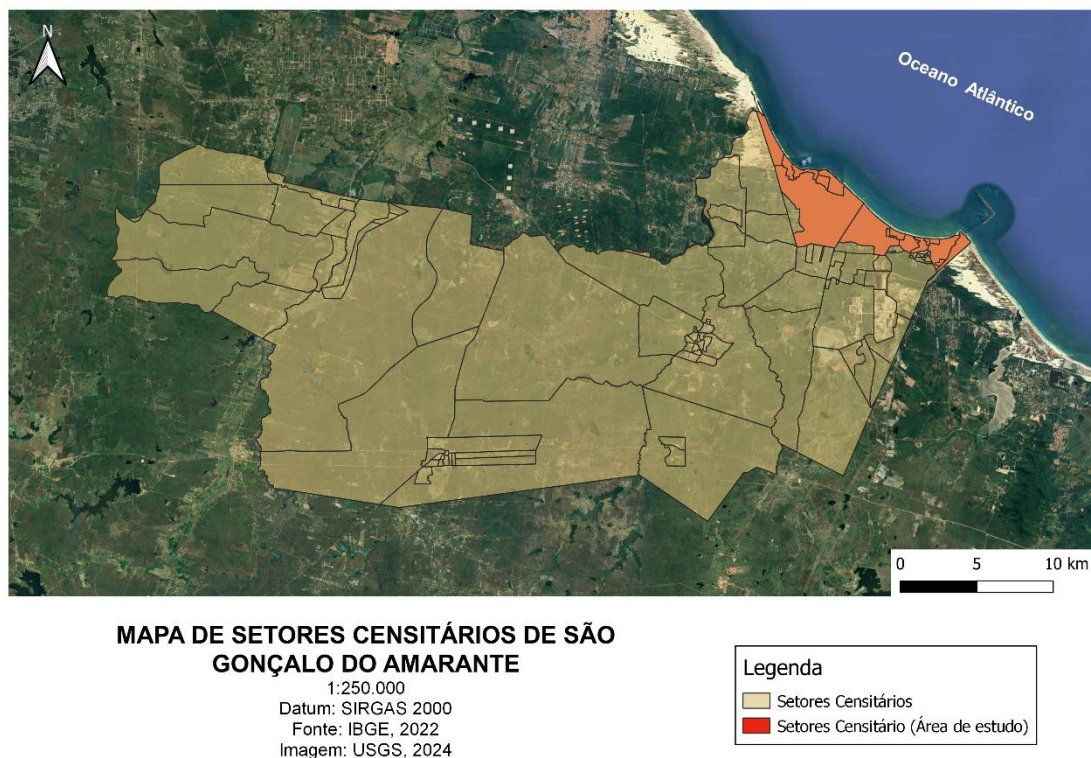


Figura 2. Setores censitários do município de São Gonçalo do Amarante e da porção litorânea (área de estudo)

Já os dados do censo demográfico foram também classificados com valores entre 1 e 5. A densidade populacional foi calculada através da razão entre a quantidade de população e a unidade territorial desejada (IBGE), ou seja, a

densidade populacional foi calculada para cada setor censitário levando em conta o número de habitantes por setor e a área correspondente de cada setor censitário na região de estudo (Tabela 2).

Tabela 2. Dados dos setores censitários da área de estudo

Código do Setor censitário	Distrito	Nº de Habitantes	Área (km²)	Densidade Demográfica
231240315000002P	Pecém	187	0,443	422,05
231240315000003P	Pecém	591	0,198	2974,53
231240315000013P	Pecém	68	0,149	453,52
231240315000015P	Pecém	395	0,120	3280,10
231240315000026P	Pecém	941	2,071	454,32
231240315000028P	Pecém	433	0,618	700,47
231240315000029P	Pecém	194	1,001	193,78
231240315000030P	Pecém	266	6,232	42,68
231240315000042P	Pecém	36	0,155	232,35
231240315000043P	Pecém	0	1,300	0,00
231240327000002P	Taíba	813	1,266	641,95
231240327000003P	Taíba	722	16,085	44,89
231240327000006P	Taíba	537	0,521	1030,19
231240327000008P	Taíba	528	0,701	752,47
231240327000009P	Taíba	704	0,666	1056,02

E para atribuir os valores da classe de exposição levou-se em consideração a estimativa oficial do IBGE realizada para a população Brasileira no ano de 2022, onde o número de habitantes do país é de 203.080.756. E a área territorial oficial do país é de 8.510.417,77 km². Dessa forma, ao calcularmos a densidade demográfica do Brasil, temos uma densidade demográfica de aproximadamente 23,9 hab/km².

No entanto, se considerarmos os valores demográficos regionais, essa relação altera-se significativamente, pois, a população do país encontra-se má distribuída, havendo regiões com uma elevadíssima concentração de pessoas e outras com verdadeiros “vazios demográficos”. A cidade de São Paulo, por exemplo, apresenta mais de 7.300 hab/km², ao passo em que várias cidades na região Norte apresentam índices menores do que 10 hab/km². E para o estado do Ceará, a densidade demográfica é de 59,07 hab/km² para o censo de 2022.

Já para os dados densidade de domicílios particulares e densidade de domicílios coletivos. Faz necessário ter alguns conceitos bem definidos, como domicílio, que é definido como o local construído ou utilizado com a finalidade de residência ou moradia. Esses domicílios são classificados em dois grandes grupos: os Particulares e os Coletivos (IBGE, 2024).

Os Domicílios Particulares Permanentes (DPP) são aqueles cuja edificação foi construída com a finalidade de servir de moradia a uma ou mais pessoas. Isso inclui casas, apartamentos em edifícios, apart-hotéis, habitações em cortiços, habitações indígenas sem paredes (malocas), entre outros. Os DPP se dividem em três categorias:

- Domicílios Particulares Permanentes Ocupados (DPPO): Domicílios permanentes ocupados na data de referência do Censo, nos quais foi realizada a entrevista.
- Domicílios Particulares Permanentes de Uso Ocasional (DPPUO): Domicílios permanentes utilizados ocasionalmente para moradia, como para descanso nos fins de semana, férias, ou por conveniência de trabalho.
- Domicílios Particulares Permanentes Vagos (DPPV): Domicílios permanentes sem moradores na data de referência do Censo.

Além disso, existe o Domicílio Particular Improvisado Ocupado (DPIO), que é aquele localizado em edificações não destinadas

exclusivamente à moradia, como bares, lojas, depósitos, escritórios, estruturas móveis, calçadas, praças, viadutos, ou abrigos naturais como grutas ou cavernas. Os domicílios particulares ocupados são compostos pelas espécies DPPO e DPIO.

Por outro lado, o Domicílio Coletivo (DC) é uma instituição ou estabelecimento onde a relação entre as pessoas que nele se encontram, moradoras ou não, na data de referência, é restrita a normas de subordinação administrativa. Os DC podem ser classificados como Com Morador (DCCM) ou Sem Morador (DCCSM). Exemplos incluem abrigos, asilos, orfanatos, albergues, casas de passagem para população em situação de rua, clínicas psiquiátricas, comunidades terapêuticas ou de dependência química, hotéis, pensões, penitenciárias, centros de detenção, alojamentos de trabalhadores, quartéis ou outras organizações militares, etc.

Com base nesses conceitos e dados do censo 2022 (IBGE) foi calculado a densidade de domicílios por setor, onde foi feita a razão entre o número total de domicílios particulares e área de cada setor estudado (DPPO + DPPV + DPPUO + DPIO + DCCM + DCSM) e a razão entre o número de domicílios coletivos e a área total de cada setor censitários, gerando as classes de densidade de domicílios, alta, média, baixa, muito baixa e nenhuma.

E para concluir a “Etapa 1” foi aplicado o Índice costeiro (IC), que é uma medida existente para identificação de pontos de risco que combina as variáveis do “risco de inundação” e “avaliação de exposição” da área de estudo em um único índice (Ferreira *et al.*, 2016; Viavattene *et al.*, 2017), ou seja, é usado para identificar potenciais HS, permitindo assim uma rápida comparação dos setores costeiros.

Entretanto, não há uma abordagem padronizada quanto aos tipos de indicadores considerados, à forma de classificação e à fórmula utilizada para combinar diferentes variáveis entre os estudos (Gornitz, 1990; Balica *et al.*, 2012; McLaughlin *et al.*, 2002; Ramieri *et al.*, 2011). No entanto, no âmbito do CRAF, opta-se por um enfoque simplificado que combina cinco classes para classificar o risco e a exposição, atribuindo-lhes igual peso e calculando uma média geométrica de raiz quadrada, (Gornitz, 1990; Thieler e Hammer-Close, 1999):

$$IC = \sqrt{RI \times AE}$$

2

IC: Índice Costeiro
RI: Risco de Inundação

AE: Avaliação de Exposição

Já a segunda etapa, denominada "Etapa 2", aprimora a avaliação de risco regional, aumentando a resolução na avaliação de perigos. Ela inclui o cálculo do perigo, o modelo de avaliação de impacto e a análise multicritério usada para selecionar o que é chamado de *hotspot* (ponto crítico) ao longo da costa. Esta fase visa aprofundar a análise e a seleção de áreas prioritárias para intervenção e gerenciamento de riscos.

3. Resultados e discussões

Neste estudo, focou-se na análise e processamento dos dados dos 16 setores censitários localizados na porção costeira dos distritos de Pecém e Taíba, abrangendo uma área total de 33,76 km². Adotou-se uma abordagem que considera uma gama de indicadores, desde dados de mapeamento do uso e cobertura da terra até informações sobre infraestrutura e densidade populacional e de domicílios para avaliar a exposição a risco, além de dados de variação da linha de costa dos últimos 39

anos. Foram atribuídos valores de sensibilidade às diferentes classes de exposição, para então obter uma visão mais precisa dos potenciais impactos em caso de eventos adversos.

4.1 Etapa 1

Risco de inundação

Na Etapa 1 deste estudo, foi realizado um exame sistemático da costa do município de São Gonçalo do Amarante. Para calcular os riscos de inundação, foram utilizados dados processados digitalmente das imagens de satélite, seguidos de uma vetorização manual das linhas costeiras. Essas informações foram então analisadas utilizando o *Digital Shoreline Analysis System 5.0* (DSAS), permitindo o cálculo das variações na linha costeira ao longo do tempo. Com base nesses cálculos, as áreas foram classificadas em três categorias de risco de inundação: acreção alta, acreção, estabilidade, erosão e erosão alta (Figura 3).



Figura 3. Mapa de risco de inundação da porção costeira do município de São Gonçalo do Amarante

A combinação de dados de imagens de satélite, análise da linha de costa e mapeamento da dinâmica sedimentar fornece uma base sólida para a avaliação dos riscos costeiros e a tomada de decisões informadas em relação ao planejamento e gestão costeira. Segundo Birkmann *et al.*, (2022), a integração de múltiplos indicadores é crucial para a avaliação precisa da vulnerabilidade costeira, ou

seja, esses resultados são fundamentais para promover a resiliência costeira e garantir o desenvolvimento sustentável das áreas costeiras do município de São Gonçalo do Amarante.

Os resultados indicam uma dinâmica complexa na linha de costa do município de São Gonçalo do Amarante ao longo das últimas quatro décadas. Observou-se uma variabilidade nas taxas de erosão e acresção em diferentes áreas, refletindo

a influência de processos naturais e antropogênicos, mas não houve valores significativos de erosão alta.

É possível também observar no mapa que a classe de menor predominância ao longo da costa do município corresponde a classe de Estabilidade, seguida pela classe de acreção alta e acreção. Já com relação aos valores de erosão é possível perceber que eles estão concentrados na porção mais a oeste do município, onde está localizado na foz do Rio Anil. Devido à sua dinâmica fluvial única, influenciada por diversos fatores externos como a pluviosidade e o transporte de sedimentos, a foz do Rio Anil não segue um padrão linear. Ao longo do ano, a largura da faixa de praia varia, o que favorece a influência de eventos externos (Lopes *et al.*, 2023).

Embora não tenham sido registrados valores significativos de erosão alta, é evidente a importância de compreender, monitorar continuamente a evolução da linha costeira e identificar áreas de maior vulnerabilidade à erosão costeira e inundação, bem como compreender os padrões de mudança ao longo do tempo. para

garantir a segurança e a sustentabilidade das comunidades costeiras.

Avaliação de exposição

Os indicadores selecionados abrangem uma gama de indicadores, desde uso e cobertura da terra, a infraestrutura de transporte e energia, além de dados do censo demográfico. Para entender a distribuição e a natureza da cobertura do solo, foi categorizado as áreas em diferentes tipos, incluindo florestas, formações savânicas, manguezais, áreas agrícolas e áreas urbanizadas. Além disso, considerou-se a presença de corpos d'água, como rios, lagos e oceano (Figura 4). Para os dados demográficos do censo de 2022 foram considerados os dados de densidade demográfica (Figura 5), densidade de domicílios particulares (Figura 6) e densidade de domicílios coletivos (Figura 7). Na qual, todos esses dados foram classificados com valores entre 1 e 5 conforme a metodologia definida.

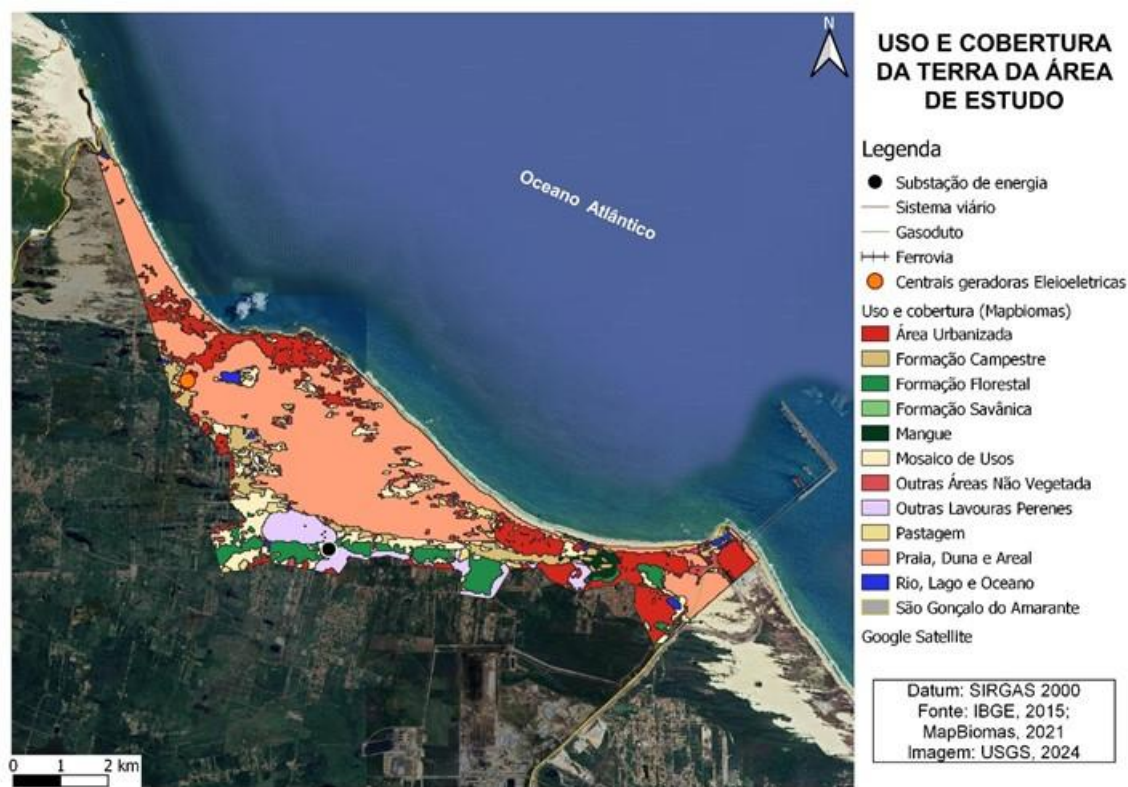


Figura 4. Uso e cobertura da terra da área de estudo

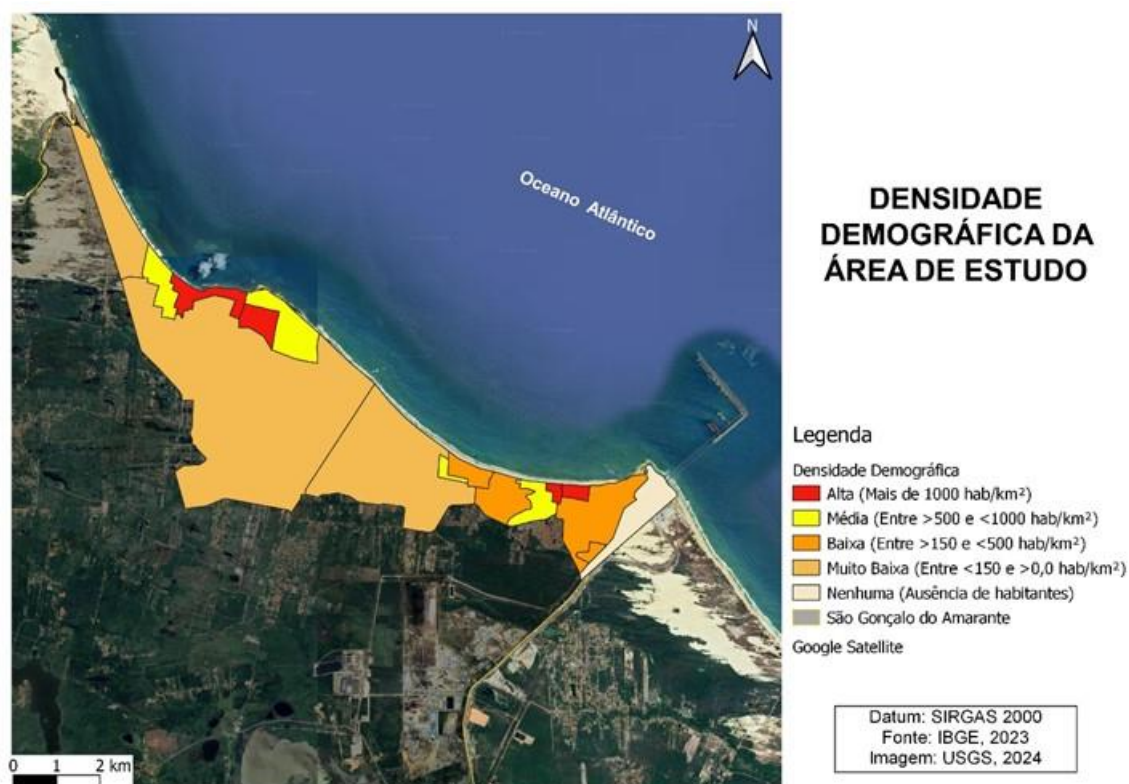


Figura 5. Densidade demográfica da área de estudo

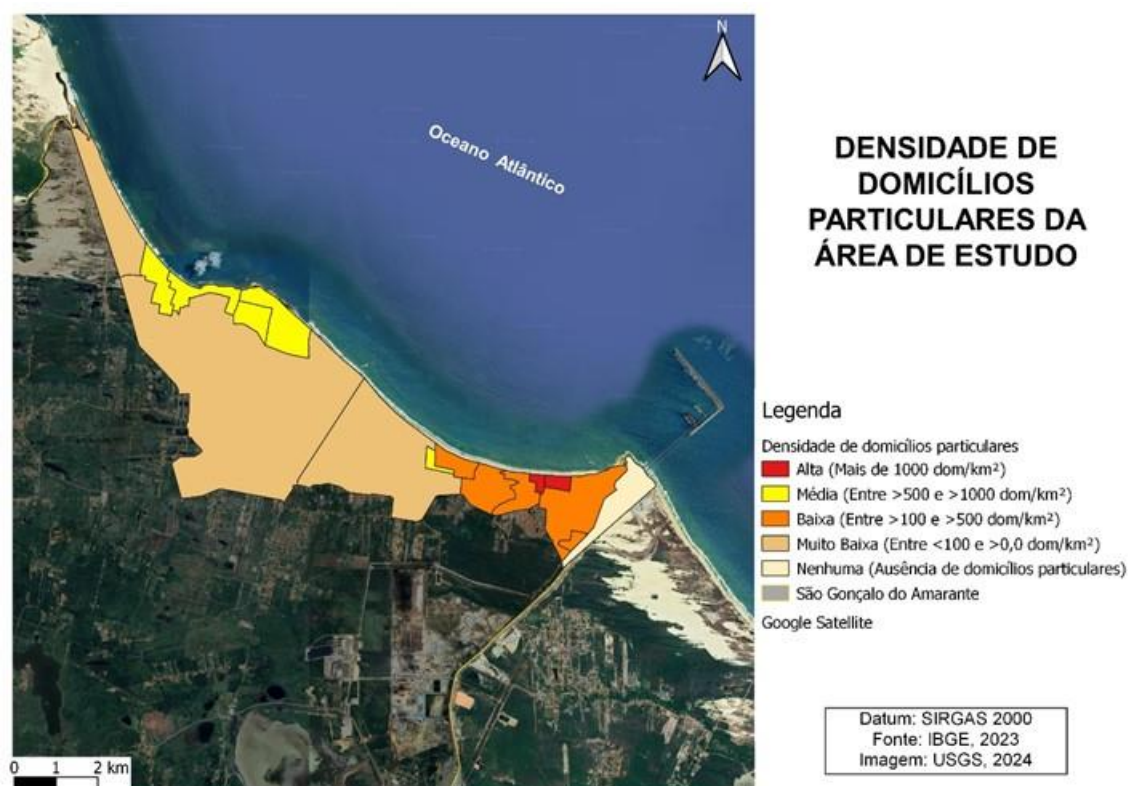


Figura 6. Densidade de domicílios particulares da área de estudo



Figura 7. Densidade de domicílios coletivos da área de estudo

Cruzar os dados de avaliação de exposição com classes que variam de 1 a 5 foi uma abordagem crucial para compreender e quantificar o nível de risco e vulnerabilidade em na área de estudo. Essa técnica permitiu atribuir valores numéricos aos diferentes aspectos que influenciam a exposição a determinados riscos, fornecendo uma avaliação mais precisa e detalhada. Ao atribuir valores às classes de exposição, está-se essencialmente quantificando a sensibilidade ou a importância de cada fator em relação ao risco percebido (Figura 8).

Os resultados revelam uma paisagem diversificada, com uma variedade de usos da terra e características. Por exemplo, identificou-se a presença significativa de florestas, incluindo formações florestais e manguezais, que desempenham um papel crucial na proteção da biodiversidade e na prestação de serviços ecossistêmicos. Além disso, observa-se a expansão de áreas urbanizadas e o desenvolvimento de infraestrutura de transporte e energia, indicando pressões crescentes sobre o meio ambiente e os recursos naturais.

Áreas com menor densidade demográfica e predominância de usos menos vulneráveis foram classificadas com menor

sensibilidade. Ao considerar a distribuição dos domicílios, observa-se uma diversidade de padrões. Enquanto alguns setores apresentavam uma alta densidade de domicílios particulares, outros se destacavam pela presença significativa de domicílios coletivos. Essa variação reflete as diferentes características socioeconômicas e urbanas da região costeira estudada.

Por exemplo, em um contexto de análise de riscos costeiros, atribuiu-se um valor mais alto (por exemplo, 5) a áreas com alta densidade populacional, infraestrutura crítica e fragilidade ambiental, indicando uma maior exposição a possíveis impactos, tendo com resultado as áreas em vermelho.

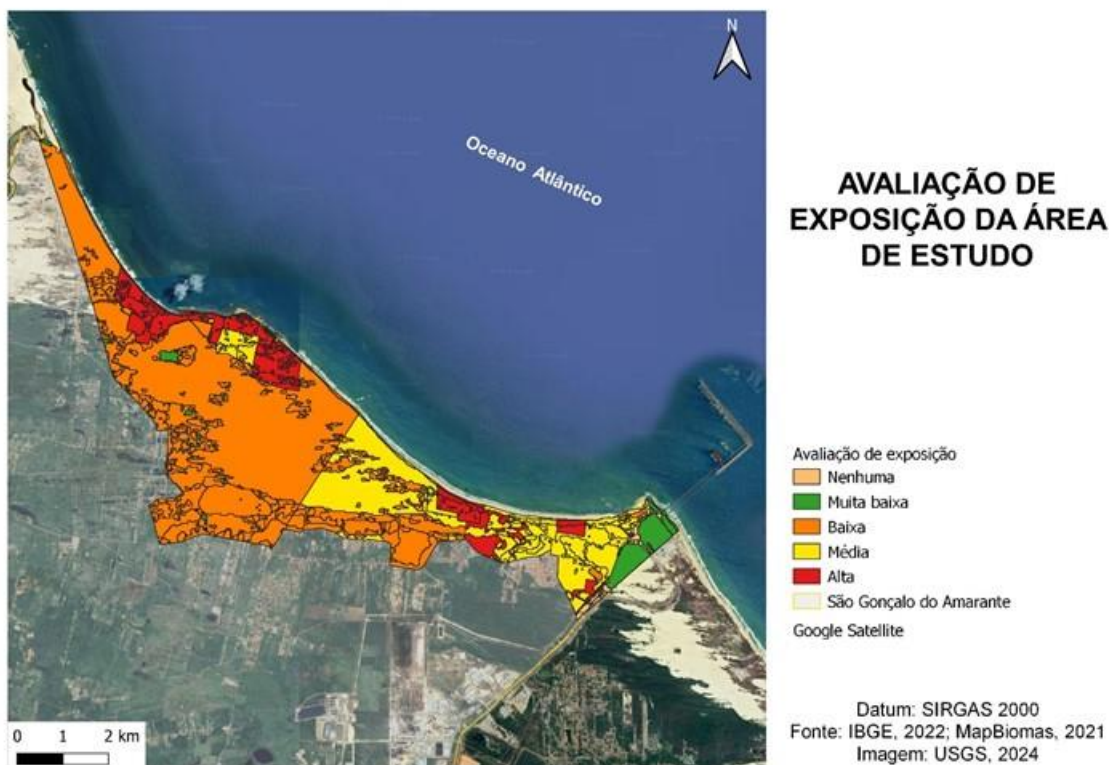


Figura 8: Avaliação de exposição da área de estudo

Por outro lado, áreas com baixa densidade populacional, cobertura vegetal densa e presença mínima de infraestrutura podem receber valores mais baixos (por exemplo, 1), indicando uma menor exposição aos mesmos riscos, com coloração em verde no mapa. Essa escala numérica nos permite diferenciar entre áreas de alta, média e baixa vulnerabilidade, facilitando a priorização de ações de gestão de riscos e adaptação. A classe nenhuma corresponde às áreas que tiveram valores atribuídos inferiores a 1, como áreas com ausência de habitantes, com ausência de domicílios particulares e de domicílios coletivos.

O avanço e a expansão de São Gonçalo do Amarante desde a inauguração do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) em 2002 são notáveis, representando uma fase crucial para o município. O CIPP, com seus 13.337 hectares, abrange áreas de São Gonçalo do Amarante e Caucaia, contribuindo de forma significativa para suas economias locais. O impacto desse complexo industrial foi tão marcante que se tornou o ponto central do desenvolvimento econômico não só dessas localidades, mas também da região metropolitana de Fortaleza e do estado do Ceará como um todo (Coelho; Queiroga; Reis, 2022).

O rápido crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) de São Gonçalo do Amarante, aumentando em 1762% entre 2000 e 2010, evidencia claramente o impacto positivo do CIPP (Coelho; Queiroga; Reis, 2022). Esse crescimento econômico não apenas trouxe prosperidade para o município, mas também o posicionou como detentor do segundo maior PIB per capita da região metropolitana de Fortaleza.

O efeito do crescimento econômico se manifesta nos processos de expansão urbana de São Gonçalo do Amarante. Os loteamentos residenciais são estrategicamente planejados em torno do CIPP, valorizando a proximidade com as atividades industriais em ascensão. Além disso, a proximidade com o distrito de Taíba, famoso por seus atrativos turísticos, também influencia na escolha de locais para moradia, impulsionando ainda mais o desenvolvimento urbano (Coelho; Queiroga; Reis, 2022).

Resumindo, o CIPP não apenas impulsionou o crescimento econômico de São Gonçalo do Amarante, mas também contribuiu para moldar sua paisagem urbana e facilitar uma integração mais ampla com as áreas circundantes, consolidando sua posição como um importante

centro de atividade industrial e econômica na região.

O complexo foi implantado em 2002 com o objetivo de diversificar o parque industrial do Ceará e promover sua inserção na economia global. Com uma área total de 13.337 hectares, o CIPP abrange atividades industriais variadas, como siderurgia, metalurgia, química, entre outras, além de um porto que facilita a movimentação de cargas e a integração com o mercado internacional.

A análise minuciosa desses dados proporcionará uma compreensão mais profunda dos padrões de uso da terra e dos obstáculos que a infraestrutura enfrenta na região em análise. Essas informações desempenharão um papel crucial na identificação de áreas prioritárias para a preservação ambiental, o planejamento urbano sustentável e a gestão dos riscos naturais e humanos.

Em síntese, a combinação de diversos indicadores nos permite obter uma visão abrangente e completa da paisagem e dos desafios enfrentados na região em questão.

Índice Costeiro

Para concluir a “Etapa 1”, aplicou-se o Índice Costeiro (IC) como uma medida integrada de risco, combinando os fatores de inundação e exposição. Embora não haja uma abordagem padronizada para calcular esse índice, optamos por uma metodologia simplificada que permite uma rápida comparação entre os setores costeiros. Os resultados do IC forneceram insights sobre os pontos de vulnerabilidade ao longo da costa, contribuindo para identificação do *hospots* e uma melhor compreensão dos desafios enfrentados pela região.

Ou seja, ao cruzar todas as variáveis de avaliação de exposição, como dados demográficos, uso e cobertura do solo com os dados do mapa de inundação, pode-se identificar se há áreas de maior prioridade para intervenções de mitigação de riscos e adaptação às mudanças climáticas. Ou seja, pode-se identificar se há áreas com uma alta combinação de exposição a riscos costeiros e alta densidade populacional, associado a áreas de maior erosão indicando a necessidade de medidas urgentes de proteção e planejamento urbano resiliente.

No caso da porção costeira de São Gonçalo do Amarante ao aplicar-se a metodologia revelou resultados surpreendentemente baixos, com valores consistentemente inferiores a 2, indicando uma classificação muito baixa. Esses

resultados refletem uma série de fatores específicos da região que contribuem para uma menor exposição aos riscos costeiros.

A atividade humana e o desenvolvimento urbano são fatores cruciais a serem considerados. Embora algumas áreas costeiras do município possuam alta densidade populacional, é curioso notar que a região mais afetada pela erosão é menos povoada e possui uma menor concentração de infraestrutura crítica, como indústrias ou áreas residenciais densamente construídas. Essa dinâmica contribui para uma classificação de risco costeiro mais baixa.

Além disso, de acordo com Meulen *et al.*, (2022), a presença de ecossistemas costeiros saudáveis, como manguezais, florestas de restinga e vegetação de dunas, desempenha um papel fundamental na proteção contra a erosão e a inundação. Esses ecossistemas atuam como barreiras naturais, absorvendo a energia das ondas e estabilizando o solo, reduzindo os impactos dos eventos costeiros extremos.

Apesar da atual classificação do Índice Costeiro refletir condições favoráveis, é essencial considerar o potencial impacto das mudanças climáticas e da variabilidade ambiental no futuro. O aumento do nível do mar, a intensificação de eventos climáticos extremos e outras mudanças ambientais podem alterar os padrões de erosão e inundação, exigindo uma adaptação contínua e um planejamento adequado para garantir a resiliência costeira a longo prazo.

Essa conclusão é reforçada pela literatura que alerta para a necessidade de um monitoramento contínuo das condições costeiras, dado que os efeitos das mudanças climáticas podem alterar rapidamente esse cenário (MORTENSEN & WARD, 2023).

4.2 Etapa 2

Assim, com base no que foi discutido até agora, é possível inferir que a ausência da “Etapa 2” pode ser justificada pelos resultados obtidos na “Etapa 1”. Na “Etapa 1”, foi realizada uma análise abrangente da dinâmica costeira e dos riscos de inundação na região de São Gonçalo do Amarante, utilizando uma variedade de indicadores e métodos de avaliação. Os resultados dessa análise indicaram que a região apresenta uma baixa classificação de risco costeiro, devido a uma série de fatores.

Dessa forma, não há necessidade imediata de avançar para a “Etapa 2”. A “Etapa 2” é projetada para aprimorar a avaliação de risco regional, aumentando a resolução na avaliação de

perigos e selecionando áreas prioritárias para intervenção e gerenciamento de riscos. No entanto, se a análise da Etapa 1 indica que a região apresenta baixos riscos costeiros e não há áreas de alta vulnerabilidade identificadas, pode-se concluir que não há necessidade de investir recursos nesse momento nessa atividade específica. Portanto, a ausência da "Etapa 2" pode ser justificada pela conclusão de que a região não requer uma análise mais aprofundada no momento, com base nos resultados obtidos na "Etapa 1".

No entanto, como argumentam Birkmann *et al.*, (2022), faz-se necessário um monitoramento regular e a atualização das avaliações de risco são fundamentais para garantir a resiliência das comunidades costeiras diante de um futuro incerto.

Conclusões

A metodologia adotada para avaliação de riscos costeiros em São Gonçalo do Amarante é notavelmente simples e eficaz, demonstrando sua capacidade de ser facilmente empregada em outras regiões costeiras. Pois, além de sua eficácia na produção de resultados robustos, a simplicidade e facilidade de emprego dessa metodologia a tornam uma ferramenta valiosa para avaliação de riscos costeiros em diversas localidades, proporcionando uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação.

Este estudo buscou analisar a dinâmica costeira e os riscos de inundação na região de São Gonçalo do Amarante, utilizando uma combinação de dados de imagens de satélite, análises geomorfológicas e indicadores socioeconômicos. Os resultados revelaram uma complexa interação entre processos naturais e antropogênicos, evidenciando variações significativas nas taxas de erosão e acreção ao longo da costa, com predominância de áreas de estabilidade e baixo risco de erosão alta.

A utilização do Digital Shoreline Analysis System (DSAS) permitiu um mapeamento detalhado das mudanças na linha de costa, essencial para a identificação de áreas vulneráveis. Embora tenha sido observada uma concentração de erosão na porção oeste, especialmente na foz do Rio Anil, a ausência de erosão alta em outras áreas sublinha a importância de um monitoramento contínuo e de uma gestão proativa.

Além disso, a avaliação de exposição revelou a influência do crescimento urbano e da infraestrutura na vulnerabilidade costeira. A análise demográfica, combinada com dados sobre

uso do solo, demonstrou que as áreas com alta densidade populacional e infraestrutura crítica estão mais expostas aos riscos, enquanto regiões com ecossistemas saudáveis, como manguezais, oferecem uma proteção natural contra a erosão e a inundação.

O Índice Costeiro (IC) calculado indicou uma classificação geral de baixo risco para a região, refletindo a combinação de fatores que atenuam a vulnerabilidade, o que justifica a não necessidade imediata de avançar para a "Etapa 2", ou seja, ao demonstrar uma baixa classificação de risco costeiro na região, respaldada por uma análise detalhada que empregou uma variedade de indicadores e métodos, a necessidade imediata de avançar para a "Etapa 2" é questionada. Essa conclusão reforça a importância de uma abordagem criteriosa na gestão de recursos e priorização de atividades, especialmente em contextos onde os recursos podem ser escassos.

É importante notar que, embora a inclusão de indicadores socioeconômicos, como renda média nominal dos responsáveis pelo domicílio no setor censitário, índice de pobreza, índice de escolaridade relativa dos responsáveis, taxa de analfabetismo, vulnerabilidade etária no setor, vulnerabilidade relativa das construções, seja fundamental para uma análise mais abrangente da vulnerabilidade das comunidades, esses dados do IBGE ainda não estavam disponíveis devido à recente realização do censo de 2022. A ausência dessas informações limita a capacidade de uma avaliação mais completa e detalhada, enfatizando a necessidade de um monitoramento contínuo e atualização dos dados para futuras investigações. Pois, esses fatores são cruciais, conforme apontado por Wisner *et al.*, (2004), que evidenciam por exemplo que famílias de baixa renda residem em habitações menos seguras e possuem menos recursos para se recuperar de desastres.

Em suma, os resultados deste estudo não apenas fornecem uma base sólida para a compreensão dos riscos costeiros em São Gonçalo do Amarante, mas também destacam a necessidade de um planejamento urbano sustentável e de ações integradas para promover a resiliência das comunidades costeiras frente às mudanças ambientais futuras. A continuidade do monitoramento e a implementação de medidas proativas são essenciais para garantir a segurança e o desenvolvimento sustentável da região.

Referências

Abijith, D.; Saravanan, S.; Sundar, P. K. S. (2023). Coastal vulnerability assessment for the coast

- of Tamil Nadu, India - a geospatial approach. *Environ Sci Pollut Res* 30, 75610–75628. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27686-8>
- Anfuso, G.; Postacchini, M.; Di Luccio, D.; Benassai, G. (2021). Coastal Sensitivity/Vulnerability Characterization and Adaptation Strategies. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 71, 1-29. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9010072>
- Angeli S.; D'andrea M.; Cazzola G.; Rebora N. (2017). Coastal Risk Assessment Framework: comparison of fluvial and marine inundation impacts in Bocca di Magra, Italy. *Coastal Engineering*, 134, 229-240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.09.011>
- Areia, N. P.; Tavares, A. O.; Costa, P. J. M. (2023). Public perception and preferences for coastal risk management: evidence from a convergent parallel mixed-methods study. *Science Of The Total Environment*, 882. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163440>.
- Armaroli C & Duo E. (2017). Validation of the Coastal storm Risk Assessment Framework along the Emilia-Romagna coast. *Coastal Engineering*, 134, 159-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.014>
- Birkmann, J.; Jamshed, A.; Mcmillan, J. M.; Feldmeyer, D.; Totin, E.; Solecki, W.; Ibrahim, Z. Z.; Roberts, D.; Kerr, R. B.; Poertner, H. (2022) Understanding Human Vulnerability To Climate Change: A Global Perspective On Index Validation For Adaptation Planning. *Science Of The Total Environment*, 803, 150065. Doi: [Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Scitotenv.2021.150065](http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Scitotenv.2021.150065).
- Brasil. Ministério da Integração Nacional. (2017). *Gestão de Riscos: Noções Básicas em Proteção e Defesa Civil e em Gestão de Riscos*. (Ed. 1, pp. 95). Brasília: Ministério da Integração Nacional, Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, Departamento de Minimização de Desastres
- Bruno, M.F.; Motta Zanin, G.; Barbanente, A.; Damiani, L. (2021). Understanding the Cognitive Components of Coastal Risk Assessment. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 780. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9070780>
- Boori, M. S.; Amaro, V. E. (2010). Land use change detection for environmental management: using multi-temporal, satellite data in Apodi Valley of northeastern Brazil. *Applied GIS International Journal*, (6), 1-15. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/31112/1/LandUseChange_AMARO_2010.pdf.
- Buitrago, N. R.; Neal, W. J.; Bonetti, J.; Anfuso, G.; Jonge, V. N. (2020). Vulnerability assessments as a tool for the coastal and marine hazards management: An overview. *Ocean & Coastal Management*, 189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105134>.
- Cardona, O. D.; Van Aalst, M. K.; Birkmann, J.; Fordham M.; McGregor, G.; Perez, R.; Pulwarty, R. S.; Schipper, E.L.F.; B. T. Sinh. (2012). Determinants of risk: exposure and vulnerability. In: Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation . A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* (pp. 65-108). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>
- Ceará. Superintendência Estadual do Meio Ambiente. (2016). *Reestruturação e atualização do mapeamento do projeto Zoneamento Ecológico-Econômico do Ceará – zona costeira e unidades de conservação costeiras - Relatório Final de Mapeamento de Uso e Cobertura do Solo* (pp.475). Fortaleza, CE: SEMACE.
- Coelho, L. L.; Queiroga, E. F.; Reis, S. M. (2022). Processos de expansão urbana e as transformações da paisagem no vetor oeste da região metropolitana de Fortaleza. *Revista de Arquitetura e Urbanismo*, 225101 (19), 1-20. DOI: <https://doi.org/10.24220/2318-0919v19e2022a5101>
- CRED. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2018). *EM-DAT Glossary*. Disponível em: <https://www.emdat.be/Glossary>.
- Cristie E.; Spencer T.; Owen D.; Mcivor A.; Moller I.; Viavattene C. (2018). Regional coastal flood risk assessment for a tidally dominant, natural coastal setting: North Norfolk, southern North Sea, *Coastal Engineering*, 134, 177-190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.05.003>

- Crossland, C. J.; Baird, D.; Ducrottoy, J-P. A.; Lindeboom H. J. (2005). The Coastal Zone - a Domain of Global Interactions. In: Crossland, C.J.; Kremer, H.H.; Lindeboom, H.J.; Marshall Crossland, J.I.; Le Tissier, M. D. A. (Eds). Coastal Fluxes in the Anthropocene, 1–37. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-27851-6_1
- Ferreira, O.; Viavattene, C.; Jimenez, J.; Bole, A.; Plomaritis, T.; Costas, S.; Smets, S. (2016). CRAF Phase 1, a framework to identify coastal hotspots to storm impacts. In 3rd European Conference on Flood Risk Management (FLOODrisk 2016). (pp. 9). Lyon, France. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20160711008>.
- Ferreira, J. C.; Cardona, F. S.; Santos, C. J.; Tenedório, J. A. (2021) Hazards, Vulnerability, and Risk Analysis on Wave Overtopping and Coastal Flooding in Low-Lying Coastal Areas: the case of costa da caparica, portugal. Water, 13, 2. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/w13020237>.
- Gornitz, V. M.; Daniels, R. C.; White, T. W.; Birdwell, K. R. (1994) The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level rise in the US Southeast. Journal of Coastal Research, 12, 327–338. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/25735608>
- Hinkel, J.; Klein, R.J. (2009). Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. Global Environmental Change, 19 (3), 384–395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.03.002>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2012). Censo Brasileiro de 2010. Rio de Janeiro. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2019). Área urbanizada. Diretoria de Geociências, Coordenação de Meio Ambiente, Áreas Urbanizadas do Brasil, Rio de Janeiro. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024) Censo Brasileiro de 2022. Rio de Janeiro. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023) Base cartográfica contínua do Brasil, escala 1:250 000 - BC250. Versão 2023. Rio de Janeiro. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>
- IBGE. Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. (2024). Características dos domicílios. Rio de Janeiro, pp. 53. Disponível em https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3106/cd_2022_domicilios.pdf
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Pachauri, R. K. & Meyer, L. A. (Eds.). Climate Change 2014: Synthesis Report. (pp. 151). Geneva, Switzerland.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Summary for policymakers. In: Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds. Pörtner H.O.; Roberts D. C.; Poloczanska E. S.; Mintenbeck K., Tignor M.; Alegria A.; Craig M.; Langsdorf S.; Löschke S.; Möller V.; Okem A. DOI: 10.1017/9781009325844.001
- Jimenez J.A.; Ballesteros C.; Sanuy M.; Valdemoro H. (2017). Storm-induced risks along the coast northwards of Barcelona (NW Mediterranean), Coastal Engineering, 134, 148-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.012>
- Lopes, D.; Duarte, C. R.; Silva, M. T.; Freires, E. V. (2023) Índice de vulnerabilidade costeira do município de São Gonçalo do Amarante (Ceará) frente a elevação do nível do mar. Journal Of Hyperspectral Remote Sensing, 13(2), 176-186. DOI: <http://dx.doi.org/10.29150/jhrs.v13.2.p176-186>.
- Meulen, F. V. D.; Ijff, S.; Van Zetten, R. (2022). Nature-based solutions for coastal adaptation management, concepts and scope, an overview. Nordic Journal Of Botany, 2023, 1, 1-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/njb.03290>.
- Mortensen, E.; Ward, P. (2023). Adapting with future increases to coastal and riverine flood risk in deltas and estuaries: a global perspective. In: EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria. DOI: 1104

- <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-14131>.
- Neumann, B.; Vafeidis, A.T.; Zimmermann, J.; Nicholls, R.J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding-a global assessment. *PLOS ONE*, 10(6). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>
- Nicholls R. J.; Wong, P. P.; Burkett, V.; Woodroffe C. D.; Hay, J. (2008). Climate change and coastal vulnerability assessment: scenarios for integrated assessment. *Sustainability Science*, 3(1), 89–102. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11625-008-0050-4>
- Patterson M, Hardy D. (2008) Economic Drivers of Change and their Oceanic-Coastal Ecological Impacts. In: Patterson M, Glavovic BC (Eds.). *Ecological economics of the oceans and coasts*. Edward Elgar Publishing, (pp. 187–215). DOI: <https://doi.org/10.4337/9781782542483.00017>
- Pazini, K. C.; Bonetti, J.; Silva, P. G.; Klein, A. H. F. (2022) Spotting areas critical to storm waves and surge impacts on coasts with data scarcity: a case study in Santa Catarina, Brazil. *Natural Hazards*, 112, 3, 2493-2521. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-022-05275-1>.
- SFREDDO, G. A.; SILVA, T. S.; BARBOZA, E. G. (2023). Assessment of local coastal vulnerability based on a global model: a case study in Jaguaruna, Southern Brazil. *Regional Studies In Marine Science*, 61. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102824>
- PROJETO MAPBIOMAS. (2021). *Coleção MapBiomias, 7; Série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil*). Disponível em <<http://mapbiomas.org>>
- Van Dongeren, A.; Ciavola, P.; Viavattene, C.; De Kleermaeker, S.; Martinez, G.; Ferreira, O.; Costa C.; McCall, R. (2014). RISC-KIT: Resilience-Increasing Strategies for Coasts–toolkit. In: *Proceedings 13th International Coastal Symposium*, (pp. 366–371), Durban, South Africa. DOI: <https://doi.org/10.2112/SI70-062.1>
- Van Dongeren, A. P.; Ciavola, P.; Martinez, G.; Viavattene, C.; Bogaard, T.; Ferreira, O.; Higgins, R.; McCall, R. (2018). Introduction to RISC-KIT: Resilience-increasing strategies for coasts. *Coastal Engineering*, 134, 2-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.10.007>
- Viavattene, C.; Jimenez, J.A.; Ferreira, O.; Priest, S.; Owen, D.; McCall, R. (2017). Selecting coastal hotspots to storm impacts at the regional scale: the Coastal Risk Assessment Framework. *Coastal Engineering*, 134, 33–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.09.002>
- Thieler, E.R.; Hammar-Klose, E.S. (2000). *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise; Preliminary Results for the US Pacific Coast; Technical Report; U.S. Geological Survey: Woods Hole, MA, USA.*
- Wisner B., Blaikie P., Cannon T., Davis I. (2004). *At risk: natural hazards, People's Vulnerability and Disasters*. (Vol. 1, 1.ed., pp. 304). London: Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203974575>