



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Mapeamento e análise de Vulnerabilidade ambiental sazonal na Ilha de São Luís, Maranhão

Stephanie Jael Negrão de Freitas Ruiz¹, Giordani Rafael Conceição Sodré², Breno Ruiz de Lima Verde da Silva³, Francisca Helena Muniz⁴

¹Doutoranda em Ciências Agrárias, Universidade Estadual do Maranhão, Campus São Luís, N.º 1000, 65.055-310 – São Luís – MA- Brasil. negro.stephanie@gmail.com <http://orcid.org/0000-0001-9917-5342> (autor correspondente). ²Doutor e Mestre em Ciências Ambientais, UFPA Campus Belém, N.º 01- 66075-110 - PA, Brasil. giordani@ufpa.br, <http://orcid.org/0000-0002-8918-973X>. ³Geólogo da empresa Petróleo Brasileiro S/A-Petrobrás, bacharel em Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, campus Natal, s/n, 59078-900 – Natal – RN – Brasil, stephfreitaseng@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-9669-6494>. ⁴ Doutora e Mestre em Biologia Vegetal pela UNESP-Rio Claro, Bacharel e licenciada em Ciências Biológicas pela UFMA, Professora adjunto IV da Universidade Estadual do Maranhão, campus São Luís. N.º 1000, 65.055-310 – São Luís – MA- Brasil. franciscamuniz@professor.uema.br, <https://orcid.org/0000-0001-8511-7424>

Artigo recebido em 04/04/2024 em e aceito em 10/09/2024

RESUMO

A erosão do solo é um fenômeno natural que desempenha um papel na configuração da paisagem e é influenciado por diversos fatores, tais como clima, relevo, tipo de solo, cobertura vegetal, geomorfologia e inclinação do terreno. No entanto, sua intensificação ocorre devido à ação humana não planejada, conhecida como 'mudanças de uso da terra'. Neste estudo, o objetivo foi analisar a vulnerabilidade ambiental à erosão do solo na ilha de São Luís, considerando a interferência sazonal, utilizando um método baseado na álgebra de mapas. Os resultados revelaram a significativa influência do clima e dos manguezais na ilha, em quatro cenários distintos. As estações mais vulneráveis foram identificadas como verão e outono, associadas aos períodos mais chuvosos na Amazônia brasileira. Assim, a utilização de estações meteorológicas como ferramenta de monitoramento emergiu como um aspecto crucial neste estudo. Portanto, a implementação de uma rede de drenagem urbana adequada e adaptada ao cenário urbano, diretamente impactado pelo rápido crescimento populacional, é uma medida prioritária. Isso visa evitar que eventos de chuvas intensas transformem a região em ambientes propícios a desastres.

Palavras-chave: Erosão. Mudanças climáticas. Riscos.

Mapping and analysis of seasonal environmental vulnerability on São Luís Island, Maranhão

ABSTRACT

This Soil erosion is a natural phenomenon that plays a role in the configuration of the landscape and is influenced by several factors, such as climate, relief, soil type, vegetation cover, geomorphology and terrain slope. However, its intensification occurs due to unplanned human action, known as 'land use changes'. In this study, the objective was to analyze environmental vulnerability to soil erosion on the island of São Luís, considering seasonal interference, using a method based on map algebra. The results revealed the significant influence of climate and mangroves on the island, in four different scenarios. The most vulnerable seasons were identified as summer and autumn, associated with the rainiest periods in the Brazilian Amazon. Thus, the use of meteorological stations as a monitoring tool emerged as a crucial aspect in this study. Therefore, the implementation of an adequate urban drainage network adapted to the urban scenario, directly impacted by rapid population growth, is a priority measure. This aims to prevent intense rain events from transforming the region into disaster-prone environments.

Key words: Erosion. Climate changes. Scratches.

Introdução

As mudanças de uso da terra nos grandes centros urbanos desencadearam e ainda desencadeiam mudanças ambientais significativas nas últimas décadas e fatores como a migração

rural - urbana, a transformação do uso e cobertura do solo, criação de assentamento urbanos, desmatamentos e invasões são somente alguns exemplos de atividades antrópicas marcantes na fragmentação espacial. A inexistência de planejamento, ordenamento e infraestrutura

territorial resultam em ocupações em áreas de risco, em ambientes sujeitos a eventos críticos como enchentes e inundações, deslizamentos de terra e um maior acometimento por doenças (Camello et al., 2009; Coutinho et al., 2017).

Diferentes formas de uso do solo os tornam vulneráveis e com a intensificação das atividades humanas, pode existir a remoção de partículas e transporte de material mineral pelas excessivas chuvas para as áreas mais baixas do terreno ocasionando a formação de erosão laminar, podendo acarretar sulcos, ravinas ou voçorocas (FioresE et al., 2021).

A erosão do solo é um fenômeno natural que atua na formação da paisagem e possui fatores que a condicionam, são esses: clima, relevo, solos, cobertura vegetal, geomorfologia, declividade do terreno. Entretanto, é acentuada com a ação antrópica não planejada, as chamadas “mudanças de uso da terra”. O processo de urbanização desenfreado dando origem a ocupações em lugares inadequados pela perspectiva geotécnica, além da precariedade dos sistemas de drenagem de águas pluviais maximiza a degradação, prejudicando em sua maioria a população menos favorecida economicamente. Ou seja, o ritmo acelerado do crescimento de um território, se não for bem planejado, o torna vulnerável (Rostam et al., 2010; Siwar et al., 2016).

No que tange aos fatores que expressam o grau de suscetibilidade à erosão a que um sistema ambiental está exposto; um destes indicadores reside na precipitação, a qual influencia no desgaste e transporte de material do solo e das rochas. No contexto de regiões costeiras do Estado do Maranhão, a capital São Luís, caracteriza-se por uma geografia diversificada propícia ao desenvolvimento e atuação de diversos sistemas atmosféricos, que contribuem para a heterogeneidade espacial e temporal da precipitação. Dessa forma, pesquisas que consideram a variabilidade da precipitação, enriquecem e subsidiam ações governamentais em tomadas de decisão quanto ao ordenamento do território (Cabral e Candido, 2019).

Na presente análise, destaca-se o conceito de vulnerabilidade ambiental, que se refere ao nível de impacto que um sistema sofre devido à sua exposição, representando o oposto de resiliência e capacidade de resistência. Isso porque, a resiliência é a capacidade de um sistema em resistir a eventos adversos, se adaptar, recuperar rapidamente de eventos adversos. Um sistema resiliente é capaz de minimizar danos e retornar ao seu estado original

ou se transformar em um estado melhor pós crise (Birkmann et al., 2014).

No que tange à centros urbanos que abrigam regiões costeiras, entende-se que são particularmente vulneráveis às alterações climáticas, uma vez que são diretamente influenciadas por processos oceânicos, atmosféricos e continentais (Mu et al., 2021). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) confirmou que as regiões costeiras são as áreas mais afetadas pelas alterações climáticas, se tivermos em conta consideração o aumento médio do nível dos oceanos e a intensidade dos eventos climáticos extremos.

A zona costeira brasileira apresenta grandes extensões territoriais ocupadas. São, 463 municípios cobrem os primeiros 100 km do litoral e abrangem mais de 17,4 milhões de domicílios ou aproximadamente 30% da população, o que corresponde a 50,7 milhões de habitantes (IBGE, 2019). Esses municípios e suas populações estão expostos aos riscos ambientais costeiros causados pelas mudanças climáticas no Brasil.

O litoral amazônico é uma região que abrange uma das maiores áreas de concentração humana. Isto compreende três regiões metropolitanas: Macapá (AP), Belém (PA) e São Luís (MA), e concentra aproximadamente 3 milhões de habitantes (IBGE, 2019). As regiões são caracterizadas por processo de urbanização rápido e desordenado, e leva a graves problemas socioambientais como ocupação territorial em áreas de risco, desmatamento, pesca predatória e contaminação de lençóis freáticos, rios e estuários (Santos et al., 2021).

Se tratando especificamente da ilha de São Luís, zona costeira que a qual registra eventos de chuva intensa que muitas vezes são precedidos por episódios de erosão. Os veículos midiáticos do Estado noticiam constantemente episódios de eventos adversos. Um dos exemplos é o caso do evento ocorrido na zona rural da ilha de São Luís, as margens da BR-135, na região entre a vila maranhão e o maracanã, onde foram formadas crateras no asfalto, ao ponto de colidir a estátua do antigo prefeito Luís Edivaldo de Holanda Júnior, além da ameaça de erodir edificações, sendo grave risco para a população (Rede ImirantE Maranhão, 2021; Serra et al., 2024).

No mês de fevereiro de 2022 com episódios de intensa precipitação, houve deslizamento de uma encosta no Bairro São Raimundo, em São Luís, gerando uma voçoroca que ameaçou inúmeras residências do bairro (Rede Imirante Maranhão, 2022).

No ano de 2020 fora noticiado que o calçadão que dá acesso a uma parte do Terminal Praia Grande, em São Luís, estava deteriorado por conta da força da maré, que ultrapassou o muro de contenção. A erosão também atingiu o gradeado instalado na parte traseira do terminal. Crateras de lixo são encontradas espalhadas pela parte onde a força da maré danificou a estrutura. Com a maré, o calçamento diminuiu, o que preocupa os comerciantes que trabalham na área, além de ameaçar as construções existentes no local (Rede Imirante Maranhão, 2020).

Em abril de 2024, durante um episódio de precipitação intensa uma voçoroca se formou às margens da rodovia MA-203, via de acesso ao município de Raposa, na região metropolitana de São Luís, e colocou em risco a vida de motoristas e pedestres. O período de chuvas mais pronunciadas amedronta a população de que a situação piore e cause problemas de mobilidade ou até uma tragédia (Rede Imirante Maranhão, 2024).

Um fato importante é que as questões ambientais estão entre as questões mais importantes que os tomadores de decisão enfrentam hoje. A dinâmica dos sistemas atmosféricos e hidrológicos da Terra mostram que todos os sistemas ambientais são dinâmica e espacialmente inter-relacionado. Os impactos ambientais em um determinado local geográfico geralmente afetam outros locais geográficos (Lourenço et al., 2022).

A Ilha de São Luís, ao mesmo tempo que representa o principal núcleo econômico do Estado do Maranhão, torna-se vulnerável por todo o histórico controverso exposto, onde a relação homem e natureza não está sendo tão bem-sucedida. Dessa forma, o desafio está em entender como indicadores ambientais e antrópicos interferem na vulnerabilidade ambiental do município.

Portanto, estudos de vulnerabilidade à erosão do solo tornam-se tão importantes pois quando realizado com dados refinados, representam a realidade da área de estudo e antecipam o conhecimento que pode direcionar a atividade humana para usos sustentáveis do solo (JACOBI et al., 2015).

No âmbito de estudos de suscetibilidade, o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) têm facilitado análises de suscetibilidade e as atividades relacionadas à caracterização, ao diagnóstico e ao planejamento ambiental e urbano, auxiliando em tarefas como a simulação do espaço geográfico e de seus processos naturais, na integração de informações espaciais (Ribeiro, 2016).

As alterações ocorridas devido ao rápido e desordenado crescimento urbano na Ilha de São Luís, acarretaram alterações do Sistema Climático Urbano (SCU) (Luna et al.; 2019), como a ZCIT (zona de convergência inter tropical), ventos alísios e sistema de brisas atmosféricas e os mecanismos oceano-atmosfera: EL Niño Oscilação Sul (ENOS); que além de tornar as regiões mais vulneráveis aos desastres naturais, impactam diretamente as condições de conforto ambiental, sustentabilidade e a dinâmica de vida (Santos et al.; 2024).

Tricart (1977) destaca que a organização ou reorganização do território requer um diagnóstico preliminar que proporcione o conhecimento das características, aptidões e, principalmente, limitações das áreas a serem utilizadas. Isso possibilita a escolha adequada do tipo de uso da terra e cobertura vegetal compatíveis com tais limitações.

Como exemplo de análise de vulnerabilidade ambiental, que utilizou e adaptou a metodologia proposta por Crepani et al.; (2001), foram aplicados estudos em diferentes locais no Estado do Maranhão, como a Lagoa do Bacuri (Rabelo, 2016), Bacia do Ribeirão do Rio Preto (Santos e Soares, 2020), bacia do Córrego Pequiá, Açailândia, Maranhão (Rizzo et al., 2022) Bacia Hidrográfica do Rio Buriticupu (Medeiros et al., 2023). Os resultados obtidos pelos autores revelaram áreas críticas aos processos erosivos e informações valiosas para o planejamento e gestão ambiental dessas unidades territoriais.

Sabendo que o estado do Maranhão possui geodiversidade complexa, por abranger três biomas distintos (amazônia, cerrado e caatinga), especificamente a Ilha de São Luís é um lócus de estudos científicos nas ciências atmosféricas, ambientais e agrárias; esta pesquisa visa obter dados valiosos a partir de técnicas de sensoriamento, para análise de vulnerabilidade ambiental e antropização; para assim propor ferramentas de gestão assertivas, que controlem e minimizem as problemáticas que incidem sobre o território e maximizando a potencialidade de desenvolvimento (Lima et al., 2022).

A hipótese desse estudo postula que através do cruzamento de fatores ecossistêmicos (solos, vegetação, precipitação, geomorfologia, declividade e geologia), a suscetibilidade ambiental aos processos erosivos contribui diretamente para a existência de recortes espaciais propícios à erosão. De forma que os processos erosivos podem estar contribuindo para o contínuo agravamento das condições ambientais e sociais, uma vez que a vulnerabilidade decorrente deste

efeito pode tornar as localidades mais suscetíveis a eventos adversos nos principais núcleos econômicos da Ilha.

Nesse contexto, este estudo objetiva analisar a vulnerabilidade ambiental da Ilha de São Luís, importante lócus amazônico de desenvolvimento, capital do Estado do Maranhão, com o uso da metodologia proposta por Crepani et.al, (2001) adaptada, sob a ótica das quatro estações meteorológicas: verão (dezembro, janeiro e fevereiro); outono (março, abril e maio); inverno (junho, julho e agosto) e primavera (setembro, outubro e novembro).

Isso porque, cenários climáticos e medições históricas apontam para o risco da variação de precipitação, o que constitui um agravante adicional ao ambiente urbano e à sua população, dados os potenciais impactos, na dinâmica social e ambientes naturais e construídos (Vommaro et al, 2020; Santos et al, 2021).

A gravidade dos impactos é relacionada ao fenômeno climático e à vulnerabilidade do sistema, o que se traduz em sua propensão a ser afetado negativamente (IPCC, 2014). Existe um consenso entre os cientistas de que a avaliação da vulnerabilidade dos sistemas socioecológicos aos processos erosivos podem contribuir para o planejamento de medidas eficazes estratégias de adaptação e redução de potenciais impactos do clima. As características de um sistema socioecológico podem ser agrupadas de acordo com sua exposição, sensibilidade e/ou capacidade adaptativa (Santos et al, 2021)

Desse modo, o clima na região amazônica é caracterizado pela presença de um vasto espectro de variações espaço-temporais na atividade convectiva, com altos índices pluviométricos, principalmente durante o verão e outono austral (mas é importante abordar as quatro estações, porque entre o período mais e seco e mais chuvoso há meses de transição sendo de extrema importância analisar a continuidade dos cenários situacionais e disponibilizar dados para subsidiar o planejamento e a gestão ambiental do território (Santos et.al, 2024).

Material e métodos

Caracterização da Área de Estudo

A Ilha de São Luís, situada no Estado do Maranhão, integra a região amazônica no norte do litoral brasileiro, que representa 35% do total do litoral do país (figura 1). Esse setor é caracterizado por um relevo suave, vasta planície costeira e uma

extensa plataforma continental adjacente (Szlafestein, 2012).

Há quatro municípios na Ilha do Maranhão: São Luís, São José do Ribamar, Raposa e Paço do Lumiar. A população humana de a ilha tem mais de um milhão, a maioria dos quais vive em São Luís, capital do Estado do Maranhão. As principais atividades econômicas da ilha são navegação, pesca, turismo e comércio em geral (Pereira et al., 2016).

A escala aplicada e área de estudo desta pesquisa, corresponde a ilha de São Luís inserida na bacia hidrográfica do Sistema Hidrográfico das Ilhas Maranhenses, situada ao centro norte do Maranhão, na região Amazônica (Medeiros et.al, 2023).

Mapeamento Geoambiental

A ilha de São Luís é um lócus complexo do ponto de vista geoambiental. Logo, compreendê-la sob a ótica de quatro cenários situacionais através estações meteorológicas: verão (dezembro, janeiro e fevereiro); outono (março, abril e maio); inverno (junho, julho e agosto) e primavera (setembro, outubro e novembro). Isso porque, clima na região amazônica é marcado por uma ampla variedade de variações espaço-temporais na atividade convectiva, com elevados índices pluviométricos, especialmente durante o verão e o outono no hemisfério sul.

É fundamental considerar as quatro estações, pois entre os períodos mais seco e mais chuvoso há meses de transição que são cruciais para a análise contínua dos cenários ambientais. Essa análise é essencial para fornecer dados que apoiem o planejamento e a gestão ambiental do território; de extrema valia para sanar e/ou minimizar seus problemas e propiciar informações que auxiliem na produção de um banco de dados efetivo ao ordenamento do território.

2.1.2 Adaptação metodológica.

A metodologia para a análise de vulnerabilidade ambiental à perda de solo é uma adaptação do método proposto por Crepani et al. (2001) para elaborar cartas de vulnerabilidade a partir do conceito da Ecodinâmica; assim, Tricart (1977) propôs a estratificação da paisagem em três tipos de unidades ecodinâmicas: 1) estáveis, com domínio da pedogênese sobre a morfogênese; 2) integradas, com interferência permanente da morfogênese e da pedogênese no mesmo espaço e 3) instáveis, com domínio da morfogênese sobre a pedogênese.

A partir da concepção de unidades ecodinâmicas, Ross (1994; 2012) propôs a análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados, estratificando em cinco classes a vulnerabilidade da paisagem: muito fraca, fraca, média, forte, e muito forte. em que a vulnerabilidade das unidades de paisagem é determinada por meio de uma escala dos valores de 1 a 3 estabelecidos previamente de acordo com os processos de morfogênese e pedogênese (tabela 1) de cada critério, ou seja, o grau de fragilidade apresentado, analisando individualmente os temas imprescindíveis Geologia, Geomorfologia, Solo, Vegetação e Clima. e posteriormente cruzar os dados através da técnica de álgebra de mapas no ambiente do software QGis 3.28.

Embasamento geológico

Conforme o Mapa Geológico da Ilha de São Luís, elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (2019) a geologia da Ilha assim se enquadra: Formação pós barreiras, depósitos aluvionares, depósitos de pântanos salinos, depósitos de mangues, Depósito de cordões litorâneos antigos, grupo itapecuru, Depósitos eólicos litorâneos e depósitos eólicos praias. A espacialização desses dados consta na Figura 3 e a pontuação conforme o grau de vulnerabilidade à erosão na tabela 2.

Tipos de solos que ocorrem na ilha

Segundo CPRM (2019), os tipos de solos que ocorrem na Ilha de São Luís são: Argissolo vermelho distrófico, gleissolo háplico distrófico, Argissolo vermelho amarelo distrófico, neossolo quartzenico órtico, Solo de mangue e tipo de terreno-dunas, argissolo vermelho distrófico, e neossolo quartzenico órtico (tabela 3). Pelo que consta na figura 3, predominam na bacia a associação argissolo vermelho distrófico + neossolo quartzenico órtico. Portanto, predominam na Ilha solos rasos a profundos, conforme mapeado.

Caracterização do relevo

A declividade, é caracterizada pela máxima inclinação (ângulo vertical) de um plano tangente a um ponto na superfície do terreno, em relação ao horizonte. Pode ser medido em graus ou porcentagem. O aspecto é o azimute (ângulo horizontal) da projeção da direção determinada pela declividade; corresponde a uma linha perpendicular às curvas de nível, medido em graus (Evans, 1972).

Os dados foram obtidos, através de Modelo Digital do terreno (MDT), Shuttle Radar

Topography Mission – SRTM baixado é o resultado de aquisição e interpolação de uma amostra de pontos para representar o terreno através do banco de dados da National Aeronautics and Space Administration (NASA), disponível no site: <https://search.asf.alaska.edu>.

A espacialização da declividade consta na Figura 3 e a quantificação na tabela 4. De acordo com os dados da Tabela 2, a declividade predominante na ilha vai de 0° a 2° de planície, sendo que, acima de 2° à 5° a inclinação é suavemente ondulada. Isso porque, ocorre em alguns fragmentos de forma espaçada inclinação de 5° à 10° e nas bordas da ilha surgem angulações maiores de 10° podendo chegar até 25°.

As características geomorfológicas da ilha são diversificadas e estão especializadas na figura 3, tabela 5, sendo predominante as feições que variam entre trabuleiros e tabuleiros dissecados; nas bordas predominam planícies fluvioamarinhas e alguns fragmentos de campos de dunas e depósitos tectogênicos. A quantificação completa consta na tabela 2 de acordo com o grau de suscetibilidade e foram mapeadas a partir da base cartográfica disponibilizada no site do Serviço Geológico do Brasil - CPRM na escala de mapeamento de 1:50.000, que disponibiliza arquivos no formato shapefile através do site <https://www.sgb.gov.br/>.

Caracterização climática

A espacialização do clima na ilha foi gerada a partir da base de dados globais CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station) com série temporal anual da precipitação 1991/2021 incorporando imagens de satélite de resolução de 0,05° com informações de estações pluviométricas para criar séries temporais de pluviometria em grade. Os dados para a ilha de São Luís foram processados no software QGis 3.28. Após realizar a quantificação da intensidade pluviométrica a partir da divisão da precipitação anual pelo número de meses que comportam o verão (dezembro, janeiro e fevereiro), outono (março, abril e maio), inverno (junho, julho e agosto), e primavera (setembro, outubro e novembro), sendo possível quantificar a média climatológica de cada estação que consta na tabela 6.

Vegetação e uso da terra

A base de cobertura vegetal e uso da terra foi extraída do projeto MapBiomias Brasil em escala 1:50.000, disponível no site <https://brasil.mapbiomas.org/>. Dessa forma, a ilha possui uma geodiversidade bastante complexa que

pode ser observada na tabela 7 com fragmentos de formações florestais fragmentadas, mangue nas bordas, uma grande e intensificada área urbana e pastagem.

Geoprocessamento de vulnerabilidade ambiental

A análise geológica, geomorfológica e pedológica se deu através da base cartográfica disponibilizada no site do Serviço Geológico do Brasil - CPRM na escala de mapeamento de 1:50.000, que disponibiliza arquivos no formato shapefile através do site <https://www.sgb.gov.br/>. A base cartográfica sobre cobertura vegetal foi extraída do projeto MapBiomas Brasil em escala 1:50.000, disponível no site <https://brasil.mapbiomas.org/>.

Ressalta-se que as variáveis estavam em formato vetorial, escala geográfica de detalhamento 1:50.000 e foram convertidas para raster, uma vez que há necessidade de todas as variáveis estarem nesse formato, para ocorrer a atribuição dos pesos. Desta forma, baseado na revisão bibliográfica realizada, atribuiu-se pesos para cada característica representada, de tal forma que os maiores valores foram concedidos aos atributos que indicaram maior grau de influência na vulnerabilidade.

Portanto neste método optou-se por não atribuir grau de importância a estas variáveis para que o resultado fosse o mais próximo da realidade sem qualquer intervenção externa, para que fosse possível observar qual seria o fator mais influente na vulnerabilidade à erosão.

Processamento de dados

Por fim, na geração dos mapas de vulnerabilidade ambiental, as cartografias foram agrupadas utilizando um Raster Calculator no QGIS, Desktop 3.28, no método chamado de Álgebra de Mapas, isto é, uma sobreposição cartográfica em que cada elemento não terá um peso sobre o outro, uma combinação pixel a pixel que resulta em uma cartografia de síntese. Os procedimentos podem ser de subtração, adição e multiplicação, nesse caso, utilizou-se a equação 1. A tabela 1 apresenta a definição de classes de vulnerabilidade de acordo com a relação morfogênese/pedogênese.

$$V = G + R + P + C + Ve + D \dots \dots \dots (1)$$

6

V= Vulnerabilidade à Perda de Solo

G= Critério Geologia

R= Critério Geomorfologia

P= Critério Pedologia

C= Critério Clima

Ve= Critério Vegetação

D= Critério Declividade

Como é possível observar na equação 1, não fora atribuído peso de relevância em uma variável específica em detrimento de outra. Isso porque, optou-se por simplesmente aguardar a resposta do software diante da álgebra e qual poderia ser o fator determinante na vulnerabilidade à perda de solo nas quatro estações meteorológicas. A figura 2 esquematiza de forma resumida a metodologia

Tabela 1: Determinação de estabilidade conforme às condições de vulnerabilidade ambiental.

Grau de vulnerabilidade	Valor	Relação entre morfogênese/pedogênese
Estável	1,0-1,3	Prevalece a Pedogênese
Medianamente estável	1,4-1,7	
Moderadamente vulnerável	1,8-2,2	Equilíbrio
Vulnerável	2,3-2,6	Prevalece a morfogênese
Muito vulnerável	2,7-3,0	

Fonte: Crepani et. al, (2001).

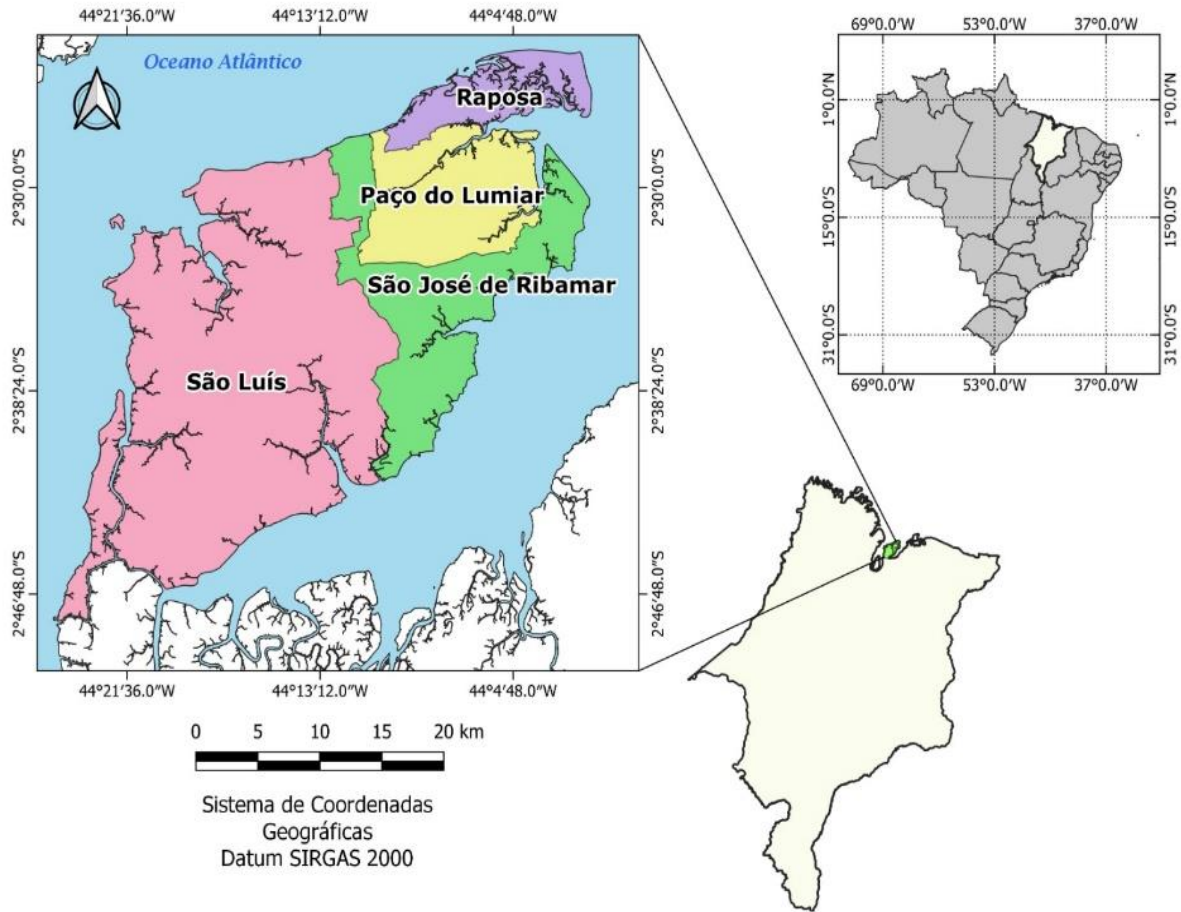


Figura 1 - Localização geográfica da Ilha de São Luís-Ma.

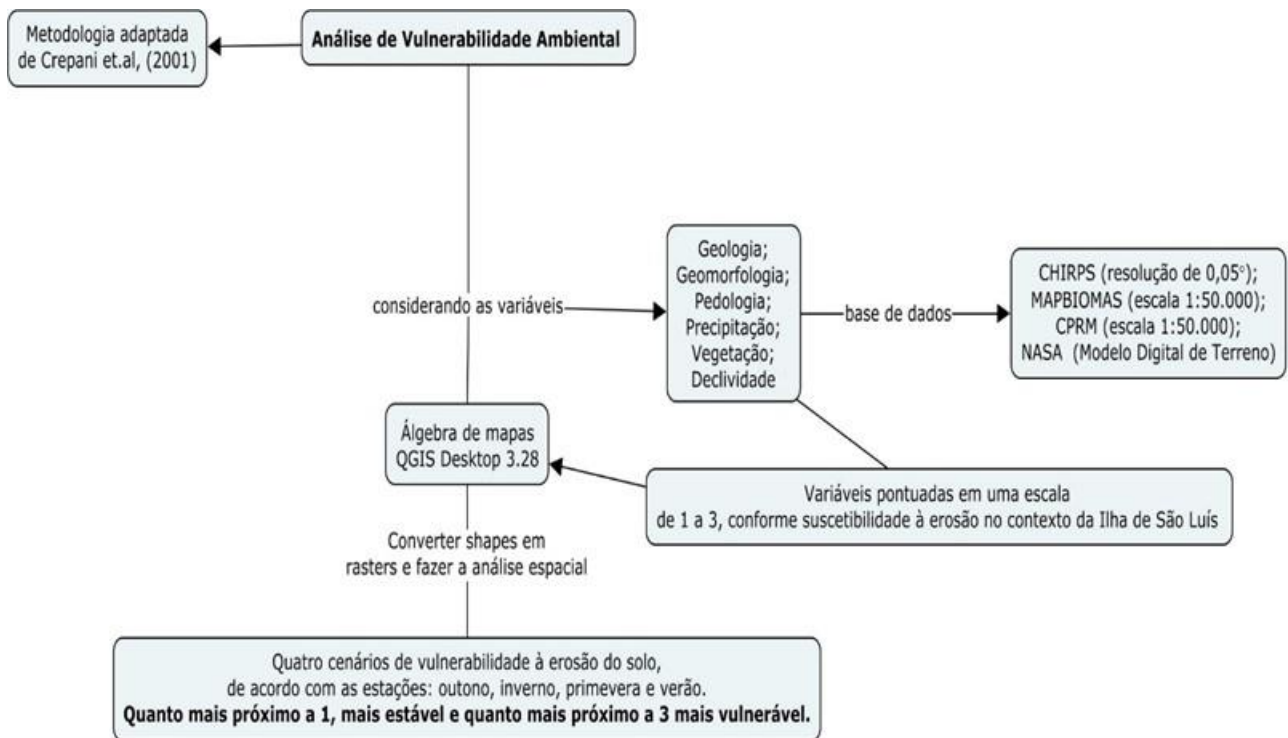


Figura 2 – Fluxograma metodológico de análise de vulnerabilidade ambiental à perda de solo.

Resultados

Geoformas mapeadas na Ilha

O mapeamento dos componentes físicos, climáticos e bióticos são essenciais para entender o nível de suscetibilidade da Ilha. No caso desta

pesquisa, a relação sistêmica se deu diante da geologia, relevo, solos, vegetação, declividade e clima uso e cobertura da terra que compõem a Ilha (tabelas 2, 3, 4, 5, 6 e figura 3).

Tabela 2 - Valoração das Unidades de Mapeamento Geológico da Ilha quanto à vulnerabilidade.

Classe geológica	Pesos	Crítérios
Formação pós barreiras, Depósito de pântanos salinos e Depósitos de mangues	2	O tempo obedecerá se é mais ou menos recente, logo, rochas mais recentes tendem a ser mais vulneráveis aos processos pedo e morfogenéticos. A estabilidade e resistência trata-se dos minerais e rochas e sua vulnerabilidade ao intemperismo.
Grupo Itapecuru	2,7	
Depósitos aluvionares, Depósito de cordões litorâneos antigos, Depósitos eólicos litorâneos e Depósitos litorâneos praias.	3,0	

Tabela 3 - Valoração das classes de solos da Ilha quanto à vulnerabilidade.

Classe de solos	Pesos	Crítérios
Argissolo vermelho distrófico e Argissolo vermelho amarelo distrófico	1,5	A porosidade corresponderá se um solo é mais ou menos permeável, valores mais elevados significam mais impermeável. A profundidade e maturidade vai corresponder ao fator formação "tempo", que se relaciona ao grau de estabilidade pedogenética, valores mais elevados significam rasos e pouco evoluídos. A textura discorre sobre agranulometria, arenosa, argilosa a siltosa, valores mais elevados vão ser siltosa (mais frágil).
Tipos de terreno - dunas	2,5	
Solo de mangue	2,8	
Gleissolo háplico distrófico, Neossolo quartzênico órtico e Neossolo quartzênico órtico típico	3,0	

Tabela 4 - Valoração das classes de declividade da Ilha quanto à vulnerabilidade.

Angulação	Pesos	Crítérios
Plano (0° a 2°)	1,0	Corresponde o quanto o relevo é íngreme ou aplainado dentro das classificações do SRTM.
Suave ondulado (2° a 5°)	1,4	
Ondulado (5° a 10°)	1,7	
Forte ondulado (10° a 25°)	2,8	

Tabela 5 - Valoração da precipitação da Ilha quanto à vulnerabilidade.

Precipitação		Pesos	Critérios
Primavera	50-75 mm/mês	1,1	O clima influencia diretamente no intemperismo. A principal causa da perda de solos é a ação pluviométrica agindo sobre o solo removendo-o pela erosão hídrica. Dessa forma, valores mais altos de intensidade tornam o território mais suscetível ao intemperismo.
	75-100 mm/mês	1,2	
	100-125 mm/mês	1,3	
Verão	>500 mm/mês	2,7	
Outono	1108-1128 mm/mês	3,0	
Inverno	270-300 mm/mês	2,0	
	300-320 mm/mês	2,2	
	320-340 mm/mês	2,4	

Tabela 6 - Valoração das classes de vegetação e uso da terra quanto à vulnerabilidade.

Classe de Vegetação e uso da terra	Pesos	Critérios
Formação florestal	1,0	Esse aspecto diz respeito a proteção ao solo isso, porque a menor ou maior proteção é dada pelo dossel vegetativo. Valores menores significam maior proteção e menor vulnerabilidade.
Formação savânica, mangue e formação campestre	1,5	
Pastagem	2,5	
Campo alagado/pantanosos, praia, duna, areal, área urbana e mineração	3,0	

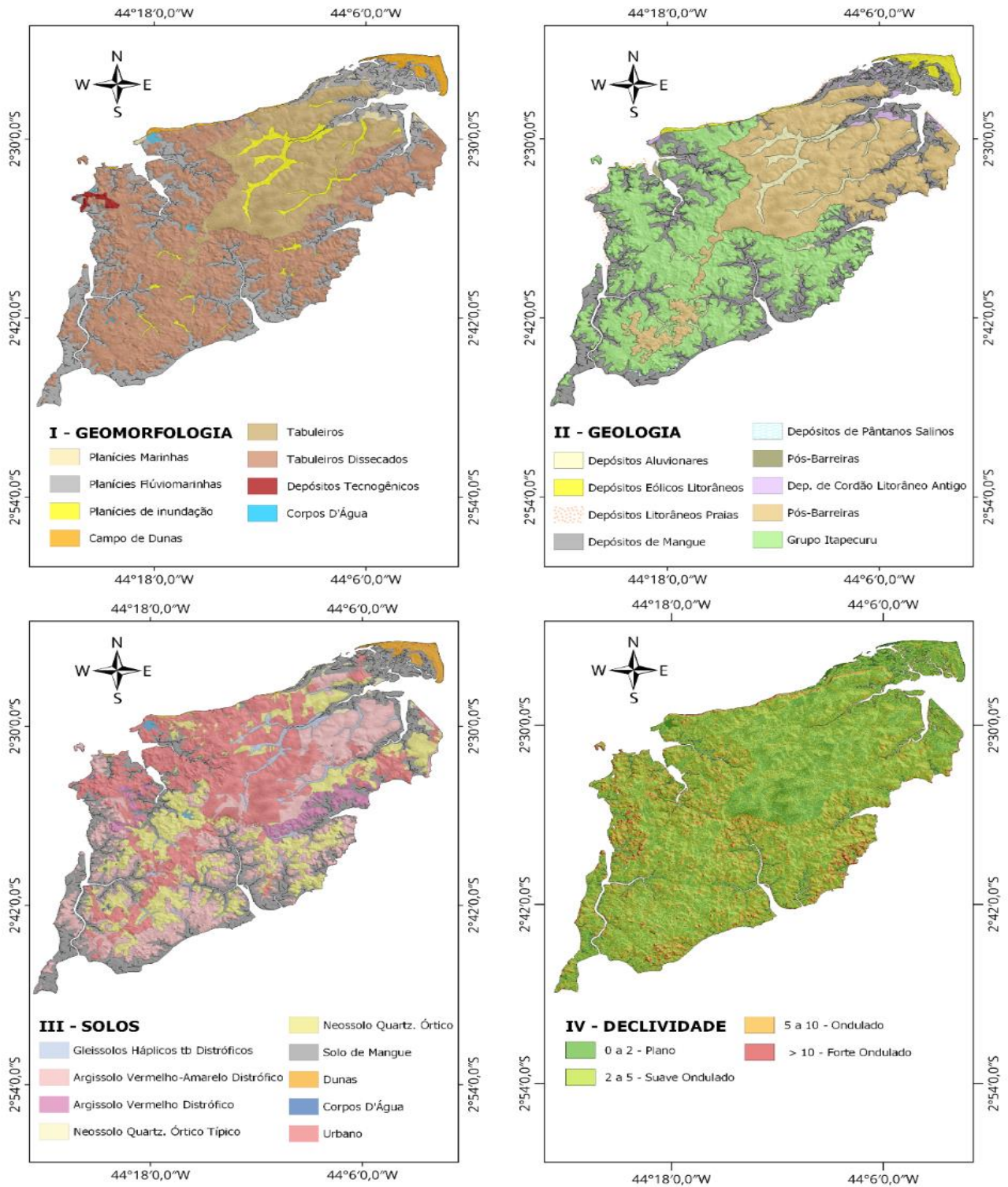


Figura 3 – Geofomas mapeadas na Ilha de São Luís-Ma.

A geologia da ilha de São Luís (figura 3) abrange diversos domínios, os quais destacam-se os mais vulneráveis à erosão, sendo referentes a era mesozoica o grupo Itapecuru, o qual ocorre praticamente em toda a área, perfazendo pelo menos 80% da Ilha de São Luís, sendo observado em cortes de estradas, morrotes, cavas de extração de areia e falésias. Compõe-se principalmente de

arenitos e pelitos intercalados com arenitos finos, bem selecionados, com coloração amarela, roxa, vermelha e esbranquiçada, bem laminados, às vezes ondulados. Já na era cenozoica e período quaternário os depósitos aluvionares e depósitos eólicos litorâneos apresentam características parecidas, com sedimentos esbranquiçados, quartzosos, finos, bem selecionados, presentes nas

dunas móveis e fixas ao longo da faixa litorânea (IMESC, 2020).

Os depósitos litorâneos praias ao longo de toda a faixa litorânea referem-se aos sedimentos e formações geológicas que se acumulam nas áreas costeiras. Já os depósitos e cordões litorâneos antigos, presente no conhecido bairro ponta d'areia, apresenta sedimentos arenosos e areno-argilosos costeiros. Dessa forma, atribuiu-se maior peso à estas formações isso, porque essas áreas costeiras são naturalmente vulneráveis, por serem altamente dinâmicas e devido à interação entre processos marinhos, fluviais e eólicos (Freitas et.al, 2020).

De forma geral, a geomorfologia da região (figura 3) que apresenta maior vulnerabilidade são os campos de dunas, dominantes nas praias do Meio, São Marcos, Calhau, Olho d'água, Araçagi, e Ilha do Cururupu. A formação de depósitos tectogenicos apresenta composição de aterros sobre corpos d'água e consta sobre a faixa da ponta da madeira. As planícies de inundação contêm áreas de várzea e se distribuem ao longo dos corpos d'água urbanos, a exemplo do rio paciência e riacho das pedrinhas. A planície de mangues, é uma geofoma associada a ecossistemas de manguezais, recorrente em grande parte da ilha envolvendo suas bordas.

Neste cenário, a declividade da ilha se apresenta diversa (figura 3), entretanto a maioria dos fragmentos vai de plano a suave ondulado. A região da linha costeira, Nova república Vila Maranhão e Guarapiranga apresentaram hipsometria mais pronunciada, oscilando entre plano, suave ondulado, ondulado e forte ondulado.

De acordo com o mapeamento de uso da terra (tabela 6), no MapBiomias, destaca-se que a ilha de São Luís vivenciou uma grande expansão imobiliária, entretanto ainda apresenta extensão de formações florestais, e notáveis mangues especialmente nas regiões de Paço do Lumiar, Raposa e São José de Ribamar, a ilha possui fragmentos de atividades de mineração na Vila Maranhão, a qual comporta o complexo portuário Itaqui.

Em relação aos solos (figura 3), dentre os mais suscetíveis estão os gleissolos háplicos tb distróficos, que compreendem solos mal drenados, relacionados às áreas mais deprimidas do terreno, com deficiência de oxigênio, dando ao solo uma coloração acinzentada a azulada, quase sempre implicando em presença de ferro. Pela proximidade do mar, é comum estarem associados a solos com excesso de sais (solos salinos). Tais solos possuem estruturas prismáticas, comumente colunares, com baixíssima permeabilidade.

Com relação ao neossolo quartzênico órtico, esses estão correlacionados principalmente aos tabuleiros da formação terciária do grupo barreiras, abrangendo grande parte da ilha e os solos indiscriminados de mangue com ocorrência restrita às áreas de baixadas, que é recorrente em diversos pontos do território.

No que tange ao clima, pesquisas sobre a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluviométrica em regiões litorâneas ainda são tímidas, principalmente quando os estudos são baseados em dados de sensoriamento remoto e analisados em distintas escala de tempo (Vantuan et al. 2023). De forma que, nesta análise, houve maior suscetibilidade nos meses que compõem o verão (dezembro, janeiro e fevereiro), e outono (março, abril e maio).

De modo que, a maior intensidade pluviométrica no verão e outono pode ser explicada através da adjacência da Zona de Convergência Inter Tropical (ZCIT), as Linhas de Instabilidades (LI), os Sistemas Convectivos de Mesoescala Circular (SCMC), e os mecanismos oceano-atmosfera: EL Niño Oscilação Sul (ENOS) e Modo Meridional do Atlântico Sul (MMA) como também o sistema de circulação de brisa, que compõem as conjunturas dinâmicas de grande e meso-escalas que possibilitam o desenvolvimento de Linhas de Instabilidade por toda extensão longitudinal da região norte e nordeste da Amazônia (Santos et al., 2018; Cavalcante et al., 2020).

Análise de vulnerabilidade ambiental

A avaliação da vulnerabilidade ambiental sob a ótica de observação do comportamento das quatro estações meteorológicas, resultou da interação entre os elementos físicos e antrópicos, fornecendo dados que permitem estabelecer limitações e oferecer sugestões de aprimoramento para o uso e cobertura da terra. Nesse sentido, as atividades humanas introduzem desequilíbrios de diferentes magnitudes no sistema ambiental, e essa vulnerabilidade possibilita a identificação da fragilidade dos ambientes naturais diante das intervenções antrópicas em cada estação do hemisfério sul (figura 4).

Na primavera (figura 4), o índice de vulnerabilidade foi de estável (alguns fragmentos) à medianamente vulnerável (maior extensão territorial). Isso, porque o índice pluviométrico de 50 a 125 mm/mês, de setembro, outubro e novembro possuem tendencia histórica na Amazonia oriental a serem mais secos. De forma que estas secas estão cada vez mais acentuadas devido ao fenômeno climático El Niño/Oscilação Sul (ENOS), somado a fatores atores locais e globais mais amplos como o desmatamento contribuem para impactar as condições climáticas

na região amazônica, através de secas mais pronunciadas e os impactos se traduzem em alterações na precipitação (SantoS et. al, 2023).

Durante o período de inverno (figura 5), todas as margens da Ilha se tornam vulneráveis. Isso ocorre devido à riqueza em remanescentes florestais, associados à Floresta Amazônica (ombrófila densa e aberta). No entanto, essas áreas revelam-se geoambientalmente instáveis, caracterizadas predominantemente por planícies fluviomarinhas, juntamente com depósitos e solos de mangue.

Além disso, o índice pluviométrico mais elevado em comparação com a primavera amplia a suscetibilidade nas margens, que, intrinsecamente, são naturalmente vulneráveis, dada sua natureza de linhas costeiras. Isso porque, a precipitação é a variável climática mais investigada no balanço hidrológico da região amazônica, por esse motivo conhecer a sua variabilidade é indispensável na gestão, no planejamento local, principalmente no desenvolvimento de atividades socioeconômicas em zonas tropicais como a Ilha de São Luís (Gomes et al., 2021).

Durante a estação de verão (figura 6), o índice de vulnerabilidade apresentou um aumento notável em comparação com as demais estações, abrangendo praticamente toda a periferia da ilha, incluindo os municípios de São José de Ribamar e Ilha do Cururupu. Especialmente, observou-se uma elevada vulnerabilidade em toda a extensão do município de Raposa, caracterizado por feições geológicas de manguezais, geomorfologia de planícies fluviomarinhas, maior índice pluviométrico e solos de mangue, criando um ambiente propício à erosão.

O cenário do outono (figura 7) manteve a mesma tendência observada no verão, com poucas alterações significativas. De acordo com o Índice de Vulnerabilidade, algumas regiões demonstraram uma elevada vulnerabilidade em ambas as estações, sendo a maioria dessas áreas situada ao longo das praias do Calhau e Olho d'água, no município de São Luís. A importância dessas áreas destaca a urgência da conservação para um ecossistema que apresenta características distintas em termos de composição e fatores abióticos, além de enfrentar diversas pressões antrópicas (ANA E CPRM, 2019).

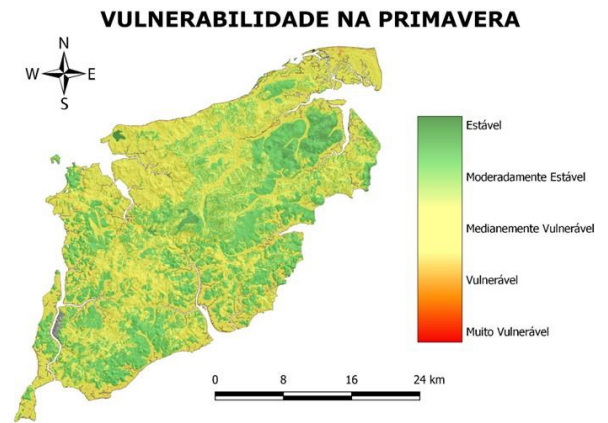


Figura 4 - Cenário da primavera gerado na avaliação de vulnerabilidade à perda de solo.

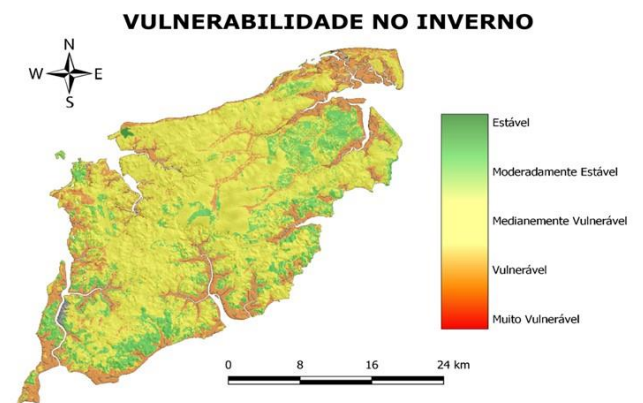


Figura 5 - Cenário do inverno gerado na avaliação de vulnerabilidade à perda de solo.

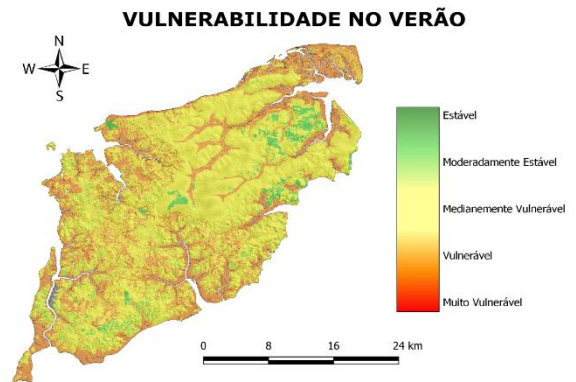


Figura 6 - Cenário do verão gerado na avaliação de vulnerabilidade à perda de solo.

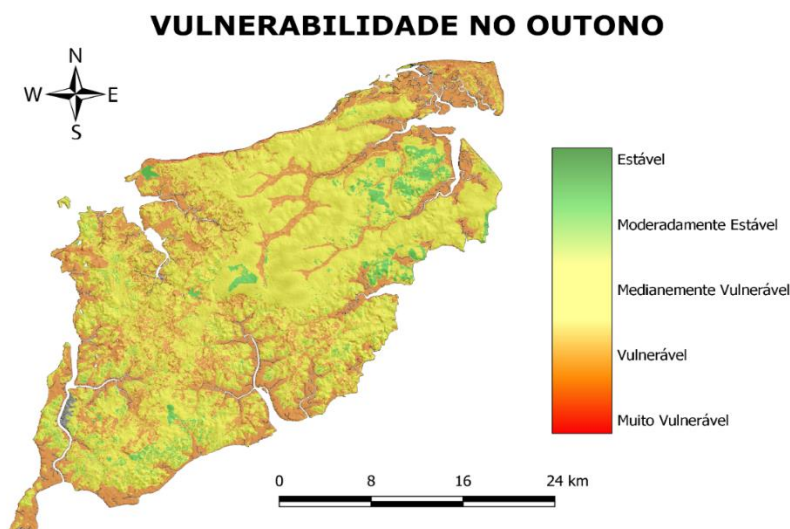


Figura 7 - Cenário do outono gerado na avaliação de vulnerabilidade à perda de solo.

Discussão

Correlação entre os cenários mapeados e a realidade na região metropolitana de São Luís.

Os cenários se mostraram variáveis de acordo com a variação pluviométrica, provando justamente que o clima influencia diretamente no intemperismo, por meio da precipitação pluviométrica e da temperatura de uma região. A principal causa da perda de solos é a ação pluviométrica agindo sobre o solo removendo-o pela erosão hídrica, além de promover o arraste de contaminantes (CREPANI et al., 2001).

A pesquisa conduzida por Negrão e Ranieri (2022) na região costeira de Marapanim-Pa revelou que a combinação da influência da atividade humana com os processos naturais tem desencadeado o fenômeno de erosão costeira. Notavelmente, as áreas mais densamente ocupadas e situadas em proximidade à linha costeira apresentaram níveis significativos de instabilidade local, aumentando os riscos e danos costeiros. Estas localidades são identificadas como áreas críticas, destacando sua importância especial no contexto do planejamento.

As zonas costeiras são sistemas dinâmicos e complexos que respondem a eventos climáticos extremos, influenciados pela população humana, pelas edificações e pelas atividades socioeconômicas que crescem mais rapidamente do que a média global (Nguyen, 2021). A sua morfologia influencia a sua colonização, tornando-a propícia ao desenvolvimento de comunidades e à expansão agrícola. A localização estratégica da costa, perto da água, facilita o acesso à pesca, ao

transporte de matérias-primas e ao comércio. A promoção das indústrias, dos transportes, do turismo e da pesca melhorou enormemente a economia das cidades costeiras, resultando num maior crescimento populacional e no desenvolvimento de infra-estruturas (ABIR, 2023).

A instabilidade frequente observadas neste estudo nas bordas da ilha, inclusive no inverno, (junho, julho e agosto) é ratificada pela pesquisa de Lima et.al, (2022) que descreve a construção de um Espigão (que dissipa a energia das ondas) costeiro na região da Ponta d'Areia que, de forma que a estrutura ajuda a conter a erosão e proteger a área urbana contra o avanço do mar. Ele desempenha um papel importante no controle e atenuação das marés e tempestades a fim de proteger a infraestrutura urbana.

Esse cenário é reforçado pelos eventos de erosão registrados em 2022, noticiados pelo veículo midiático Rede Imirante, o qual noticia episódios no estado do Maranhão mas especificamente na ilha de São Luís, como os casos das crateras na zona costeira e em grande parte da área portuária. Assim, a infraestrutura da orla de Raposa encontra-se completamente comprometida, demandando medidas corretivas urgentes.

A ocupação desordenada da área, impulsionada principalmente pelos empreendimentos industriais, intensificou o surgimento de vários problemas de cunho social, econômico e ambiental, com destaque para a capital maranhense, que se transformou em um polo atrativo de mão de obra. Grande parte da vegetação natural deu lugar a expansão imobiliária, ampliando cada vez mais as áreas

impermeabilizadas, acarretando a minimização da infiltração e o aumento das vazões escoadas superficialmente. São constantes as ocorrências de alagamentos em toda a região (ANA E CPRM, 2019).

Os resultados obtidos nos cenários analisados neste estudo estão correlacionados aos desfechos de outras investigações e eventos na ilha, conforme reportado pela mídia. Isso inclui o levantamento presencial conduzido pelo CPRM em 2019, em colaboração com órgãos públicos dos quatro municípios da ilha, que identificou mais de 90 locais propensos a frequentes alagamentos. Em fevereiro de 2022, durante períodos de intensas chuvas, ocorreu um deslizamento de encosta no Bairro São Raimundo, em São Luís, resultando na formação de uma voçoroca que representou uma ameaça significativa para diversas residências do bairro (Rede Imirante Maranhão, 2022).

Em 2020, foi divulgado que o calçadão que conduz a uma seção do Terminal Praia Grande, em São Luís, encontrava-se em estado de deterioração devido à intensidade da maré, que transbordou o muro de contenção. A erosão afetou também o gradil na parte posterior do terminal, e crateras de resíduos foram dispersas na área danificada pela força da maré. O pavimento diminuiu com a influência das marés, causando apreensão entre os comerciantes locais e representando uma ameaça às estruturas existentes na região (Rede Imirante Maranhão, 2020).

Em 2024 houve outro episódio de voçoroca às margens da rodovia MA-203, via de acesso ao município de Raposa, ou seja, não ocorreu na zona costeira mas, é tão recorrente que surgem em diversos recortes espaciais inclusive no caso de uma rodovia, sendo de extremo risco (Rede Imirante Maranhão, 2024). Durante os meses de março, abril e maio, período do outono no hemisfério sul, a distribuição da chuva tende a ser mais pronunciada, bem como o outono apresentou 1108-1128 mm/mês.

Santos et. al, (2024) explica que, o clima na região amazônica é caracterizado pela presença de um vasto espectro de variações espaço-temporais na atividade convectiva, com altos índices pluviométricos, principalmente durante o verão e outono austral.

A pesquisa de Rizzo et.al, (2023) concluiu que, a perda de solo nos pontos mais críticos da bacia do córrego Pequiá- Maranhão se deve ao tipo de solo e manejo inadequado com altos índices pluviométricos especialmente nos meses de dezembro à abri, que corresponde ao verão e outono.

Os estudos de Cavalcanti et al. (2020) apresentam resultados similares de precipitação quando investigados os períodos do verão e outono austral para a região amazônica, incluindo região costeira, a partir de dados do CHIRPS. A precipitação regional é promovida pela interação de diversos sistemas meteorológicos e mecanismos oceano atmosfera que interagem em distintas escalas de tempo gerando a convecção local. A saber os principais sistemas precipitantes são: a Zona de Convergência Intertropical (IT), as Linhas de Instabilidades (LI), os Sistemas Convectivos de Mesoescala Circular (SCMC), e os mecanismos oceano-atmosfera: EL Niño Oscilação Sul (ENOS) e Modo Meridional do Atlântico Sul (MMA) (Blanco, 2021; Santos et al., 2024).

Diante dos cenários situacionais e das comprovações científicas de complexidade ambiental a ilha de São Luís, enquanto epicentro econômico fundamental para o Estado do Maranhão, encontra-se suscetível devido a seu histórico controverso, no qual a interação entre o homem e a natureza enfrenta desafios significativos, resultando em um cenário de desequilíbrio e vulnerabilidade. Diante desse contexto, o desafio reside na formulação de políticas de gestão preventiva e sistemas de alerta eficazes, visando contribuir efetivamente para a prevenção de riscos e desastres.

A crescente população e o desenvolvimento econômico nas costas estão a causar mudanças ambientais significativas, a procura de recursos e a exposição a perigos costeiros como a erosão, as inundações e a intrusão de salinidade. Assim, podem ser considerados sistemas naturalmente instáveis, cujo estado de equilíbrio dinâmico pode ser rapidamente alterado face às alterações climáticas. As alterações climáticas estão agravando estes desafios atuais, a exemplo de chuvas mais intensas e os seus potenciais implicações estão causando muita preocupação nas costas do mundo (Dada, Almar, E Morand, 2024).

Conclusão

Sugerir modificações na abordagem metodológica tradicional não representa uma novidade ou originalidade singular. No entanto, a concepção de empregar estações meteorológicas como um meio de observação do comportamento dos diversos elementos da paisagem emergindo como um aspecto crucial que se destacou neste estudo pois os dados de sensoriamento remoto são uma alternativa eficiente para estudos de variabilidade espaço-temporal da chuva em

extensas regiões, sanando as limitações escalares inerentes das estações meteorológicas de superfície.

Assim, este estudo teve como propósito analisar a correlação entre a prevalência de áreas vulneráveis aos processos erosivos na Ilha de São Luís, MA. A hipótese subjacente sustenta que a combinação de variáveis está diretamente associada à suscetibilidade aos processos erosivos, resultando na formação de áreas espacialmente propensas à erosão. Nesse sentido, os processos erosivos possivelmente desempenham um papel significativo no agravamento contínuo das condições ambientais e sociais. A vulnerabilidade decorrente desses processos pode aumentar a

suscetibilidade de localidades a eventos adversos nos principais centros econômicos e turísticos da ilha como Raposa, São José de Ribamar e na faixa litorânea.

É imprescindível a implantação de uma rede de drenagem urbana adequada e compatível com o cenário urbano, diretamente influenciado pelo abrupto crescimento populacional e em um contexto de vulnerabilidade, se constitui em medida prioritária, para que em eventos de chuvas intensas não se tornem ambientes propícios à desastres.

Referências

- ANA; CPRM. (2019). Agência Nacional de Águas, Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Estudos hidrogeológicos da Ilha de São Luís, MA: Subsídios para o uso sustentável dos recursos hídricos.
- Abir, L. M. (2023). Impact of tourism in coastal areas: Need of sustainable tourism strategy. Available from http://www.coastalwiki.org/wiki/Impact_of_tourism_in_coastal_areas:_Need_of_sustainable_tourism_strategy
- Belato, L. S., Serrão, S. L. C., Gandra, A. L. F., & Amorim, I. L. S. (2018). Aplicação da vulnerabilidade ambiental do município de Moju, Estado do Pará. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 9(5), 218-230. <https://doi.org/10.6008/CBPC21796858.2018.005.0020>
- Birkmann, J., Kienberger, S., & Alexander, D. E. (2014). Introduction: Vulnerability: A key determinant of risk and its importance for risk management and sustainability. *Assessment of Vulnerability to Natural Hazards*, 4(2), 30-50.
- Becker, B. (2005). Geopolítica da Amazônia. *Estudos Avançados*, 19(53). <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000100005>
- Cabral, L. N., & Cândido, G. A. (2019). Urbanização, vulnerabilidade, resiliência: Relações conceituais e compreensões de causa e efeito. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 11(2), 35-50.
- Camello, T. C. F., Garcia, V. S., Araújo, S. B., & Almeida, J. R. (2009). Gestão e vigilância em saúde ambiental. Rio de Janeiro: THEX Editora.
- Cavalcante, R. B., Ferreira, D. B. S., Pontes, P. R. M., Tedeschi, R. G., Costa, C. P. W., & Souza, E. B. (2020). Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazônia. *Atmospheric Research*, 238, 104-179. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.10487>
- CPRM. (2013). Portal GeoBank. <https://geoportal.cprm.gov.br/geosgb/>. Acesso em 2 de maio de 2023.
- Crepani, E. M., et al. (2001). Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento físico-territorial. São José dos Campos: INPE. <http://sap.ccst.inpe.br/artigos/CrepaneEtAl.pdf>
- Coutinho, E. De C., Rocha, E. J. P., Lima, A. M. M., Ribeiro, H. M. C., Gutierrez, L. A. C. L., Barbosa, A. J. S., ... & Tavares, P. A. (2017). Riscos socioeconômicos e ambientais em municípios banhados pelos afluentes do Rio Amazonas. *Revista Ambiente & Água*, 12(5). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2013>
- Dada, O. A., Almar, R., & Morand, P. (2024). Coastal vulnerability assessment of the West African coast to flooding and erosion. *Scientific Reports*, 14, 890. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48612-5>
- Evans, I. S. (1972). General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics. In R. J. Chorley (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology* (pp. 36-41). Methuen.
- Fiorese, C., Carvalho, J., Batista, A., Batista, J., & Torres, H. (2021). Levantamento da perda de solo atual por erosão hídrica do município de Cachoeiro de Itapemirim (ES). *Cadernos Camilliani*, 16(3), 1525-1546.
- Freitas, S. J. N., Silva, M. A., Sodré, G. R. C., & Santos, M. R. S. (2020). Vulnerabilidade aos processos erosivos relacionada com a

- sazonalidade no município de Barcarena, Pará. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 11(7), 448-462. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.007.0036>
- Gomes, F. B. R., Vargas, I. S., Procópio, A. S., & Castro, S. R. (2021). Estudo da variabilidade espaço-temporal e tendências de precipitação na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*, 28. <https://doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.74380>
- IBGE. (2010). Censo Demográfico de 2010. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IBGE. (2019). Estimativas populacionais dos municípios. <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em 29 de novembro de 2019
- IMESC. (2020). Relatório Técnico de Arranjos Jurídicos Institucionais do Zoneamento Ecológico Econômico do Maranhão (ZEE-MA) - Etapa Bioma Amazônico. São Luís: IMESC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri & L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- Lima, L. G., Ferreira, M. S., & Santos, J. H. S. (2022). Morfodinâmica da praia da Ponta da Areia: Considerações sobre a construção de um espigão costeiro e ambiente de macromaré. *Geociências*, 41(2), 503-515. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i02.16457>
- Luna, V. F., Gomes, J. F., Silva, C. C. J., & Silva, J. M. O. (2019). Ilhas de calor na zona urbana do Crato-Ceará na perspectiva do S.C.U. (Sistema Clima Urbano) sob o nível termodinâmico. *Revista GeoUECE*, 8(14), 371-387. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21930.43203>
- Lourenço, R. W., Sales, J. C. A., Arantes, L. T., Silva, C. V., & Silva, D. C. C. (2022). Reflexos ambientais do desenvolvimento e expansão das atividades humanas sobre a qualidade da água. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15, 176-198. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p176-198>
- Mapbiomas. (2020). Coleção MapBiomas. https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-cama_set_language=pt-BR
- Medeiros, R. B., Santos, L. C., Bezerra, J. F. R., Silva, Q. D., & Melo, S. N. (2023). Environmental vulnerability of the Buriticupu River Water Basin, Maranhão - Brazil: The relief as a key element. *Sociedade & Natureza*, 35(1). <https://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-66679>
- Mu, Y., Biggs, T., & Shen, S. S. (2021). Satellite-based precipitation estimates using a dense rain gauge network over the Southwestern Brazilian Amazon: Implication for identifying trends in dry season rainfall. *Atmospheric Research*, 261, 105741. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105741>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2023). ASF Data Search. <https://search.asf.alaska.edu/>
- Negrão, Y. S., Sousa, H. C., & Ranieri, L. A. (2022). Vulnerabilidade à erosão costeira em praias amazônicas e a ocupação populacional em áreas de riscos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(2), 1264-1284. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i2.195>
- Nguyen, Q. H. (2021). Impact of investment in tourism infrastructure development on attracting international visitors: A nonlinear panel ARDL approach using Vietnam's data. *Economies*, 9(3), 131. <https://doi.org/10.3390/economies9030131>
- Pereira, L. C. C., Trindade, W. N., Silva, I. R., Concejo, A., & Short, A. D. (2016). Maranhão beach systems, including the human impact in São Luís beaches. In A. D. Short & A. Klein (Eds.), *Brazilian Beach Systems Coastal Research Library 17* (pp. 125-152). Springer.
- QGIS Development Team. (2023). QGIS Desktop 3.28.5. Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Rabelo, T. O. (2016). A análise da vulnerabilidade ambiental como subsídio para a gestão da Lagoa do Bacuri, Maranhão – Brasil. *Revista de Geociências do Nordeste*, 2, 1088-1098. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2016v2n0ID10571>
- Rede Imirante Maranhão. (2021). Chuva provoca erosão e derruba estátua em São Luís. Imirante. <https://imirante.com/noticias/sao-luis/2021/02/17/chuva-provocaerosao-e-derruba-estatua-em-sao-luis-alerta-para-temporais-no-maranhao>
- Rede Imirante Maranhão. (2022). Porto do Braga sofre com a erosão na cidade de Raposa. G1 Maranhão. <https://g1.globo.com/ma/maranhao/noticia/202>

- 2/10/06/porto-do-braga-sofre-com-a-erosao-na-cidade-de-raposa.ghhtml
- Rede Imirante Maranhão. (2022). Erosão toma conta do asfalto e abre cratera no Turu. Imirante. <https://imirante.com/noticias/sao-luis/2016/04/27/erosao-toma-conta-do-asfalto-e-abre-crateras-em-rua-do-turu>
- Rede Imirante Maranhão. (2024). Cratera às margens da MA-203, na Raposa, oferece riscos na via de grande movimentação. Imirante. <https://imirante.com/noticias/raposa/2024/04/11/cratera-as-margens-da-ma-203-na-raposa-oferece-riscos-na-via-de-grande-movimentacao>
- Ribeiro, A. S. R. (2016). Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(1), 16-31. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p016-03>
- Rizzo, F. A., Silva, D. C., & Tonello, P. S. (2023). Análise da vulnerabilidade dos solos quanto à erosão hídrica na bacia do Córrego Pequiá, Açailândia, Maranhão. *Revista do Departamento de Geografia/USP*, 2023. <https://doi.org/10.11606/eissn.2236-2878.rdg.2023.192740>
- Rostam, K., Jali, M. F. M., & Toriman, E. (2010). Impacts of globalisation on economic change and metropolitan growth in Malaysia: Some regional implications. *Social*, 5, 293-301.
- Ross, J. L. S. (1992). O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Revista do Departamento de Geografia/USP*, 6, 17-29.
- Ross, J. L. S. (1994). Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia/USP*, 8, 63-73.
- Santos, M. (2006). Por uma outra globalização: Do pensamento único à consciência universal. Record.
- Santos, L. C. A., & Soares, I. G. (2020). Caracterização da vulnerabilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Preto, Maranhão – Brasil. *Geografia (Londrina)*, 29(1), 85-105. <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2020v29n1p85>
- Santos, P. T., & Martins, A. P. (2018). Análise da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Claro (GO) utilizando geotecnologias. *Revista do Departamento de Geografia/USP*, 36(2), 155-170. <https://doi.org/10.11606/rdg.v36i0.143665>
- Santos, M. R. S., Paula, E. M. S. de, Rabelo, D. R., & Pimentel, M. A. da S. (2024). Variação espaço-temporal (1981-2020) da chuva na região costeira do estado do Pará – Amazônia Oriental. *Caminhos de Geografia*, 25(99), 167-178. <https://doi.org/10.14393/RCG259970567>
- Santos, M. R. S., Vitorino, M. I., Pereira, L. C. C., Pimentel, M. A. S., & Quintão, A. F. (2021). Vulnerabilidad socio-ambiental al cambio climático: Condiciones en los municipios costeros del estado de Pará. *Ambiente & Sociedade*, 24, 1-22. <https://doi.org/10.1590/18094422asoc20200167r1vu2021L3A>
- Santos Quaresma, M. de N., Nunes da Silva, C., Brito da Cruz, M. L., & Da Silva Santos, M. R. (2023). Análise climática e a identificação de extremos de precipitação na Ilha do Marajó/Pará. *Geoambiente On-line*, (47).
- Serra Lisboa, G., Rodrigues Bezerra, J. F., & De Govêa, K. V. (2024). Mapeamento de áreas potenciais à erosão laminar na Bacia Hidrográfica do Rio dos Cachorros, São Luís-Maranhão. *Revista Contexto Geográfico*. <https://doi.org/10.28998/contegeo.9i.18.16887>
- Siwar, C., Ahmed, F., Bashawir, A., & Mia, M. S. (2016). Urbanization and urban poverty in Malaysia: Consequences and vulnerability. *Journal of Applied Sciences*, 16(4), 154–160.
- Szlafstein, C. F. (2012). The Brazilian Amazon coastal zone management: Implementation and development obstacles. *Journal of Coastal Conservation*, 16(3), 335–343.
- Tricart, J. (1977). *Ecodinâmica*. IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN.
- Van Tuan, N., et al. (2023). Spatio-temporal analysis of drought in the North-Eastern coastal region of Vietnam using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Atmospheric and Climate Sciences*, 13(2), 175–200. <https://doi.org/10.4236/acs.2023.132011>
- Vommaro, F., Menezes, J. A., & Barata, M. M. L. (2020). Contributions of municipal vulnerability map of the population of the state of Maranhão (Brazil) to the sustainable development goals. *Science of The Total Environment*, 706, 134629. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134629>