



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO
NORTE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA REGIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE/PRODEMA**



**USOS DA TERRA E VULNERABILIDADE NATURAL E
AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
BOQUEIRÃO (RN)**

MARIA DENIZE DA COSTA

2024
Natal – RN
Brasil

Maria Denize da Costa

**USOS DA TERRA E VULNERABILIDADE NATURAL E
AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
BOQUEIRÃO (RN)**

Dissertação apresentada ao Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PRODEMA/UFRN), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Orientador: **Prof.Dr. Sebastião Milton Pinheiro da Silva**

2024

Natal – RN

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Costa, Maria Denize da.

Usos da terra e vulnerabilidade natural e ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão (RN) / Maria Denize da Costa. - 2024.

93 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Biociências, Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - PRODEMA, Natal, RN 2024.

Orientação: Prof. Dr. Sebastião Milton Pinheiro da Silva.

1. Bacia Hidrográfica - Dissertação. 2. Vulnerabilidade Natural - Dissertação. 3. Vulnerabilidade Ambiental - Dissertação. 4. Degradação - Dissertação. 5. Indicadores - Dissertação. I. Silva, Sebastião Milton Pinheiro da. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 556(043.3)

Brasil

MARIA DENIZE DA COSTA

Dissertação submetida ao Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PRODEMA/UFRN), como requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Sebastião Milton Pinheiro da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PRODEMA/UFRN)

Prof. Dr. Wendson Dantas de Araújo Medeiros

Membro Externo à UFRN – Universidade Estadual do Rio Grande do Norte

Profa. Dra. Rebecca Luna Lucena

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero expressar minha mais profunda gratidão a Deus, cuja orientação e proteção estiveram presentes em cada etapa desta jornada acadêmica.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), minha instituição de ensino, dedico sinceros agradecimentos. Agradeço pelo ambiente acadêmico estimulante, pelos recursos e oportunidades oferecidos, e pelo suporte contínuo ao longo deste processo de aprendizagem e pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), expresso minha profunda gratidão pela concessão da bolsa de estudos, que foi crucial para viabilizar minha dedicação integral a este projeto acadêmico.

Ao meu orientador/professor, Sebastião Milton Pinheiro da Silva, por seu apoio constante, orientação sábia e valiosas sugestões ao longo deste processo. Sua dedicação e expertise foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), minha sincera gratidão por proporcionar um ambiente de estudo e pesquisa enriquecedor.

Aos Professores Dr. Franklin R. da Costa e a Dra. Raquel F. de Souza pela contribuição na banca de Qualificação.

Aos membros da banca examinadora os Professores Dr. Wendson Dantas de Araújo Medeiros e a Dra. Rebecca Luna Lucena por dedicarem seu tempo e expertise na avaliação deste trabalho que contribuíram significativamente para a qualidade final desta dissertação

Em memória do meu amado pai, Manoel Severino da Costa, cuja presença e apoio foram uma fonte constante de inspiração e força ao longo desta jornada. Seu legado e amor permanecerão eternamente em meu coração.

À minha querida família, minha mãe Francisca, minha irmã Aparecida e meus irmãos Washington, Nelson e Francisco, agradeço por seu amor incondicional, apoio inabalável e compreensão durante os momentos desafiadores.

Agradeço também aos amigos do PRODEMA que compartilharam comigo suas experiências, ideias e apoio mútuo ao longo deste percurso acadêmico.

Aos amigos Anchieta Júnior e João Carlos, que estiveram ao meu lado, oferecendo seu apoio, incentivo e amizade verdadeira, sou imensamente grata.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação, meu sincero
agradecimento.

DEDICATÓRIA

Dedico a presente pesquisa à memória do meu pai,
Manoel Severino da Costa.
"Deus te faça feliz."

RESUMO

Usos da Terra e Vulnerabilidade Natural e Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão (RN)

O uso desordenado da terra é hoje um dos grandes responsáveis por agravos ambientais com variados relatos de áreas de conflitos e indicadores de degradação ambiental, como a poluição de rios em bacias hidrográficas de todo o país. A mesma literatura aponta que uma das maneiras de se atacar o problema é tentando entender o funcionamento do ecossistema de interesse, mediante estudos geoambientais, como de vulnerabilidade natural e ambiental, cujos resultados contribuam com soluções propositivas de restauração ambiental, planejamento e gestão territorial e uso sustentável dos recursos naturais. Neste contexto, o objetivo geral da presente pesquisa é analisar a vulnerabilidade natural e ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão (BHRB), com dados de laboratório e campo, para mapear as condições ambientais e levantar subsídios para a readequação e a elaboração de políticas públicas e projetos de planejamento e ordenamento territorial da bacia. Para tanto, foram empregadas técnicas estatísticas, processamento e análises de imagens. Isto, possibilitou gerar mapas do meio físico da bacia na primeira etapa. Os resultados revelaram que 0,72% da área da BHRB é vulnerável, localizada no entorno da Lagoa do Boqueirão e na zona urbana de Touros/RN, com uma escala de vulnerabilidade de 2,4 a 2,7. Cerca de 12,92% da área é classificada como medianamente estável/vulnerável, 52,61% como moderadamente vulnerável e 33,75% como áreas estáveis, distribuídas por toda a bacia. A agricultura irrigada vem crescendo e avançando para o entorno da bacia aumentando as áreas de desmatamento e a pressão sob a oferta hídrica. O processo de ocupação intensificou-se nos últimos anos, avançando para o interior da bacia devido à implementação do agronegócio, o que aumentou a pressão sobre a oferta hídrica. Esta pesquisa é uma tentativa importante para gerar novas informações e criar instrumentos que contribuam para o planejamento ambiental da bacia.

PALAVRAS-CHAVE: bacia hidrográfica, vulnerabilidade natural, vulnerabilidade ambiental, degradação, indicadores

ABSTRACT

Land Uses and Natural and Environmental Vulnerability of the Boqueirão River Watershed (RN)

The disordered use of land is currently one of the major contributors to environmental issues, with various reports highlighting conflict areas and indicators of environmental degradation, such as river pollution in watersheds across the country. The literature suggests that addressing this problem involves understanding the functioning of the ecosystem in question through geoenvironmental studies, such as natural and environmental vulnerability assessments, whose results can contribute to proposing solutions for environmental restoration, territorial planning and management, and the sustainable use of natural resources. In this context, the general objective of this research is to analyze the environmental vulnerability of the BHRB, using laboratory and field data to map vulnerability indicators that can support the development and adjustment of public policies, as well as territorial planning and management projects for the BHRB. Statistical techniques, image processing, and analyses were employed, enabling the generation of physical environment maps of the basin in the first stage. The results revealed that 0.72% of the BHRB area is vulnerable, located around the Boqueirão Lagoon and the urban area of Touros/RN, with a vulnerability scale ranging from 2.4 to 2.7. Approximately 12.92% of the area is classified as moderately stable/vulnerable, 52.61% as moderately vulnerable, and 33.75% as stable areas, distributed throughout the basin. Irrigated agriculture has been expanding around the basin, increasing deforestation and pressure on water supply. Occupation processes have intensified in recent years, moving further into the basin due to the implementation of agribusiness, which has heightened the pressure on water resources. This analysis represents an important attempt to generate new information and create tools to support the environmental planning of the basin.

KEYWORDS: hydrographic basin, natural vulnerability, environmental vulnerability, degradation, indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema ilustrativo de Geossistema	20
Figura 2 - Mapa de localização da Bacia do Rio Boqueirão/RN.	27
Figura 3 - Unidades Litoestratigráficas da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.....	30
Figura 4 - Geomorfologia da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.	32
Figura 5 - Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.	34
Figura 6 - Mapa de Zonas Climáticas do IBGE (2021) da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.....	35
Figura 7 - Gráfico representando série histórica (2012 a 2022) da precipitação anual do município de Touros/RN.	36
Figura 8 - 8A e 8B: Mapa de Precipitação Média Anual e Mapa de Temperatura Média Anual da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN, respectivamente.....	36
Figura 9 - Mapa da Hidrografia da Bacia do Rio Boqueirão/RN.....	38
Figura 10 - Mapa da Vegetação da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.	40
Figura 11 - Mapa dos pontos visitados em campo realizado em julho de 2023.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados obtidos por órgãos, escala, variáveis e ano de publicação. 1 - Dados obtidos por órgão, escala, variáveis e ano de publicação.	46
Tabela 2 - Escala de vulnerabilidade das Unidades Temáticas para determinação da vulnerabilidade natural à perda de solo.	50

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA - Agência Nacional de Água

BHRB - Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDEB - Índice de Desenvolvimento da Educação Básica

IDH - Índice de Desenvolvimento Humano

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MDE - Modelo Digital de Elevação

MMA - Ministério do Meio Ambiente

NRM - Máximo Nível Relativo do Mar

PIB - Produto Interno Bruto

ODS - Objetivo de Desenvolvimento Sustentável

OLI - Operational Land Imager

QGIS - Quantum GIS

SEMAHR - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Rio Grande do Norte

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas

TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil

UPRH - Unidade de Planejamento de Recursos Hídricos

USGS - United States Geological Survey

UTM - Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2 ESTADO DA ARTE.....	17
2.1 Bacia Hidrográfica como Unidade de Análise Ambiental	17
2.2 Abordagem Ecológica	19
2.3 Conceitos de vulnerabilidades – breve revisão	23
3 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	27
3.1 Caracterização do meio físico da Bacia do Rio Boqueirão	28
3.1.1 Geologia	28
3.1.2 Geomorfologia	31
3.1.3 Pedologia.....	33
3.1.4 Clima.....	35
3.1.5 Hidrografia	37
3.1.6 Vegetação.....	38
3.1.7 Dados Socioeconômicos do Município de Touros	43
4 METODOLOGIA GERAL	44
5 CAPÍTULO 1: VULNERABILIDADE NATURAL À PERDA DE SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BOQUEIRÃO/RN.....	51
RESUMO.....	51
ABSTRACT	51
INTRODUÇÃO.....	52
MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
MÉTODOS.....	54
CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS	65
6 CAPÍTULO 2: ANÁLISE DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BOQUEIRÃO/RN.....	68
RESUMO.....	68
ABSTRACT	68
INTRODUÇÃO.....	69
MATERIAL E MÉTODO	69
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	70
RESULTADO E DISCUSSÃO.....	76
CONCLUSÃO.....	83
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
8 CONCLUSÃO.....	87
9 REFERÊNCIAS	90

1. INTRODUÇÃO

A exploração desordenada dos recursos naturais e o uso inadequado da terra têm resultado em degradação ambiental em diversos ecossistemas, constituindo um dos maiores problemas do século XXI (MIRA et al., 2022). Desequilíbrios recorrentes, temporários ou permanentes, causam instabilidade no meio ambiente, resultando em áreas cada vez mais vulneráveis à geração de desastres naturais, os quais podem acarretar danos significativos à saúde, bem-estar e segurança da população (ROSA et al., 2021). Nesse contexto, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 15: Vida Terrestre ressalta a importância de proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres para evitar a degradação ambiental. Dessa forma, para alcançar o desenvolvimento sustentável, é crucial levar em consideração a vulnerabilidade dos ambientes naturais diante das interações das atividades humanas com o meio ambiente (CHOUDHARY; SINGH; KUPRIYANOV, 2018).

Quando se trata de degradação ambiental, é essencial restringir o foco geográfico e, nesse sentido, as bacias hidrográficas se destacam como regiões ideais para uma análise mais aprofundada e pode ser caracterizada pela área em que ocorre o fluxo de água, tanto superficial quanto subterrânea, convergindo para uma única saída (LEITE *et al.* 2022). Segundo Cunha e Guerra (2003), uma bacia hidrográfica é uma unidade que integra os aspectos naturais e sociais, com o objetivo de minimizar os impactos ambientais. Reconhecendo a complexidade desse território, é necessário estudá-lo de forma abrangente, considerando a interligação entre os fatores fisiográficos, geológicos, socioeconômicos e socioculturais (LEITE *et al.* 2022).

A bacia hidrográfica, enquanto unidade integradora, compreende as interações entre elementos naturais (relevo, solo, vegetação e água) e sociais (ocupação humana, atividades econômicas e práticas culturais) e seu ordenamento territorial restringe usos do solo, preservando e conservando o ambiente, permitindo o desenvolvimento socioeconômico sustentável (AQUINO E MOTA, 2019).

De forma geral, segundo Silva, Neves e Vendrusculo (2014), bacia hidrográfica, como unidade territorial, disponibiliza inúmeras funções, sendo componente fundamental na contribuição de realização de diagnóstico básico imprescindível para análise dos conflitos, recomendação de soluções ou diretrizes e a tomada de decisão em relação ao meio físico, antrópico e biológico.

Naturalmente, os solos são suscetíveis à degradação por processos erosivos e movimentos de massa, o que os torna naturalmente vulneráveis. Ações humanas

desordenadas, como o desmatamento para agricultura e a remoção de matas ciliares, agravam esses fenômenos, gerando o conceito de vulnerabilidade ambiental (SANTOS *et al.*, 2020).

Zalidis *et al.* (2002) enfatizam que práticas agrícolas inadequadas levam ao mau funcionamento da terra e à degradação ambiental. A degradação dos solos agrícolas representa um sério desafio global, com impactos ambientais, econômicos e sociais significativos.

Outro exemplo claro é a degradação do solo, que leva à perda de funções vitais e serviços ecossistêmicos essenciais para a sobrevivência humana, os quais incluem a produção de alimentos, o suporte para construções, a preservação da qualidade da água, o controle de enchentes, a retenção de carbono e nutrientes, entre outros (BÜNEMANN *et al.*, 2018).

Nessa perspectiva, o termo vulnerabilidade ambiental surge e vem, também, sendo muito difundido nas últimas décadas. Segundo Tagliani (2003), vulnerabilidade ambiental é definida como qualquer susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por qualquer tipo de uso antrópico em um território. Esse conceito, portanto, está ligado tanto às características físicas naturais da paisagem quanto às atividades antrópicas nela desenvolvidas (BELATO; SERRÃO, 2019).

De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente – Brasil CONAMA (BRASIL, 1986) impacto ambiental:

É qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante de atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais.

Com base na definição mencionada anteriormente, é possível afirmar que qualquer forma de ocupação humana acarreta algum tipo de impacto no meio ambiente. Em muitos casos, a primeira ação ao apropriar-se da terra envolve o desmatamento da superfície, o que resulta na perda de elementos bióticos e abióticos, provocando diferentes graus de impacto e degradação como a redução da capacidade produtiva dos solos, o assoreamento dos rios e dos reservatórios, além da poluição das fontes de água (SANTOS *et al.*, 2012).

A ocupação da terra por atividades humanas frequentemente implica na alteração significativa dos ecossistemas naturais. Coberturas inadequadas da terra podem causar altos índices erosivos, prejudicando a estabilidade das bacias hidrográficas e resultando em danos ambientais graves, incluindo redução da capacidade produtiva dos solos, assoreamento de cursos d'água e reservatórios (ARAÚJO *et al.*, 2023).

É importante destacar que o modo de ocupação e o impacto da degradação de uma

bacia está diretamente relacionada a forma da ocupação e suas atividades econômicas são realizadas em função das práticas adotadas (CRUZ, 2009) e a transformação da paisagem natural para acomodar atividades humanas resulta também em consequências negativas para o meio ambiente.

Nessa perspectiva, as bacias hidrográficas vêm sendo degradadas à medida que crescem as atividades econômicas de uma determinada região e um dos fatores responsáveis é o mau uso e ocupação do solo, tornando-se um dos maiores problemas ambientais como é o caso, na região metropolitana de Natal, das bacias dos rios Potengi, Pitimbu, Pium, Guajirú, Mudo e o Rio Doce (SILVA, 2016) e Doce (FAUSTINO *et al.*, 2014; COSTA, 2018).

A vulnerabilidade em uma bacia hidrográfica pode estar associada às atividades antrópicas, as quais desequilibram a dinâmica natural, alterando a vazão de cursos d'água e/ou ampliando a quantidade de sedimentos a serem transportados (MESQUITA *et al.*, 2010). Além disso, alguns processos que ocorrem em bacias hidrográficas irão impactar, de alguma forma, os mananciais superficiais e/ou subterrâneos, e fatores como, por exemplo, as mudanças climáticas, uso e cobertura do solo, geologia, relevo, vegetação e outras atuações humanas sob o meio físico podem contribuir, para aumentar ou diminuir a vulnerabilidade ambiental de uma determinada bacia hidrográfica (CARVALHO, 2012).

A vulnerabilidade natural é uma característica inerente ao meio físico e pode ser avaliado com base em informações sobre as características físicas e ambientais locais. Esses dados incluem aspectos como geomorfologia, geologia, pedologia, vegetação e clima (ROSS, 1994; CREPANI *et al.*, 2001).

Já a vulnerabilidade ambiental refere-se ao grau em que um sistema natural é suscetível ou incapaz de lidar com os efeitos das interações externas, podendo decorrer de características naturais ou da pressão causada por atividades humanas podendo, também, envolver sistemas frágeis de baixa resiliência, ou seja, a capacidade do meio ambiente de retornar ao estado natural, superando uma situação crítica (AQUINO *et al.*, 2017). Essa vulnerabilidade depende da natureza dos fatores que exercem pressão ou causam mudanças ambientais, bem como da sensibilidade do ambiente à alteração e de sua capacidade de adaptação (CHOUDHARY; SINGH; KUPRIYANOV, 2018).

No contexto da vulnerabilidade natural e ambiental, é fundamental considerar a intrínseca relação entre os condicionantes ambientais de um determinado espaço geográfico e a população que ali reside. Condicionantes ambientais são responsáveis por identificar e avaliar a vulnerabilidade ambiental local, enquanto a população, por sua vez, influenciada por condições de vida, estrutura institucional, econômica, cultural e política, determina os usos

e/ou desusos dos recursos hídricos, evidenciando a natureza socioambiental dessa questão (CARVALHO, 2012).

A avaliação da vulnerabilidade dos ambientes, considerando suas características naturais e o uso e ocupação do solo, pode ser realizada por meio de uma análise integrada de aspectos físicos e ambientais, utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) (CREPANI *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2018). O uso de informações obtidas por meio de sensoriamento remoto possibilita a análise de regiões extensas, heterogêneas ou de difícil acesso, permitindo a geração de resultados de forma rápida e eficiente (SCHARSICH *et al.*, 2017).

Os SIGs fornecem uma plataforma eficaz para integrar e analisar dados geográficos, permitindo a combinação de informações sobre a topografia, geologia, pedologia, cobertura vegetal e outros fatores relevantes. Essa abordagem possibilita uma compreensão mais abrangente e precisa das características do ambiente e sua suscetibilidade a diferentes impactos.

O geoprocessamento desempenha um papel fundamental na geração de um produto síntese resultante dessa análise integrada. Por meio da elaboração de mapas temáticos, é possível visualizar espacialmente os diferentes graus de vulnerabilidade, facilitando a interpretação tanto por gestores quanto pela população em geral e isso possibilita uma melhor gestão dos recursos naturais e a implementação de políticas ambientais mais eficazes (AQUINO; PALETTA; ALMEIDA, 2017).

Compreende-se, portanto, que a realização de pesquisas em bacias hidrográficas, com o objetivo de fornecer diagnósticos e estudos de vulnerabilidade ambiental, é de extrema importância para subsidiar o planejamento territorial e o uso adequado dos recursos hídricos e naturais. Essas pesquisas desempenham um papel fundamental ao avaliar, de maneira sustentável, a coexistência harmoniosa entre os seres humanos e o meio ambiente.

Diversos estudos têm sido conduzidos para analisar a vulnerabilidade ambiental de bacias ou sub-bacias hidrográficas, utilizando álgebra de mapas. Destacam-se as contribuições de Nicolau (2018), Rocha e Magri (2022), Lira e Feiden (2022), e Zanella *et al.* (2013), entre outros. Essas análises são consideradas importantes, pois a bacia hidrográfica é reconhecida como uma unidade ambiental fundamental para o planejamento e gestão dos sistemas ambientais (SOUZA; VALE; NASCIMENTO, 2013).

Com base nessa perspectiva, esta pesquisa de dissertação de mestrado foi proposta na Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão (BHB), que atualmente passa por um intenso processo de ocupação e crescimento da agricultura irrigada, aparentemente sem o devido conhecimento

de suas potencialidades e limitações naturais.

As inquietações e suposições que deram origem a esse estudo são função do processo de ocupação e da exploração econômica da bacia, mediante desmatamento, remoção de matas ciliares, extinção de nascentes e poluição de rios e dos solos e cuja vulnerabilidade ambiental pode ser investigada e quantificada em ambiente SIG a partir de dados e indicadores das condições do meio ambiente decorrente da ocupação humana da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

Com a premissa do entendimento surgiram algumas perguntas e a formulação de duas hipóteses: a vulnerabilidade natural da BHRB é alta, é mediana ou é baixa? Existe e como anda a vulnerabilidade ambiental? Como e com o que se pode estudar a vulnerabilidade ambiental na BHRB?

Hipótese 1: a vulnerabilidade ambiental na BHRB é significativa e tem forte relação com o tipo de uso e ocupação da terra.

Hipótese 2: a vulnerabilidade ambiental pode estar relacionada com a falta de políticas públicas estruturadoras e de comitês de bacias para gestão e monitoramento voltado para o uso sustentável dos recursos naturais e a falta delas tem propiciado o avanço da degradação do ambiente.

Sob a perspectiva do que foi exposto anteriormente, nas perguntas elaboradas e na hipótese de trabalho pode-se elencar como objetivos o seguinte:

1 Objetivo geral

O objetivo da pesquisa é investigar a vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão, com dados de laboratório e campo, para mapear o território e prover subsídios para a elaboração de políticas públicas e projetos de planejamento.

1.1 Objetivos específicos:

- I Analisar e mapear a vulnerabilidade natural da bacia a partir da montagem e emprego de uma base de dados espaciais públicos oficiais;
- II Mapear o uso e cobertura da terra;
- III Analisar e mapear a vulnerabilidade ambiental da bacia.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Bacia Hidrográfica como Unidade de Análise Ambiental

Uma bacia hidrográfica é reconhecida como a unidade ambiental mais relevante para o estudo da dinâmica das inter-relações na gestão do desenvolvimento e planejamento dos recursos naturais em âmbito regional representando uma área delimitada pela rede de drenagem, na qual a água e outros elementos naturais interagem e se conectam de maneira integrada.

Ao adotar a bacia hidrográfica como unidade de análise, é possível compreender a complexa interação entre os aspectos físicos, biológicos, sociais e econômicos dentro de uma determinada região.

De acordo com Christofolletti (1974, p. 81), uma bacia hidrográfica é caracterizada como a área em que ocorre a coleta e o escoamento das águas por um rio específico ou por um sistema fluvial. Essa coleta de água é realizada por uma rede complexa de canais interconectados, que compõem a drenagem fluvial. Em conjunto, esses canais formam a bacia de drenagem, que representa uma unidade geográfica fundamental para o estudo e manejo dos recursos hídricos.

A caracterização da bacia hidrográfica está relacionada à sua função como um sistema que abrange recursos hídricos, mananciais e fluxo de águas. Os eventos que ocorrem na área da bacia, sejam eles naturais ou antrópicos, afetam a qualidade dos recursos naturais. Por essa razão, a bacia hidrográfica é frequentemente escolhida como unidade de estudo devido a variáveis como solo, clima, vegetação e relevo, hidrologia que são determinantes em sua dinâmica e a tornam uma unidade natural bem definida (SANTOS, 2004).

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório (TUCCI, 1997).

Uma bacia hidrográfica é uma área natural que capta a água proveniente de precipitações, direcionando seu escoamento para um ponto de saída comum. É composta por superfícies inclinadas e uma rede de drenagem formada por cursos de água que se juntam até chegar a um único leito no ponto de saída (TUCCI, 1997). A bacia Hidrográfica pode ser então considerada um ente sistêmico.

A bacia hidrográfica representa um espaço integrado e dinâmico, em que as interações entre os elementos naturais e sociais moldam suas características e funcionalidades, conforme algumas definições a seguir.

Christofoletti (1974, p. 81) definiu bacia hidrográfica como uma área delimitada pela drenagem de um rio principal ou sistema fluvial, compreendendo um conjunto de canais inter-relacionados responsáveis pelo escoamento superficial. Nesse sentido, a bacia hidrográfica é caracterizada pela interligação dos cursos d'água e pelas áreas adjacentes que contribuem para o fluxo de água. Essa abordagem enfatiza a importância dos canais de escoamento e a conexão entre as diferentes partes da bacia, evidenciando a dinâmica e a interdependência dos processos hídricos na região.

No contexto físico-ambiental, a definição de bacia hidrográfica apresentada por Rasmusson e Carpenter (1983) destaca que é toda área geográfica responsável por drenar água, sedimentos e materiais dissolvidos para um ponto comum ao longo do curso de um rio ou curso d'água. Por sua vez, Silva (1995) define a bacia hidrográfica como um compartimento geográfico com divisores topográficos e escoamento superficial, composto por um rio principal e seus afluentes. Essas definições se complementam e contribuem para a compreensão da bacia hidrográfica como um recorte espacial significativo e objeto de estudo.

De acordo com Guerra e Cunha (2005), a definição de bacia hidrográfica abrange uma área da superfície terrestre responsável por drenar água, sedimentos e materiais dissolvidos para um único ponto de saída, conhecido como exutório, localizado em um canal fluvial. Essa definição destaca a importância do escoamento superficial na bacia hidrográfica, onde os processos de drenagem convergem para uma saída específica. Sendo compreendida como uma unidade funcional que abrange a área de captação e escoamento de recursos hídricos, sedimentares e dissolvidos, estabelecendo uma relação intrínseca entre a superfície terrestre e os sistemas fluviais.

De acordo com Silva (2009), a bacia hidrográfica pode ser compreendida como um compartimento geográfico delimitado por divisores topográficos, no qual ocorre o escoamento superficial seguindo o curso de um rio principal. Complementando essa definição, Pires et al. (2005) ressalta que a bacia hidrográfica é um sistema biofísico complexo, enfatizando a interligação entre os sistemas hidrológicos e ecológicos. Essa abordagem reforça a compreensão de que as bacias hidrográficas são unidades integradas, onde a dinâmica da água, dos solos, da vegetação e da fauna estão inter-relacionadas. Seguindo esse raciocínio dos autores, ao estudar e gerenciar uma bacia hidrográfica, é necessário considerar a

interdependência dos processos físicos, biológicos e sociais que ocorrem nesse contexto, a fim de promover a conservação dos recursos naturais e o uso sustentável do território.

No âmbito da gestão e planejamento dos recursos naturais, é crucial compreender a importância da bacia hidrográfica como um recorte físico-territorial específico. Conforme discutido anteriormente por diversos autores, a bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação, onde o escoamento converge para um único ponto de saída, conhecido como exutório.

Essa definição encontra respaldo nos estudos de Silva (2009) e Pires et al. (2005), que destacam a delimitação das bacias hidrográficas pelos divisores topográficos e a complexidade dos sistemas biofísicos presentes nelas. Nesse contexto, é importante ressaltar que as atividades humanas são desenvolvidas dentro dessas bacias, abrangendo áreas urbanas, industriais, agrícolas e de preservação.

A interligação entre as atividades humanas e a bacia hidrográfica se reflete no ponto de saída da bacia, o exutório, onde estão representados todos os processos que compõem o sistema da bacia. O que ocorre nesse local é resultado direto das formas de ocupação do território e do uso das águas que convergem para ele.

Dessa forma, compreender a dinâmica das bacias hidrográficas e suas relações com as atividades humanas é fundamental para uma gestão eficiente dos recursos hídricos e a preservação do meio ambiente. A análise integrada desses aspectos, considerando as características físicas, biológicas e sociais, permite o desenvolvimento de estratégias sustentáveis e a tomada de decisões adequadas para o uso consciente e equilibrado dos recursos naturais presentes nas bacias hidrográficas.

2.2 Abordagem Ecosistêmica

Desenvolvida pelo biólogo austríaco Ludwig Von Bertalanffy, a Teoria Geral dos Sistemas é amplamente aplicada em diversas áreas. Essa teoria, que adota uma abordagem holística, propõe que um sistema seja compreendido como um conjunto de fenômenos que ocorrem por meio de interações entre fluxos de matéria e energia (GOMES, 2009).

A Teoria Geossistêmica tem suas raízes na Teoria Geral dos Sistemas, proposta por Ludwig von Bertalanffy em 1968. Essa teoria fundamental estabelece que os sistemas podem ser compreendidos como conjuntos de elementos interrelacionados, com diferentes variáveis e características, que interagem tanto entre si quanto com o meio ambiente externo. Essa teoria aplica esses princípios aos estudos das ciências naturais e sociais, buscando uma abordagem

mais precisa para compreender os sistemas complexos que não se restringem ao âmbito físico. Ela reconhece a interdependência entre os elementos do sistema, bem como suas interações com o meio ambiente, enfatizando a importância de uma perspectiva holística e integradora.

Dentro desse contexto, a Teoria Geossistêmica busca compreender os sistemas geográficos como um todo, considerando a interação entre os componentes naturais, como clima, relevo, solo, biodiversidade, e os componentes sociais, como a cultura, economia, política e as atividades humanas. Essa abordagem permite uma análise mais completa e abrangente dos sistemas, levando em consideração a influência mútua entre as esferas natural e social representada na Figura 1.

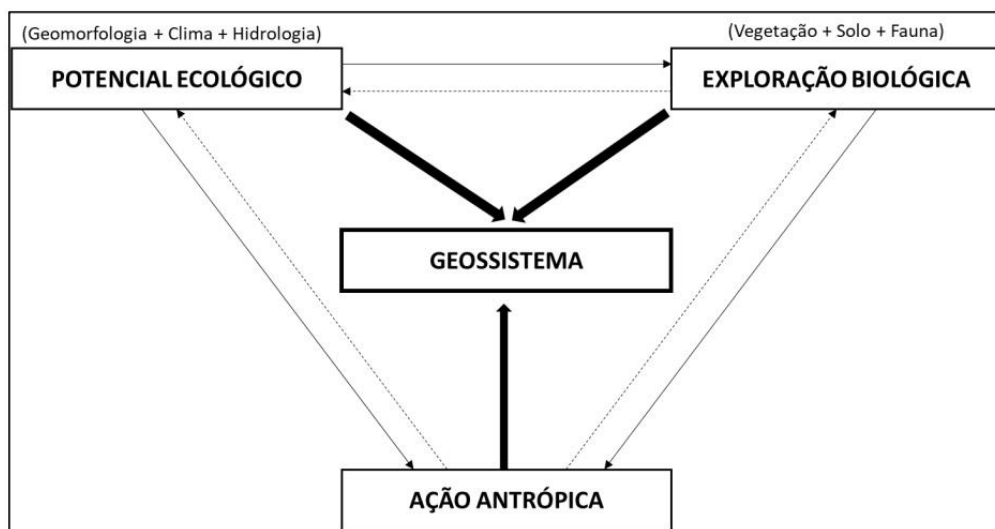


Figura 1 - Esquema ilustrativo de Geossistema
Fonte: Adaptado de Bertrand (1968).

De acordo com Mendonça (1998), a abordagem geossistêmica, fundamentada na teoria dos sistemas proposta por Sothava (1978) e aprimorada posteriormente por Bertrand, envolve a análise do "complexo físico-geográfico". Esse conceito representa a interconexão entre a natureza e a sociedade humana, englobando tanto os aspectos econômicos e sociais quanto os elementos naturais como hidrologia, geomorfologia, vegetação e clima, que compõem o quadro natural de um geossistema. Mendonça (1998) destaca, ainda, que o geossistema envolve a compreensão das interações complexas entre os componentes naturais e sociais, reconhecendo sua interdependência e a influência mútua entre eles.

Hall & Fagen (1965, apud CHRISTOFOLETTI, 1979), nos diz que um sistema é composto por um conjunto de elementos e suas relações, juntamente com seus atributos. De forma semelhante, Vale (2012) define um sistema como o conjunto de elementos interligados,

nos quais suas relações e atributos são interdependentes. Essa interdependência possibilita identificar a direção dos fluxos, que ocorrem a partir de uma entrada (input) e se transformam em uma saída (output). Essas definições destacam a importância das relações entre os elementos de um sistema, assim como a dependência mútua desses elementos para o seu funcionamento adequado.

Sotchava (1978) propôs uma divisão dos geossistemas em diferentes escalas geográficas: escala local ou topológica, escala regional e escala planetária. Essa classificação permite compreender a distribuição e interação dos geossistemas em diferentes níveis espaciais. Além disso, Sales (2004) contribuiu com uma hierarquia de funcionamento dos geossistemas, definindo categorias em ordem decrescente: geossistema (ambiente natural), geócoro (classe de geossistema com estrutura heterogênea), geômero (classes de geossistema com estrutura homogênea) e geótopo (geossistemas associados a setores fisionômicos homogêneos). Essa classificação e hierarquia dos geossistemas auxiliam na organização e compreensão de suas características em diferentes escalas, permitindo uma análise abrangente dos processos naturais e interações presentes.

O conceito de Geossistema proposto por Sotchava está associado a uma escala regional, abrangendo centenas ou milhares de quilômetros quadrados, conforme observado na literatura das escolas russa e alemã (TROPPMAIR, 2006). Troppmair ainda menciona que Bertrand (1978) desenvolveu o conceito de geossistema considerando as dimensões e escalas da França, dividindo-o em geossistema, geofácia e geótopo. Essas categorias variam desde extensas áreas em quilômetros quadrados (geossistema) até áreas menores em metros quadrados (geótopo).

Sotchava e Bertrand, em 1978, utilizaram o conceito de Geossistema com objetivos distintos, mas ambos direcionaram suas discussões para o meio físico das áreas estudadas. Sotchava concentrou-se na análise geossistêmica das vastas planícies siberianas, resultando no zoneamento biogeográfico. Por sua vez, Bertrand enfocou os terrenos acidentados dos Pirineus Franceses, priorizando uma análise geossistêmica com base na compartimentação geológico-geomorfológica (DANTAS et al., 2015).

Tricart (1977) desenvolveu outra vertente da escola francesa, conhecida como Ecodinâmica e Ecogeografia, que se concentrava na análise da estrutura da paisagem em sua morfodinâmica.

No estudo da ecodinâmica dos ambientes naturais, Tricart (1977) propôs uma abordagem que se baseia na análise integrada dos sistemas ambientais. Ele estruturou essa análise por meio da classificação morfodinâmica dos sistemas ambientais, levando em

consideração a relação com a paisagem. Tricart divide os ambientes em três categorias: meios estáveis, meios de transição e meios instáveis. Essa classificação é determinada pela intensidade dos processos morfodinâmicos em ação, seja por influência antrópica ou natural.

Dessa forma Tricart (1977) desenvolveu uma abordagem de avaliação integrada das características regionais, com o objetivo de reunir diferentes aspectos do meio natural e obter diagnósticos operacionais. Dividiu o processo em etapas, incluindo a definição do quadro regional, análise morfodinâmica, recursos ecológicos e problemas da gestão do território. Essa abordagem permitiu compreender a configuração espacial da região, os processos morfodinâmicos, os recursos naturais e os desafios da gestão territorial.

Nessa perspectiva, o estudo da teoria ecodinâmica, baseada nas ideias de Tricart, desempenha um papel importante na promoção de diagnósticos ambientais. Nesse contexto, Ross (1990) desenvolveu uma análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais modificados pela atividade humana. Ao propor uma abordagem alternativa para nomear as unidades estáveis e instáveis resultantes dessas transformações, Ross introduz as unidades ecodinâmicas de instabilidade potencial e as unidades ecodinâmicas de instabilidade emergente.

Crepani et al. (2001) utilizou o conceito de ecodinâmica de Tricart (1977) como base para desenvolver uma metodologia de mapeamento da vulnerabilidade natural à perda de solo. Essa abordagem foi aplicada no Zoneamento Ecológico Ecodinâmico da Amazônia. O estudo envolveu a reinterpretação de dados temáticos existentes e a utilização de imagens de satélite, permitindo uma visão abrangente da paisagem. A análise de vulnerabilidade foi realizada por meio de uma escala de valores relativos e empíricos, considerando a relação entre morfogênese e pedogênese. Foram avaliados individualmente os temas: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso da terra e clima.

Dessa forma, a abordagem dinâmica de Tricart, que considera as relações entre morfogênese e pedogênese, juntamente com os princípios de homogeneidade e diferenciação propostos por Sotchava (1978), em conjunto com a aplicação flexível e sistêmica da análise proposta por Crepani et al. (2001), possibilitam uma compreensão mais ampla das intervenções humanas nas dinâmicas naturais. Essa abordagem também permite a realização de estudos integrados do meio ambiente, considerando as interações complexas entre os diversos elementos.

2.3 Conceitos de vulnerabilidades – breve revisão

Segundo o dicionário de língua portuguesa da *Oxford Languages*, a palavra "vulnerabilidade" é comumente utilizada para descrever o estado ou qualidade do que é ou se encontra vulnerável. Refere-se à intensidade de deterioração que um sistema experimenta ao ser exposto a ameaças. No entanto, no ambiente científico, esse termo está sendo utilizado em diversas áreas de pesquisa, como sustentabilidade, mudanças globais, climáticas, ecologia, desenvolvimento político e social e medicina. Em cada uma dessas áreas, a vulnerabilidade é abordada com conceitos distintos. Portanto, a definição da vulnerabilidade pode variar, inclusive dentro de um mesmo tema, dependendo dos pesquisadores envolvidos.

A vulnerabilidade ambiental é evidenciada pela fragilidade resultante de perturbações decorrentes de ações humanas (GOLDSMITH, 1983).

Vulnerabilidade ambiental refere-se a qualquer conjunto homogêneo de fatores ambientais que, diante das atividades presentes ou futuras, pode enfrentar adversidades capazes de afetar, total ou parcialmente, a estabilidade ecológica da região em que está situado (ANDERSEN e GOSKEN, 1989).

Conforme Cutter (1996), a ideia de vulnerabilidade está intrinsecamente ligada ao potencial de perda, abrangendo tanto as perdas individuais como as coletivas. Essas perdas podem surgir da interação entre a sociedade e as condições biofísicas, afetando a resiliência do ambiente em responder a perigos ou desastres. Além disso, tais interações também influenciam a capacidade de adaptação da sociedade diante das mudanças nas condições. Essa perspectiva, Cutter (1996) destaca que a vulnerabilidade envolve uma análise das fragilidades e limitações existentes nos sistemas sociais e ambientais. Essas fragilidades podem surgir de fatores como a exposição a riscos, a falta de recursos ou capacidades para lidar com eles, e a ausência de estratégias efetivas de adaptação.

A vulnerabilidade ambiental é conceituada como a capacidade intrínseca de um sistema em ajustar suas respostas diante de fatores estressores ao longo do tempo e espaço, fundamentada em suas características ecossistêmicas (WILLIAMS e KAPUTSKA, 2000).

Já Lima *et al.* (2000) analisam a vulnerabilidade de um geossistema por meio da avaliação das características do meio físico, biótico e antrópico que contribuem para a instabilidade do relevo devido aos processos erosivos. Os dados do meio físico englobam temas como geologia, geomorfologia, pedologia, clima e hidrografia. O meio biótico está relacionado à vegetação, enquanto as características antrópicas dizem respeito ao uso e ocupação do solo.

De acordo com Villa e McLeod (2002), para o desenvolvimento de um método de avaliação da vulnerabilidade ambiental, é essencial seguir três etapas fundamentais: definir o conceito mais adequado de vulnerabilidade, selecionar o sistema a ser avaliado e organizar os indicadores ambientais.

Vulnerabilidade ambiental refere-se à maior ou menor susceptibilidade de um ambiente a um potencial impacto decorrente de qualquer uso antrópico, incorporando critérios de fragilidade estrutural inerente ao meio físico, sensibilidade e o grau de maturidade dos ecossistemas (TAGLIANI, 2003).

Ainda conforme Tagliani (2003), define a vulnerabilidade ambiental como a susceptibilidade de um ambiente em relação a um potencial impacto causado por qualquer forma de uso humano. Essa definição ressalta a ideia de que os ambientes naturais estão sujeitos a serem afetados negativamente pela ação humana. A vulnerabilidade ambiental reconhece que as atividades antrópicas, como o desenvolvimento urbano e a exploração de recursos naturais, podem ter consequências negativas para os ecossistemas.

Vulnerabilidade ambiental consiste em um conjunto homogêneo de fatores ambientais que, diante das atividades em curso ou futuras, pode enfrentar perturbações, impactando total ou parcialmente a estabilidade ecológica da região em questão (CASTELLANI, 2004).

Vulnerabilidade ambiental refere-se à susceptibilidade do ambiente a pressões antrópicas (COSTA *et al.*, 2006).

Dentre os vários conceitos de vulnerabilidade ambiental, o adotado por Li *et al.* (2006) é relevante para os objetivos deste trabalho. Segundo os autores, o conceito de vulnerabilidade está associado às características do meio físico e biótico, à exposição a fontes de pressão ambiental, incluindo o uso e cobertura da terra, e à ocorrência de impactos ambientais, como a erosão hídrica.

A vulnerabilidade ambiental é conceituada como a probabilidade de degradação do ambiente natural, manifestando-se em fenômenos como a erosão do solo, a perda de biodiversidade, o assoreamento, e a contaminação dos corpos hídricos, podendo ser agravada por fatores antropogênicos, resultando na perda de biodiversidade em áreas não produtivas, o que, por conseguinte, compromete a qualidade e quantidade dos recursos hídricos disponíveis (COSTA *et al.*, 2007).

Para Santos e Caldeyro (2007) concepção de vulnerabilidade ambiental está vinculada à condição intrínseca que cada porção do território exibe em sua capacidade de reação às perturbações. Essa resposta, em interação com a natureza e intensidade do evento induzido, culmina em uma amplitude de efeitos adversos.

A vulnerabilidade ambiental pode ser compreendida como a propensão do ambiente à degradação, levando em conta a sua capacidade intrínseca de resposta (FIGUEIRÊDO, 2010).

Em 2012, Fushimi relacionou a vulnerabilidade ambiental às práticas sociais que alteram as paisagens e, em interação com os elementos naturais, podem induzir ou acelerar o processo erosivo.

A vulnerabilidade ambiental aborda a fragilidade do ambiente em face de qualquer tipo de dano, seja decorrente da dinâmica ambiental, de eventos naturais, e/ou de ação antrópica (MIGUEL *et al.*, 2013).

A vulnerabilidade ambiental pode ser caracterizada como uma condição na qual o meio físico se encontra vulnerável às influências humanas. Geralmente, envolvem três elementos fundamentais: exposição ao risco, incapacidade de reação e dificuldade de adaptação diante da concretização desse risco (LOURENÇO *et al.*, 2013).

Segundo Fushimi (2016) a abordagem ambiental da vulnerabilidade está intrinsecamente ligada à fragilidade, resultante da complexa inter-relação dos elementos naturais. No entanto, diferencia-se ao incorporar a influência da ação humana sobre as paisagens, especialmente em função dos interesses econômicos, muitas vezes moldados pelo sistema de produção capitalista.

A vulnerabilidade ambiental refere-se ao nível de suscetibilidade ou incapacidade de um sistema natural em lidar com os efeitos das interações externas, podendo decorrer de características ambientais naturais, pressões decorrentes de atividade humana ou de sistemas frágeis com baixa resiliência, representando a capacidade do ambiente em retornar ao seu estado natural após enfrentar uma situação crítica (AQUINO *et al.*, 2017).

Para Duarte e Carneiro (2017) a vulnerabilidade ambiental refere-se à maior ou menor suscetibilidade erosiva de um ambiente, resultante do impacto das atividades humanas.

Essas abordagens permitem uma compreensão mais abrangente da vulnerabilidade ambiental, considerando tanto os elementos naturais quanto os aspectos humanos que influenciam a suscetibilidade do meio às pressões e aos impactos ambientais. Ao integrar fatores físicos, bióticos e antrópicos, é possível obter uma visão mais completa da vulnerabilidade de um determinado geossistema ou área de estudo, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de manejo e conservação mais eficazes.

Conforme afirmado por Costa *et al.* (2021), a análise da vulnerabilidade ambiental tem sido extensivamente aplicada em diversos estudos no Brasil. Como resultado, nos últimos 20 anos, foram desenvolvidos diversos métodos, tanto qualitativos quanto quantitativos e quali-quantitativos, como mencionado por Thirummurthy *et al.* (2022). Diante desse panorama de

investigações variadas, é relevante ressaltar a contribuição de Crepani *et al.* (2001), cuja proposta se destaca pela análise da vulnerabilidade potencial natural, realizada por meio de uma escala específica de vulnerabilidade.

Crepani *et al.* (2001) propõem uma metodologia para a elaboração de mapas de vulnerabilidade natural à perda de solo, utilizando o conceito de Ecodinâmica (TRICART, 1977) e a interpretação de dados temáticos, juntamente com imagens de satélite. O procedimento metodológico envolve a interpretação das informações temáticas disponíveis, como mapas geológicos, geomorfológicos, pedológicos, de cobertura vegetal e uso da terra, sobre as imagens de satélite. Com base nessa interpretação, são gerados mapas temáticos georreferenciados, como Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso e Intensidade Pluviométrica. Esses mapas são gerados por meio da sobreposição de diferentes informações temáticas, resultando em unidades territoriais básicas que são classificadas de acordo com seu grau de vulnerabilidade, levando em consideração o estágio de evolução morfodinâmica.

O mapeamento da vulnerabilidade natural à perda do solo utilizada por Crepani *et al.* (2001) vem servindo de base para outros estudos como Grigio (2003), Ribeiro e Campos (2007), Mesquita *et al.* (2010), Mota e Valladares (2011), Oliveria (2011), Medeiros *et al.* (2012), Rovani *et al.* (2015) e Costa (2018).

Neste trabalho, a vulnerabilidade ambiental será compreendida pela relação entre os fatores biofísicos (vulnerabilidade natural) e o fator antrópico (perspectiva do uso e ocupação do solo) em uma determinada área geográfica, considerando fundamentos teóricos basilares e metodológicos os trabalhos de Crepani *et al.* (2001), e adaptações de Grigio (2003) e Oliveira (2011).

Dessa forma, a abordagem adotada neste trabalho, busca considerar tanto os elementos naturais do ambiente quanto os efeitos das atividades humanas, entendendo a vulnerabilidade como a capacidade do ambiente em responder a essas influências e mudanças. O conceito de vulnerabilidade ambiental de Tagliani (2002) enfatiza a passividade do ambiente diante dos impactos antrópicos, reconhecendo a possibilidade de alterações e transformações na sua condição original.

3 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange a Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão (BHRB), situada em uma zona de transição entre a Bacia Costeira, caracterizada por um clima úmido, e a Bacia Potiguar, de clima semiárido. Ela se estende por uma área de 190 km² (Figura 2), completamente localizada no município de Touros, no estado do Rio Grande do Norte. As águas subterrâneas e a Lagoa do Boqueirão são os principais recursos hídricos utilizados pela população local, desempenhando um papel fundamental no abastecimento humano e na irrigação.

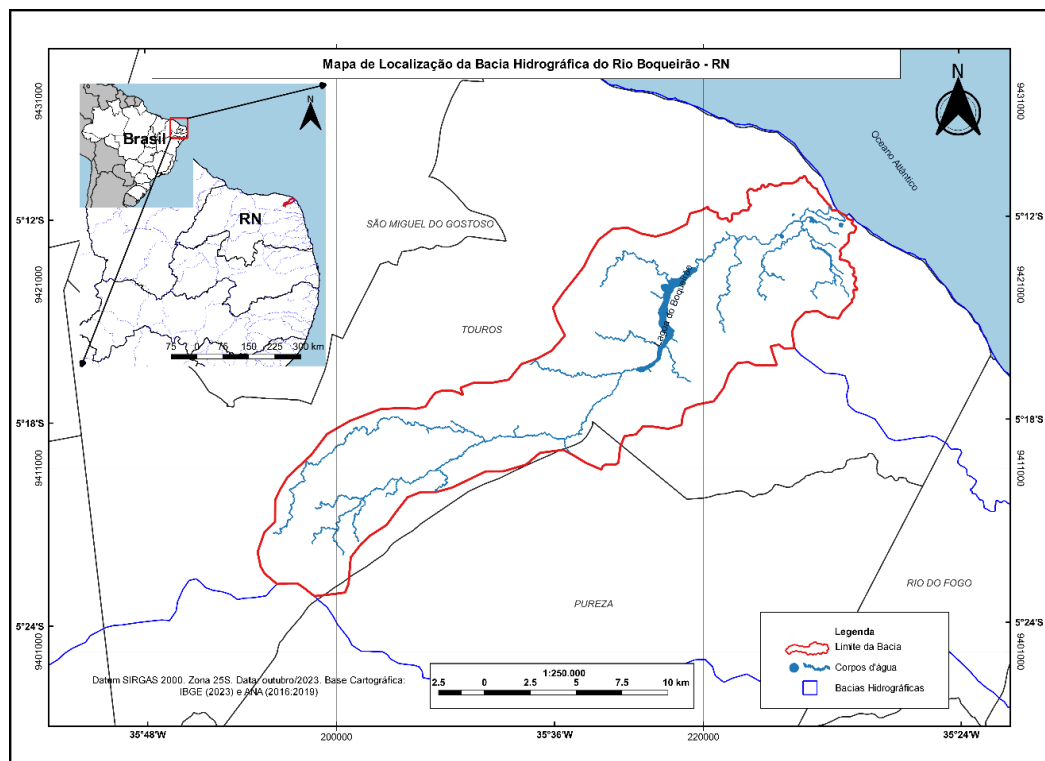


Figura 2 - Mapa de localização da Bacia do Rio Boqueirão/RN.

As características do meio físico e socioeconômico foram analisadas com base em levantamentos cartográficos e bibliográficos abrangendo temas como geologia, geomorfologia, solos, clima, hidrografia, vegetação e socioeconômico. Os mapas foram produzidos em escala 1:100.000, utilizando dados provenientes de órgãos públicos municipais, estaduais e federais. Esses dados foram coletados, consolidados e utilizados para análises e extração de informações, com o suporte de geoprocessamento e a implementação de um banco de dados geográficos.

3.1 Caracterização do meio físico da Bacia do Rio Boqueirão

3.1.1 Geologia

Do ponto de vista geológico, a área em questão é composta por um embasamento cristalino Pré-Cambriano, rochas sedimentares do Cretáceo pertencentes à Bacia Potiguar e depósitos terrígenos do Mioceno e Plioceno do Grupo Barreiras. Além disso, ocorrem depósitos marinhos, praias, eólicos e aluviais do Quaternário que recobrem essas unidades geológicas (BARRETO *et al.*, 2004). Na região da bacia, também são encontrados depósitos do Mesozoico e Cenozoico, conforme ilustrado na figura 2 (BARRETO *et al.*, 2002).

A Bacia Potiguar está localizada na interseção entre a Margem Continental Equatorial e a Margem Continental Leste Brasileira, abrangendo a metade norte do estado do Rio Grande do Norte e a região nordeste do Ceará. Sua área total é estimada em 60.000 km², dos quais 21.000 km² são emersos. A bacia abrange uma área estimada de 39.000 km² na plataforma e no talude continental (BERTANI *et al.*, 1990; ARARIPE & FEIJÓ, 1994; CALDAS, 1998).

Conforme relatado por Barreto *et al.* (2002), ao longo da costa próxima à região de Touros, existem importantes unidades litoestratigráficas, sendo elas as formações Jandaíra e Açú. A formação Jandaíra é composta por estruturas rochosas do período Cretáceo, contendo fósseis marinhos, enquanto a formação Açú é caracterizada por rochas siliciclásticas. Os depósitos continentais siliciclásticos do Mioceno-Plioceno da Formação Barreiras são encontrados acima dessas unidades (SUGUIO & NOGUEIRA, 1999). Esses depósitos são cobertos por depósitos marinhos, eólicos e aluviais do Quaternário. Além disso, os depósitos de terraços marinhos estão sobrepostos por depósitos eólicos e aluviais.

Os sedimentos quaternários (Pleistoceno Holoceno Superior) mapeados na área de estudo incluem depósitos eólicos, como dunas ativas, dunas inativas e lençóis de areia inativos, bem como depósitos marinhos, como regressões pleistocênicas, rochas de praias holocênicas e depósitos de maré atual (BARRETO *et al.*, 2004), coberturas detritos-laterítica Neo-Pleistocênica (IBGE, 2021). Com base em critérios morfológicos, sedimentológicos e biológicos, as dunas foram classificadas como ativas, inativas nítidas, inativas tênues e lençóis de areia inativos (BARRETO *et al.*, 2004). As dunas inativas apresentam idades que variam de cerca de 400.000 anos a algumas dezenas de anos. As dunas mais antigas coincidem aproximadamente com o máximo nível relativo do mar (NRM) holocênico na costa nordeste, enquanto as dunas mais recentes correspondem a porções recentemente expostas ou reativas dessas paleodunas.

As dunas, formadas no Quaternário, são resultado da acumulação de areias provenientes tanto das praias quanto das planícies costeiras ou aluviais expostas. A contribuição da Formação Barreiras como rocha-fonte variou de acordo com o grau de exposição e dissecação. Dados texturais e mineralógicos indicam que a Formação Barreiras atuou principalmente como fonte durante os períodos glaciais, em momentos de nível do mar mais baixo do que o atual (BARRETO *et al.*, 2004).

Os sedimentos marinhos mapeados próximos à área de estudo incluem depósitos de intermarés e inframarés pleistocênicos, que aparecem como falésias com diferentes tipos litológicos, além de depósitos de intermarés e inframarés holocênicos (rochas de praias), depósitos da planície de maré atual (BARRETO *et al.*, 2002; BARRETO *et al.*, 2004), aluviões, depósitos aluvionares e depósitos eólicos costeiros (IBGE, 2021). As características, descritas anteriormente, estão representadas na Figura 3.

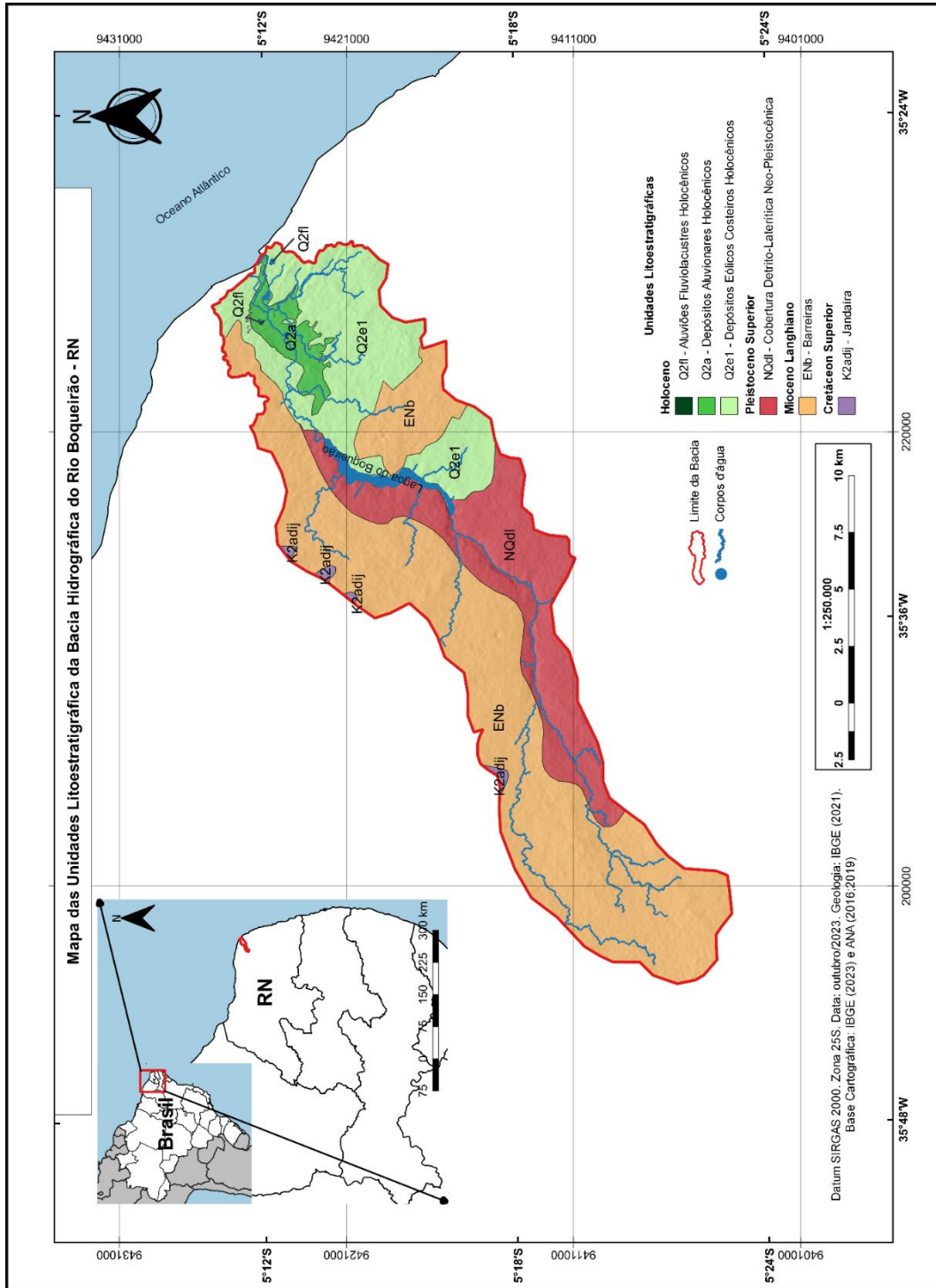


Figura 3 - Unidades Litoestratigráficas da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

3.1.2 Geomorfologia

De acordo com Barreto et al. (2004), a área costeira do Rio Grande do Norte é caracterizada pela presença contínua dos depósitos sedimentares da Formação Barreiras, formando uma superfície plana conhecida como tabuleiro, que é dissecada pela drenagem atual e suavemente inclinada em direção ao oceano. Os afloramentos da Formação Barreiras separam a região costeira da sublitorânea, terminando próximo ao mar em falésias, frequentemente ativas. As planícies costeiras com cristas de praia são pouco desenvolvidas ou inexistentes, indicando uma maior tendência à erosão do que à sedimentação.

Essa erosão é evidenciada pela presença constante de falésias com até 30-40 metros de altura, compostas não apenas pela Formação Barreiras, mas também por depósitos de paleopraias quaternárias, na forma de terraços de construção marinha e paleodunas. O retrabalhamento dos sedimentos praias por processos eólicos é uma característica marcante na área. Além disso, a amplitude de marés é de mesomaré (2 a 4 metros), e a atividade tectônica durante o Quaternário tem sido relevante na região (BEZERRA & VITA-FINZI, 2000). O mapa da Figura 4 mostra as unidades geomorfológicas da BHRB.

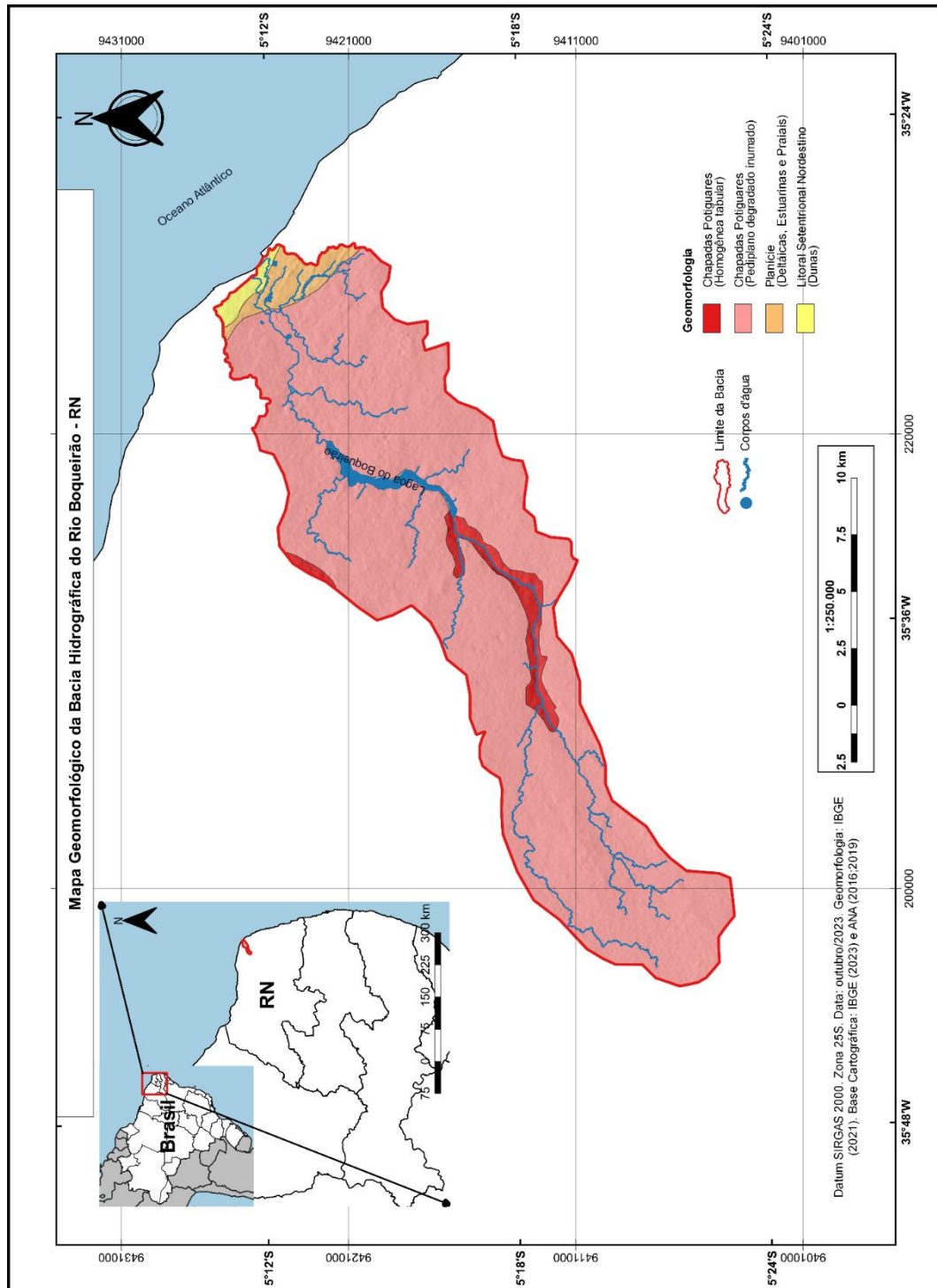


Figura 4 - Geomorfologia da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

3.1.3 Pedologia

Os solos encontrados na bacia são classificados como Latossolo Amarelo Distrófico e Neossolo Quartzarênico Órtico, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021) (Figura 5).

Os Neossolos Quartzarênicos Órticos ocupam a maior parte da bacia hidrográfica e são caracterizados por sua alta concentração de areia e baixo teor de argila e matéria orgânica (Figuras 4A e 4B). Esses solos são considerados jovens, com desenvolvimento limitado e horizontes pouco distintos. A designação "quartzarênico" indica a predominância de partículas de quartzo, conferindo uma textura arenosa ao solo. O termo "órtico" refere-se à presença de horizontes pouco desenvolvidos e pouco diferenciados (IBGE, 2021)

O Latossolo Amarelo Distrófico, ocupa uma parcela pequena da bacia, é um tipo de solo que se destaca por sua coloração amarela intensa e sua fertilidade naturalmente baixa (IBGE, 2021). Esses solos são altamente intemperizados, apresentando uma boa capacidade de drenagem, porém uma baixa capacidade de retenção de nutrientes. O adjetivo "distrófico" indica que esses solos possuem uma fertilidade natural reduzida, sendo necessário o fornecimento de nutrientes adicionais para o cultivo de plantas agrícolas. Os tipos de solos da bacia, podem ser visualizados na Figura 5.

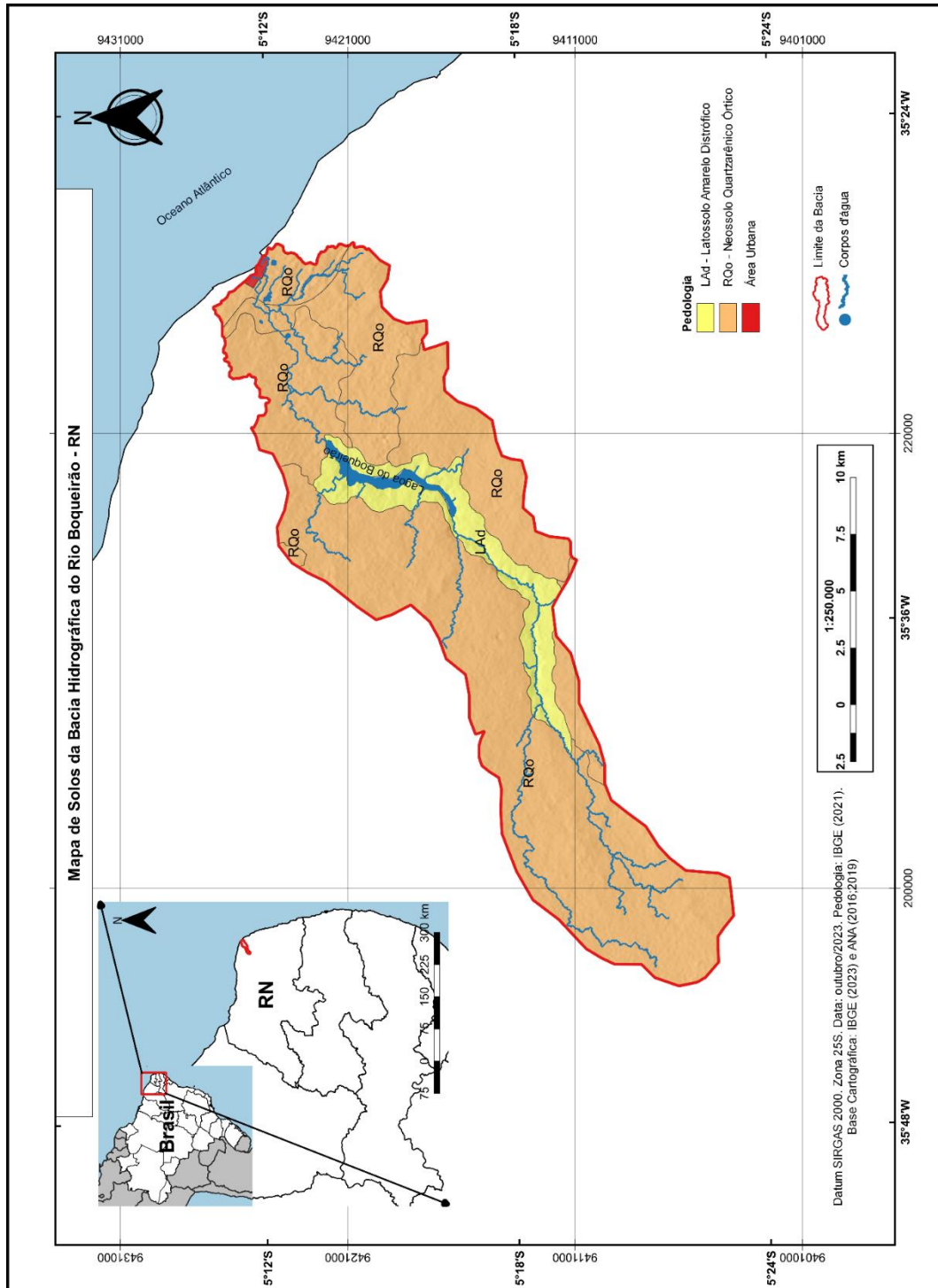


Figura 5 - Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

3.1.4 Clima

De acordo com a classificação do IBGE (2021), a bacia possui um clima classificado como "Tropical Nordeste Oriental, quente - média > 18°C em todos os meses, semiárido". O termo "semiárido" indica que a região sofre com um déficit hídrico significativo, com chuvas escassas e irregulares ao longo do ano. Essa condição afeta a precipitação média anual, resultando em um regime de chuvas insuficiente para sustentar a vegetação de forma contínua, representado na Figura 7.

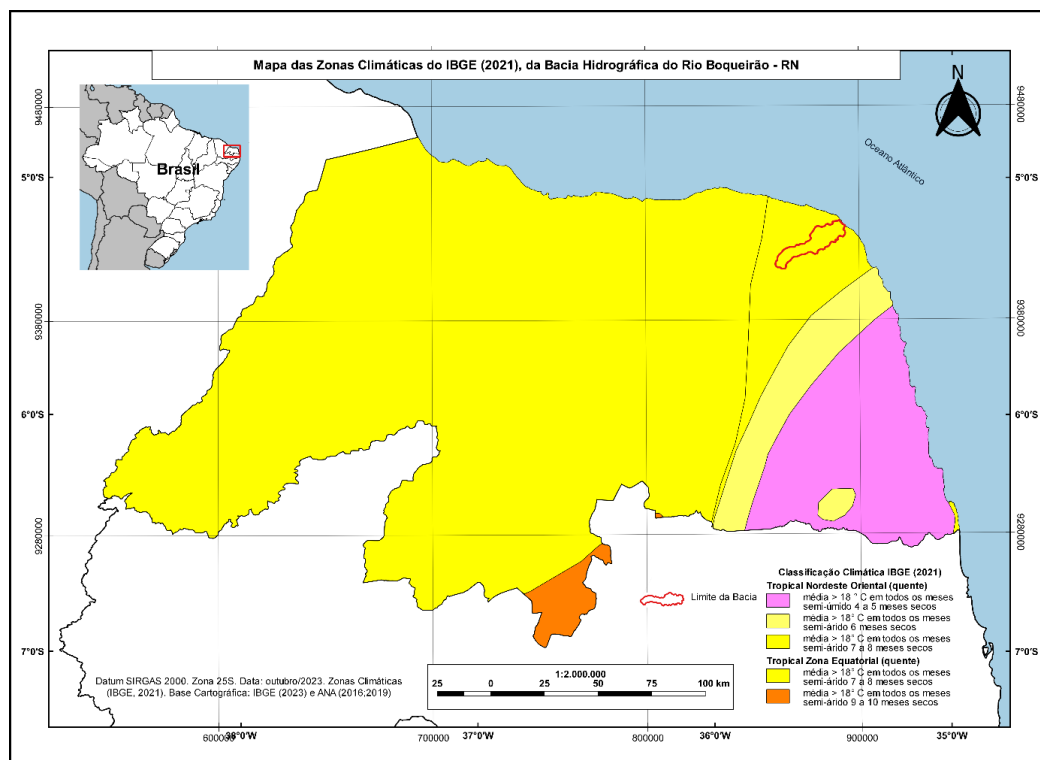


Figura 6 - Mapa de Zonas Climáticas do IBGE (2021) da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

Na BHRB o período chuvoso tem uma duração de aproximadamente 7 meses acima de 70 mm mensais, concentrando a maior parte das chuvas em um período específico do ano. Durante esses meses, há um aumento significativo na quantidade de chuva, o que contribui para a manutenção dos recursos hídricos e a sobrevivência da vegetação local. O clima apresenta uma característica quente, com médias de temperatura superiores a 18°C em todos os meses, refletindo condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento de um clima tropical, com temperaturas elevadas ao longo de todo o ano, observado na Figura 8. O gráfico representa da Figura 7 mostra uma série histórica de precipitação mensal no município de Touros (RN).

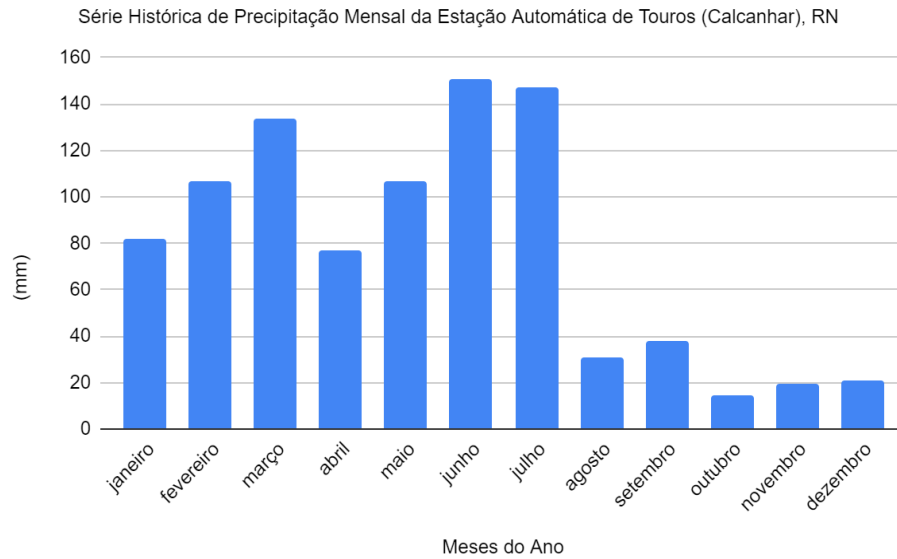


Figura 7 - Gráfico representando série histórica (2012 a 2022) da precipitação anual do município de Touros/RN.

A BHRB apresenta índices pluviométricos que variam de 17 mm a 150 mm mensais, registrados em uma estação pluviométrica que está localizada na cidade de Touros, a estação Calcanhar.

O quadrimestre mais chuvoso ocorre de março a junho. Já o quadrimestre mais seco se estende de agosto a dezembro. O mês com maior intensidade de chuvas é junho, enquanto o mês mais seco é outubro (Figuras 8 e 9).

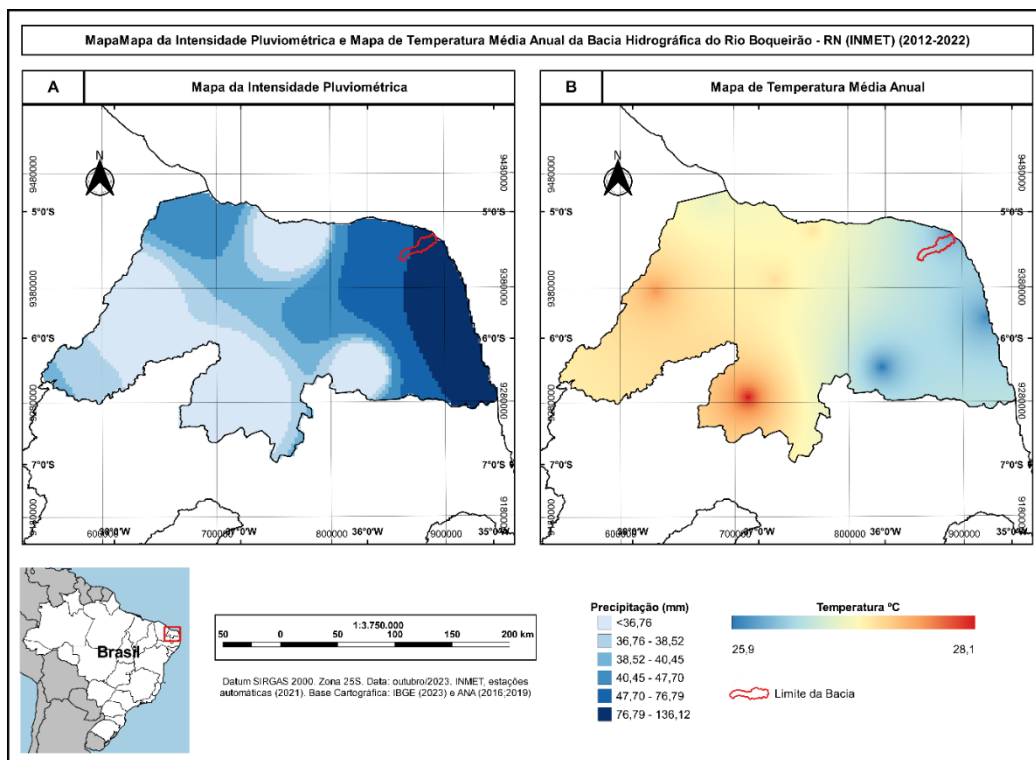


Figura 8 - 8A e 8B: Mapa de Precipitação Média Anual e Mapa de Temperatura Média Anual da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN, respectivamente.

3.1.5 Hidrografia

A hidrografia desempenha um papel fundamental na caracterização do meio físico, sendo uma das principais variáveis utilizadas para compreender a dinâmica de formação de uma bacia hidrográfica. Ela proporciona uma avaliação das diversas dinâmicas, interações ecossistêmicas e fluxos de massa que ocorrem na região. Ao analisar a hidrografia, é possível obter insights sobre os padrões de drenagem, fluxo de água, distribuição de rios, lagos e outras formas de corpos d'água presentes na bacia. Essas informações são essenciais para compreender o funcionamento do ecossistema, as interações entre os elementos naturais e as implicações para a sustentabilidade e gestão dos recursos hídricos.

A Lagoa do Boqueirão está localizada em uma área que abrange os sedimentos das dunas e da Formação Barreiras e apresenta uma estreita relação entre as águas subterrâneas e as águas superficiais, sendo parcialmente abastecida pelas águas subterrâneas provenientes de duas frentes de escoamento bem definidas: uma no setor sul-sudoeste e outra a leste do corpo d'água, além de receber água do rio Boqueirão (MELO, 2005).

Na Lagoa do Boqueirão, existe uma situação equilibrada entre o influxo e o defluxo do aquífero, o que é evidenciado pela manutenção do seu tamanho e pela persistência do defluxo fluvial. Isso indica que a quantidade de água que entra na lagoa é compensada pela quantidade que sai, resultando em um equilíbrio hidrológico. A Figura 9 mostra a rede de drenagem da bacia onde se observa uma baixa densidade de canais fluviais devido à alta porosidade e permeabilidades dos solos e coberturas superficiais associadas.

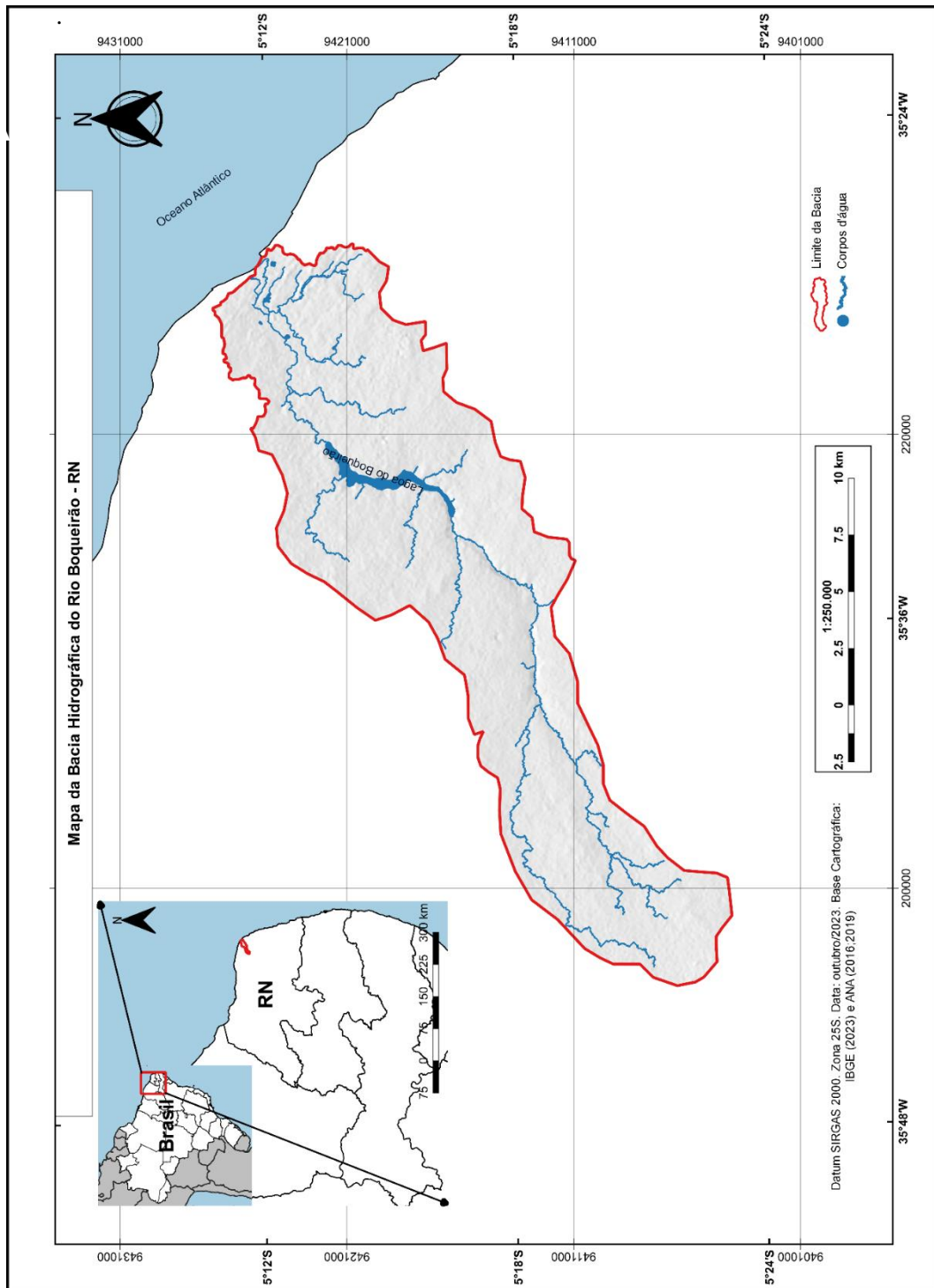


Figura 9 - Mapa da Hidrografia da Bacia do Rio Boqueirão/RN.

3.1.6 Vegetação

A BHRB, possui pequenas áreas cobertas por vegetação nativa e vegetação em estágios de sucessão. No entanto, devido às formas de cultivos na agricultura, houve supressão da vegetação, como desmatamento para agricultura, práticas pecuárias, por exemplo (IBGE, 2021). Essas atividades têm sido responsáveis pela diminuição da cobertura vegetal na

região (Figura 10).

A Formação Pioneira com Influência Marinha refere-se a áreas costeiras sujeitas à influência direta do Oceano (IBGE, 2021). É caracterizada por vegetação pioneira, que se desenvolve em solos arenosos e salinos, enfrentando condições adversas como ventos fortes, alta salinidade e inundação periódica. Essa formação apresenta espécies adaptadas a ambientes litorâneos, como gramíneas, arbustos e algumas árvores de pequeno porte.

A Formação Pioneira com Influência Marinha-Herbáceo está relacionada às áreas costeiras com influência marinha, caracterizadas pela presença predominante de plantas herbáceas (IBGE, 2021). São formações vegetais rasas, compostas por gramíneas, arbustos e ervas, que se adaptam às condições de salinidade e exposição ao vento.

A Formação Contato (Ecótono) (Savana/Formações Pioneiras) representa o contato entre a savana (ou cerrado) e as formações pioneiras. É um ecótono caracterizado pela transição gradual entre esses dois tipos de vegetação (IBGE, 2021). Nesse ambiente, é possível encontrar uma mistura de espécies características das savanas, como gramíneas e árvores espaçadas, com espécies pioneiras, adaptadas a solos mais pobres e sujeitos a perturbações.

A Formação Contato (Ecótono) (Savana/Savana-Estépica) representa o contato entre a savana e a savana-estépica (IBGE, 2021). A savana-estépica é uma forma de savana que ocorre em regiões com menor disponibilidade de água e solos mais secos. O ecótono entre esses dois tipos de vegetação exibe uma transição gradual, com a presença de espécies de ambas as formações.

A Savana Arborizada refere-se a uma savana com maior densidade de árvores e arbustos em relação à savana aberta. É caracterizada pela presença de árvores espaçadas, entre as quais predominam espécies adaptadas à sazonalidade climática e ao fogo recorrente (IBGE, 2021). Essa formação vegetal combina características de savanas e florestas, apresentando uma cobertura arbórea mais densa do que a savana aberta.

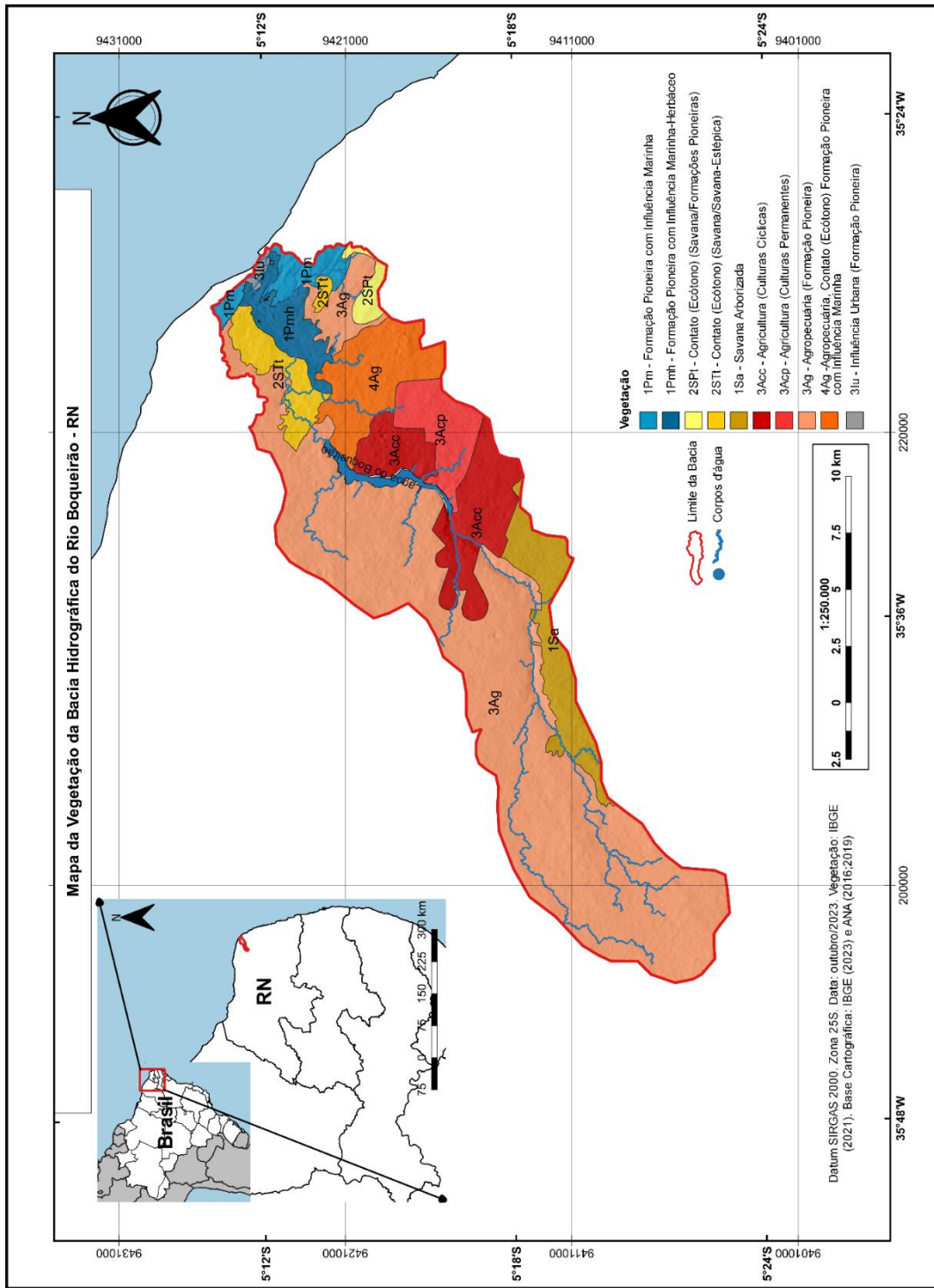


Figura 10 - Mapa da Vegetação da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

3.1.7 Dados Socioeconômicos do Município de Touros

Os dados fornecidos pelo IBGE constituem a principal fonte para a construção do perfil socioeconômico da BHRB, sendo considerada a base mais abrangente em relação a indicadores como educação, saúde, renda, moradia e demografia. Levando em consideração a área estudada, a qual está totalmente inserida no município de Touros os dados são relacionados a esse município.

Segundo o IBGE (2022), a população do município de era de 33.035 habitantes, resultando em uma densidade demográfica de 43,82 habitantes por quilômetro quadrado. Em relação aos demais municípios do estado, o município ocupava as posições 16 e 69, respectivamente, dentre 167. Ao considerar a comparação nacional, sua posição era a 997ª em termos de população e a 1681ª em densidade demográfica, em um total de 5570 municípios no país.

No ano de 2021, o salário médio mensal atingiu a marca de 1,9 salários mínimos. A proporção de pessoas ocupadas em relação à população total foi de 9,73% (IBGE, 2021).

Considerando os domicílios com rendimentos mensais de até meio salário mínimo por pessoa, observou-se que 52% da população estava enquadrada nessa faixa. Esse percentual colocou o município na 41ª posição de 167 quando comparado às cidades do estado do Rio Grande do Norte (IBGE, 2021).

No ano de 2010, a taxa de escolarização para a faixa etária de 6 a 14 anos atingiu notáveis 99,2%. Quanto ao Índice de Desenvolvimento da Educação Básica (IDEB) em 2021, os resultados revelaram um desempenho consistente. Para os anos iniciais do ensino fundamental na rede pública, o IDEB alcançou 4,3, repetindo-se o mesmo índice para os anos finais (IBGE, 2021).

No ano de 2021, o Produto Interno Bruto (PIB) per capita do município alcançou a marca de R\$ 24.167,89. Quanto ao percentual de receitas externas em 2015, registrou-se um valor significativo de 89,7%, situando o município na 100ª posição entre os 167 municípios do estado e na 2246ª posição entre todos os 5570 municípios do país (IBGE, 2021).

Em relação às finanças municipais em 2017, o município apresentou um total de receitas realizadas de R\$ 70.283,39 (em milhares de reais) e um total de despesas empenhadas de R\$ 63.216,58 (em milhares de reais) (IBGE, 2021).

O município apresenta uma taxa média de mortalidade infantil de 11,96 para cada 1.000 nascidos vivos. Além disso, as internações devido a diarreias foram registradas em 0,1 para cada 1.000 habitantes (IBGE, 2021).

Todos esses dados, em conjunto, proporcionam uma compreensão abrangente do panorama socioeconômico de Touros, evidenciando desafios e potencialidades para orientar futuras políticas e intervenções no desenvolvimento do município.

4 METODOLOGIA GERAL

Os procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa envolvem uma abordagem baseada no levantamento da literatura para obter embasamento teórico, conceitual e metodológico, utilizando o método da análise integrada na perspectiva sistêmica da área de estudo. Além disso, foi realizado um levantamento de materiais cartográficos relevantes para o estudo.

Posteriormente, foram realizadas etapas de trabalho de campo como forma de reconhecimento, e posteriores interpretações mais precisas e relevantes para a pesquisa. Para auxiliar na elaboração e interpretação dos mapas de vulnerabilidade natural e ambiental, foram empregadas técnicas de geoprocessamento, que serviram como um importante instrumento de apoio na análise dos dados coletados.

Dessa forma, a pesquisa adotou uma abordagem multidisciplinar, combinando com análise teórica, levantamento de dados de campo (Figura 11) e utilização de técnicas avançadas de geoprocessamento, visando obter uma compreensão abrangente e aprofundada da área de estudo e sua vulnerabilidade natural e ambiental.

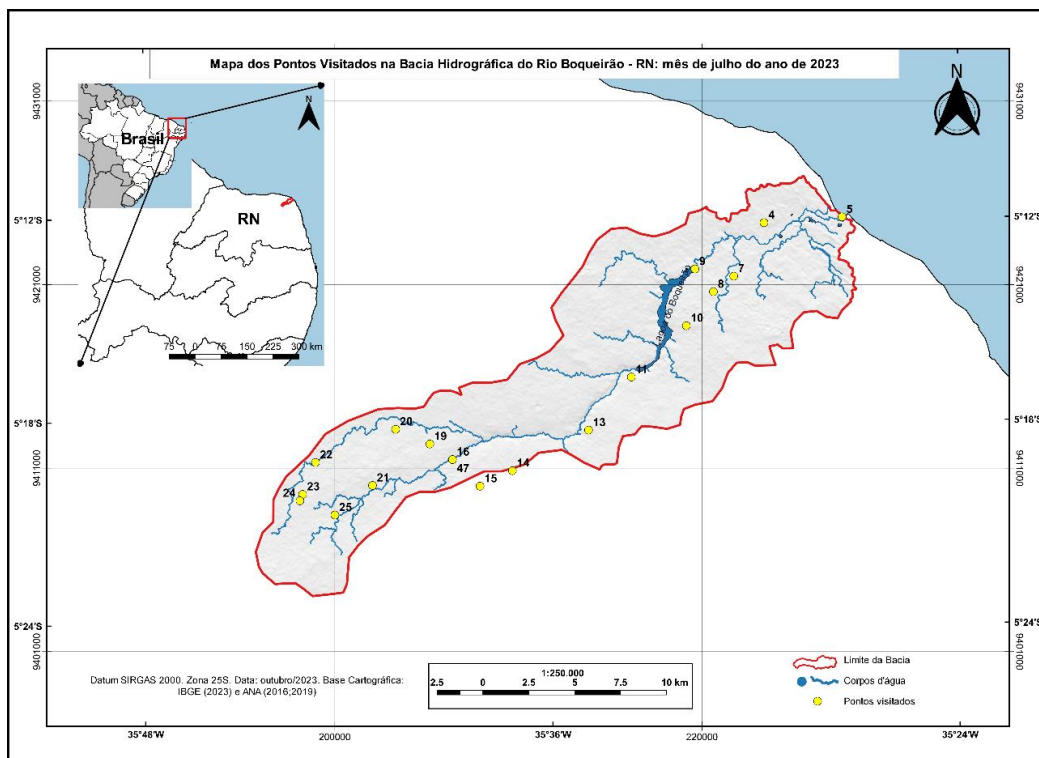


Figura 11 - Mapa dos pontos visitados em campo realizado em julho de 2023.

As visitas de campo realizadas em julho de 2023, novembro de 2023 e julho de 2024, tiveram o objetivo de conhecer as características do meio físico e os aspectos relacionados ao uso e ocupação da bacia hidrográfica. Para isso, foram utilizadas imagens do Google Earth, mapas e um GPS Etrex Garmin Venture para obter as coordenadas UTM de cada local visitado. Todos os dados foram registrados em uma caderneta de campo e fotografados para colaborar com as interpretações das cartografias (Figura 11).

A análise da vulnerabilidade natural e ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão tomou como referência critérios de avaliação dos aspectos ambientais e antrópicos, na representação da superfície terrestre. A partir disso, com base na aplicação da metodologia de Crepani *et al.*, (2001) buscou-se identificar e mensurar o grau de vulnerabilidade natural e ambiental referentes aos indicadores geoambientais, apresentando, assim, os efeitos das ações antrópicas no meio ambiente.

A aplicabilidade do conceito de vulnerabilidade natural e ambiental, neste estudo, foi fundamentada na adaptação do conceito de ecodinâmica proposto por Tricart (1977). Nessa abordagem, foram consideradas as exposições dos ambientes aos riscos e perturbações decorrentes das atividades humanas, como o uso da terra e seus impactos ambientais, bem como suas consequências para o meio ambiente.

As informações e dados secundários relacionados à bacia foram coletados a partir de diversas fontes, tanto de órgãos públicos quanto privados, conforme apresentado no Tabela 1. Esses dados secundários foram utilizados como referência para a pesquisa inicial para fins de gerar a vulnerabilidade natural.

Tabela 1 - Dados obtidos por órgãos, escala, variáveis e ano de publicação.1 - Dados obtidos por órgão, escala, variáveis e ano de publicação.

Produto	Órgão/Autor	Escala	Camada	Variáveis	Ano
Geomorfologia	IBGE	1:250.000	Vetorial.	Unidades geomorfológicas	2021
Clima	IBGE	1:5.000.000	Vetorial	Zonas Climáticas	2021
Precipitação	INMET	Estadual	Planilha	Precipitação Mensal	2023
Temperatura	INMET	Estadual	Planilha	Temperatura Mensal	2023
Pedologia	IBGE	1:250.000	Vetorial	Nomenclatura dos solos (ordem).	2021
Geologia	IBGE	1:250.000	Vetorial	Unidades geológicas e tempo geológico.	2021
Vegetação	IBGE	1:250.000	Vetorial	Área de vegetação.	2023
Hidrografia	ANA	1:1.000.000	Vetorial	Bacias Hidrográficas, Massas d'Água; Cursos d'Água.	2016;2019
TOPODATA	INPE	1:250.000	Raster (SRTM)	Topografia/Declividade.	2011
Base Cartográfica	IBGE	1:250.000	Vetorial	Limites Territoriais (Estados e municípios)	2021
Uso e Cobertura da Terra	Autora	1:250.000	-	Bacia Hidrográfica	2024

Para execução do trabalho, foram utilizados dados espaciais no software livre QGis versão 3.28.5. Os dados espaciais foram modelados, importados, processados e armazenados, utilizando-se de sistema gerenciador do software. A projeção empregada foi a Universal Transversal de Mercator (UTM) e o Datum Sirgas 2000, EPSG 31985, zona 25S. Os arquivos vetoriais do tipo *shapefile* foram utilizados para os seguintes dados: bacia hidrográfica; base cartográfica; localização; geologia; vegetação; pedologia; geomorfologia; clima e precipitação.

Os dados referentes à base cartográfica para a vegetação, pedologia, geologia e geomorfologia foram obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística –IBGE, (IBGE, 2021).

Para calcular a precipitação média anual, foram coletados dados de precipitação mensal no

período de 2012 a 2022 (INMET, 2023). A coleta envolveu a obtenção dos valores de precipitação para cada mês ao longo desses anos. Em seguida, os valores de precipitação mensal foram somados para cada ano. A soma total da precipitação de todos os anos foi dividida pelo número de anos considerados. Esse procedimento permitiu obter um valor médio que representa a quantidade média de precipitação ocorrida anualmente durante o período de estudo.

Os dados foram tratados no Google Planilhas e importados para usá-los como camadas de atributos no projeto do QGIS. Em seguida, realizou-se a interpolação, que é um processo utilizado para estimar valores desconhecidos em locais não amostrados com base em observações disponíveis em pontos amostrais, já que existem somente 8 estações automáticas do INMET no estado. O QGIS possui diferentes algoritmos de interpolação e utilizou-se o IDW (Inverse Distance Weighting), um método que atribui pesos aos pontos amostrais com base em sua proximidade aos pontos desconhecidos. Quanto mais próximos os pontos amostrais estiverem, maior será sua influência na estimativa do valor desconhecido.

Para calcular a média anual de temperatura, coletou-se os dados de temperatura mensal ao longo de 2012 a 2022, no INMET (2023). Somou-se os valores de temperatura mensal para cada mês do ano, e posteriormente, dividiu-se a soma total da temperatura de todos os anos pelo número de anos considerados. Isso resultou na média anual de temperatura, de acordo com a fórmula abaixo:

$$\text{Fórmula 1: } \textit{Média anual de temperatura} = \frac{\sum \textit{temperaturas mensais}}{\textit{número de anos}}$$

Os dados relacionados à hidrografia, incluindo os limites da bacia, divisão administrativa regional e rede hidrográfica, foram obtidos na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2016; 2019).

A rede de drenagem foi obtida a partir da extração automática com o software TerraHidro 0.42 (x86) baseada no Modelo Digital de Elevação (MDE) Also Palsar com resolução interpolada de 12,5 m.

A elaboração do mapa de uso e cobertura da terra da Bacia do Rio Boqueirão foi realizada utilizando sensoriamento remoto e uma abordagem de classificação supervisionada no software QGIS. Foram empregadas imagens do satélite CBERS-4A, que possui alta resolução espacial e espectral, proporcionando uma análise detalhada das diferentes classes de uso do solo. As imagens, adquiridas em 24 de julho de 2021, passaram por correções radiométricas, geométricas e atmosféricas.

O processo de desenvolvimento do estudo seguiu diversas etapas. Primeiramente, foram adquiridas imagens de satélite com alta resolução espacial e espectral adequadas para a área de

estudo.

Em seguida, as imagens foram submetidas a um processo de pré-processamento, incluindo a montagem das bandas e a correção atmosférica para eliminar interferências atmosféricas, como brilho e contraste.

A etapa subsequente envolveu a seleção de áreas de treinamento, onde foram identificadas regiões na imagem representando diferentes classes, tais como agricultura, edificações, corpos d'água, entre outras. Essas áreas foram marcadas como "áreas de treinamento" e, a partir delas, foram extraídas assinaturas espectrais, representando padrões característicos de cada categoria de uso e cobertura da terra. Para garantir a precisão do mapeamento, foram conduzidas avaliações de precisão comparando as áreas classificadas com dados de referência de campo ou imagens de alta resolução espacial.

Posteriormente, foram feitos ajustes e o refinamento da classificação. Posteriormente foram feitos ajustes para o refinamento da classificação aplicado ao mapa de uso e cobertura da terra utilizando técnicas de pós-processamento. Ao final do processo, foi obtido o mapa final de uso e cobertura do solo, representando com precisão as diferentes categorias na área de estudo.

O mapa de Uso e Cobertura da terra foi com base nas categorias fornecidas pelo MapBiomias (2021), identificamos as seguintes áreas: Campo Antropizados, Restinga, Área alagada, Reservatórios, Cobertura Florestal Areia/Dunas/Praia, Formação Campestre, Área Desmatada e Área Urbana. A elaboração do mapa ocorreu por meio de sensoriamento remoto, onde cada pixel é atribuído a uma classe específica.

A avaliação da vulnerabilidade pode abranger diversas áreas, incluindo mudanças climáticas, gestão de riscos e desastres, ações humanas e desenvolvimento econômico regional. Quando se trata de vulnerabilidade ambiental, o foco está nas características ambientais e nos impactos causados pela atividade humana. O objetivo dessas avaliações é desenvolver diagnósticos e prognósticos para reduzir os riscos e promover a conservação de áreas vulneráveis, visando assim a proteção do meio ambiente e a segurança das comunidades.

A análise espacial dessas informações sobre as vulnerabilidades natural e ambiental de uma área desempenha um papel fundamental na tomada de decisões, ao integrar aspectos como exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa de uma área como componentes da vulnerabilidade física (WEIS *et al.*, 2016).

Crepani *et al.* (2001) propuseram uma classificação do grau de vulnerabilidade de uma região, relacionando a resistência ao processo natural de erosão. Nesta classificação, são atribuídos valores de 1,0 a 3,0, onde valores mais próximos a 1,0 caracterizam áreas mais estáveis, onde predomina a pedogênese. Por outro lado, valores mais próximos a 3,0 caracterizam áreas mais

instáveis, onde predomina a morfogênese. Os valores próximos a 2,0 indicam um equilíbrio entre ambos os processos (Tabela 2).

Adotou-se nesse estudos a proposta de Crepani *et al.* (2001) cuja metodologia possibilita avaliar a vulnerabilidade natural à perda de solo, visando subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia,

Na aplicação dos procedimentos metodológicos foram consideradas cinco variáveis (geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e intensidade pluviométrica), as quais foram submetidas a uma análise morfodinâmica baseada no Princípio da Ecodinâmica de Tricart (1977). Durante essa análise, cada unidade foi atribuída a valores variando de 1 a 3 para definir a relação entre morfogênese e pedogênese: 1 indicava a predominância da morfogênese (com predomínio dos processos erosivos), 2 representava um equilíbrio entre ambos os processos e 3 indicava a predominância da pedogênese (com maior influência dos processos formadores dos solos).

Com base nessa primeira classificação, os autores desenvolveram uma escala de vulnerabilidade composta por 21 classes, distribuídas em um intervalo de 1 a 3. Cada classe foi associada a uma cor, resultante de combinações de vermelho, verde e azul, como demonstrado na Tabela 2.

Essa escala foi empregada na elaboração dos mapas para determinar a vulnerabilidade de cada elemento das unidades temáticas. Posteriormente, foi calculado um valor final para a vulnerabilidade ambiental de toda a bacia, por meio da média aritmética entre todas as variáveis consideradas.

Baseado na metodologia de Crepani *et al.* (2001), Grigio *et al.* (2006) adaptaram e desenvolveram o Índice de Vulnerabilidade Ambiental, adaptando-a para incluir o Uso e Ocupação da Terra como uma variável representativa da ação antrópica na região de Guamaré, localizada no estado do Rio Grande do Norte. Nos mapas de geologia, geomorfologia e solos, as unidades seguiram os valores de definição da relação morfogênese/pedogênese mencionados anteriormente, com escalas variando de 1 a 3 e intervalos de 0,5. Para o mapa de vegetação, foram adotadas notas relacionadas ao grau de diversidade das espécies (1,0 - alta; 2,0 - média; 3,0 - baixa). Os valores atribuídos à variável uso e ocupação foram determinados com base no grau e tipo de antropização da área, seguindo a mesma escala das variáveis geologia, geomorfologia e solos.

Esses procedimentos metodológicos são amplamente utilizados em estudos para identificar áreas vulneráveis a mudanças climáticas, aumento do nível médio do mar e impactos da ação humana. Na bacia hidrográfica do Rio Doce/RN, Costa *et al.*, (2019) realizou uma análise para determinar a vulnerabilidade natural e ambiental, visando fornecer subsídios para o planejamento e a gestão ambiental abrangentes da bacia.

Tabela 2 - Escala de vulnerabilidade das Unidades Temáticas para determinação da vulnerabilidade natural à perda de solo.

UNIDADE DE PAISAGEM	VALORES	GRAU DE VULNERABILIDADE	GRAU DE SATURAÇÃO			
			VERMELHO	VERDE	AZUL	CORES
U1	3,0	Vulnerável	255	0	0	
U2	2,9		255	51	0	
U3	2,8		255	102	0	
U4	2,7		255	153	0	
U5	2,6	Moderadamente Vulnerável	255	204	0	
U6	2,5		255	255	0	
U7	2,4		204	255	0	
U8	2,3	Medianamente Estável/Vulnerável	153	255	0	
U9	2,2		102	255	0	
U10	2,1		51	255	0	
U11	2,0		0	255	0	
U12	1,9	Moderadamente Estável	0	255	51	
U13	1,8		0	255	102	
U14	1,7		0	255	153	
U15	1,6		0	255	204	
U16	1,5	Estável	0	255	255	
U17	1,4		0	204	255	
U18	1,3		0	153	255	
U19	1,2		0	102	255	
U20	1,1		0	51	255	
U21	1,0		0	0	255	

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001).

A escala de representação da cartográfica desta pesquisa é de média a pequena, portanto, de cunho e natureza regional.

Os procedimentos metodológicos adotados nessa etapa da pesquisa, desde o levantamento bibliográfico a obtenção dos dados até a interpretação dos mapas cartográficos, permitiram uma abordagem abrangente e embasada da área de estudo proporcionando uma compreensão mais profunda e abrangente dos aspectos ambientais e climáticos relacionados à bacia hidrográfica em questão.

5 CAPÍTULO 1: VULNERABILIDADE NATURAL À PERDA DE SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BOQUEIRÃO/RN

MARIA DENIZE DA COSTA¹, SEBASTIÃO MILTON PINHEIRO DA SILVA²

¹ Mestranda do Programa de PósGraduação em Desenvolvimento Regional – PRODEMA/RN. costdenz@gmail.com; ²Departamento de Geografia da UFRN. sebastiaomilton@gmail.com

ESTE ARTIGO FOI SUBMETIDO AO PERIÓDICO REVISTA BRASILEIRA DE GEOGRAFIA FÍSICA E, PORTANTO, ESTÁ FORMATADO DE ACORDO COM AS RECOMENDAÇÕES DESTA REVISTA (acessar em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/index>)

RESUMO

A análise da vulnerabilidade natural à perda de terra foi realizada na bacia hidrográfica do Rio Boqueirão, localizada em uma região de transição entre a Bacia Costeira e a Bacia Potiguar, com características climáticas úmidas e semiáridas, respectivamente. A metodologia adotada considerou aspectos como Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação e Clima, aplicados individualmente a cada unidade territorial básica. Por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) foram determinados os índices de vulnerabilidade para cada aspecto das unidades territoriais básica se com álgebra de mapas determinou-se os níveis de vulnerabilidade natural à perda de solo. Os resultados indicaram que cerca de 55,0% da área da bacia do Rio Boqueirão apresenta predominância de níveis medianamente vulneráveis. A bacia encontra-se em uma faixa que varia de medianamente estável vulnerável (1,8) a moderadamente vulnerável (2,4), ressaltando a importância de adotar medidas de proteção e gestão da bacia. Essas conclusões destacam a necessidade de um monitoramento contínuo e a implementação de estratégias de manejo adequadas para mitigar possíveis impactos e garantir a estabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Boqueirão, considerando ainda o avanço acelerado do uso da terra para a agricultura em larga escala.

Palavras-Chave: Bacia Hidrográfica, Vulnerabilidade, Erosão do solo, SIG

ABSTRACT

The analysis of natural vulnerability to soil loss was conducted in the Boqueirão River watershed, located in a region transitioning between the Coastal Basin and the Potiguar Basin, with humid and semi-arid climatic characteristics, respectively. The adopted methodology considered aspects such as Geology, Geomorphology, Soils, Vegetation, and Climate, individually applied to each basic territorial unit. Through a Geographic Information System (GIS), vulnerability indices were determined for each aspect of the basic territorial units, and by using map algebra, the levels of natural vulnerability to soil loss were determined. The results indicated that approximately 55.0% of the Boqueirão River watershed area presents a predominance of moderately vulnerable levels. The watershed ranges from moderately stable vulnerable (1.8) to moderately vulnerable (2.4),

highlighting the importance of adopting protection and management measures for the watershed. These conclusions underscore the need for continuous monitoring and the implementation of appropriate management strategies to mitigate potential impacts and ensure the environmental stability of the Boqueirão River watershed, considering the rapid advancement of large-scale agriculture land use.

Keywords: Hydrographic basin, Vulnerability, Soil erosion, GIS (Geographic Information System)

INTRODUÇÃO

Com o aumento da população e o conseqüente desenvolvimento acelerado do processo produtivo, os recursos naturais estão sendo explorados de forma mais intensa (PEREIRA *et al.* 2011).

O mapeamento da vulnerabilidade natural à perda da terra é uma avaliação relevante para o planejamento e gestão territorial e ambiental a qual identifica áreas suscetíveis à erosão e ajuda os órgãos públicos a tomar medidas preventivas (ROCKETT *et al.* 2014).

A compreensão da vulnerabilidade natural e ambiental de uma região, juntamente com o estudo da resposta dos atributos físicos e químicos do solo em relação ao uso e ocupação, pode ser uma ferramenta valiosa como um "sistema de alerta precoce" (AQUINO; PALETTA; ALMEIDA, 2017).

A exploração desordenada dos recursos naturais e o uso inadequado da terra têm resultado em degradação ambiental em diversos ecossistemas. Para alcançar o desenvolvimento sustentável, é crucial levar em consideração a vulnerabilidade dos ambientes naturais diante das interações das atividades humanas com o meio ambiente (CHOUDHARY; SINGH; KUPRIYANOV *et al.* 2018).

O estudo em bacias hidrográficas é importante, pois nos fornecem um recorte natural para a análise integrada do ambiente, onde ocorrem diversas formas de intervenção no espaço, tanto de origem natural quanto antrópica (SANTOS *et al.* 2022).

Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho é investigar a vulnerabilidade natural da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão em relação à perda de solo. Isso envolve a identificação e mapeamento das unidades territoriais básicas, a aplicação de álgebra de mapas para produzir uma síntese cartográfica e a avaliação da influência natural da vulnerabilidade à perda de solo na bacia.

MATERIAIS E MÉTODOS

Localização da área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Boqueirão está localizada no estado do Rio Grande do Norte, no Brasil. É uma das várias bacias hidrográficas presentes no estado e desempenha um papel importante no desenvolvimento de atividades agrícolas da região (IBGE, 2023). Com uma extensão de 250,50 km², a bacia representa aproximadamente 0,5% do território estadual (**Figura 1**). Essa região é caracterizada por uma diversidade de ambientes, com relevos variados, como planícies costeiras, colinas e pequenas serras, contribuindo para a heterogeneidade da paisagem local situada em uma zona de transição entre a Bacia Costeira, caracterizada por um clima úmido, e a Bacia Potiguar, de clima semiárido (IBGE, 2023).

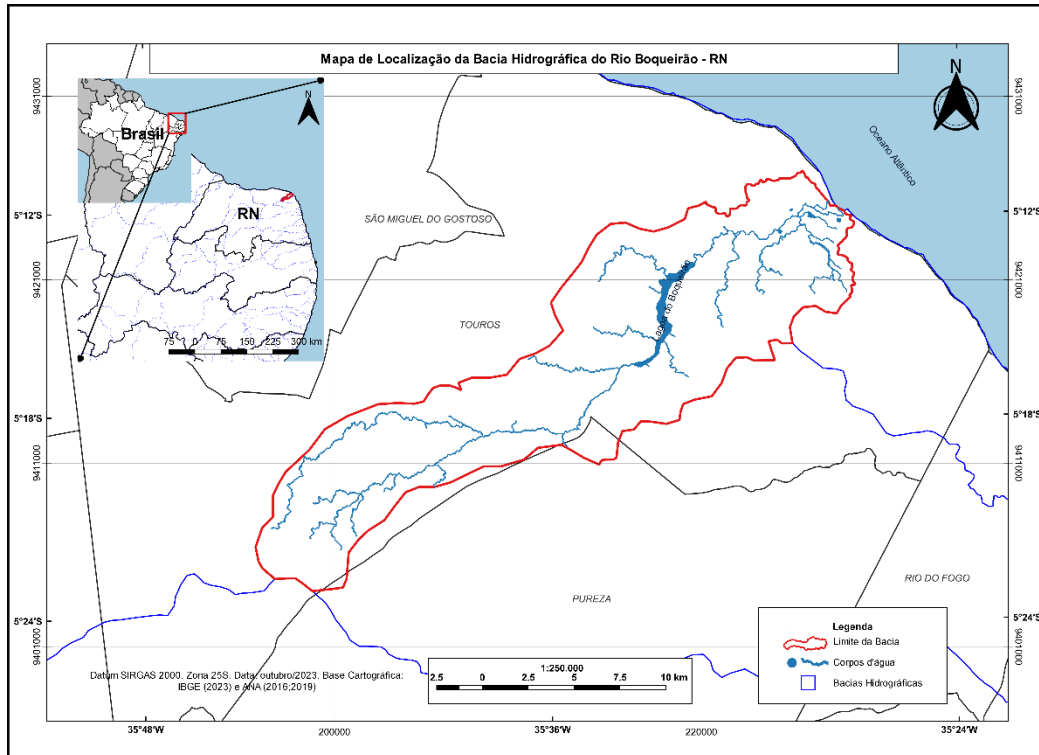


Figura 1 - Mapa de localização da Bacia do Rio Boqueirão/RN.

Banco de dados

Para execução do trabalho, foram utilizados dados espaciais em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando-se para isso o *software* livre QGIS v. 3.28.5. Os dados espaciais foram modelados, importados, processados e armazenados, utilizando-se a projeção Universal Transversal de Mercator -UTM e o Datum SIRGAS 2000 (EPGS 4674) ZONA25S. Os arquivos vetoriais do tipo *shapefile* foram utilizados para os seguintes dados: bacia hidrográfica; base cartográfica; geologia; vegetação; pedologia; climatologia; hidrologia e geomorfologia.

Os dados utilizados foram obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2016; 2019) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023) representados na **Tabela 1**.

Tabela 1: Dados obtidos por órgão, escala, variáveis e ano de publicação para a pesquisa.

Produto	Órgão/Autor	Escala	Camada	Variáveis	Ano
Geomorfologia	IBGE	1:250.000	Vetorial.	Unidades geomorfológicas.	2021
Clima	Alvares et al.	1:5.000.000	Raster	Classificação Climática	2013
Clima	IBGE	1:5.000.000	Vetorial	Zonas Climáticas	2021
Precipitação	INMET	Estadual	Planilha	Precipitação Mensal	2023
Temperatura	INMET	Estadual	Planilha	Temperatura Mensal	2023
Pedologia	IBGE	1:250.000	Vetorial	Nomenclatura dos solos (ordem).	2021
Geologia	IBGE	1:250.000	Vetorial	Unidades geológicas e tempo geológico.	2021
Vegetação	IBGE	1:250.000	Vetorial	Área de vegetação.	2021
Hidrografia	ANA	1:1.000.000	Vetorial	Bacias Hidrográficas, Massas d'Água; Cursos d'Água.	2016;2019
TOPODATA	INPE	1:250.000	Raster (SRTM)	Topografia/Declividade.	2011
Base Cartográfica	IBGE	1:250.000	Vetorial	Limites Territoriais (Estados e municípios)	2021

Organização pelos autores.

MÉTODOS

A metodologia envolveu levantamentos de dados geoespaciais e a geração de produtos cartográficos temáticos de Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Climatologia e Vegetação. Esses temas são responsáveis pela avaliação da "Vulnerabilidade Natural à Erosão". Inicialmente, avalia-se o grau de vulnerabilidade para cada tema, atribuindo-lhes valores que variam de acordo com o seu estado ecodinâmico, de acordo com Crepani *et al.* (2001).

De acordo com essa abordagem, o grau de vulnerabilidade é determinado com base em fatores morfogênicos e pedogênicos. São atribuídos graus de vulnerabilidade para cada unidade de paisagem considerando aspectos como Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Hidrografia, Clima e Cobertura Vegetal.

De forma geral, dividimos nossos procedimentos operacionais para elaboração do mapa de vulnerabilidade natural em quatro fases, a partir de Crepani *et al.* (2001) e são elas: 1) a preparação dos dados; 2) a reclassificação dos mapas de fatores de vulnerabilidade; 3) a combinação dos mapas de fatores de vulnerabilidade; 4) e a interpolação do mapa de vulnerabilidade.

Os dados capturados no formato adequado raster ou vetorial compatíveis com o QGIS, foram importados, georreferenciados para a criação do mapa de vulnerabilidade. Em seguida foram identificados os fatores de vulnerabilidade para criar cada um dos mapas de fatores de vulnerabilidade individualmente. Para isso, criamos um raster para cada novo mapa com os valores empregados.

Foi realizada a reclassificação dos mapas de fatores de vulnerabilidade, que envolve a agrupação dos valores em classes de vulnerabilidade, atribuindo um novo valor a cada célula do raster original, a partir da ferramenta "r.reclass" no QGIS, seguida da combinação

dos mapas reclassificados utilizando a calculadora raster no QGIS, que permite aplicar operações matemáticas às células dos mapas raster, para aplicar a metodologia de combinação dos fatores de vulnerabilidade conforme descrito em Crepani *et al.* (2001).

Posteriormente foi aplicada a interpolação do mapa de vulnerabilidade combinado para obter um mapa contínuo de vulnerabilidade. Para tanto, utilizamos a ferramenta de Interpolação IDW (Inverse Distance Weighting) no QGIS, que calcula valores para locais não amostrados com base na proximidade ponderada dos valores conhecidos.

Para Crepani *et al.* (2001), o modelo da vulnerabilidade natural é calculado a partir da equação apresentada na **Tabela 2**. A equação é um modelo matemático que considera diferentes variáveis e parâmetros relacionados às características físicas, climáticas e de uso da terra de uma determinada região.

Tabela 2 - Equação para a obtenção da vulnerabilidade natural à perda de solos.

$$V = \frac{(G + R + S + Vg + C)}{5}$$

onde: V = Vulnerabilidade
 G = vulnerabilidade para o tema Geologia
 R = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia
 S = vulnerabilidade para o tema Solos
 Vg = vulnerabilidade para o tema Vegetação
 C = vulnerabilidade para o tema Clima

Fonte: Adaptado de Crepani (2001).

A Escala de Vulnerabilidade é feita a partir da caracterização morfodinâmica das unidades de paisagem natural. Essa escala estabelece as seguintes categorias: muito vulnerável, vulnerável, medianamente vulnerável e pouco vulnerável. As classes de vulnerabilidade natural propostas por Crepani *et al.* (2001) variam de acordo com o estudo e as características da região analisada.

As categorias morfodinâmicas propostas por Crepani *et al.* (2001) estão relacionadas às classes de vulnerabilidade natural, pois os processos morfodinâmicos atuam diretamente na determinação da vulnerabilidade de uma determinada área a eventos naturais. Segundo o autor, as três categorias morfodinâmicas estão relacionadas com a pedogênese e a morfogênese, que são dois processos inter-relacionados que ocorrem na terra e influenciam sua formação e evolução ao longo do tempo, conforme o **Tabela 3**.

Tabela 3 - Classes de Vulnerabilidade Natural.

Categoria morfodinâmica	Relação Pedogênese/Morfogênese	Valor
Estável	Prevalece a Pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio Pedogênese/Morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a Morfogênese	3,0

Adaptado de Crepani et al. (2001). Organização dos dados pelos autores.

Os valores e classes de estabilidade/vulnerabilidade natural mostrados na **Tabela 4** são uma forma de quantificar e classificar a estabilidade ou vulnerabilidade de uma determinada área com base em valores atribuídos a uma variável específica. Essas classes indicam diferentes níveis de estabilidade ou vulnerabilidade em relação à variável considerada. Os valores e classes podem auxiliar na definição dessas classes, considerando a relação entre as variáveis e a estabilidade/vulnerabilidade do solo.

Tabela 4 - Valores e classes de Estabilidade/Vulnerabilidade de Vulnerabilidade Natural.

Categoria morfodinâmica	Valores de Variável
Estável	1,0 a 1,3
Moderadamente Estável	1,4 a 1,7
Medianamente Estável/Vulnerável	1,8 a 2,2
Moderadamente Vulnerável	2,3 a 2,6
Vulnerável	2,7 a 3

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001). Organização dos dados pelos autores.

Essa abordagem integrada permite uma análise mais precisa e detalhada da vulnerabilidade à perda de solos na área de estudo, sendo uma classificação útil para identificar áreas com diferentes níveis de estabilidade ou vulnerabilidade em relação a uma determinada variável e pode ser usada para orientar o planejamento do uso do solo, a gestão de riscos naturais e a tomada de decisões relacionadas à conservação ambiental (ROCKETT *et al.* 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Geologia

A Formação Jandaíra e a Formação Barreiras, compostas principalmente por arenito, são classificadas como tendo uma vulnerabilidade natural moderadamente estável (valor 1,7). Isso ocorre devido às características semelhantes dos solos arenosos presentes nessas formações. O arenito possui uma estrutura consolidada e resistente, que tende a ser menos suscetível a processos erosivos e perda de nutrientes, que conferem uma certa estabilidade em relação a processos de degradação (IBGE, 2021).

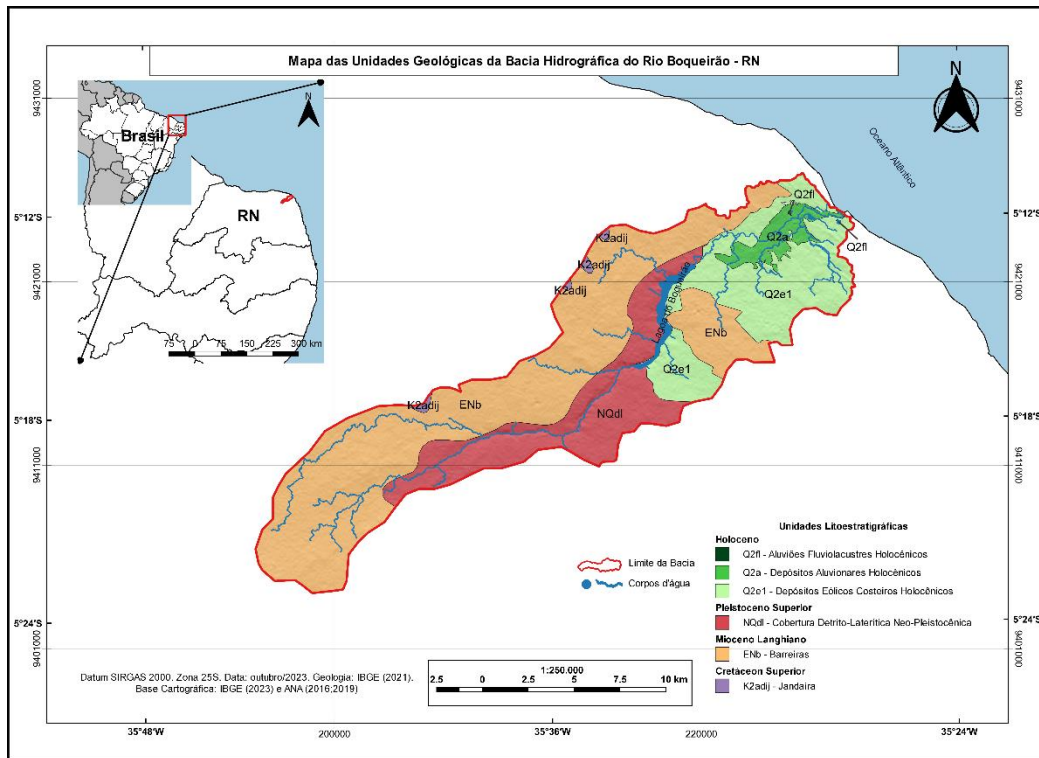


Figura 2 - Unidades Litostratigráficas da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

Tabela 5 - Unidades Geológicas e respectivos valores na escala de vulnerabilidade morfodinâmica natural, e respectivas áreas, na Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão.

Geologia	Classe	Valor
Formação Jandaíra (Arenito)	Moderadamente Estável	1,7
Formação Barreiras (Arenito)	Moderadamente Estável	1,7
Depósitos Eólicos Costeiros Holocênicos (Dunas de areia)	Moderadamente Vulnerável	2,4
Cobertura Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica (Laterita)	Vulnerável	2,7
Aluviões Fluviolacustres Holocênicos (Sedimentos aluviais - como areia, silte e argila)	Vulnerável	2,7
Depósitos Aluvionares Holocênicos (Sedimentos aluviais, como areia, silte e argila)	Vulnerável	2,7

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001). Organização dos dados pelos autores.

A Cobertura Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica, composta por laterita, e os Aluviões Fluviolacustres Holocênicos, que são sedimentos aluviais, recebem o valor de vulnerabilidade natural vulnerável (2,7). A laterita é um solo altamente intemperizado e com baixa capacidade de retenção de nutrientes, tornando-o mais suscetível à degradação. Os solos aluviais possuem estrutura porosa e são facilmente erodidos, especialmente quando contêm sedimentos finos como silte e argila (IBGE, 2021)

Os Depósitos Aluvionares Holocênicos, também sedimentos aluviais, compartilham características semelhantes aos Aluviões Fluviolacustres e possuem o mesmo valor de vulnerabilidade natural (2,7).

Os Depósitos Eólicos Costeiros Holocênicos, representados pelas dunas de areia, possuem uma vulnerabilidade natural moderadamente vulnerável (valor 2,4) devido à

instabilidade da areia e à suscetibilidade à erosão eólica. Apesar disso, esses solos têm uma capacidade moderada de regeneração e recuperação natural (IBGE, 2021).

Geomorfologia

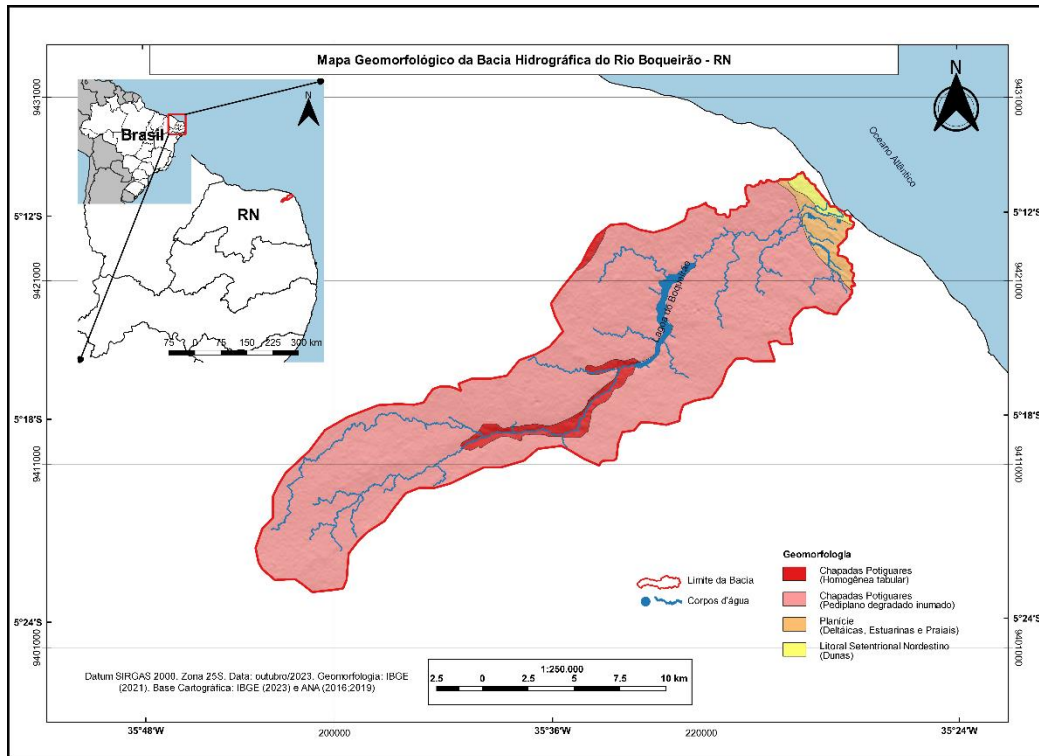


Figura 3 - Mapa da Geomorfologia da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

Os resultados da análise geomorfológica, que incluem a amplitude altimétrica, a declividade e a amplitude do interflúvio, são utilizadas para avaliar a sensibilidade e suscetibilidade do terreno a processos erosivos e de degradação. A amplitude altimétrica indica a variação de altitude na área estudada, e valores entre 1,0 e 1,4 representam uma faixa de baixa amplitude. Isso significa que as diferenças de altitude entre as áreas são relativamente pequenas, o que pode afetar a retenção de água e a estabilidade do solo. Valores mais baixos (1,0) indicam menor vulnerabilidade, enquanto valores mais altos (1,4) sugerem maior sensibilidade a processos erosivos (IBGE, 2021).

A declividade é a inclinação do terreno e influencia a ocorrência de erosão. Valores entre 1,0 e 2,0 são atribuídos para representar diferentes graus de declividade. Valores mais baixos (1,0 - 1,4) indicam declividades suaves, enquanto valores mais altos (1,5 - 2,0) indicam declividades íngremes. Declividades acentuadas aumentam a suscetibilidade à erosão, pois a água e o vento podem transportar o solo mais facilmente em áreas inclinadas. Já valores de 2,9 e 3,0 indicam uma amplitude do interflúvio relativamente alta, indicando uma maior variação de largura entre as cristas dos interflúvios, o que pode afetar a retenção de água e a estabilidade da terra (IBGE, 2021).

Tabela 6 - Equação para a obtenção da vulnerabilidade para o tema geomorfologia.

$R = \frac{(G + A + D)}{3}$
<p>onde: R = Vulnerabilidade para o tema Geomorfologia. G = Vulnerabilidade atribuída ao Grau de Dissecação. A = Vulnerabilidade atribuída à Amplitude Altimétrica. D = Vulnerabilidade atribuída à Declividade</p>
Fonte: Adaptado de Crepani <i>et al.</i> (2001).

Tabela 7 - Tema Geomorfologia e respectivos valores na escala de vulnerabilidade morfodinâmica natural, e respectivas áreas, na Bacia Hidrográfica do Boqueirão, em cinza.

Amplitude Altimétrica (m)	Valor	Declividade (graus)	Valor	Amplitude do Interflúvio	Valor
<20	1,0	<2	1,0	> 5000	1,0
20 - 29,5	1,1	2 - 3,3	1,1	4750 - 5000	1,1
29,5 - 39	1,2	3,3 - 4,6	1,2	4750 - 5000	1,2
39 - 48,5	1,3	4,6 - 5,9	1,3	4250 - 4500	1,3
48,5 - 58	1,4	5,9 - 7,3	1,4	4000 - 4250	1,4
58 - 67,5	1,5	7,3 - 8,6	1,5	3750 - 4000	1,5
67,5 - 77	1,6	8,6 - 9,9	1,6	3500 - 3750	1,6
77 - 84,5	1,7	9,9 - 11,2	1,7	3250 - 3500	1,7
84,5 - 94	1,8	11,2 - 12,5	1,8	3000 - 3250	1,8
94 - 103,5	1,9	12,5 - 13,8	1,9	2750 - 3000	1,9
103,5 - 113	2,0	13,8 - 15,2	2,0	2500 - 2750	2,0
113 - 122,5	2,1	15,2 - 16,5	2,1	2250 - 2500	2,1
122,5 - 132	2,2	16,5 - 17,8	2,2	2000 - 2250	2,2
132 - 141,5	2,3	17,8 - 19,1	2,3	1750 - 2000	2,3
141,5 - 151	2,4	19,1 - 20,4	2,4	1500 - 1750	2,4
151 - 160,5	2,5	20,4 - 21,7	2,5	1250 - 1500	2,5
160,5 - 170	2,6	21,7 - 23,0	2,6	1000 - 1250	2,6
170 - 179,5	2,7	23,0 - 24,4	2,7	750 - 1000	2,7
179,5 - 189	2,8	24,4 - 25,7	2,8	500 - 750	2,8
189 - 200	2,9	25,7 - 27	2,9	250 - 500	2,9
>200	3,0	>27	3,0	< 250	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001).

Pedologia

Tabela 8 - Tipos de solos e respectivos valores na escala de vulnerabilidade morfodinâmica natural, e respectivas áreas, na Bacia Hidrográfica do Boqueirão.

Tipo de Solos	Classe	Valor
LAd - latossolo Amarelo Distrófico	Estável	1,0
RQo - Neossolo Quartzarênico Órtico	Instável	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001). Organização dos dados: Autor (a).

O solo LAd é classificado com um valor de 1,0 de vulnerabilidade natural, indicando que é uma classe estável. Ele é comum em regiões tropicais e possui uma camada subsuperficial rica em argila, conferindo-lhe uma alta capacidade de retenção de água e nutrientes. Sua boa estrutura facilita a infiltração da água e a circulação de ar no solo. Essas características

reduzem a suscetibilidade do solo LAd a processos erosivos, compactação e perda de nutrientes, resultando em menor vulnerabilidade natural (IBGE, 2021).

O solo RQo (Neossolo Quartzarênico Órtico) e o RQo (Neossolo Quartzarênico Órtico - área urbana) têm um valor de vulnerabilidade natural de 3,0, indicando uma classe instável (CREPANI *et al.* 2001). Esses solos são altamente suscetíveis a processos de degradação devido à alta proporção de areia, baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, fragilidade estrutural e baixa matéria orgânica. Isso aumenta a propensão desses solos à erosão, compactação e perda de nutrientes, tornando-os mais vulneráveis aos impactos ambientais, como chuvas intensas e uso inadequado da terra (IBGE, 2021).

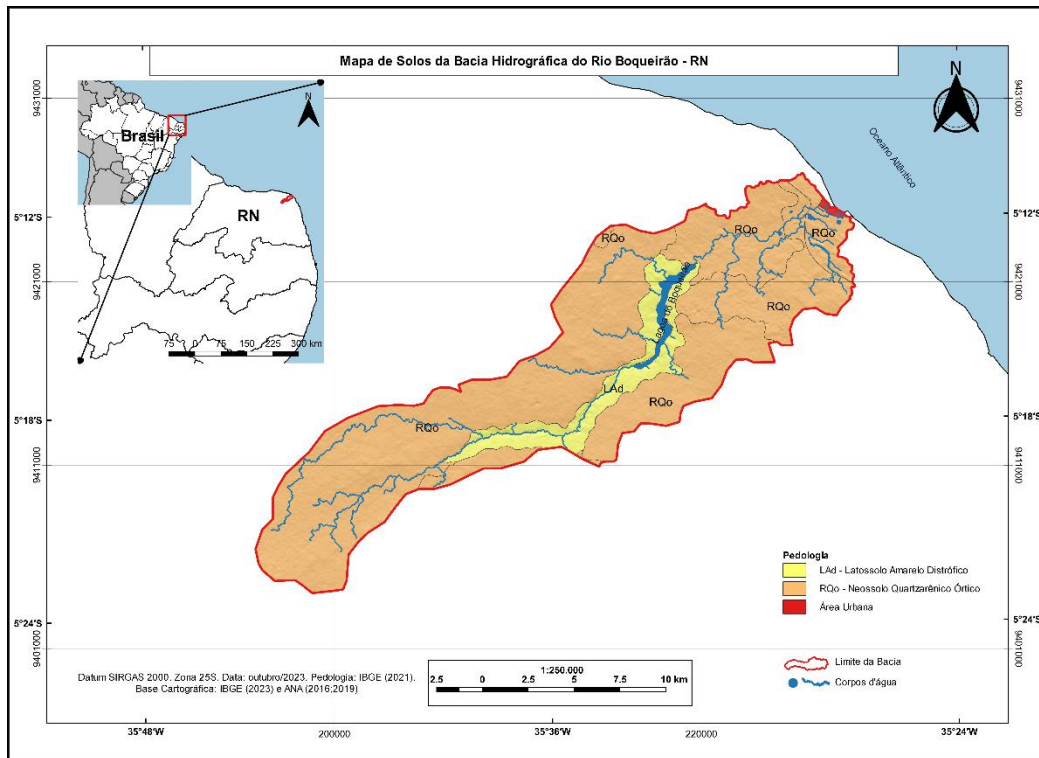


Figura 4 - Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

Vegetação

Para as coberturas artificiais do terreno, como pastagens, culturas perenes e culturas anuais, foram adotados os valores de 2,8, 2,9 e 3,0, respectivamente, na escala de vulnerabilidade natural. Quanto às feições de regeneração da vegetação, o valor de vulnerabilidade depende do estágio de crescimento e recobrimento do terreno. No caso dos contatos entre diferentes tipos de vegetação, como encraves e misturas (ecótonos), não foram estabelecidos valores de vulnerabilidade específicos, devido à variabilidade na densidade de cobertura e distribuição da vegetação nessas áreas. Para calcular o valor de vulnerabilidade natural dos contatos do tipo ecótono, nos quais não é possível definir espacialmente as unidades de vegetação envolvidas, é realizada a média aritmética dos tipos de vegetação presentes (CREPANI, 2001).

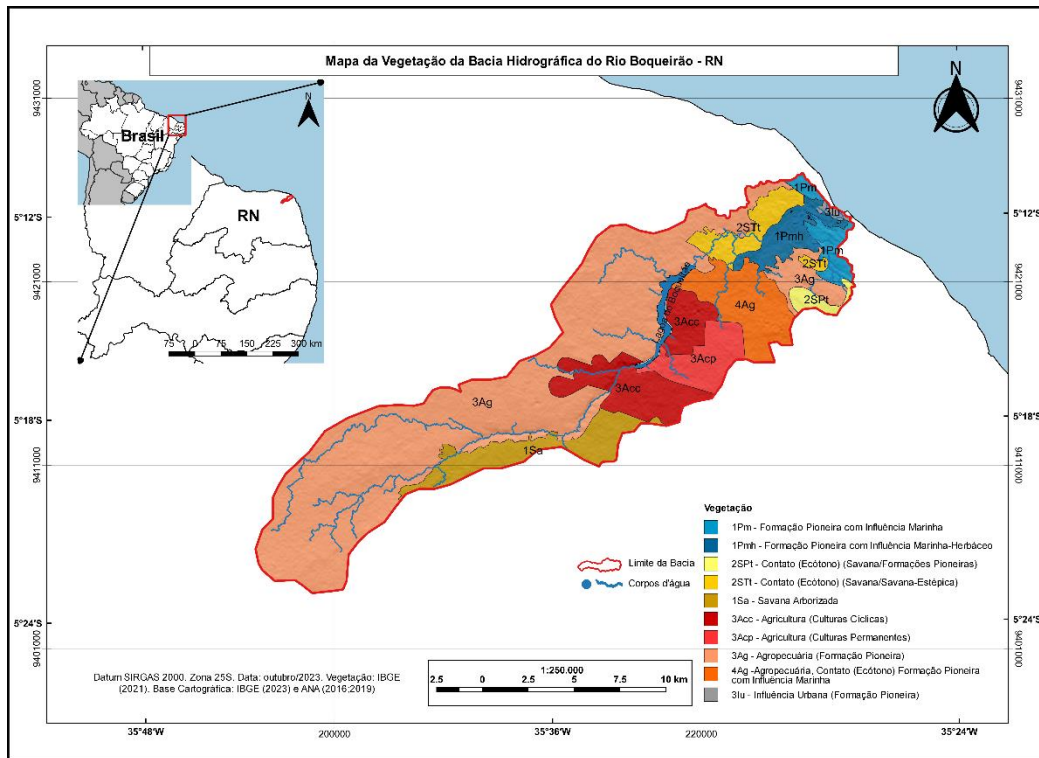


Figura 5 - Mapa da vegetação da Bacia do Rio Boqueirão/RN.

Embora não haja informações específicas nas citações de Crepani *et. al.* (2001) para atribuir valores de vulnerabilidade natural às outras categorias da lista, nos propomos a fazer uma análise com base em conhecimento sobre tipos de agricultura e uso da terra, no que se refere a: 3Acc; 3Acp; 3Ag; 4Ag, e; 3lu.

Tabela 9 - Classes de vegetação e respectivos valores na escala de vulnerabilidade morfodinâmica natural, e respectivas áreas, na Bacia Hidrográfica do Boqueirão.

Vegetação	Classe	Valor
1Pm - Formação Pioneira com Influência Marinha	Moderadamente Estável	1,4
2SPt - Contato (Ecótono) (Savana/Formações Pioneiras)	Medianamente Estável	1,8
2Stt - Contato (Ecótono) (Savana/Savana-Estépica)	Medianamente Estável	2,1
1Sa - Savana Arborizada	Medianamente Estável	2,1
1Pmh - Formação Pioneira com Influência Marinha-Herbáceo	Vulnerável	2,7
3Ag - Agropecuária (Formação Pioneira)	Vulnerável	2,8
3Acc - Agricultura (Culturas Cíclicas)	Vulnerável	2,9
3Acp - Agricultura (Culturas Permanentes)	Vulnerável	2,9
4Ag - Agropecuária Contato (Ecótono) Formação Pioneira com Influência Marinha	Vulnerável	3,0
3lu - Influência Urbana (Formação Pioneira)	Vulnerável	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001). Organização dos dados pela autora.

No contexto da Vulnerabilidade da Vegetação, diferentes categorias de uso da terra foram consideradas com base na nomenclatura adotada (IBGE, 2021). Para a categoria 3Acc, foi atribuído um valor de vulnerabilidade natural de 2,9, aproximando-se do limite superior, considerando que as culturas cíclicas têm uma vulnerabilidade semelhante às

culturas anuais. A categoria 3Acp recebeu o valor de vulnerabilidade natural de 2,9. Na categoria 3Ag, atribuiu-se o valor de 2,8, pois a conversão de vegetação natural em pastagens pode causar impactos negativos no solo e na biodiversidade. Para a categoria 4Ag, foi atribuído um valor mais alto de 3,0, pois essa categoria envolve a agropecuária em uma área de ecótono com influência marinha, onde ocorrem interações complexas entre ecossistemas terrestres e marinhos. Por fim, a categoria 3lu foi analisada de maneira geral, considerando que a urbanização em áreas pioneiras pode resultar em alterações significativas nos ecossistemas naturais, com desmatamento, compactação da terra, fragmentação do habitat e introdução de poluentes, resultando em um aumento da vulnerabilidade natural, com valor máximo de 3,0.

Clima

Para a classificação do Clima na Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão foram utilizados dois mapas diferentes relacionados ao clima. O primeiro mapa foi baseado no trabalho de Alvares *et al.* (2013), que classificou o Brasil de acordo com o sistema climático de Köppen. Os dados meteorológicos coletados ao longo de mais de 25 anos foram utilizados para estimar as informações de temperatura e precipitação em todo o país. Esses dados foram atribuídos a cada município. O segundo mapa, obtido no (IBGE, 2021), apresenta a classificação de diferentes zonas climáticas no território brasileiro, considerando a temperatura e umidade.

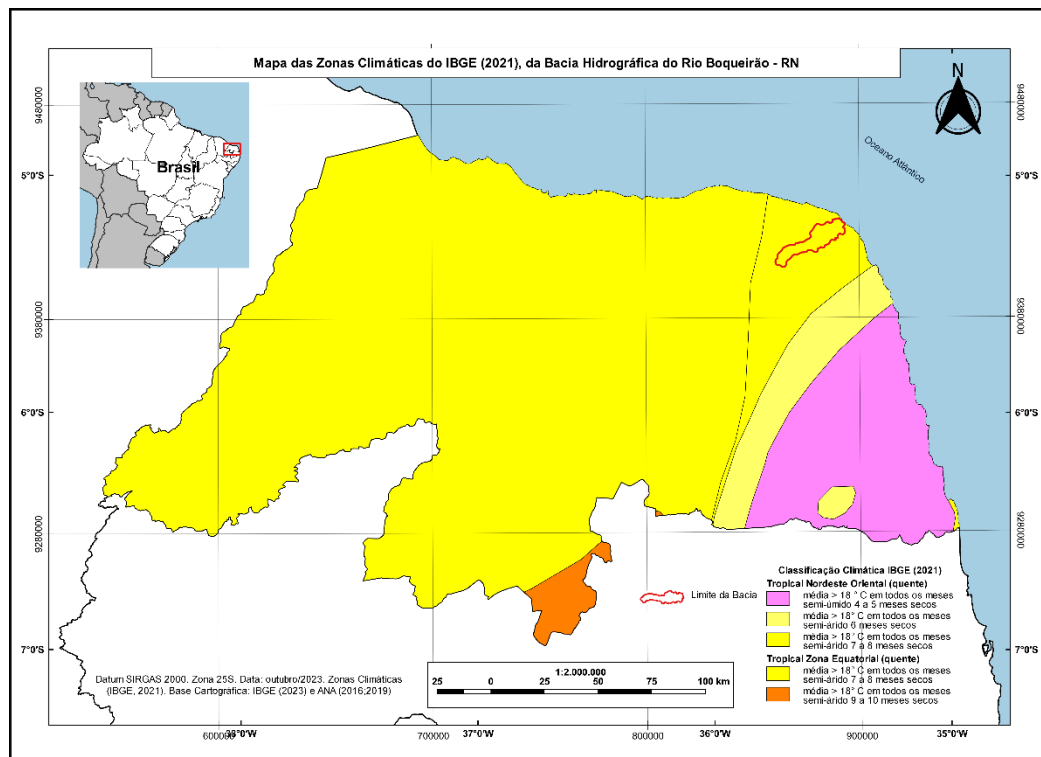


Figura 6 - Mapa de Zonas Climáticas do IBGE (2021) da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

As proposições climáticas convergentes de Crepani *et al.* (2001), IBGE (2021) e INMET (2023) indicam um valor de 1,7 na escala de vulnerabilidade natural, que representa um nível moderadamente estável de vulnerabilidade. Embora existam desafios e impactos associados ao clima na região, esses podem ser gerenciados com medidas adequadas de mitigação e adaptação. É importante considerar que a vulnerabilidade natural pode variar em

diferentes áreas e ao longo do tempo devido a fatores como mudanças climáticas e ação humana. Portanto, a monitorização contínua e a análise atualizada são cruciais para compreender e responder aos desafios da vulnerabilidade natural.

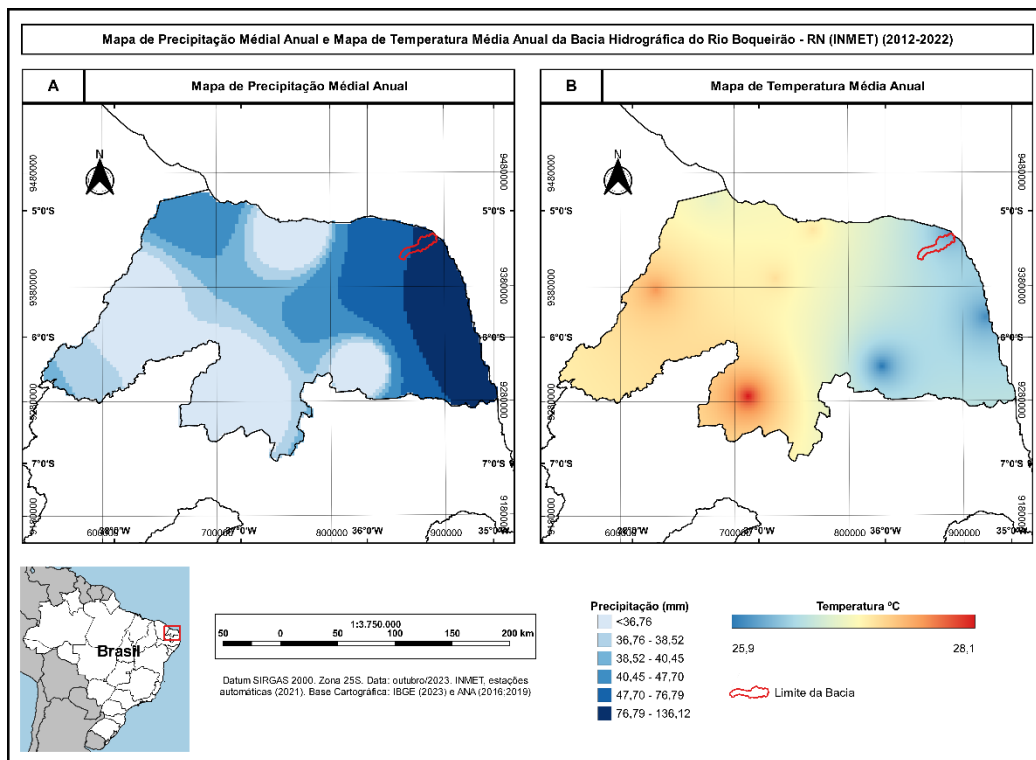


Figura 7A e 7B - Mapa de Intensidade Pluviométrica e Mapa de Temperatura Média Anual da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN, respectivamente.

Tabela 9 - Classificações climáticas, processos pluviométricos e respectivos valores na escala de vulnerabilidade morfodinâmica natural, e respectivas áreas, na Bacia Hidrográfica do Boqueirão.

Classificação	Precipitação Média Anual	Duração Período Chuvoso (meses)	Intensidade Pluviométrica	Valor
Crepani et al. (2001)	1201,5	5,3	234,5	1,7
Alvares et al. (2013) / Koppen	As - clima quente com chuva de inverno	3 a 6	-	1,7
IBGE (2021)	Tropical Nordeste Oriental, semi-árido	4 a 5	-	1,7
INMET (2023)	373,85 a 1026,16	5	213	1,7

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001). Organização dos dados pelos autores.

Vulnerabilidade Natural

Tabela 10 - Classes de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solos da Bacia Hidrográfica do Boqueirão.

Classes/Níveis de Vulnerabilidade	Valor	Áreas das classes (km ²)	Áreas das classes (%)
Medianamente Estável/Vulnerável	1,8	5,63	2,3
Medianamente Estável/Vulnerável	1,9	4,74	1,9
Medianamente Estável/Vulnerável	2,0	26,16	10,6
Medianamente Estável/Vulnerável	2,1	3,19	1,3
Medianamente Estável/Vulnerável	2,2	135,11	55,0
Moderadamente Vulnerável	2,3	25,51	10,4
Moderadamente Vulnerável	2,4	45,36	18,5

Organização dos dados pelos autores.

Com base nos valores de vulnerabilidade natural obtidos (variando de 1,8 a 2,4) e nas respectivas áreas percentuais associadas, observamos que a área de menor vulnerabilidade natural (1,8) abrange apenas 2,3% da bacia total. Essa parcela da área é considerada relativamente estável e menos suscetível a mudanças significativas ou impactos.

Os valores de vulnerabilidade natural entre 1,9 e 2,4 correspondem a áreas classificadas como moderadamente estável e moderadamente vulnerável, respectivamente. Em particular, destaca-se uma área que abrange 55% do total da bacia e possui um valor de vulnerabilidade natural de 2,2. Essa área apresenta uma vulnerabilidade moderada e representa a maior proporção da região.

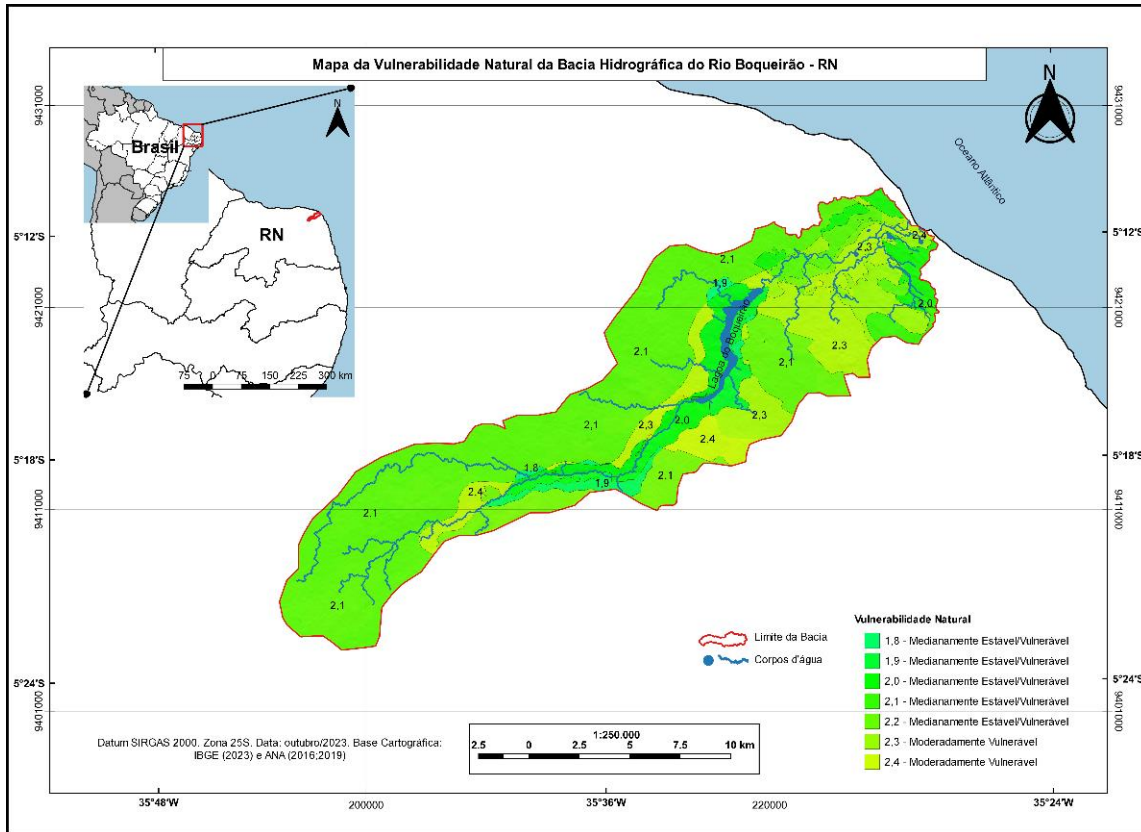


Figura 9 - Mapa de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solos da Bacia Hidrográfica do Boqueirão/RN.

CONCLUSÃO

Com base na integração dos dados sobre geologia, solo, geomorfologia, vegetação e clima, foi possível realizar uma análise abrangente da vulnerabilidade natural à perda do terra na Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão, localizada no Rio Grande do Norte. Essa abordagem permitiu identificar e analisar a vulnerabilidade de toda a bacia com base no conceito de ecodinâmica, que considera a relação entre morfogênese e pedogênese.

Os resultados indicam que a bacia hidrográfica do Rio Boqueirão foi classificada como medianamente vulnerável em aproximadamente 55% de sua extensão. Essa classificação ressalta a importância de monitorar e gerenciar cuidadosamente essa área, a fim de mitigar possíveis impactos e preservar sua estabilidade ambiental.

Portanto, os resultados revelam que a maior parte da área da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão encontra-se dentro de uma faixa que varia de medianamente estável vulnerável (1,8) a moderadamente vulnerável (2,4), denotando a necessidade de uma abordagem atenta para proteger esse ecossistema valioso.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Massa d'água.shp. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2016. 23/06/23
<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Curso d'água.shp. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2019. 23/08/23 <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>.

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, DOI: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

AQUINO, A. R. de; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. DE. Vulnerabilidade Ambiental. São Paulo: Blucher, 2017.

CHOUDHARY, K.; SINGH, M.; KUPRIYANOV, A. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences Spatial modelling for natural and environmental vulnerability through remote sensing and GIS in Astrakhan , Russia. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, v. 21, n. 2, p. 139–147, 2018.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento territorial. São José dos Campos: SAE/INPE. (INPE-8454-RPQ/722), 2001.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Variáveis geomorfométricas locais. São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em: 10/05/2023.

IBGE. Vegetação. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao.html>. Acesso em: 21/04/2023.

IBGE. Geologia. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geologia.html>. Acesso em: 21/04/2023.

IBGE. Pedologia. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia.html>. Acesso em: 22/04/2023.

IBGE. Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra: série histórica. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html>. Acesso em: 22/04/2023.

IBGE. Geomorfologia. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia.html>. Acesso em: 03/05/2023.

IBGE. Geociências. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 02/06/2023.

MAPBIOMAS. O Projeto. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/o-projeto>. Acesso em: 10/05/2023.

PEREIRA JR, Ferreira PA, Boas AAV, Oliveira ER, Cardoso RF. Gestão social dos territórios da cidadania: o zoneamento ecológico-econômico como instrumento de gestão do território noroeste de Minas Gerais. Cadernos EBAPE. BR 2011; 9(3): 724-747.

QGIS Development Team, 2015. QGIS Geographic Information System: Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 10 maio 2023.

ROCKETT, G.C.; MARTINS, E.M.; TODT, V.; THUM, A.B.; BARBOZA, E.G. Geoprocessamento aplicado à análise ambiental: Vulnerabilidade natural à perda de solo no Morro do Osso, Porto Alegre/RS. GEOGRAFIA, Rio Claro, v.39, n.3, p. 465- 481, 2014.

SANTOS, A. B. C. Análise da Vulnerabilidade Natural da Perda de Solos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Vermelho/MS. GEOFRONTER, v. v. 8, p. p. 01-23, 2022.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (RN). Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte (ed.). Bacia Boqueirão. Natal, 2009. Disponível em: <http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/IGARN/doc/DOC00000000028894.PDF>. Acesso em: 18/05/2023.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (RN). Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte (ed.). Bacia Boqueirão. Natal, 2009. Disponível em: <http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/IGARN/doc/DOC00000000028894.PDF>. Acesso em: 18/05/2023.

6 CAPÍTULO 2: ANÁLISE DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BOQUEIRÃO/RN

MARIA DENIZE DA COSTA¹, SEBASTIÃO MILTON PINHEIRO DA SILVA²

¹ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional –
PRODEMA/RN. costdenz@gmail.com; ²Departamento de Geografia da UFRN.
sebastiaomilton@gmail.com

ESTE ARTIGO SERÁ SUBMETIDO AO PERIÓDICO REVISTA BRASILEIRA DE
CIÊNCIAS AMBIENTAIS – FORMATAÇÃO DEVERÁ SER DE ACORDO COM AS
RECOMENDAÇÕES DESTA REVISTA (acessar em:
https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB?/)

RESUMO

As bacias hidrográficas constituem um sistema natural equilibrado e são importantes unidades de planejamento dos sistemas ambientais. Considerando a relevância do planejamento e gestão ambiental na atualidade. Este artigo tem por objetivo realizar a análise de vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN, com a aplicação de álgebra de mapas e análise integrada de suas variáveis físicas e ambientais. Para isso, foram confeccionados mapas da Vulnerabilidade Natural e de Uso e Cobertura da Terra. Esses mapas receberam pesos, conforme sua estabilidade/vulnerabilidade e, posteriormente, foram combinados em álgebra de mapas. O mapa gerado com a combinação desses fatores apresentou quatro classes de vulnerabilidade para a bacia em questão: moderadamente estável, medianamente estável/vulnerável, moderadamente vulnerável e vulnerável. Os resultados revelaram que 0,72% da área da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN é vulnerável, localizada no entorno da Lagoa do Boqueirão e na zona urbana de Touros/RN, com uma escala de vulnerabilidade de 2,4 a 2,7. Cerca de 12,92% da área é classificada como medianamente estável/vulnerável, 52,61% como moderadamente vulnerável e 33,75% como áreas estáveis, distribuídas por toda a bacia.. Este diagnóstico constitui-se numa tentativa importante de criação de instrumentos que contribuam para o planejamento ambiental da bacia.

Palavras-Chave: Bacia Hidrográfica, Vulnerabilidade Ambiental, Geoprocessamento.

ABSTRACT

The watersheds constitute a balanced natural system and are important units for planning environmental systems. Considering the relevance of environmental planning and management today. This article aims to analyze the environmental vulnerability of the Boqueirão River Basin/RN, using map algebra and integrated analysis of its physical and environmental variables. For this purpose, maps of Natural Vulnerability and Land Land use and coverage. These maps were weighted according to their stability/vulnerability and subsequently combined in map algebra. The generated map with the combination of these factors presented four classes of vulnerability for the basin in question: moderately stable, moderately stable/vulnerable, moderately vulnerable, and vulnerable. The results revealed that 0.72% of the Boqueirão River Basin/RN area is vulnerable, located around the Boqueirão Lagoon and in the urban area of Touros/RN, with a vulnerability scale ranging from 2.4 to 2.7. Approximately 12.92% of the area is classified as moderately stable/vulnerable, 52.61% as moderately vulnerable, and 33.75% as stable areas, distributed throughout the basin. This diagnosis represents an important attempt to create tools that contribute to the environmental planning of the basin.

Keywords: Hydrographic basin, Environmental Vulnerability, Geoprocessing.

INTRODUÇÃO

Estudos sobre vulnerabilidade ambiental de uma área engloba o mapeamento, análise e compreensão das potencialidades e fragilidades. Estas pesquisas destacam sua relevância ao identificar elementos que afetam o equilíbrio ambiental de uma região, utilizando como base o grau de estabilidade/vulnerabilidade das categorias morfodinâmicas da paisagem (TRICART, 1977).

As bacias hidrográficas representam um sistema natural equilibrado, no qual modificações no ambiente físico podem comprometer sua funcionalidade, por exemplo, a remoção da cobertura vegetal pode influenciar a temperatura, o regime hídrico e a resistência do solo, afetando assim a integridade do ecossistema (ARAÚJO *et. al.*, 2023).

As atividades humanas nas bacias hidrográficas resultam na modificação das condições naturais da superfície do solo, incluindo sua estrutura e composição de cobertura, o que pode provocar mudanças significativas no ambiente (DINIZ, *et al.* 2021; ANDRADE *et. al.*, 2015. P. 260)). Assim, tanto a qualidade quanto a quantidade de água disponível em uma bacia hidrográfica são influenciadas pelo tipo de ocupação humana presente nesse sistema. As práticas de uso e ocupação do solo devem ser realizadas de modo a considerar as características do meio físico, visando evitar prejuízos socioambientais (DIAS *et. al.*, 2023).

A avaliação da vulnerabilidade dos ambientes, considerando suas características naturais e o uso e ocupação do solo, pode ser realizada por meio de uma análise integrada de aspectos físicos e ambientais, utilizando ferramentas de Geoprocessamento (CREPANI *et al.*, 2011).

Sendo assim, a análise da vulnerabilidade ambiental emerge como uma ferramenta crucial para compreender a vulnerabilidade de uma determinada região diante da intervenção desordenada da sociedade nos recursos naturais (MEDEIROS, *et. al.*, 2023).

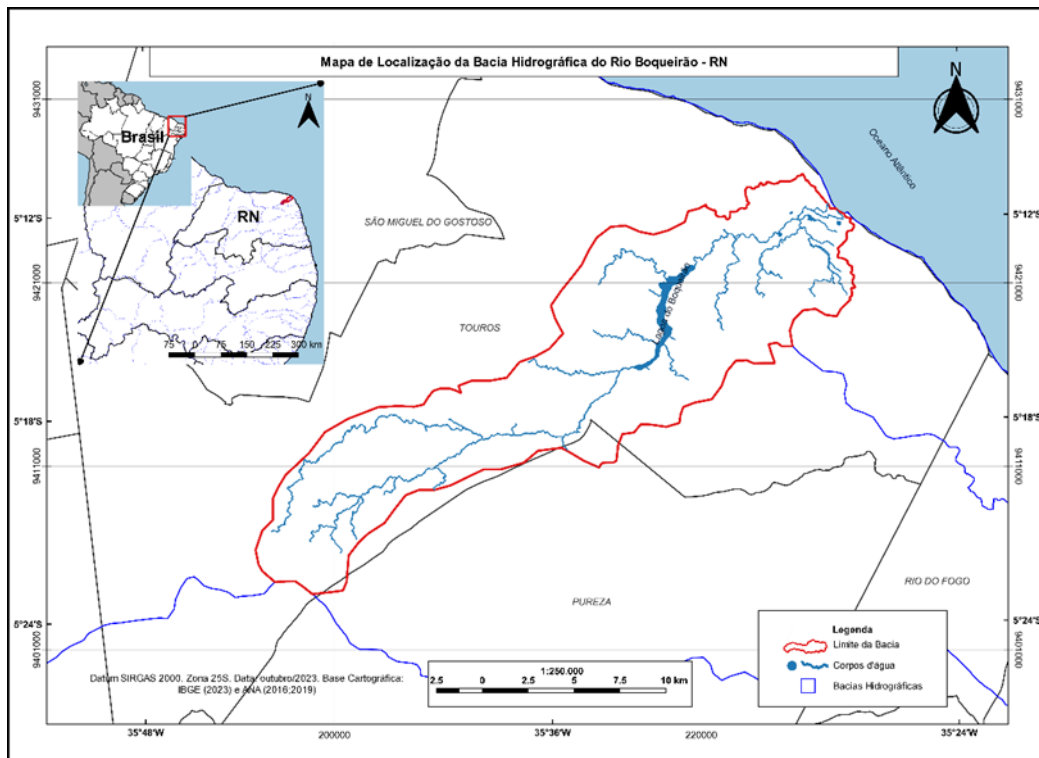
Diante do exposto acima, objetivo-se realizar a análise de vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN, com a aplicação de álgebra de mapas e análise integrada de suas variáveis físicas e ambientais.

MATERIAL E MÉTODO

Localização da área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Boqueirão está localizada no estado do Rio Grande do Norte, no Brasil. Ela é uma das várias bacias hidrográficas presentes no estado e desempenha um papel importante no desenvolvimento de atividades agrícolas da região (IBGE, 2023), possuindo uma extensão de 250,50 km² e representando aproximadamente 0,5% do território estadual (Figura 1). Essa região é caracterizada por uma diversidade de ambientes, com relevos variados, como planícies costeiras, colinas e pequenas serras, que contribuem para a heterogeneidade da paisagem local, além de estar situada em uma zona de transição entre a Bacia Costeira, caracterizada por um clima úmido, e a Bacia Potiguar, de clima semiárido (IBGE, 2023).

Figura 1 - Mapa de localização da bacia do Rio Boqueirão/RN.



PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS






A determinação da vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN foi viabilizada mediante a utilização dos métodos propostos Crepani *et al.* (1996, 2001) e Grigio (2003). Adaptou-se o processo à realidade geoambiental na qual a área de estudo está inserida, levando em consideração sua escala de análise. A base conceitual desse processo considerou a estabilidade da unidade de paisagem, desenvolvida a partir do conceito de Ecodinâmica (Tricart, 1977), e sua operacionalização conforme descrita por Crepani *et al.* (1996, 2001). Estes autores estabelecem que a análise morfodinâmica das unidades de paisagem natural, realizada com base nos princípios da Ecodinâmica, permite a identificação de diferentes categorias morfodinâmicas resultantes dos processos de morfogênese ou pedogênese.

Nessa análise, quando predomina a morfogênese, são observados meios Fortemente Instáveis (valor 3.0), caracterizados por uma significativa modificação das formas de relevo. Nas situações em que há um equilíbrio entre morfogênese e pedogênese, predominam os Intergrades (valor 2.0). Já quando a pedogênese é predominante, destacam-se os processos formadores de solos com categoria Estável (valor 1.0). Essa classificação permite uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas ambientais presentes na área de estudo, contribuindo para a avaliação de sua vulnerabilidade.

A metodologia para determinar o grau de vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN, foi baseada no trabalho de Crepani *et al.* (2001) sobre Vulnerabilidade Potencial Natural.

De acordo com as abordagens de Crepani *et al.* (1996, 2001) e Grigio (2003), procedeu-se a uma análise que abrange 21 unidades de paisagem, classificadas com base em suas características morfodinâmicas em cinco graus de vulnerabilidade, onde o grau de vulnerabilidade é determinado com base em fatores morfogênicos e pedogênicos, os quais são atribuídos graus de vulnerabilidade para cada unidade de paisagem considerando aspectos como Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Hidrografia, Clima e Cobertura Vegetal (Figura 2).

Figura 2 - Escala de vulnerabilidade das unidades de paisagem.

UNIDADE DE PAISAGEM	VALORES	GRAU DE VULNERABILIDADE	GRAU DE SATURAÇÃO			
			VERMELHO	VERDE	AZUL	CORES
U1	3,0	Vulnerável	255	0	0	
U2	2,9		255	51	0	
U3	2,8		255	102	0	
U4	2,7		255	153	0	
U5	2,6	Moderadamente Vulnerável	255	204	0	
U6	2,5		255	255	0	
U7	2,4		204	255	0	
U8	2,3	Medianamente Estável/Vulnerável	153	255	0	
U9	2,2		102	255	0	
U10	2,1		51	255	0	
U11	2,0		0	255	0	
U12	1,9		0	255	51	
U13	1,8	Moderadamente Estável	0	255	102	
U14	1,7		0	255	153	
U15	1,6		0	255	204	
U16	1,5		0	255	255	
U17	1,4	Estável	0	204	255	
U18	1,3		0	153	255	
U19	1,2		0	102	255	
U20	1,1		0	51	255	
U21	1,0		0	0	255	

Fonte: Crepani et al. (2001).

Para Crepani *et al.* (2001), o modelo da vulnerabilidade natural é calculado a partir da equação apresentada na Tabela 2. A equação é um modelo matemático que considera diferentes variáveis e parâmetros relacionados às características físicas, climáticas e de uso da terra de uma determinada região.

Tabela 1 - Equação para a obtenção da vulnerabilidade natural à perda de solos.

$$V = \frac{(G + R + S + Vg + C)}{5}$$

onde: V = Vulnerabilidade
 G = vulnerabilidade para o tema Geologia
 R = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia
 S = vulnerabilidade para o tema Solos
 Vg = vulnerabilidade para o tema Vegetação
 C = vulnerabilidade para o tema Clima

Fonte: Adaptado de Crepani (2001).

A Escala de Vulnerabilidade é feita a partir da caracterização morfodinâmica das unidades de paisagem natural. Essa escala estabelece as seguintes categorias: muito vulnerável, vulnerável, medianamente vulnerável e pouco vulnerável. As classes de vulnerabilidade natural propostas por Crepani *et al.* (2001) variam de acordo com o estudo e as características da região analisada.

As categorias morfodinâmicas propostas por Crepani *et al.* (2001) estão relacionadas às classes de vulnerabilidade natural, pois os processos morfodinâmicos atuam diretamente na determinação da vulnerabilidade de uma determinada área a eventos naturais. Segundo o autor, as três categorias morfodinâmicas estão relacionadas com a pedogênese e a morfogênese, que são dois processos inter-relacionados que ocorrem na terra e influenciam sua formação e evolução ao longo do tempo, conforme a Figura 2.

Geologia

Para o tema geologia, foram classificados os tipos de rochas presentes na área de estudo utilizando a malha vetorial obtida do Banco de Dados do IBGE (2021). As informações foram espacializadas com o auxílio do software QGIS, permitindo a organização dos valores de vulnerabilidade para cada classe de rochas na tabela de atributos do vetor, como representado na Tabela 2. Após a organização dos valores, utilizou-se a ferramenta "Rasterizar" para converter o vetor em raster, com base nos valores de vulnerabilidade organizados no vetor de geologia.

Tabela 2: Unidades Geológicas e respectivos valores na escala de vulnerabilidade morfodinâmica natural, e respectivas áreas, na Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão.

Geologia	Classe	Valor
Formação Jandaíra (Arenito)	Moderadamente Estável	1,7
Formação Barreiras (Arenito)	Moderadamente Estável	1,7
Depósitos Eólicos Costeiros Holocênicos (Dunas de areia)	Moderadamente Vulnerável	2,4
Cobertura Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica (Laterita)	Vulnerável	2,7
Aluviões Fluviolacustres Holocênicos (Sedimentos aluviais - como areia, silte e argila)	Vulnerável	2,7
Depósitos Aluvionares Holocênicos (Sedimentos aluviais, como areia, silte e argila)	Vulnerável	2,7

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001). Organização dos dados pelos autores.

Geomorfologia

Para o tema geomorfologia algumas informações foram necessárias a análise geomorfológica, que incluem a amplitude altimétrica, a declividade e a amplitude do interflúvio, as quais são utilizadas para avaliar a sensibilidade e suscetibilidade do terreno a processos erosivos e de degradação.

Na determinação do grau de dissecação do relevo, foi utilizado um modelo digital de elevação (MDE) recortado para a bacia hidrográfica. Para correção de depressões, aplicou-se a ferramenta "r.fill" no QGIS.

Para calcular a amplitude interflúvial, utilizou-se a malha vetorial para determinar a área e o perímetro da bacia hidrográfica. A classificação dos valores de vulnerabilidade seguiu o método proposto por Crepani *et al.* (2001).

Para representar a declividade, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) delimitado para a área da bacia. A declividade em porcentagem foi determinada no raster através da ferramenta de análise, utilizando a função "Declividade em Porcentagem", uma vez que este trabalho emprega valores em porcentagem para sua classificação. Em seguida, procedeu-se à reclassificação dos dados utilizando a ferramenta r.reclass, aplicando a regra de reclassificação proposta por Crepani *et al.* (2001).

Para determinar os valores do grau de vulnerabilidade das unidades de paisagem natural em relação à geomorfologia, foi calculada a média a partir da soma dos graus de dissecação, amplitude interfluvial e declividade, conforme cada grau de vulnerabilidade estabelecido nos índices apresentados na Tabela 3. Após o desenvolvimento do fator geomorfologia, a classificação da vulnerabilidade foi aplicada com base nas características do relevo, conforme observado na Tabela 4.

Tabela 3 - Equação para a obtenção da vulnerabilidade para o tema geomorfologia.

$R = \frac{(G + A + D)}{3}$
<p>onde: R = Vulnerabilidade para o tema Geomorfologia. G = Vulnerabilidade atribuída ao Grau de Dissecação. A = Vulnerabilidade atribuída à Amplitude Altimétrica. D = Vulnerabilidade atribuída à Declividade</p>
<p>Fonte: Adaptado de Crepani <i>et al.</i> (2001).</p>

Tabela 4 - Tema Geomorfologia e respectivos valores na escala de vulnerabilidade morfodinâmica natural, e respectivas áreas, na Bacia Hidrográfica do Boqueirão, em cinza.

Amplitude Altimétrica (m)	Valor	Declividade (graus)	Valor	Amplitude do Interflúvio	Valor
<20	1,0	<2	1,0	> 5000	1,0
20 - 29,5	1,1	2 - 3,3	1,1	4750 - 5000	1,1
29,5 - 39	1,2	3,3 - 4,6	1,2	4750 - 5000	1,2
39 - 48,5	1,3	4,6 - 5,9	1,3	4250 - 4500	1,3
48,5 - 58	1,4	5,9 - 7,3	1,4	4000 - 4250	1,4
58 - 67,5	1,5	7,3 - 8,6	1,5	3750 - 4000	1,5
67,5 - 77	1,6	8,6 - 9,9	1,6	3500 - 3750	1,6
77 - 84,5	1,7	9,9 - 11,2	1,7	3250 - 3500	1,7
84,5 - 94	1,8	11,2 - 12,5	1,8	3000 - 3250	1,8
94 - 103,5	1,9	12,5 - 13,8	1,9	2750 - 3000	1,9
103,5 - 113	2,0	13,8 - 15,2	2,0	2500 - 2750	2,0
113 - 122,5	2,1	15,2 - 16,5	2,1	2250 - 2500	2,1
122,5 - 132	2,2	16,5 - 17,8	2,2	2000 - 2250	2,2
132 - 141,5	2,3	17,8 - 19,1	2,3	1750 - 2000	2,3
141,5 - 151	2,4	19,1 - 20,4	2,4	1500 - 1750	2,4
151 - 160,5	2,5	20,4 - 21,7	2,5	1250 - 1500	2,5
160,5 - 170	2,6	21,7 - 23,0	2,6	1000 - 1250	2,6
170 - 179,5	2,7	23,0 - 24,4	2,7	750 - 1000	2,7
179,5 - 189	2,8	24,4 - 25,7	2,8	500 - 750	2,8
189 - 200	2,9	25,7 - 27	2,9	250 - 500	2,9
>200	3,0	>27	3,0	< 250	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001).

Pedologia

Para a variável solo, seguiu-se o mesmo roteiro metodológico utilizado para a variável geologia, com informações provenientes do banco de dados do IBGE (2021). Os valores de vulnerabilidade foram inseridos na tabela de atributos de cada classe de solo, conforme indicado na Tabela 5. Por fim, utilizou-se a ferramenta de rasterização para converter os dados vetoriais em raster com base nos dados de vulnerabilidade. Todo o processo foi realizado utilizando o software QGIS.

Tabela 5 - Tipos de solos e respectivos valores na escala de vulnerabilidade morfodinâmica natural, e respectivas áreas, na Bacia Hidrográfica do Boqueirão.

Tipo de Solos	Classe	Valor
LAd - latossolo Amarelo Distrófico	Estável	1,0
RQo - Neossolo Quartzarênico Órtico	Instável	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001). Organização dos dados: Autor (a).

Vegetação

A cobertura vegetal e suas subclasses foram obtidas no banco de dados do IBGE (2021). Em seguida, os valores de vulnerabilidade foram adicionados à tabela de atributos, onde cada classe vegetativa possui um valor que varia de 1 a 3, conforme a proposta de Crepani *et al.* (2001), observado na Tabela 6. Utilizou-se a ferramenta de rasterização para converter os dados vetoriais em raster com base nos valores de vulnerabilidade.

Tabela 6 - Classes de vegetação e respectivos valores na escala de vulnerabilidade morfodinâmica natural, e respectivas áreas, na Bacia Hidrográfica do Boqueirão.

Vegetação	Classe	Valor
1Pm - Formação Pioneira com Influência Marinha	Moderadamente Estável	1,4
2SPt - Contato (Ecótono) (Savana/Formações Pioneiras)	Medianamente Estável	1,8
2STt - Contato (Ecótono) (Savana/Savana-Estépica)	Medianamente Estável	2,1
1Sa - Savana Arborizada	Medianamente Estável	2,1
1Pmh - Formação Pioneira com Influência Marinha-Herbáceo	Vulnerável	2,7
3Ag - Agropecuária (Formação Pioneira)	Vulnerável	2,8
3Acc - Agricultura (Culturas Cíclicas)	Vulnerável	2,9
3Acp - Agricultura (Culturas Permanentes)	Vulnerável	2,9
4Ag - Agropecuária Contato (Ecótono) Formação Pioneira com Influência Marinha	Vulnerável	3,0
3lu - Influência Urbana (Formação Pioneira)	Vulnerável	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001). Organização dos dados pela autora.

Clima

Os dados climatológicos são essenciais para a descrição morfodinâmica das unidades de paisagem devido ao seu papel no processo de intemperismo e na remoção de material superficial por meio de enxurradas, ou seja, um processo de erosão pluvial da superfície da terra (Crepani *et al.*, 2001). Os dados do fator clima foram coletados de uma série histórica mensal de 2012 a 2022 em uma estação pluviométrica do IMNET (2023).

Para gerar a variável clima, utilizou-se a ferramenta de interpolação, atribuindo os dados de intensidade pluviométrica (IP) para criar um raster de IP. Em seguida, com o uso da ferramenta r.reclass, o raster foi reclassificado com base nos valores de vulnerabilidade apresentados na Tabela 7, referentes a cada valor de IP.

Tabela 7 - Classificações climáticas, processos pluviométricos e respectivos valores na escala de vulnerabilidade morfodinâmica natural, e respectivas áreas, na Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão.

Classificação	Precipitação Média Anual	Duração Período Chuvoso (meses)	Intensidade Pluviométrica	Valor
Crepani et al. (2001)	1201,5	5,3	234,5	1,7
IBGE (2021)	Tropical Nordeste Oriental, semi-árido	4 a 5	-	1,7
INMET (2023)	373,85 a 1026,16	5	213	1,7

Fonte: Organização dos dados pelos autores.

Uso e cobertura da terra

O mapa de Uso e Cobertura da Terra foi com base nas categorias fornecidas pelo MapBiomias (2021), identificando-se as seguintes classes: Campo Antropizados, Restinga, Área alagada, Reservatórios, Cobertura Florestal Areia/Dunas/Praia, Formação Campestre, Área Desmatada e Área Urbana. A elaboração do mapa ocorreu por meio de sensoriamento remoto, onde cada pixel é atribuído a uma classe específica.

O fator de uso e ocupação foi baseado nos dados disponíveis no MapBiomias (2021). Para isso, utilizou-se a ferramenta "Poligonizar" para converter os dados de raster para vetor. Em seguida, na tabela de atributos, reclassificou-se os valores de vulnerabilidade com base nos respectivos temas de uso e ocupação da área de estudo. Após esse processo, utilizou-se a ferramenta "Rasterizar" para converter os dados de vetor de volta para raster, considerando os valores de vulnerabilidade indicados na Tabela 8.

Tabela 8 - Uso e Cobertura da Terra na Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

Classes	Vulnerabilidade
1 - Campo Antropizado	2,5
2 - Restinga	2,5
3 - Área Alagada	1,0
4 - Reservatórios	1,0
5 - Cobertura Florestal	1,0
6 - Areia/Praia/Dunas	2,5
7 - Formação Campestre	1,5
8 - Área Desmatada	2,5
9 - Área Urbana	3,0

Fonte: Organização pelos autores.

Metodologia para a Vulnerabilidade Ambiental

O método envolve a criação de critérios para avaliar, de maneira relativa e empírica, cada unidade da paisagem, atribuindo valores ao seu grau de vulnerabilidade. E com isso, agregou-se os valores atribuídos a cada unidade e dividindo-se o total por cinco, resultando em uma média, conforme a equação mostrada na Tabela 9.

Tabela 9 - Equação para a obtenção da vulnerabilidade natural à perda de solos.

$$V = \frac{(G + R + S + Vg + C)}{5}$$

onde: V = Vulnerabilidade

G = vulnerabilidade para o tema Geologia

R = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia

S = vulnerabilidade para o tema Solos

Vg = vulnerabilidade para o tema Vegetação

C = vulnerabilidade para o tema Clima

Fonte: Adaptado de Crepani (2001).

Por fim, os componentes estruturadores da paisagem, mencionados na Tabela 9, tiveram sua vulnerabilidade natural classificada. No que se refere à vulnerabilidade ambiental, utilizamos a média, conforme a fórmula 1. A partir dessa média, foi possível determinar a vulnerabilidade ambiental da área de estudo.

$$\text{Formula 1: } \frac{VA = \text{Uso e Cobertura do Solo} + VPN}{2}$$

RESULTADO E DISCUSSÃO

Análise do Uso e Ocupação da Terra

O desenvolvimento urbano e a ocupação da terra muitas vezes contribuem para aumentar a vulnerabilidade de uma região, acelerando e intensificando a degradação ambiental. A vulnerabilidade ambiental é a medida da susceptibilidade que uma área pode sofrer em danos quando exposta a atividades antrópicas. Ela é determinada pela interação entre os potenciais impactos dessas atividades, a sensibilidade do ambiente às mudanças resultantes e a capacidade do ecossistema de se adaptar a essas mudanças (CHOUDHARY, 2018).

O levantamento do uso e cobertura da terra deve ser encarado como um instrumento essencial de ordenamento territorial, abrangendo tanto o processo de construção e parcelamento da terra quanto a garantia da sustentabilidade nas esferas ambiental, social e econômica (IBGE, 2013).

Neste contexto, a pesquisa de campo desempenhou um papel crucial na detecção e validação do mapa gerado pela fotointerpretação de imagens de satélite de alta resolução para a área da bacia BHRB, em conformidade com os padrões técnicos e metodológicos delineados no Manual Técnico de Uso e Ocupação da Terra (IBGE, 2013). O levantamento de campo possibilitou a definição das classes de uso e cobertura, conforme apresentado na Tabela 1, e a representação desses usos na Figura 6.

Apesar da BHRB ser considerada uma bacia pequena, ela tem sido intensamente explorada para a agricultura e, em menor escala, para a criação de gado. Durante as visitas de campo, identificou-se o cultivo de diversas culturas, como coqueiros, batata-doce, grama e eucalipto são exemplos de cultivos na região. Essas atividades agrícolas têm se concentrado nas proximidades da lagoa do Boqueirão que é a principal fonte hídrica da região (Figura 3).

A presença de coqueiros na área indica uma tentativa de diversificação das culturas, provavelmente voltada para a produção de coco para consumo local e comercialização. A batata-doce é outra cultura importante, oferecendo uma fonte de alimento e renda para os agricultores. O cultivo de grama sugere atividades relacionadas à jardinagem e paisagismo, enquanto o eucalipto é frequentemente plantado para a produção de madeira e celulose.

Apesar da diversidade de culturas, o manejo da terra para abrir novas áreas de cultivo tem contribuído significativamente para a degradação ambiental da região. A expansão agrícola intensiva, especialmente próxima à lagoa do Boqueirão (Figuras 4B e 4D), tem causado vários problemas ambientais como observados em campo potencialmente contaminando a terra e os corpos d'água com fertilizantes e pesticidas,, comprometendo, dessa forma a qualidade da água na lagoa e os riachos vistos no interior da bacia.

Além disso, o desmatamento desordenado para abrir espaço para novas culturas está reduzindo a cobertura vegetal nativa, o que diminui a biodiversidade e a capacidade do solo de absorver água. Esse processo aumenta a erosão do solo, resultando no assoreamento dos rios e da própria lagoa do Boqueirão. O processo erosivo em curso pode ser visto ao longo de estradas e a compactação dos solos, causada tanto pela agricultura intensiva quanto pelo pisoteio do gado, tem aumentado o escoamento superficial, também observado em trechos de estradas vicinais pela erosão e transporte de material para os cursos de água naturalmente escassos pelas características de solos principalmente arenosos..

A análise de vulnerabilidade ambiental da região, conforme ilustrado na Figura 6, demonstra que essas atividades estão concentradas em campos antropizados, áreas que já foram modificadas pelas atividades humanas. Essa concentração agrava os impactos ambientais e sublinha a necessidade urgente de implementar práticas de manejo sustentável.

Classes	Área (%)	Área (km ²)
1 - Campo Antropizado	42,05	105,32
2 - Restinga	3,82	9,58
3 - Área Alagada	2,85	7,13
4 - Reservatórios	1,07	2,68
5 - Cobertura Florestal	28,79	72,12
6 - Areia/Praia/Dunas	2,68	6,71
7 - Formação Campestre	12,06	30,20
8 - Área Desmatada	5,42	13,57
9 - Área Urbana	1,27	3,18

Tabela 3 - Classificação das Classes de Uso e Cobertura da Terra.

Figura 3 – 3A, 3B, 3C e 3D: Visualização do uso e ocupação da terra da bacia: na Figura 3A apresenta uma área com plantio de Eucalipto, na 3B apresenta área de pastagem para criação de gado, na 3C apresenta plantio de batata doce e na 3D apresenta o preparo da terra para o cultivo.



Fonte: Autoria própria, 2024

Tabela 4 - Definições das Classes encontradas na Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.

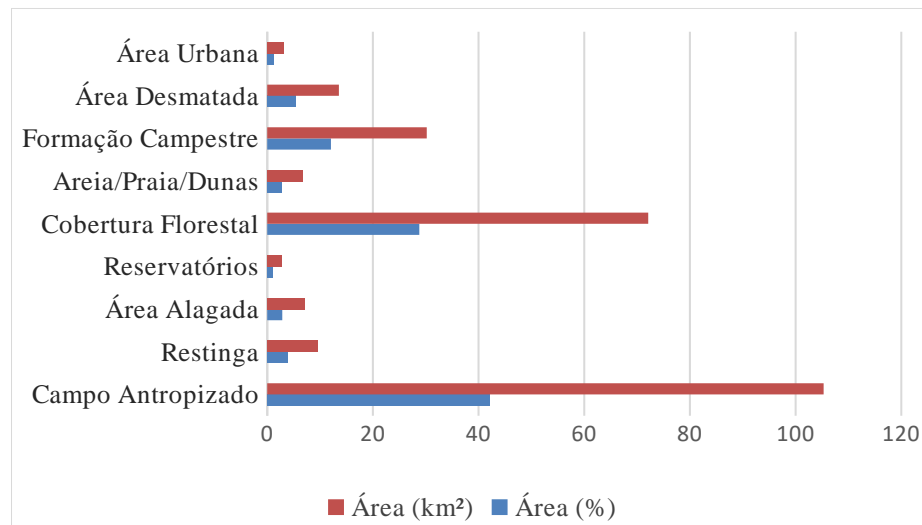
Classe	Definição
Campo Antropizado	Esta categoria abrange áreas que foram recentemente submetidas a intensa ação humana, resultando na supressão ou comprometimento significativo da vegetação tanto acima quanto abaixo do solo.
Restinga	São faixas alongadas de areia, paralelas à linha costeira, predominantemente formadas pela ação de transporte e deposição de sedimentos arenosos pelo mar. Essas áreas abrangem uma variedade de ambientes distintos, incluindo manguezais, áreas pantanosas, dunas, além de lagoas tanto temporárias quanto perenes. A vegetação que prospera ao longo desses cordões arenosos se manifesta em formas arbóreas, arbustivas e herbáceas.
Área Alagada	Essa classe abrange áreas planas e baixas, sujeitas a alagamentos sazonais, localizadas nas cabeceiras de rios, zonas de transbordamento de rios ou próximas a lagos e lagoas. Geralmente, essas áreas são cobertas por vegetação higrófila típica de várzea.
Reservatório	São corpos de água.
Cobertura Florestal	Essa classe é ocupada por florestas nativas. Isso inclui diversas categorias, como Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional e Floresta Ombrófila Mista.
Areia/Praia/Dunas	Essa classificação engloba as praias e dunas. As praias são depósitos de sedimentos, geralmente arenosos, acumulados pela ação das ondas que, devido à sua mobilidade, se adaptam às condições das ondas e marés. Por essa razão, representam um importante elemento de proteção costeira, além de serem amplamente utilizadas para atividades de lazer.
Formação Campestre	Essas formações se caracterizam por um estrato predominantemente arbustivo, dispersamente distribuído sobre um estrato gramíneo-lenhoso. Incluem-se nessa categoria as Savanas, Estepes, Savanas-Estépicas, Formações Pioneiras e Refúgios Ecológicos.
Área Desmatada	Área que está em processo de remoção completa da cobertura vegetal natural de um bioma, independentemente da finalidade posterior dessas áreas.
Área Urbana	Esta categoria abrange áreas ocupadas por edificações e infraestrutura viária, englobando todo o sistema urbano das cidades, municípios, distritos, vilas e vias pavimentadas.

Figura 4 – 4A - Visualização de solos arenosos; 4B - Lagoa do Boqueirão; 4C - Rio Boqueirão na área urbana da cidade de Touros/RN; 4D - riacho no interior da bacia; 4E - planícies alagadas; 4F - Formação campestre; restinga; 4H e 4I cobertura vegetal rasteira e de médio porte esparsa, respectivamente.



Fonte: Autoria própria, 2024

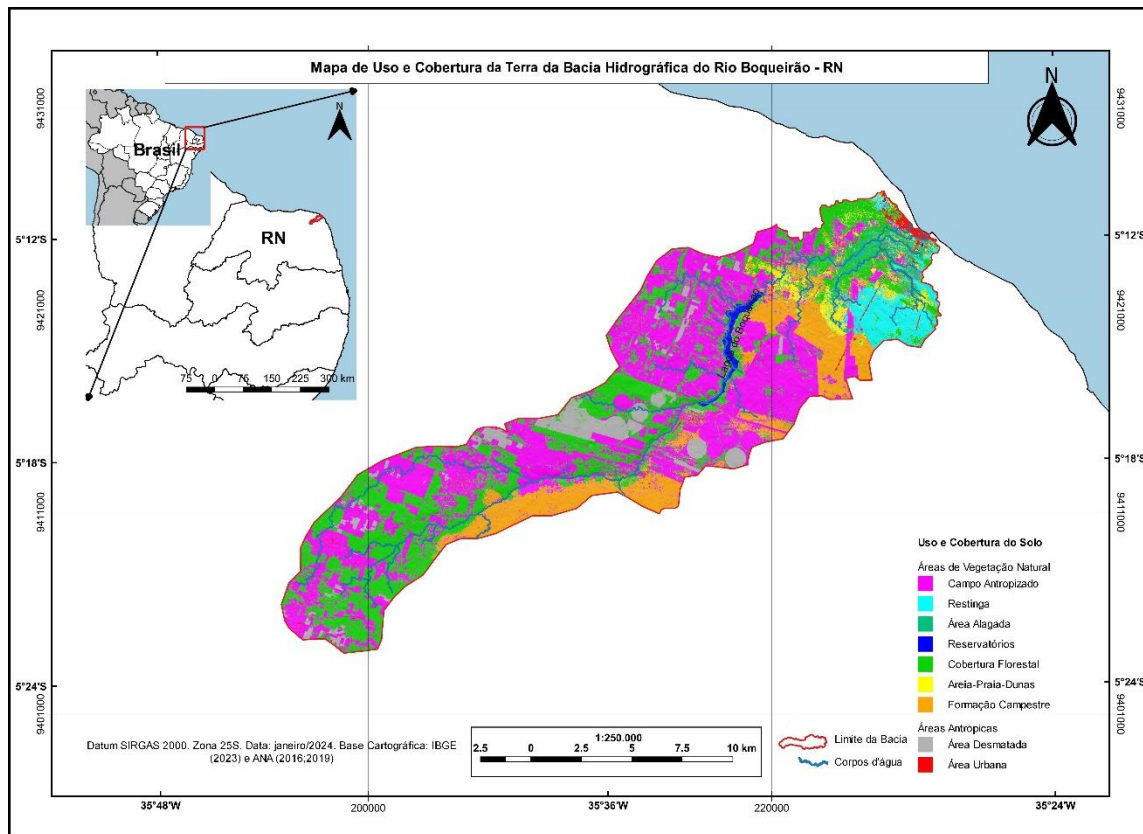
Figura 5 - Percentual do Uso e Cobertura da Terra da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.



Os dados analisados revelam que a maior parte da bacia ainda é coberta por campos antropizados, abrangendo aproximadamente 105,32 km, o que equivale a 42,05% do território. As áreas designadas como Reservatórios compreendem cerca de 1,07% da superfície, com destaque para a lagoa do Boqueirão, intensamente utilizada pelas atividades econômicas do entorno. Quanto a classe de área desmatada abrange 5,42% e 13% da área total mapeada. Já a área urbana engloba tanto a sede municipal, Touros/RN, quanto alguns assentamentos localizados na zona rural da bacia, totalizando apenas 1,27% do uso e ocupação da terra, conforme demonstrado nas Figuras 5 e 6.

O uso e cobertura da terra desempenham um papel fundamental na organização do território, visando potencializar as capacidades das atividades urbanas e rurais. Isso implica em controlar a densidade populacional e a expansão das atividades agrícolas, buscando otimizar os deslocamentos e promover a mobilidade tanto urbana quanto rural. Ao evitar possíveis conflitos entre funções urbanas e rurais. Realizar um planejamento que contribua para a preservação do meio ambiente e melhoria da qualidade de vida da população da bacia, fortalece, assim, o caminho para o desenvolvimento sustentável.

Figura 6 - Mapa de Uso e Cobertura da Terra da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN.



Análise da Vulnerabilidade Ambiental

O mapa de vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão, localizada no estado do Rio Grande do Norte, foi desenvolvido com base em procedimentos metodológicos consolidados na literatura onde se aplicam pesos compensatórios distintos para os valores de vulnerabilidade natural e para o uso e cobertura da terra.

Conforme a Tabela 3, a vulnerabilidade ambiental da bacia foi categorizada em quatro classes: Moderadamente estável, Medianamente estável/vulnerável, Moderadamente vulnerável e Vulnerável. Não foram identificadas áreas classificadas como Estável.

Em termos quantitativos, a classe mais predominante na Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão foi a Moderadamente Estável, abrangendo uma área de 84,72 km², equivalente a 33,75% da extensão total da bacia. Em seguida, a classe Medianamente Estável/Vulnerável foi identificada em uma área de 32,36 km², correspondendo a 12,92%. A classe Moderadamente Vulnerável apresenta os resultados mais expressivos da bacia cobrindo áreas de 131,81 km², a qual corresponde a 52,61% da área total, corroborando com o que foi visualizado em campo. A classe Vulnerável, corresponde com a menor proporção da bacia com uma área de 1,8 km² com área total de 0,72%.

As áreas classificadas como Moderadamente Estáveis estão presentes em toda a bacia, porém, estão mais concentradas a Nordeste, mais próxima da faixa litorânea com suas planícies alagadas. Essas áreas se caracterizam por um relevo plano, representativo da geomorfologia das Chapadas Potigüares, onde predomina uma vegetação restinga e grandes áreas alagadas (Figura 4E).

As áreas Medianamente Estáveis/Vulneráveis com níveis mais altos de vulnerabilidade se concentram principalmente na porção sul-sudeste da bacia. Elas se caracterizam pela presença de uma geologia composta por Coberturas Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica, solos do tipo Neossolo Quartzarênico Órtico e formações geomorfológicas típicas das Chapadas Potigüares. A vegetação

predominante é a Savana Arborizada, com uso e cobertura da terra dominados pela Formação Campestre. Semelhante à classe anterior, essas áreas requerem atenção especial por estarem em um nível de transição. No entanto, neste caso, há um baixo risco de tornarem-se moderadamente vulneráveis, dado o uso e ocupação predominante pela Formação Campestre.

A classe Moderadamente Vulnerável apresenta em uma região que requer mais atenção, pois enfrenta uma degradação crescente devido à intensa exploração para práticas agrícolas diversificadas e criação de gado. A expansão dessas atividades econômicas, apesar de contribuir significativamente para o desenvolvimento local, tem gerado impactos ambientais preocupantes. A agricultura intensiva e o desmatamento para a abertura de novas áreas de cultivo compromete a vegetação nativa, vem reduzindo a biodiversidade e a capacidade de absorção de água pelo solo.

Nessas áreas, o Campo Antropizado, Cobertura Florestal e Área Desmatada se destacam, especialmente ao longo da bacia e nas proximidades da Lagoa do Boqueirão. Essa classe apresenta a maior parcela de cobertura no terreno possuindo uma extensão de 131,81 km² (52,61%), evidenciando uma área em processo de antropização e avanço da ocupação humana. Esse processo de antropização é o principal responsável pela degradação ambiental observada na bacia.

A criação de gado, por sua vez, pode contribuir para a degradação por meio do pisoteio do solo e compactação, que reduzem a infiltração de água e aumentam o escoamento superficial. Esse escoamento carrega sedimentos e nutrientes para os cursos d'água, afetando negativamente a qualidade da água.

Por fim, as áreas classificadas como vulneráveis na escala de vulnerabilidade representam a menor porção, totalizando 1,8 km² e correspondendo a 0,72% da área total da bacia. Essa área que se localiza na costa leste, que apresenta o maior adensamento populacional, abriga a sede do município e ocupa a zona costeira. Nessa região também estão situados todos os equipamentos urbanos necessários para o funcionamento da cidade de Touros.

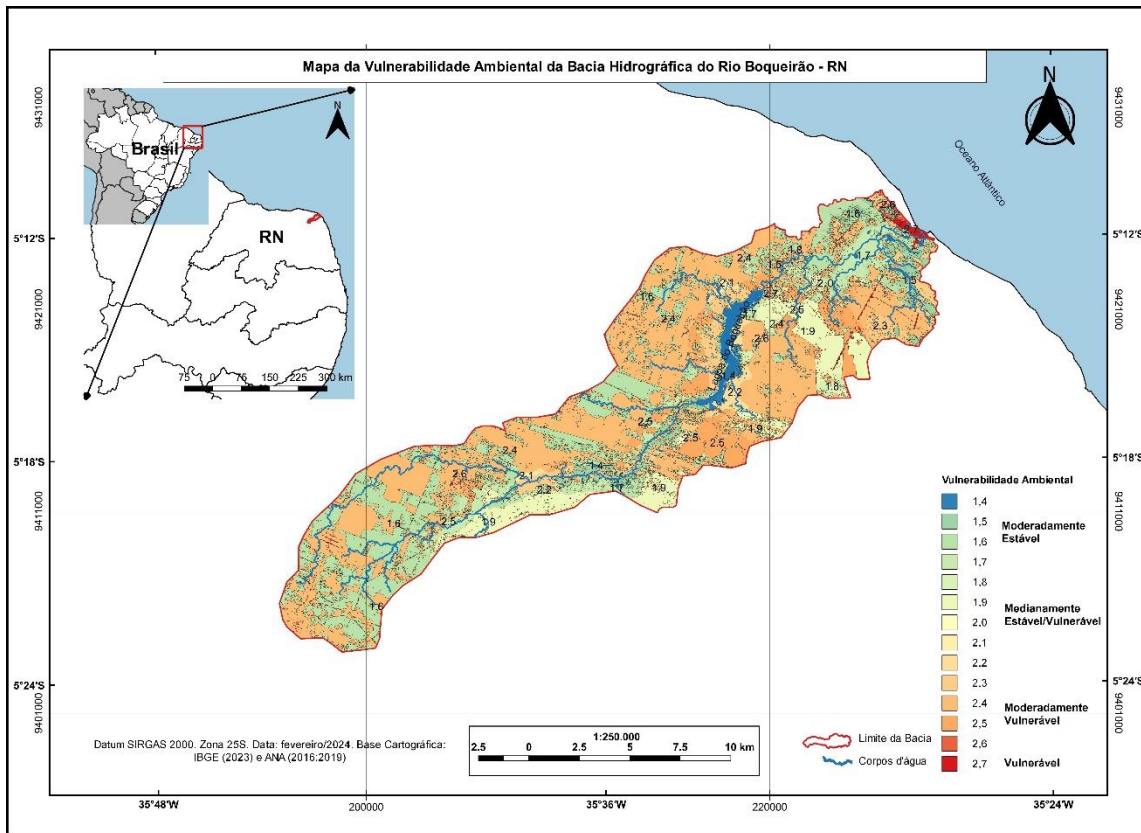
Essas áreas são cobertas por formações geológicas recentes, compostas por Depósitos Aluvionares Holocênicos, que incluem sedimentos aluviais e compartilham características semelhantes aos Aluviões Fluviolacustres. Do ponto de vista geomorfológico, trata-se de uma região de relevo plano a suave, com ocupação antrópica dos solos já consolidada. Quanto à vegetação, é predominante a Formação Pioneira com influência Marinha-Herbácea.

Tabela 3 - Classes da Vulnerabilidade Ambiental da BHRB.

Classes de Vulnerabilidade		Área (%)	Total (%)	Área (km ²)	Total (km ²)
Moderadamente Estável	1,4	1		2,49	
	1,5	4,18	33,75	10,47	84,52
	1,6	22,28		55,81	
	1,7	6,29		15,75	
Medianamente Estável/Vulnerável	1,8	1,25		3,12	
	1,9	9,05		22,67	
	2,0	0,42	12,92	1,05	32,36
	2,1	0,5		1,26	
Moderadamente Vulnerável	2,2	1,7		4,26	
	2,3	6,04		15,14	
	2,4	38,89	52,61	97,43	131,81
	2,5	7,13		17,86	
Vulnerável	2,6	0,55		1,38	
	2,7	0,72	0,72	1,8	1,8

Fonte: Organizado pela autora.

Figura 7 - Mapa de Vulnerabilidade Ambiental da bacia do Rio Boqueirão/RN.



CONCLUSÃO

As análises do uso e ocupação da terra e da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Boqueirão revelam uma situação preocupante de expansão da degradação ambiental por meio da forte exploração para o uso agrícola. A aplicação das metodologias de Crepani *et al.* (2001), Grigio (2003) e Oliveira (2011) permitiu identificar que 52,61% da área da bacia é moderadamente vulnerável, e que a expansão dessas atividades sem planejamento territorial poderá no futuro afetar a própria atividade econômica em curso.

As áreas Moderadamente Estáveis, embora representem 33,75% da bacia, são concentradas principalmente no nordeste e são vulneráveis à pressão agrícola. As áreas Medianamente Estáveis/Vulneráveis, que abrangem 12,92% da bacia, também requerem atenção devido à sua posição de transição. A classe Vulnerável, apesar de representar apenas 0,72% da área, está localizada na densamente povoada costa leste, incluindo a sede do município de Touros.

As atividades econômicas, apesar de promoverem o desenvolvimento local, têm gerado impactos ambientais significativos e preocupantes, destacando-se nesta pesquisa a necessidade urgente de implementar medidas de proteção e gestão sustentável para mitigar esses impactos e preservar a bacia.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. R. M. et al. Mapeamento de uso da terra para avaliação da qualidade das águas do Reservatório Guarapiranga. *Revista Geociências*, v. 34, n. 2, p. 258-274, 2015.

ARAÚJO, R. C.; GOMES, D. D. M.; SANTOS, J. Y. G.; MOURA-FÉ, M. M. Mapeamento de vulnerabilidade ambiental da sub-bacia do Rio Bodó, na região da Serra de Santana, estado do Rio Grande do Norte, Brasil. *Northeast Geosciences Journal*, v. 9, n. 1, p. 45-59, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Massa d'água.shp. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2016. 30/02/24
<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Curso d'água.shp. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2019. 28/05/24
<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>.

CHOUDHARY, K.; SINGH, M.; KUPRIYANOV, A. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences Spatial modelling for natural and environmental vulnerability through remote sensing and GIS in Astrakhan , Russia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, v. 21, n. 2, p. 139–147, 2018.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento territorial. São José dos Campos: SAE/INPE. (INPE-8454-RPQ/722), 2001.

DIAS, L. S. M.; DINIZ, T. B.; COSTA, A. J. S. T. O uso e ocupação do solo nas margens do Rio Comprido, Rio de Janeiro–RJ. *Geografia em Atos*, v. 15, n. 2, p. 45-60, 2023

DINIZ, F. G.; SILVA, M. do S. F.; ANDRADE, M. H. da S. Impactos socioambientais e a conservação do Córrego Bandeira em Campo Grande - MS. *Revista Monografias Ambientais*, v. 20, p. 1-15, 2021.

GRIGIO, A. M.; CASTRO, A. F.; SOUTO, M. V. S.; AMARO, V. E.; VITAL, H.; DIODATO, M. A. Use of Remote Sensing and Geographical Information System in the Determination of the Natural and Environmental Vulnerability of the Municipal District of Guamaré - Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 39, p.1427 – 1431, 2006.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Variáveis geomorfométricas locais. São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em: 10/05/2023.

IBGE. Vegetação. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao.html>. Acesso em: 21/04/2023.

IBGE. Geologia. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geologia.html>. Acesso em: 21/04/2023.

IBGE. Pedologia. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia.html>. Acesso em: 22/04/2023.

IBGE. Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra: série histórica. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html>. Acesso em: 22/04/2023.

IBGE. Geomorfologia. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia.html>. Acesso em: 03/05/2023.

IBGE. Geociências. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 02/06/2023.

MAPBIOMAS. O Projeto. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/o-projeto>. Acesso em: 10/05/2023.

MEDEIROS, R. B.; SANTOS, L. C. A.; BEZERRA, J. F. R.; SILVA, Q. D.; MELO, S. N. Vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Buriticupu, Maranhão-Brasil: o relevo como elemento chave. *Sociedade & Natureza*, v. 35, n. 1, p. 123-137, 2023.

QGIS Development Team, 2015. QGIS Geographic Information System: Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 10 maio 2023.

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. *Revista do Departamento de Geografia – USP, São Paulo*, v. 8, n. 1, p. 63-74, nov. 1994.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (RN). Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte (ed.). *Bacia Boqueirão*. Natal, 2009. Disponível em: <http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/IGARN/doc/DOC00000000028894.PDF>. Acesso em: 18/05/2023.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (RN). Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte (ed.). *Bacia Boqueirão*. Natal, 2009. Disponível em: <http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/IGARN/doc/DOC00000000028894.PDF>. Acesso em: 18/05/2023.

TAGLIANI, C. R. A., 2003. Técnica para Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de Ambientes Costeiros utilizando um sistema geográfico de informação. In: *Seminário Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 11, 2003, Belo Horizonte. Anais... São José dos Campos: INPE, p. 1657-1664.

TRICART, J. *Ecodinâmica*. 1 ed. Rio de Janeiro: IBGE. 91p. 1977.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento da vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN revelou uma distribuição heterogênea das áreas vulneráveis ao longo da região. As análises detalhadas das classes de vulnerabilidade ambiental destacaram diferentes características geológicas, climatológicas, solos, geomorfológicas, de cobertura vegetal e de uso e cobertura da terra em cada uma das categorias identificadas.

É sabido que as ações antrópicas se configuram em um dos processos que atenuam a degradação ambiental, desse modo, estudos que englobam uma perspectiva sistêmica e integrada permitem a elaboração de propostas para um uso sustentável e planejamento ambiental e territorial das referidas áreas de estudo, bem como estudos de vulnerabilidade ambiental, sob a égide da teoria Ecodinâmica. Nesse contexto, as propostas de um uso racional dos recursos em conformidade de suas potencialidades e limitações de uso e ocupação, permitem uma redução dos processos de degradação ambiental e também uma recuperação das áreas degradadas, em conformidade com os preceitos do desenvolvimento sustentável.

Moura et al. (2017) inferiram que o conhecimento da morfodinâmica de uma bacia e a sua classificação em unidades de paisagem de acordo com o grau de vulnerabilidade natural à perda da terra por erosão, pode fornecer subsídios ao Zoneamento Ecológico-Econômico

As revisões bibliográficas realizadas foram essenciais para a compreensão das vulnerabilidades e dos problemas ambientais na área de pesquisa. Associadas ao trabalho de campo e ao uso de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento através de SIG, essas revisões potencializaram significativamente o desenvolvimento do estudo. Dada a pequena dimensão da área, o trabalho de geoprocessamento apresentou desafios complexos, tornando essas abordagens ainda mais importante para alcançar os objetivos propostos.

A metodologia empregada na análise das vulnerabilidades natural e ambiental, respaldada por Crepani *et al.* (2001), Grigio (2003) e Oliveira (2011), demonstrou resultados satisfatórios e passíveis de comparação. Foi possível verificar sua adequação e capacidade de atender às demandas requeridas com precisão. No entanto, é perceptível que em regiões com características geodinâmicas similares, são necessários ajustes adicionais. Uma distribuição mais refinada de graus ou classes de vulnerabilidade se faz necessária para uma melhor distinção entre os resultados, evitando a homogeneização devido às similaridades naturais da área. A aplicação da álgebra de mapas como técnica para o cruzamento dos mapas temáticos revelou-se eficaz e confiável, garantindo com segurança o modelamento e a espacialização dos graus de vulnerabilidade.

A análise integrada dos dados sobre geologia, solo, geomorfologia, vegetação e clima na

Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão permitiu identificar sua vulnerabilidade natural com cerca de 55% da bacia foi classificada como medianamente vulnerável, destacando a importância de monitoramento e gestão para preservar sua estabilidade ambiental. A maioria da área varia de medianamente estável vulnerável a moderadamente vulnerável, indicando a necessidade de proteção desse ecossistema.

Com base nos resultados alcançados, o mapeamento da vulnerabilidade ambiental da BHRB identificou uma distribuição heterogênea das áreas vulneráveis, com predominância de áreas Moderadamente Estável, Medianamente Estáveis/Vulneráveis, Moderadamente Vulnerável, ao longo da drenagem principal, e vulneráveis nas porções sul-sudeste e costa leste da bacia. Essas áreas enfrentam diferentes níveis de risco e degradações ambientais, requerendo uma gestão integrada para promover a conservação dos recursos naturais e melhorar a qualidade de vida das comunidades locais. As áreas que apresentam maior vulnerabilidade foram aquelas com maior interferência antrópica e sem vegetação.

A pesquisa forneceu novas informações organizadas e estruturadas que contribuem para o processo em curso de rápida transformação do território para uso pelo setor do agronegócio. No entanto, essa transformação pode aumentar os riscos de degradação, devido ao uso intensivo do solo, emprego de agrotóxicos e esgotamento das fontes de água. A costa leste, que apresenta o maior adensamento populacional, abriga a sede do município e ocupa a zona costeira.

Os resultados alcançados permitiram identificar e concluir que os principais elementos da paisagem natural, como vegetação, hidrologia e solos que constituem a bacia, estão em fase adiantada de degradação ambiental e que o mapeamento das vulnerabilidades natural e ambiental, ora analisados, pode servir e indicar subsídios para discussão e implementação de políticas públicas de recuperação, manejo e preservação ambiental na BHRB, reconhecendo-se, porém, a necessidade de estudos de maior detalhe, de análise das potencialidades e vulnerabilidades do uso da terra e hidrologia, visando o correto planejamento e ordenamento territorial da bacia.

A pesquisa forneceu novas informações organizadas e estruturadas para contribuir com o entendimento do rápido processo de transformação do território para uso pelo setor do agronegócio. Esse desenvolvimento também poderá aumentar os riscos de degradação devido ao uso intensivo do solo, ao emprego de agrotóxicos e ao esgotamento das fontes de água.

8 CONCLUSÃO

Com a premissa do entendimento, surgiram algumas perguntas que nortearam esta pesquisa: a vulnerabilidade natural da BHRB é alta, mediana ou baixa? Existe e como anda a vulnerabilidade ambiental? Como e com o que se pode estudar a vulnerabilidade ambiental na BHRB? A partir dessas indagações, foram formuladas duas hipóteses: (1) a vulnerabilidade ambiental na BHRB é significativa e tem forte relação com o tipo de uso e ocupação da terra; e (2) a vulnerabilidade ambiental pode estar relacionada com a falta de políticas públicas estruturadoras e de comitês de bacia para gestão e monitoramento voltados para o uso sustentável dos recursos naturais, sendo a ausência desses elementos um fator que propicia a degradação ambiental.

O mapeamento da Bacia Hidrográfica do Rio Boqueirão/RN revelou uma situação de vulnerabilidade ambiental preocupante, corroborando ambas as hipóteses. A análise metodológica baseada em Crepani et al. (2001), Grigio (2003) e Oliveira (2011) indicou que 52,61% da área da bacia apresenta níveis moderadamente vulneráveis. A BHRB encontra-se em uma faixa preocupante que varia de medianamente estável/vulnerável (1,8) a moderadamente vulnerável (2,6), evidenciando a forte relação entre a vulnerabilidade ambiental e o uso intensivo do solo para atividades agrícolas e pecuárias, conforme previsto na hipótese 1.

A análise detalhada da bacia permitiu classificá-la em diferentes níveis de vulnerabilidade. As áreas classificadas como Moderadamente Estáveis abrangem 33,75% da bacia, destacando-se pela presença de planícies alagadas e vegetação de restinga. Contudo, a maior parte da bacia, representando 52,61%, está em uma condição Moderadamente Vulnerável, reflexo da exploração agrícola diversificada e da criação de gado. Essas atividades, apesar de contribuírem para o desenvolvimento econômico, têm gerado impactos ambientais significativos, como desmatamento, perda de biodiversidade, erosão, assoreamento e degradação da qualidade da água.

As áreas Medianamente Estáveis/Vulneráveis (12,92%) apresentam papel crítico como zonas de transição, sendo particularmente sensíveis às práticas de manejo da terra. Já as áreas classificadas como Vulneráveis, embora representem apenas 0,72% da bacia, estão concentradas na costa leste, onde há maior adensamento populacional e intensa ocupação urbana, agravando os desafios ambientais na região.

A pesquisa também identificou que a ausência de políticas públicas estruturadas e a falta de comitês de bacia para a gestão integrada e o monitoramento sustentável da BHRB contribuem para o agravamento da vulnerabilidade ambiental, conforme sugerido na hipótese 2. Essa lacuna institucional reforça a urgência de medidas de proteção que incluam planejamento

territorial, recuperação de áreas degradadas e o fortalecimento de governança ambiental.

Portanto, a pesquisa evidencia a necessidade de implementar políticas públicas e práticas de gestão sustentável que atendam às especificidades da BHRB. As informações organizadas e estruturadas neste estudo não apenas respondem às perguntas iniciais, mas também oferecem subsídios para orientar futuras ações voltadas à mitigação da vulnerabilidade ambiental e à promoção de um equilíbrio entre desenvolvimento econômico e conservação ambiental na região.

9 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). 2016. Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu. Brasília: Agência Nacional de Águas.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Massa d'água.shp. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2016. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Massa d'água.shp. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2016. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Curso d'água.shp. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Curso d'água.shp. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>.
- ALVARES, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, DOI: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- AQUINO, Afonso Rodrigues; Paletta, Francisco Carlos; Almeida, Josimar Ribeiro, 2017. Vulnerabilidade ambiental. Afonso Rodrigues de Aquino, São Paulo: Blucher., 112 p.
- AQUINO, Marisete Dantas; Mota, Suetônio., 2019. Planejamento ambiental e ordenamento territorial em bacias hidrográficas. In: Philippi Jr., Arlindo. Sobral, Maria do Carmo. Gestão de bacias hidrográficas e sustentabilidade. 1.ed. Barueri, SP: Ed. Manole., pag. 3-18.
- ARAÚJO, R. C., 2023. Mapeamento de Vulnerabilidade Ambiental da Sub-bacia do Rio Bodó, na região da Serra de Santana, estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Rev. Geociênc. Nordeste, Caicó, v.9, n.1, p.71-87.
- BARBOSA, L. G. Análise de sistemas em Biogeografia: estudo diagnóstico da cobertura vegetal da Floresta Nacional de Palmares, Altos, Piauí /Brasil. 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015.
- BARRETO, A. M. F.; BEZERRA, F. H. R.; SUGUIO, K.; TATUMI, S. H.; YEE, M. PAIVA, R.P. & MUNITA, C. S. 2002 Late Pleistocene marine terrace deposits in northeastern Brazil: sea level change and tectonic implications. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 179, p. 57 – 69.
- BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K.; BEZERRA, F. H. R.; TATUMI, S. H.; GIANNINI, P.C. 2004. Geologia e Geomorfologia do Quaternário Costeiro do Estado do Rio Grande do Norte. Geologia USP. Série Científica - USP, São Paulo, V. 4, n. 2, p 1 – 12.
- BELATO, L. S.; SERRÃO, S. L. C., 2019. Aplicação da vulnerabilidade ambiental do município de Tomé-Açu, Estado do Pará. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais,

Aracajú, v.10, n.1, p.131-145.

BEZERRA, F. H. R & VITA-FINZI, C. 2000. How active is a Passive Margin? Paleoseismicity in Northeastern Brazil. *Geology*, V. 28, p. 591-594.

BERTRAND, C.; BERTRAND, G. La végétation dans le géosystème. *Phytogéographie des montagnes cantabriques centrales (Espagne)*. *Révue Géographique des Pyrénées et du SudOuest*, Toulouse, v. 57, n. 3, p. 291-312, juil./sept. 1986.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 120, n. September 2017, p. 105–125, 2018.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento territorial. São José dos Campos: SAE/INPE. (INPE-8454-RPQ/722), 2001.

COSTA, Fabiane Hilario dos Santos et al. Determinação da vulnerabilidade ambiental na bacia potiguar, região de Macau (RN), utilizando sistemas de informações geográficas. *Revista Brasileira de Cartografia*, [S.l.], v.58, n. 2, p.119-127, ago. 2006.

COSTA, F.R; SOUZA, R.F.; SILVA, S.M.P.; COSTA JUNIOR, M.F. Caracterização pluviométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Doce – RN. VIII Workshop de Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos do estado de Pernambuco e V Workshop Internacional sobre mudanças climáticas e biodiversidade. Anais, Recife – PE, 2017.

CHOUDHARY, K.; SINGH, M.; KUPRIYANOV, A. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences Spatial modelling for natural and environmental vulnerability through remote sensing and GIS in Astrakhan , Russia. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v. 21, n. 2, p. 139–147, 2018.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise de sistemas em Geografia. São Paulo: Editora Hucitec, 1979, 144p.

CRUZ, L. P., 2009. Avaliação do Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto. 139 p.

CUNHA, M. S. *Etnopedologia na unidade de produção agrícola familiar Canto da Ilha de Cima, São Miguel do Gostoso, RN*. 2016. 62 f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água). Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água - Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2016.

CUTTER, S. L. Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, v. 20, n. 4, p. 529-539, 1996.

DANTAS M.E.; ARMESTO R.C.G.; SILVA C.R.; SHINZATO E. Geodiversidade e análise da paisagem: uma abordagem teórico-metodológica. *Terra Didática*, 11(1):0413. <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>. Acesso em jan. 2024.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. de.; VIEIRA, V. P. P. B.; MOTA, S.; ROSA, M. F.; MIRANDA, S. Análise da Vulnerabilidade Ambiental. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010.

Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/33965/1/DO10002.pdf>. Acesso em: 11 de novembro de 2023.

FUSHIMI, M. Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares nas áreas rurais do município de Presidente Prudente - SP. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2012.

FUSHIMI, M. Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares de parte dos municípios de Marabá Paulista-SP e Presidente Epitácio-SP. 2016. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2016.

FUSSEL, H. M. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, v. 17, p. 155-167, 2007.

GRIGIO, A. M.; CASTRO, A. F.; SOUTO, M. V. S.; AMARO, V. E.; VITAL, H.; DIODATO, M. A. Use of Remote Sensing and Geographical Information System in the Determination of the Natural and Environmental Vulnerability of the Municipal District of Guamaré - Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 39, p.1427 – 1431, 2006.

GUERRA, A.J.T. E CUNHA, S.B. Geomorfologia e meio ambiente (Orgs.). 4ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

IBGE. Geociências. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 02/06/2023.

IBGE. Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra: série histórica. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html>. Acesso em: 22/04/2023.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Variáveis geomorfométricas locais. São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em: 10/05/2023.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Fifth Assessment Report*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

LAPPONI, Juan Carlos, Estatística usando Excel, 7ª reimpressão, Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

LEITE, E. F.; Berezuk, A. G.; Silva, C. A., 2022. A vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Miranda, Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.15, n.05, 2613-2639.

LI, A.; WANG, A.; LIANG, S.; ZHOU, W. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS – a case study in the upper reaches of Minjiang River, China. *Ecological Modeling*, v. 192, p. 175–187, 2006.

LIMA, L. C.; MORAIS, J. O. de; SOUZA, M. J. N. de. Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará. Fortaleza: Fundação Universidade Estadual do Ceará, 2000.

LIRA, K. C. S.; FRANCISCO, H. R.; FEIDEN, A., 2022. Classificação de fragilidade ambiental em bacia hidrográfica usando lógica Fuzzy e método AHP. *Sociedade & Natureza*. Uberlândia, MG, v. 34, e62872, ISSN 1982-4513.

LUCHIARI, M. T. P. A (Re)significação da Paisagem no Período Contemporâneo. *In: ROSENDAHL, Z.; CORRÊA, R. L. Paisagem, Imaginário e Espaço*. Rio de Janeiro: ed. UERJ, 2001.

MARQUES NETO, R. Considerações sobre a Paisagem enquanto Recurso Metodológico para a Geografia Física. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v.9, n.26, p. 243-255, jun. 2008.

MELO, J. G., OLIVEIRA, J. A., LOPES, V. L., FILHO, J. B. D., VASCONCELOS, M. B, SILVA, F. H. R., 2005. Avaliação Integrada dos Recursos de Águas Subterrâneas e Superficiais da Bacia do Rio Boqueirão, a oeste de Touros, RN. *Águas Subterrâneas*, v.19, n.2, p.121-136.

MENDONÇA, F. Diagnóstico e análise de microbacia hidrográfica: proposição metodológica na perspectiva do zoneamento, planejamento e gestão ambiental. *IN: RA'EGA: o espaço geográfico em análise*. Curitiba - PR: Ed. da UFPR, v.3, n.3, 1999, p.67-89.

MIRA, I. R. C.; Carvalho, D. S.; Souza, D. S. L.; Silva, M. L., 2022. Vulnerabilidade Ambiental da Sub-Bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.15, n.03 (2022) 1352-1370.

Moura, M. M. S., de Araújo Neto, J. R., de Quiroz Palácio, H. A., Batista, F. J. A., de Sousa, M. M. M., 2017. Vulnerabilidade à erosão quanto aos aspectos solo e vegetação em uma bacia hidrográfica no semiárido. *Entorno Geográfico* 13, 100-113.

NICOLAU, R. F., 2018. Vulnerabilidade da paisagem à perda de solos da bacia hidrográfica do rio do Peixe – Goiás. *Caminhos de Geografia*. Uberlândia – MG, v. 19, n. 66, p. 285-296.
 QGIS Development Team, 2015. QGIS Geographic Information System: Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 10 maio 2023.

PIRES, J.S.R.; SANTOS, J.E. Bacias Hidrográficas - Integração entre meio ambiente e desenvolvimento. *Ciência Hoje*, Rio de Janeiro, v. 19, n. 110, p. 40- 45, 1995.

ROCHA, L. B. de O.; MAGRI, R. A. F., 2022. Predição da perda de solo por erosão laminar na bacia hidrográfica do Ribeirão Bocaina, Passos – MG. *Revista Caminhos de Geografia*. Uberlândia-MG, v. 23, n. 87, p. 153–174.

ROSA, R. M., Ferreira, V. O., 2021. Vulnerabilidade natural à perda de solos na unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos afluentes mineiros do baixo Paranaíba – MG. *Revista Georaguia* 11, 107-13.

ROSS, J.L.S. *Geomorfologia, Ambiente e Planejamento*. S.,o Paulo: Ed. Contexto, 1990.

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. *Revista do Departamento de Geografia – USP*, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 63-74, nov. 1994.

RASMUSSEN, E. M., CARPENTER, T. H. The Relationship Between Eastern Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures and Rainfall over India and Sri Lanka. *Mon. Wea. Rev.*, v.111, 1983, p517–528.

SALES, V.C. Geografia, Sistemas e Análise Ambiental: Abordagem Crítica. GEOUSP - Espaço e Tempo, São Paulo, Nº 16, pp. 125 - 141, 2004.

SANTANA, N. S. Análise da Vulnerabilidade Ambiental de Salvador: um Subsídio ao Planejamento e à gestão territorial da cidade. 2014. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

SANTOS, Milton. Pensando o espaço do homem. 4. ed. São Paulo: Hucitec, 1997.

SANTOS, Leonardo José Cordeiro et al. Mapeamento da vulnerabilidade geoambiental do estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, [S.l.], v. 37, n. 4, p. 812-820, dez. 2007.

SANTOS, B. A. Q. dos. Análise da Vulnerabilidade Ambiental da área de Proteção Ambiental da Baleia Franca entre as pontas de Itapirubá e do Gi, Laguna, SC. 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Florianópolis, 2015.

SANTOS, J. Y. G.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M., 2012. Perdas de água e solo utilizando chuva simulada em diferentes coberturas superficiais e condições de umidade no semiárido paraibano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17(4): 217-228.

SANTOS, L. C. A.; Soares, I. G., 2020. Caracterização da Vulnerabilidade Ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Preto, Maranhão – Brasil. *Geografia (Londrina)* v. 29. n. 1. pp. 85-105.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (RN). Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte (ed.). Bacia Boqueirão. Natal, 2009. Disponível em: <http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/IGARN/doc/DOC000000000028894.PDF>. Acesso em: 18 maio 2023.

SILVA, A. M. Princípios básicos de hidrologia. Departamento de Engenharia. UFLA, Lavras-MG. 1995.

SILVA, J. S.V.; Neves, S. M. A. S. 2014; Vendrusculo, Laurimar Gonçalves., 2014. Caracterização ambiental da Unidade de Planejamento e Gerenciamento do rio Amambaí. *Revista GeoPantanal, UFMS/AGB, Corumbá/MS*, N. 16, 21-35.

SOTCHAVA, V. B. O Estudo de Geossistemas. São Paulo: Instituto de Geografia USP. 51 p. (Métodos em Questão, 16), 1977.

SOTCHAVA, V. B. Por uma Teoria de Classificação dos Geossistemas de Vida Terrestre. *Biogeografia*. São Paulo, n. 14, 1978. 24p.

SOUZA, S. O.; VALE, C. C.; NASCIMENTO, F. H., 2013. Bacia do rio Peruípe (BA): ensaio de classificação morfométrica por meio de dados SRTM. *Revista Caminhos de Geografia*. Uberlândia, v. 14, n. 47 Set. p. 208–222. ISSN 1678-6343

ZANELLA, M. A.; OLÍMPIO, J. L.; COSTA, M. C. L.; DANTAS, E. W. C., 2013. Vulnerabilidade Socioambiental do Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Cocó, Fortaleza-CE. *Soc. & Nat.*, Uberlândia, 25 (2): 317-332.

ZALIDIS G., Stamatiadis S., Takavakoglou V., Eskridge K., Misopolinos N. 2002. Impacts of Agricultural Practices on Soil and Water Quality in the Mediterranean Region and Proposed Assessment Methodology. *ELSEVIER, Agriculture, Ecosystems and Environmental*, 88: 137-14.

TAGLIANI, C. R. A., 2003. Técnica para Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de Ambientes Costeiros utilizando um sistema geográfico de informação. In: *Seminário Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 11, 2003, Belo Horizonte. *Anais...* São José dos Campos: INPE, p. 1657-1664.

TRICART, J. *Ecodinâmica*. 1 ed. Rio de Janeiro: IBGE. 91p. 1977.

THIRUMURTHY, S. 2022. Avaliação de vulnerabilidade ambiental costeira multicritério usando análise de incerteza baseada em processo de hierarquia analítica integrada ao GIS. *Jornal de Gestão Ambiental*. v. 313, Setembro.2022.

TROPPMAIR, H. *Biogeografia e meio ambiente*. Rio Claro - SP: Divisa, 2006. PASSOS, M. M. dos. *Biogeografia e Paisagem*. 2. ed. Maringá: UEM, 2003.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

VALE, C.C. Teoria geral do sistema: histórico e correlações com a geografia e com o estudo da paisagem. *Revista entre-lugar*. Dourados, MS, ano 3, n.6, jul-dez, 2012, p.85-108.

VITTE, A. C. O desenvolvimento do conceito de paisagem e a sua inserção na geografia física. *Mercator - Revista de Geografia da UFC*, Fortaleza, v.6, n. 11, p.71-78, jan./jun. 2007.