



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE – UERN
FACULDADE DE CIÊNCIAS SOCIAIS E ECONÔMICAS – FACEM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PPGE
MESTRADO ACADÊMICO EM GEOGRAFIA – MAG



**ANÁLISE DOS SISTEMAS AMBIENTAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO DO CARMO-RN, BRASIL**

MOSSORÓ/RN

2024

HERICK DANIEL CARVALHO DOS SANTOS

**ANÁLISE DOS SISTEMAS AMBIENTAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO DO CARMO-RN, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Linha de Pesquisa: Estudos Socioambientais

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Marcelo Grigio

Coorientadora: Profa. Dra. Gabriela Cemirames de Sousa Gurgel

MOSSORÓ-RN

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do(a) autor(a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu(a) respectivo(a) autor(a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

CATALOGAÇÃO DA PUBLICAÇÃO NA FONTE.
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE.

S237a Santos, Herick Daniel Carvalho dos
ANÁLISE DOS SISTEMAS AMBIENTAIS DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DO CARMO-RN, BRASIL. /
Herick Daniel Carvalho dos Santos. - Mossoró, 2024.
184p.

Orientador(a): Prof. Dr. Alfredo Marcelo Grigio.
Coorientador(a): Profa. Dra. Gabriela Cemirames de
Sousa Gurgel.

Dissertação (Mestrado em Programa de Pós- Graduação em
Geografia). Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

1. Sistemas de Informação Geográfica. 2. Uso e Cobertura da
Terra. 3. Geossistema. 4. Vulnerabilidade Natural. 5.
Vulnerabilidade Ambiental. I. Grigio, Alfredo Marcelo. II.
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pela Diretoria de Informatização (DINF), sob orientação dos bibliotecários do SIB-UERN, para ser adaptado às necessidades da comunidade acadêmica UERN.

HERICK DANIEL CARVALHO DOS SANTOS

**ANÁLISE DOS SISTEMAS AMBIENTAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO DO CARMO-RN, BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geografia.
Área de concentração: Paisagens Naturais e Meio Ambiente
Linha de pesquisa: Estudos Socioambientais
Orientador: Prof. Dr. Alfredo Marcelo Grigio
Coorientadora: Profa. Dra. Gabriela Cemirames de Sousa Gurgel

Aprovada em: 05 de março de 2024.

Banca Examinadora

Prof^ª. Dr. Alfredo Marcelo Grigio (Orientador)

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN)

Prof. Dr. Filipe Peixoto (Examinador interno)

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN)

Profa. Dra. Débora Nogueira Lopes (Examinador externo)

Universidade Federal de Goiás (UFG)

Profa. Dra. Márcia Regina Farias da Silva (Suplente Interna)

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN)

Marco Antonio Diodato (Suplente Externo)

Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

MOSSORÓ-RN

2024

Dedico este trabalho a Deus, à UERN, aos meus orientadores, à banca examinadora, à minha chefe, ao meu trabalho, à minha família, à minha esposa, aos meus colegas, aos amigos, pesquisadores e aos leitores desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha imensa gratidão a Deus, fonte da minha força e inspiração. Refúgio fundamental para me sustentar durante toda esta jornada.

Gostaria de estender meus sinceros agradecimentos à Universidade do Estado do Rio Grande do Norte e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, por proporcionarem o ambiente acadêmico propício para o meu crescimento intelectual e pessoal.

Ao meu estimado orientador, Alfredo, e à dedicada coorientadora Gabriela, manifesto meu profundo reconhecimento por sua orientação sábia, estímulo incessante e valiosas contribuições, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha amada família, expresso minha eterna gratidão pelo amor incondicional, apoio inabalável e constante encorajamento. Seu suporte foi o alicerce que sustentou cada passo desta jornada desafiadora.

Aos amigos e colegas de trabalho e da faculdade, agradeço por compartilharem comigo essa trajetória, pelo apoio mútuo e pela troca de experiências que enriqueceram esta jornada acadêmica, desejo todo sucesso a vocês.

Não posso deixar de mencionar a generosidade e compreensão da minha chefe, Monique, e da empresa PROGEL, por permitirem que eu conciliasse os estudos com minhas responsabilidades profissionais. Sua flexibilidade e apoio foram fundamentais para alcançar esse marco.

E, é claro, não posso esquecer da minha querida esposa, Paula, cuja compreensão, paciência e incentivo foram inestimáveis ao longo desta jornada. Seu apoio inabalável e presença constante foram a luz que iluminou os momentos mais desafiadores, uma parceria que estarei em eterna gratidão pelo resto da minha vida.

Por fim, dedico um reconhecimento a mim mesmo, por cada gota de suor, noite de estudo e sacrifício pessoal que investi nesse caminho. Enfrentei cada obstáculo com determinação, renunciando o conforto e lazer em prol do meu objetivo. Agradeço por nunca desistir, por superar a procrastinação e por persistir, mesmo diante das maiores adversidades. E aconselho você, caro leitor e pesquisador, que assim faça o mesmo, e acredite em seu potencial.

A todos vocês, expresso minha mais profunda gratidão. Cada um teve um papel crucial nesta jornada, contribuindo para que este trabalho fosse concebido, desenvolvido e agora defendido com sucesso.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistemas de Informações Geográficas e Uso para Pesquisas.	24
Figura 2 - Representação Matricial e Vetorial.....	26
Figura 3 - Análise de imagens do sensoriamento remoto.....	26
Figura 4 - Modelo de representação da Vulnerabilidade Natural e Ambiental.	34
Figura 5 - O método GTP de Georges Bertrand (2007).	39
Figura 6 - O Sistema GTP – Geossistema – Território – Paisagem, segundo BERTRAND.	41
Figura 7 - Modelo de representação de uma Bacia Hidrográfica.	50
Figura 8 - Mapa de Localização Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo, RN/PB, Brasil.	58
Figura 9 - Destaque dos municípios compostos na BHRC.	59
Figura 10 – Resumo da análise de criticidade dos trechos de rios.	65
Figura 11 - Método de Thornthwaite (1955).	66
Figura 12 - Processamento de Imagens para Uso e Cobertura da Terra.....	73
Figura 13 - Mapa de Campo - Pontos de Amostragem - Levantamento e Classificação.	74
Figura 14 - Fluxograma de ações para Vulnerabilidade Natural e Ambiental.	77
Figura 15 - Escala de tempo Geológico.....	86
Figura 16 - Mapa da Geologia da BHRC.	88
Figura 17 - Mapa da Geomorfologia da BHRC.	95
Figura 18 - Mapa da Declividade da BHRC.....	100
Figura 19 - Mapa da Hipsometria e Hidrografia da BHRC.....	104
Figura 20 - Barragem de Umari.....	107
Figura 21 - Mapa do Balanço Hídrico da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo.	110
Figura 22 - Mapa da Pluviometria da BHRC.	114
Figura 23 - Mapa da Pedologia da BHRC.....	118
Figura 24 - Mapa da Cobertura Vegetal – Vegetação da BHRC.....	123
Figura 25 - Perfis esquemáticos da Savana-Estépica.	124
Figura 26 - Blocos-diagramas das Fisionomias Ecológicas da Savana-Estépica.....	124
Figura 27 – Perfis esquemáticos das Formações Pioneiras sob Influência Marinha, Fluviomarina e Fluvial.	125
Figura 28 - Blocos-diagramas das Fisionomias Ecológicas das Formações Pioneiras sob Influência Marinha, Fluviomarina e Fluvial.....	126
Figura 29 - Mapa do Uso e Cobertura da Terra (2021) na BHRC.	129

Figura 30 - Mapa da Vulnerabilidade Natural da BHRC.	133
Figura 31 - Mapa da Vulnerabilidade Ambiental da BHRC.	136

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Amostragem da composição de Áreas da BHRC.	57
Gráfico 2 - Diferença populacional nos municípios da BHRC.	60
Gráfico 3 - PIB <i>per capita</i> dos municípios da BHRC.	62
Gráfico 4 – Balanço quali-quantitativo da BHRC.....	109
Gráfico 5 - Climograma da BHRC com Médias mensais de Precipitação das Estações Pluviométricas de Açu, Augusto Severo, Fazenda Angicos e Upanema, com dados de Evapotranspiração potencial (ETP) (1931-2019) e Temperaturas médias mensais (1981-2019).	112
Gráfico 6 - Distribuição Percentual da Vegetação.	120
Gráfico 7 - Compilado entre Diferenças Percentuais de Vulnerabilidades Naturais e Ambientais na BHRC.....	138

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Sequência de degradação de Geossistemas.	44
Quadro 2 - Representação de áreas dos municípios na BHRC.....	56
Quadro 3 - Representação da população dos municípios da BHRC.	60
Quadro 4 - Índice de desenvolvimento humano e econômico dos municípios.	61
Quadro 5 – Informações Gerais sobre a BHRC.	63
Quadro 6 - Obtenção de Bancos de Dados para Pesquisa.	71
Quadro 7 - Áreas propostas para confirmação de informações e reconhecimento da área.	75
Quadro 8 - Classes de Uso e Ocupação da Terra da BHRC.....	76
Quadro 9 - Graus de Vulnerabilidade – Relação da Morfogênese x Pedogênese.	78
Quadro 10 - Grau de Vulnerabilidade das Classes.	79
Quadro 11 - Declividade Média da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo.	81
Quadro 12 - Classificação simplificada dos Sistemas Ambientais da BHRC.....	83
Quadro 13 - Classificação Geral por Eras Geológicas e Unidades Geológicas da BHRC.....	87
Quadro 14 - Classificação Geomorfológica da BHRC.....	96
Quadro 15 - Cobertura Vegetal e Classificação das Áreas da BHRC.	119
Quadro 16 - Uso e Ocupação da Terra da BHRC.....	127
Quadro 17 - Análise da Vulnerabilidade Natural da BHRC.	131
Quadro 18 - Análise da Vulnerabilidade Ambiental da BHRC.....	134
Quadro 19 - Análise dos Sistemas Ambientais da BHRC.....	141
Quadro 20 - Análise das Vulnerabilidades no Sistema Ambiental (1) PLSN.	143
Quadro 21 – Análise Ilustrativa compilado de imagens do Sistema Ambiental (1) PLSN.....	145
Quadro 22 - Análise das Vulnerabilidades do Sistema Ambiental (2) TCA.....	151
Quadro 23 - Análise Ilustrativa compilado de imagens do Sistema Ambiental (2) TCA.	152
Quadro 24 - Análise das Vulnerabilidades do Sistema Ambiental (3) TSR	158
Quadro 25 - Análise Ilustrativa compilado de imagens do Sistema Ambiental (3) TSR.....	158
Quadro 26 - Análise das Vulnerabilidades do Sistema Ambiental (4) DSS.	163
Quadro 27 - Análise Ilustrativa compilado de imagens do Sistema Ambiental (4) DSS.....	165
Quadro 28 - Análise das Vulnerabilidades do Sistema Ambiental (5) SJV.	169
Quadro 29 - Análise Ilustrativa compilado de imagens do Sistema Ambiental (5) SJV.....	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo Geológico Simplificado da BHRC.....	91
Tabela 2 - Classificação da Litologia da BHRC.....	92
Tabela 3 - Total de áreas de naturezas e características geomorfológicas.	98
Tabela 4 - Declividade da BHRC.	101
Tabela 5 - Sistemas de Reservatórios da Bacia do Rio Apodi.	108
Tabela 6 - Pedologia da BHRC.	115

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANM – Agência Nacional de Mineração
BH – Bacia Hidrográfica
BHRC – Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo
CBH – Comitê de Bacia Hidrográfica
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DD – Densidade de Drenagem
DH – Densidade Hidrográfica
DSS – Depressão Sertaneja Setentrional
E – (East) Leste
ESRI – (*Environmental Systems Research Institute*)
ETP – Evapotranspiração Potencial
GEE – Google Earth Engine
GPS – Global Positioning System
GTP – Geossistema Território e Paisagem
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGARN – Instituto de Gestão das Águas do Rio Grande do Norte
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IVA – Índice de Vulnerabilidade Ambiental
IQA – Índice de Qualidade de Água
N – (North) Norte
NC – Nível de cinza
NE – (North East) Nordeste
NW – (North West) Noroeste
PB – Paraíba
PLSN - Planícies do Litoral Setentrional Nordestino
PMA – Pluviosidade Média Anual
PPT – Precipitação
RN – Rio Grande do Norte
S – (South) Sul
SE – (South East) Sudeste

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SMPJ – Serras do Martins Porta-Alegre e João do Vale

SR – Sensoriamento Remoto

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

SW – (South West) Sudoeste

TCA – Tabuleiros da Chapada do Apodi

TSR – Tabuleiros da Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu

VA – Vulnerabilidade Ambiental

VN – Vulnerabilidade Natural

W – (West) Oeste

RESUMO

No contexto do semiárido brasileiro, as bacias hidrográficas enfrentam uma série de desafios ambientais e socioeconômicos, por meio dos impactos através do uso da terra com as atividades antrópicas, há uma acentuação dos processos erosivos com a escassez de água e degradação dos recursos naturais. Utilizou-se dados bibliográficos e de bancos de dados geográficos, por meio do uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), para análise da paisagem, geossistema e distribuição territorial. Este estudo tem por objetivo identificar, caracterizar e analisar os Sistemas Ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo/RN. Por meio dos parâmetros biofísicos foram analisados aspectos da Geologia, Geomorfologia, Hidrologia, Climatologia, Pedologia, Vegetação e Uso e Cobertura da Terra. A partir dos estudos da Ecodinâmica, foi possível medir e analisar os aspectos da vulnerabilidade natural e ambiental, com a relação entre pedogênese e morfogênese. Apresentou-se a dinâmica de seu balanço hídrico em estado crítico, considerando a alta demanda, e os fatores morfoclimáticos do semiárido. Em seguida, foram subdivididos cinco Sistemas Ambientais, como Planícies do Litoral Setentrional Nordeste, Tabuleiros da Chapada do Apodi, Tabuleiros da Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu, Depressão Sertaneja Setentrional e Serras do João do Vale. Destacou-se as condições naturais, usos e impactos das atividades antrópicas, com a exploração dos recursos hídricos, por meio da atividade salineira, aquicultura, atividade petrolífera, mineração, desmatamento, agropecuária e entre outras. A partir dos resultados, com a distribuição percentual das áreas, para Vulnerabilidade Natural foi medido um quantitativo maior de áreas medianamente estáveis ou vulneráveis, com equilíbrio entre a morfogênese e a pedogênese, assim como a análise individual de cada Sistema Ambiental. Para a Vulnerabilidade Ambiental considerou-se que as áreas estiveram mais estáveis, aproximando-se dos processos pedogenéticos, já a análise individual dos Sistemas, considerou também equilíbrio entre as áreas. Em suma, é proposto para gestores e pesquisadores, que utilizem esses resultados para melhorar a gestão dos recursos hídricos, visando a sustentabilidade desta bacia hidrográfica, e sugere-se que métodos com mais variáveis sejam aplicados para melhores resultados.

Palavras-chave: Sistemas de Informação Geográfica; Uso e Cobertura da Terra; Geossistema; Vulnerabilidade Natural; Vulnerabilidade Ambiental.

ABSTRACT

In the context of the Brazilian semiarid, river basins face a series of environmental and socioeconomic challenges, through impacts of land use with human activities, there is an accentuation of erosion processes with water scarcity and degradation of natural resources. Bibliographic data and geographic databases were used, through the use of Geographic Information Systems (GIS), to analyze the landscape, geosystem, and territorial distribution. This study aims to identify, characterize, and analyze the Environmental Systems of the Rio do Carmo/RN Hydrographic Basin. Through biophysical parameters, aspects of Geology, Geomorphology, Hydrology, Climatology, Pedology, Vegetation, and Land Use and Cover were analyzed. From Ecodynamic studies, it was possible to measure and analyze aspects of natural and environmental vulnerability, with the relationship between pedogenesis and morphogenesis. The dynamics of its water balance in a critical state were presented, considering the high demand and the morphoclimatic factors of the semi-arid region. Next, five Environmental Systems were subdivided, such as the Plains of the Northern Northeastern Coast, Tablelands of Chapada do Apodi, Tablelands of the Recessed Surface of the Açu River Valley, Northern Sertaneja Depression, and Mountains do João do Vale. The natural conditions, uses and impacts of human activities were highlighted, with the exploitation of water resources, through salt production, aquaculture, oil production, mining, deforestation, agriculture, and livestock farming, among others. Based on the results, with the percentage distribution of areas, for Natural Vulnerability, a larger quantity of moderately stable or vulnerable areas was measured, with a balance between morphogenesis and pedogenesis, as well as the individual analysis of each Environmental System. For Environmental Vulnerability, it was considered that the areas were more stable, approaching pedogenetic processes, while the individual analysis of the Systems also considered balance between the areas. In short, it is proposed that managers and researchers use these results to improve the management of water resources, aiming at the sustainability of this river basin, and it is suggested that methods with more variables be applied for better results.

Keywords: Geographic Information Systems; Land Use and Coverage; Geosystem; Natural Vulnerability; Environmental Vulnerability.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
2.	Objetivos	21
2.1.	Objetivo Geral.....	21
2.2.	Objetivos Específicos.....	21
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	22
3.1.	Geoprocessamento, SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e suas aplicações 22	
3.2.	Aplicações com Álgebra de Mapas em Análises Ambientais	30
3.3.	Geossistema, Território e Paisagem: Análise dos Sistemas Ambientais e Unidades da Paisagem (Uma Análise Integrada)	36
3.4.	Bacia Hidrográfica como Unidade de Análise.....	46
4.	METODOLOGIA	56
4.1.	Localização e Caracterização da área de estudo	56
4.1.1.	Dinâmica Territorial	56
4.1.2.	Hidrografia.....	62
4.1.3.	Clima	65
4.1.4.	Geologia.....	67
4.1.5.	Geomorfologia.....	67
4.1.6.	Vegetação	68
4.1.7.	Pedologia	68
4.1.8.	Uso e cobertura da Terra	69
4.2.	Materiais	69
4.2.1.	Levantamento bibliográfico.....	69
4.2.2.	Sistemas de Informação Geográfica (SIG).....	70
4.2.3.	Aquisição de arquivos para construção do banco de dados geográficos	70
4.2.4.	Aquisição de Imagens orbitais e dados de campo	73
4.3.	Métodos e Análises	76
4.3.1.	Análise e Levantamento da Caracterização dos Parâmetros Biofísicos da BHRC 76	
4.3.3.	Análise da pesquisa e Álgebra de Mapas	77
4.3.4.	Análise da pesquisa para Classificação dos Sistemas Ambientais	83
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85

5.1.	Análise da Caracterização dos Parâmetros Biofísicos da BHRC	85
5.1.1.	Análise da Geologia.....	85
5.1.2.	Análise da Geomorfologia.....	93
5.1.3.	Análise da Hidrografia.....	102
5.1.4.	Análise da Climatologia	111
5.1.5.	Análise da Pedologia	115
5.1.6.	Análise da Vegetação	119
5.1.7.	Análise do Uso e Cobertura da Terra	126
5.2.	Análise das Vulnerabilidades da BHRC	130
5.2.1.	Vulnerabilidade Natural	131
5.2.2.	Vulnerabilidade Ambiental.....	134
5.2.3.	Comparativo da Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental	137
5.3.	Análise dos Sistemas Ambientais da BHRC	140
5.3.1.	Planícies do Litoral Setentrional Nordeste (PLSN)	142
5.3.2.	Tabuleiros da Chapada do Apodi (TCA).....	149
5.3.3.	Tabuleiros da Superfície Rebaixada do Vale do Açu (TSR).....	156
5.3.4.	Depressão Sertaneja Setentrional (DSS)	162
5.3.5.	Serras de João do Vale (SJV)	168
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	172
7.	REFERÊNCIAS	175

1. INTRODUÇÃO

A análise dos sistemas ambientais em bacias hidrográficas é de suma importância para compreender a interação complexa entre os elementos naturais e as atividades humanas que ocorrem nessas áreas.

A Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo (BHRC), com uma área de 3596,85 km², é uma sub-bacia da Apodi-Mossoró, localizada no estado do Rio Grande do Norte, Brasil (IBGE, 2022).

Essa bacia desempenha um papel crucial como fonte de recursos hídricos e naturais para a região, sustentando o abastecimento de diversas comunidades difusas e cidades, impulsionando o desenvolvimento econômico regional.

Historicamente, as bacias hidrográficas no semiárido enfrentam uma série de desafios ambientais e socioeconômicos. A escassez de água, a degradação dos recursos naturais, a desertificação e a pressão sobre os ecossistemas são problemas recorrentes que afetam diretamente a qualidade de vida das populações locais e a sustentabilidade ambiental da região. Esses desafios são agravados pela expansão desordenada e falta de planejamento territorial e com a gestão inadequada dos recursos hídricos.

Majoritariamente, as bacias hidrográficas do Nordeste Oriental, encontram-se sob a influência do bioma das Savanas Estépicas, segundo classificação mundial ou da Caatinga segundo classificação nacional do IBGE, sendo encontrado exclusivamente no Brasil (IBGE, 2021).

Esse bioma tem sua maior área na região no Nordeste do Brasil, e possui um clima predominantemente de semiárido. Segundo classificação de Köppen-Geiger, o clima semiárido quente (BSh) é caracterizado por altas temperaturas ao longo do ano e uma estação seca bem definida, durante a qual a precipitação é escassa.

A caatinga, apesar um valioso patrimônio natural rico em biodiversidade, muitas vezes é subestimado em termos de diversidade biológica, e é um dos menos pesquisados, em termos de potencial biológico no território nacional. No senso comum, a área de expressão da caatinga é frequentemente relacionada a uma região carente de riquezas naturais e associado de forma generalizada ao cenário da estação seca, além de problemas sociais. Isso resulta em um foco desproporcional na pobreza como um aspecto histórico e social relacionado aos desafios ambientais da região, levando a riqueza da Caatinga a ser frequentemente negligenciada e questionada (AB'SÁBER, 2003; TEIXEIRA, 2016).

Dessa maneira, fica evidente que uma bacia hidrográfica é utilizada para uma variedade de atividades humanas que dependem dos recursos naturais e condições ambientais disponíveis, especialmente a demanda hídrica para consumo humano e animal, pesca, carcinicultura, agropecuária e mineração.

Na busca de uma melhor gestão, o planejamento hídrico dentro de uma bacia hidrográfica deve ser concebido com a integração da gestão das águas e o uso da terra. Isso implica em alinhar as ações com os setores econômicos e os planos de desenvolvimento regionais, estaduais e nacionais. Sendo fundamental considerar a diversidade física, biótica, demográfica, econômica, social e cultural das diferentes regiões do Brasil, assim como as complexas questões territoriais resultantes dos conflitos sociais.

Para isso, utilizou-se os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), pois desempenham um papel crucial na gestão de recursos hídricos, aproveitando dados bibliográficos e bancos de dados geográficos.

Para o SIG, há uma ampla gama de aplicações que abrangem áreas como mapeamento, medição, monitoramento, modelagem e gerenciamento. Diversos setores da sociedade aproveitam essa tecnologia para resolver uma variedade de desafios.

Empresas de energia utilizam SIG para planejar rotas de distribuição eficientes, enquanto agências governamentais os empregam para monitorar variações climáticas, ambientais e urbanas. Além disso, organizações de planejamento urbano contam com SIG para analisar padrões demográficos e projetar o desenvolvimento urbano sustentável. Essa versatilidade dos SIG os torna ferramentas valiosas em uma variedade de campos, impulsionando a tomada de decisões informadas e a resolução de problemas complexos (LONGLEY et al., 2011).

Com o advento dessas ferramentas, nesse contexto, o presente estudo tem como foco a análise dos sistemas ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo, uma região de significativa importância hídrica e ambiental localizada no semiárido brasileiro.

A justificativa da escolha da análise dos Sistemas Ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo como objeto de estudo se dá pela relevância da bacia como fonte de recursos hídricos e naturais, bem como o papel crucial desempenhado no desenvolvimento econômico e social da região, se tornando um representativo recorte espacial e necessário para ordenamento territorial do semiárido no Nordeste do Brasil.

Desse modo, a análise dos sistemas ambientais desta bacia se mostra pertinente, diante dos desafios enfrentados em decorrência das características climáticas, balanço hídrico e do uso

da terra no semiárido brasileiro, focada em aprimorar uma gestão sustentável dos recursos hídricos, conservação da biodiversidade e dos recursos naturais.

Desse modo, torna-se fundamental identificar, caracterizar e analisar os sistemas ambientais a partir da gestão sustentável dos recursos hídricos dando ênfase no contexto da região, do balanço hídrico, a conservação da biodiversidade e dos recursos naturais. Levantar e analisar os parâmetros biofísicos das unidades da paisagem, relacionar a distribuição territorial da paisagem e geossistema com o Uso e Cobertura e da Terra e analisar os impactos nos Sistemas Ambientais, comparando áreas de Vulnerabilidade Natural e Ambiental.

Permeando a noção introdutória da Análise dos Sistemas Ambientais da BHRC, a partir da proposta de investigação e discussão dos resultados, conforme os objetivos da pesquisa, a pesquisa dividiu-se da seguinte maneira:

Por meio do **primeiro capítulo** com a análise da caracterização dos parâmetros biofísicos da bacia hidrográfica, foram levantados, organizados e analisados todos os fatores e elementos, a partir de sua relação de importância com a formação e composição natural, que nos releva a compreensão geral da dinâmica física e ambiental da BHRC, em conformidade a análise territorial e espacial, levando em consideração aspectos como a Geologia, Geomorfologia, Hidrologia, Climatologia, Pedologia, Vegetação e Uso e Cobertura da Terra.

O **segundo capítulo** rege a relação entre o equilíbrio dos processos da morfogênese e a pedogênese com a Ecodinâmica, analisando e comparando as áreas de vulnerabilidade natural e ambiental da bacia hidrográfica, com o propósito de avaliar a susceptibilidade aos impactos nessas áreas aos processos erosivos e vulnerabilidades.

O **terceiro capítulo** trata sobre a concepção e análise sistemática com os Sistemas Ambientais, relacionando todos os elementos abordados nos capítulos anteriores com o recorte aplicado às principais áreas propostas na metodologia, bem a identificação das condições naturais, impactos e atividades antrópicas com reconhecimento das áreas via sensoriamento remoto.

As **considerações finais** abordaram os dados e informações discutidas ao longo da dissertação. Nesse encerramento, avalia-se os objetivos propostos, conforme as questões inerentes à área de estudo, desde a justificativa, problemática, os métodos e as hipóteses utilizadas, e se foram abordados de maneira satisfatória e significativa, propondo mecanismos de avaliação e mitigação dos impactos nas áreas analisadas, em busca da sustentabilidade.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Identificar, caracterizar e analisar os Sistemas Ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo (RN).

2.2. Objetivos Específicos

Levantar e analisar os parâmetros biofísicos das unidades da paisagem presentes na Bacia Hidrográfica;

Relacionar a distribuição territorial da paisagem e geossistema com o Uso e Cobertura e da Terra;

Analisar os impactos causados pelo Uso da Terra nos Sistemas Ambientais, comparando áreas de Vulnerabilidade Natural e Ambiental, a partir dos métodos e resultados.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Geoprocessamento, SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e suas aplicações

Ao contextualizar a evolução da tecnologia e as tentativas de automatizar parte do processamento de informações na década de 50, com o objetivo principal de reduzir custos da produção e manutenção de mapas, dada a precariedade de informações na época, surgem, na década de 60, os primeiros Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Esses sistemas eram de difícil manuseio, custosos e reclusos, ficando à mercê de programas governamentais e restrito às agências públicas. Entretanto, a capacidade de armazenamento de informações e velocidade do processamento de dados ainda eram baixas.

Com o passar do tempo, a tecnologia foi avançando, e ao longo dos anos, na década de 70, foram desenvolvidos recursos mais acessíveis, seguindo para década de 80, com a marca do estabelecimento do Geoprocessamento com disciplina científica independente, é que também se inicia uma maior introdução e divulgação no Brasil (CÂMARA, DAVIS e MONTEIRO, 2001).

Segundo Sposito e Claudino (2020), tendo em vista as representações cartográficas antigas e atuais, pode-se afirmar que os mapas que hoje conhecemos, a exemplo daqueles que apresentam divisões político-administrativas, divulgados nos materiais didáticos da Geografia, constituem representações ligadas a modelos ou modos de produção específicos, que buscam registrar formas de apropriação da terra e da superfície.

Baseando-se em elementos nela existentes, como por exemplo da localização, das análises territoriais e uso e cobertura da terra, a partir dos modos de observação empírica, entre outras relações sociais e territoriais, inerentes ao modo como as sociedades produzem a sua existência (SPOSITO e CLAUDINO, 2020).

Atualmente, a ideia de uma cartografia moderna se mostra cada vez mais presente, junto ao uso das geotecnologias que buscam aplicar e desenvolver ao máximo a ciência cartográfica de fato, dando um grande passo para uma maior caracterização e aplicação desses estudos.

A contribuição das geotecnologias tem sido de grande valia, principalmente devido ao desenvolvimento da era tecnológica ou tecnocientífica, incluindo os recursos tecnológicos e processadores, com *hardwares* (computadores) e *softwares* (programas), capazes de trabalhar com o processamento de um grande volume de dados e informações, permitindo a disseminação e utilização dessas informações em um período mais curto de tempo e em larga escala.

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2007) o geoprocessamento é definido como um conjunto de tecnologias, ou geotecnologias, voltadas para coleta de informações espaciais, com tratamento de atividades executadas em sistemas específicos para análises, chamados de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Ou seja, um agrupamento de técnicas e procedimentos computacionais que através de ferramentas de processamento de dados referenciados geograficamente, desde a sua coleta até a geração de mapas, de análise de dados, de serviços e técnicas digitais com elementos da Cartografia, com o apoio do Sistemas de Posicionamento Global (GPS) e do Sensoriamento Remoto (SR), e Processamento Digital de Imagens, que geram análises e sínteses sobre o espaço (CÂMARA, DAVIS e MONTEIRO, 2001).

Pode-se destacar que o geoprocessamento é considerado uma ferramenta de grande importância, para o monitoramento da cobertura vegetal e uso das terras; ocupação desordenada e irregular; níveis de erosão do solo; poluição da água e do ar; disposição irregular de resíduos; controle, prevenção e combate aos incêndios florestais, produzindo trabalhos e grandes contribuições para pesquisas voltadas para compreensão das possíveis potencialidades, riscos e aplicações que podem ser utilizadas pelo SIG (TEIXEIRA, 2015).

Com o advento e a facilidade para utilização dos recursos tecnológicos e visuais, as imagens aeroespaciais, digitais com os satélites e aerofotogrametria, permitiram uma grande manipulação do sistema de informações geográficas (SIG), estando composto por um conjunto de dados gráficos que capturam, armazenam, atualizam e manipulam todas as formas de informações georreferenciadas (CÂMARA, DAVIS e MONTEIRO, 2001), capazes de nos favorecer uma maior visualização das relações espaciais com informações de maneira integrada.

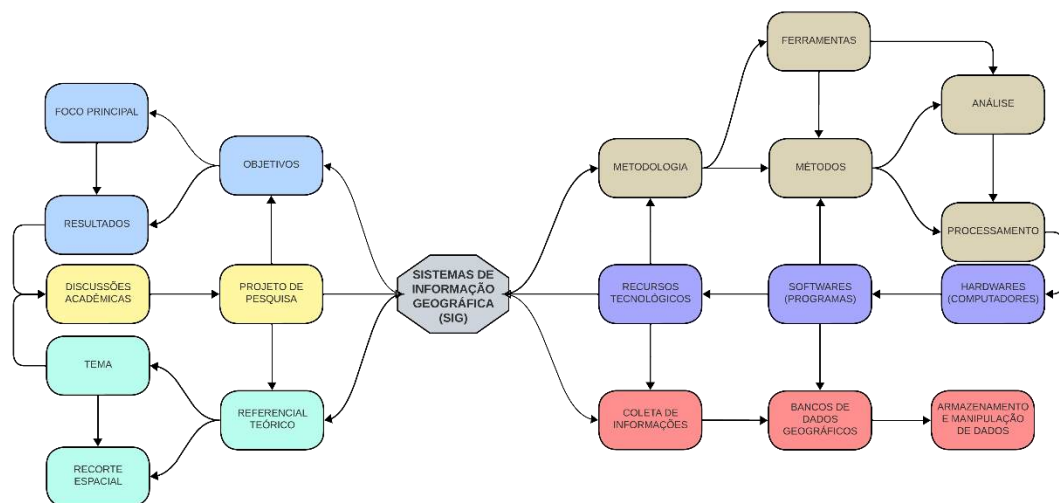
O SIG tem um potencial extraordinário de tocar todos os seres a partir de uma linguagem visual onde pessoas e organizações em todo mundo, e todos os campos do conhecimento humano são capazes de realizar análises, comunicar-se, compartilhar informações e resolver problemas complexos. Mudando até mesmo a forma como as pessoas enxergam e pensam sobre mapas e dados geográficos (HARDER e BROWN, 2017).

De acordo com o IBGE (2013), permite estabelecer relações espaciais entre os elementos gráficos realizando estudos de lugares, de características e propriedades. De forma mais eficiente, configura-se como uma ferramenta de grande valor para a gestão do território, auxiliando sobre quais as opções a serem tomadas sobre determinado espaço.

É importante considerar que procedimentos científicos, testes e modificações de hipóteses devem ser feitos para explicar a evolução dos sistemas espaciais, para compreensão dos processos de mudança no espaço e no tempo, por meio de formas de modelagem da realidade que utilizam estes métodos para análises espaciais (IBGE, 2013).

O fluxograma (Figura 01) nos concebe a ideia, e envolve, de maneira integrada uma cadeia de processos de como funciona a análise dos dados espaciais com o uso dos Sistemas de Informação Geográfica.

Figura 1 - Sistemas de Informações Geográficas e Uso para Pesquisas.



Fonte: Autor (2023).

A integração do Projeto de Pesquisa, por meio dos objetivos tem um foco principal que busca sempre resultados. O referencial teórico trabalhará um tema em pesquisas, que assim como resultados, nos levam a discussões acadêmicas, sejam através da literatura, artigos, revistas etc.

A exemplo, das revisões bibliográficas para referencial teórico, de acordo com Ridley (2008), a revisão de literatura tem como finalidade proporcionar uma visão abrangente das fontes disponíveis sobre um tema específico e é caracterizada por uma abordagem metodológica que reflete os princípios da investigação científica, portanto, deve ser conduzida de maneira sistemática e minuciosa, com o objetivo de reunir e organizar estudos anteriores de forma coesa e estruturada.

A utilização da metodologia está propriamente associada a métodos e ferramentas de análise para processamento através de hardwares e softwares que são os recursos tecnológicos.

Através da coleta de informações com o armazenamento e a manipulação desses dados, utiliza-se critérios e organização que são encontradas em banco de dados geográficos.

Dessa forma, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) representam uma infraestrutura automatizada destinada à manipulação de dados geográficos, englobando processos de coleta, armazenamento, recuperação, transformação e visualização de informações geográficas (CÂMARA, DAVIS e MONTEIRO, 2001, TEIXEIRA, 2015).

Por exemplo, utilizando o SIG pode-se aplicar a Álgebra de Mapas, como forma de analisar os impactos ambientais, a partir dos estudos da Ecodinâmica de Tricart (1977), observados em adaptações e novos métodos, a partir dados geográficos, com Crepani *et al.* (2001), Grigio (2003, 2004 *et al.*, 2009).

Entre outros autores que abordam a vulnerabilidade e estabilidade dos sistemas ambientais como Tagliani (2003), Klais *et al.* (2012), Pereira e Pereira (2013), Trevisan *et al.* (2018), Belato e Serrão (2019) e Miranda (2022).

Para isto, segundo os autores Harder e Brown (2017), utiliza-se tipos de arquivos específicos em formatos, conceitualizado como uma estrutura de armazenamento de dados e camadas vetoriais e matriciais, que é empregada para registrar as características geográficas, incluindo sua posição, forma e atributos associados.

Introduzidos na década de 1990, pela empresa americana ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), desenvolvedora do ArcGIS, entre outros softwares, os arquivos shapefiles compreendem quatro formatos principais, utilizados tanto na construção quanto na leitura por software de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

A saber: .shp (a extensão principal do arquivo onde armazena a geometria dos dados geoespaciais, como pontos, linhas e polígonos, .shx (um índice binário que acompanha o arquivo .shp que permite acesso rápido aos registros, dbf (arquivo do banco de dados que armazena os atributos associados aos elementos geoespaciais no arquivo .shp, contendo dados tabulares como nomes, populações, áreas, entre outras diversas informações e .prj (o arquivo de projeção, que contém informação sobre o sistema de coordenadas, o datum, e a projeção utilizada para representar dados espaciais, essencial para garantir que os dados sejam georreferenciados corretamente na exibição de um mapa (ARCGIS ENTERPRISE, 2023).

Por outro lado, há também um arquivo do tipo *raster* é frequentemente definido como uma imagem de mapa de bits, destinado ao armazenamento de dados visuais em um formato adequado para exibição. Este formato utiliza uma matriz de pontos para representar uma

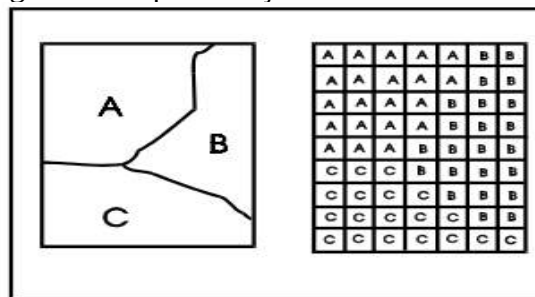
imagem, organizada em uma grade retangular de *pixels*, em que cada *pixel* possui um valor de cor específico (IBGE, 2013).

O conjunto de todos esses pixels forma a representação visual completa da imagem. Os formatos de arquivo associados a essa categoria, tais como PNG, GIF, JPG e TIFF, desempenham um papel fundamental na padronização da apresentação de imagens na World Wide Web (HARDER e BROWN, 2017).

Na produção de mapas e em operações que demandam alta precisão, é mais apropriado empregar a representação vetorial. Por exemplo, operações de álgebra de mapas são mais facilmente conduzidas utilizando o formato matricial. No entanto, para alcançar o mesmo nível de precisão, a representação matricial exige um espaço de armazenamento consideravelmente maior (CÂMARA, DAVIS e MONTEIRO, 2001).

Ao observar as representações através da figura (Figura 2), percebe-se como é representado dados matriciais e vetoriais, e como eles podem representar uma informação.

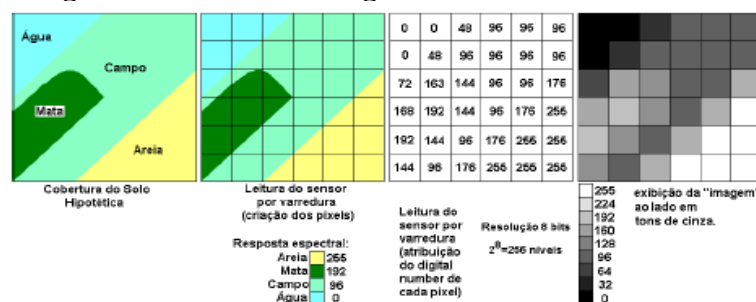
Figura 2 - Representação Matricial e Vetorial.



Fonte: (CÂMARA, DAVIS e MONTEIRO, 2001).

Na Figura 3, a exemplificação da leitura desses dados, precedidos de uma análise correta e adequada, nos fornece diversas informações para execução de trabalhos que são compreendidas com o processo da leitura do sensor de um satélite e sensoriamento remoto.

Figura 3 - Análise de imagens do sensoriamento remoto.



Fonte: Filho *et al.* (2021).

De acordo com o exemplo de Filho et al. (2021), na Figura 3, para o uso e cobertura da terra, por exemplo, pode-se indicar a informação a partir de um pixel em que a resposta espectral pode ser identificada como areia, mata, campo ou água.

Dessa forma, as imagens de satélites ou de sensoriamento remoto, são constituídas por um arranjo de elementos sob a forma de malha, grade ou matriz. De forma que cada elemento desta matriz, conhecido como pixel (combinação dos termos “*picture*” e “*element*”. O “elemento de imagem”, tem sua localização definida e espacializada com um sistema de coordenadas (datum) em ordem do tipo “coluna e linha” (HARDER e BROWN, 2017).

Pois para um mesmo sensor remoto, cada pixel corresponde a uma área com as mesmas dimensões na superfície da Terra, onde pode-se atribuir uma camada representada no Uso da Terra (IBGE, 2013).

Cada *pixel* possui também um atributo numérico, que indica o nível de cinza (NC) representando a intensidade da energia eletromagnética medida pelo sensor, para a área da superfície terrestre correspondente. Existem quatro tipos de resolução associados às imagens de Sensoriamento Remoto: Espacial, Espectral, Radiométrica e Temporal (IBGE, 2013).

A Espacial refere-se à resolução e precisão espacial das imagens capturadas. Quanto maior a resolução espacial, mais detalhes podem ser observados na imagem. Isso é essencial para atividades como mapeamento de uso da terra, detecção de mudanças ambientais e planejamento urbano (IBGE, 2013).

A Espectral envolve a capacidade do sensor em capturar diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Cada tipo de superfície reflete, absorve ou emite radiação em diferentes comprimentos de onda de forma característica. Ao analisar essas assinaturas espectrais, é possível identificar e distinguir diferentes tipos de cobertura do solo, como vegetação, água, solo exposto, entre outros (IBGE, 2013).

Radiométrica refere-se à capacidade do sensor em medir a quantidade de radiação eletromagnética refletida ou emitida pela superfície terrestre. A precisão radiométrica é importante para garantir que as variações na intensidade da radiação capturada sejam interpretadas corretamente, permitindo análises quantitativas e comparativas (IBGE, 2013).

Temporal trata-se sobre a frequência com que as imagens são capturadas ao longo do tempo. A disponibilidade de imagens temporais permite o monitoramento de mudanças na superfície terrestre ao longo do tempo, como o crescimento da vegetação, variações no uso da terra e impactos de eventos naturais ou antropogênicos (IBGE, 2013).

Vale ressaltar que a interpretação de fotografias aéreas tem sido utilizada como uma ferramenta prática para gerenciamento de recursos naturais.

Atualmente, as imagens de satélite e as imagens obtidas por *drones*, também conhecidos como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), que são dispositivos aéreos controlados remotamente, possuem uma variedade de aplicações e vantagens significativas, e vem substituindo as fotografias aéreas obtidas de forma convencional por satélites, facilitando também a aquisição de dados e o aumento do número de usuários usufruindo do sensoriamento remoto (LILLESAND, KIEFER e CHIPMAN, 2004; HARDER e BROWN, 2017).

Além da crescente demanda por drones em diversas aplicações, tanto para civis quanto militares. Com um interesse significativo no desenvolvimento de sua tecnologia com equipamentos inovadores que podem voar autonomamente em diferentes ambientes e locais, desempenhando uma variedade de missões e tarefas. Percebe-se que ao longo da última década, houve um foco intenso na ampla gama de aplicações desses *drones*, levando à criação de diversos tipos com diferentes pesos e tamanhos (HASSANALIAN, ABDELKEFI, 2017).

LILLESAND, KIEFER e CHIPMAN (2004) também consideram que a evolução das geotecnologias tem de fato se tornado uma ferramenta fundamental para áreas da ciência, agricultura, gestão pública e ambiental.

Em resumo, o uso de SIG desempenha um papel essencial tanto na pesquisa acadêmica quanto em aplicações profissionais. Possibilitando uma compreensão mais profunda do mundo geográfico, auxiliam na tomada de decisões, e desempenham um papel crucial na transformação contínua da geotecnologia, que é fundamental para enfrentar desafios globais como mudanças climáticas, problemas da urbanização e a gestão sustentável dos recursos naturais, inclusive na interpretação e análise da paisagem em bacias hidrográficas. Permitindo a identificação de padrões e tendências que não seriam evidentes de outra forma.

Isso é vital para a tomada de decisões em diversas áreas, e está em constante evolução, impulsionado pela crescente disponibilidade de dados geoespaciais, sejam nos avanços com o sensoriamento remoto, como também a manipulação e análise de dados. Isso inclui também o uso de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina (*machine learning*) para análises mais avançadas (LEE, 2019).

O Aprendizado de Máquina é um dos campos fundamentais no mundo da informação e computação. Um grande volume de pesquisas tem sido dedicado a tornar as máquinas mais inteligentes. A capacidade de aprendizado é um comportamento natural dos seres humanos que foi incorporado como um aspecto crucial nas máquinas. Diversas técnicas foram desenvolvidas

para esse fim. Algoritmos tradicionais de aprendizagem de máquina encontraram aplicações em diversas áreas (SHAH e SHINDE, 2018)

Como citado anteriormente, entre esses esforços, a contextualização de muitos estudos de autores como Tagliani (2003), Grigio (2003), Crepani *et al.* (2001), têm se concentrado também na criação de mapas de vulnerabilidade natural e ambiental. Técnicas baseadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) foram desenvolvidas e amplamente aplicadas, tornando-se as principais ferramentas para mapear a vulnerabilidade a deslizamentos de terra.

Segundo Lee (2019), os modelos de *machine learning* aumentaram em popularidade com o tempo. E é importante investigar mais áreas de estudo para melhorar a generalização e a precisão dos resultados. Especialmente técnicas relacionadas à topografia e ao solo, devem ser consideradas, para que assim mais modelos possam ser aplicados.

O autor (LEE, 2019) ainda continua em trabalho árduo de revisão do estado atual da criação de mapas de vulnerabilidade a deslizamentos de terra usando SIG, com base em 776 artigos publicados nos últimos 20 anos (1999-2018), concluiu que o número de estudos publicados anualmente aumentou rapidamente ao longo do tempo.

A inclinação do terreno, a geologia foram as causas mais frequentemente estudadas, e a regressão logística e a razão de frequência, foram os modelos mais amplamente utilizados (LEE, 2019).

De fato, novas metodologias estão sendo aplicadas no desenvolvimento de diversos segmentos, inclusive o projeto do MapBiomas¹ (2023), que contam com o apoio de um grupo de pesquisadores e programadores que desenvolveram ferramentas de Uso e Cobertura da Terra, em vários anos, com a utilização de imagens de satélite (Landsat² e Sentinel³) e modelos de classificação temporais, cruzando análises de validação e precisão dos dados a partir de uso de algoritmos, e processamento em nuvens com a plataforma do Google Engine⁴.

Sendo crucial destacar a crescente relevância do desenvolvimento das geotecnologias e da utilização de ferramentas inovadoras para aprimorar as abordagens de pesquisa e os parâmetros vigentes nas aplicações através do SIG.

¹ Os dados do MapBiomas são públicos e gratuitos mediante a simples referência da fonte observando o seguinte formato:” Projeto MapBiomas – Coleção [7.1] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em [2021] através do link: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>

Ou acesse aqui o artigo científico para mais informações: Souza et. al. (2020) – Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine – Remote Sensing, Volume 12, Issue 17, 10.3390/rs12172735

A descrição completa do projeto encontra-se em <http://brasil.mapbiomas.org>.

² Landsat - Para mais informações sobre: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>

³ Sentinel - Para mais informações sobre: <https://www.sentinel-hub.com/>

⁴ Google Earth Engine – Para mais informações sobre: <https://earthengine.google.com/>

Hofer (2014), evidencia através da literatura dos artigos acadêmicos que a interpretação de dados espaciais para extrair informações desempenha um papel crucial na Ciência e Tecnologia da Informação Geográfica.

Para analisar esses dados pela internet, de acordo com Hofer (2014), a tecnologia de geoprocessamento online pode ser aplicada de diversas maneiras, como para disponibilizar um conjunto específico de ferramentas em uma plataforma dedicada, documentar modelos ou fluxos de trabalho para compartilhamento amplo, automatizar tarefas repetitivas ou oferecer ferramentas simples para um grande número de usuários e as aplicações mostram que praticamente todas as aplicações requerem maior desenvolvimento de ferramentas.

Segundo Teixeira (2016), aplicações do SIG estão envolvendo outras áreas, além dos setores ambientais e sua aplicação permite aos usuários visualizarem informações geográficas, como localizações ou concentrações espaciais de fenômenos de interesse.

Com avanços tecnológicos recentes tornaram o SIG mais acessível, permite que pesquisadores com pouco conhecimento prévio em SIG possam utilizá-lo. Além disso, geógrafos humanistas e participativos desenvolveram abordagens críticas e não quantitativas para o SIG, oferecendo novas oportunidades relevantes inclusive para assistentes sociais, pois ajudam a compreender o contexto ambiental de seus clientes e validam suas avaliações de pontos fortes, fraquezas e oportunidades de intervenção (TEIXEIRA, 2016).

Dessa forma, encontrar modelos mais aplicáveis as áreas de estudo e pesquisas é uma tarefa importante quando pensamos em utilizar o SIG para nossas pesquisas, pois ao examinar a paisagem com base em suas condições naturais, o SIG facilita a identificação das transformações resultantes do uso antrópico, tornando-se essencial para o gerenciamento eficaz dos recursos naturais e evidenciar a susceptibilidade dos sistemas, considerando que as atividades econômicas, a partir do uso inadequado e excessivo dos recursos naturais, podem causar impactos no solo, sistemas fluviais e águas subterrâneas (CARVALHO, SILVA e SALVIO, 2022).

3.2. Aplicações com Álgebra de Mapas em Análises Ambientais

É evidente que o SIG tem diversas aplicações e métodos de análises, como amplamente mencionado. A aplicabilidade dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) em sua diversidade de métodos analíticos, há um que se destaca de maneira notável quando se trata de estudos de bacias hidrográficas e da análise de vulnerabilidades em sistemas ambientais.

O uso da Álgebra de Mapas, vem sendo realizado por meio do processo em que vários fatores corroboram de forma conjunta para uma amostragem de dados, e seu principal uso é por meio de atributos, estruturas e processos que são revelados no SIG, através de operações ou equações matemáticas conforme as ferramentas necessárias e atribuições de pesos ou valores, onde pode-se chegar a um resultado (BARBOSA, 1999).

Do ponto de vista prático, a implementação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) envolve a seleção de representações computacionais que sejam mais apropriadas para capturar o significado específico do seu campo de aplicação. Do ponto de vista tecnológico, o desenvolvimento de um SIG requer a disponibilização de uma ampla gama de estruturas de dados e algoritmos capazes de representar eficazmente a diversidade de conceitos espaciais existentes.

Segundo Casanova *et al.* (2005) as informações sobre o SIG, tratando sobre os bancos de dados geográficos, informa-nos que anteriormente os algoritmos de consulta e análise espacial incluíam as operações topológicas como a de alguns autores como Egenhofer e Franzosa (1991), álgebra de mapas com Tomlin (1990), da estatística espacial com Druck *et al.*, (2004), modelagem numérica de terreno (Li *et al.*, 2004) e processamento de imagens (Mather, 2004).

Ainda segundo os mesmos autores *op. cit.*, a implementação e operação de aplicações como a álgebra de mapas e a modelagem dinâmica tornam-se mais acessíveis com a crescente ênfase dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) em modelos dinâmicos. Os mesmos autores previram que à medida que os SIG se voltam cada vez mais para a incorporação de modelos dinâmicos, essa estrutura estaria amplamente disponível em diversas implementações de bancos de dados geográficos no futuro (CASANOVA *et al.* 2005). O que confirmou com o passar dos anos e o desenvolvimento tecnológico.

De acordo com Casanova *et al.* (2005), a ideia geral é que especialistas desenvolveriam teorias abrangentes sobre fenômenos, que incluem a definição de conceitos-chave para orientar sua pesquisa, como "exclusão" ou "vulnerabilidade". Para transpor essas teorias para o domínio computacional, é necessário que os especialistas criem modelos de inferência quantitativa. Esses modelos passam por testes de validação e confirmação por meio de procedimentos de análise quantitativa. Os resultados numéricos podem, então, fornecer suporte para ou questionar os conceitos qualitativos estabelecidos.

Dessa forma, utilizar softwares que trabalhem o SIG, como o ArcGIS⁵ ou QGIS⁶, agrupando de maneira relacionada as informações e dados, se torna interessante para análises ambientais, já que são compelidos em uma junção de ferramentas, com linguagens de programação, recursos e métodos que nos auxiliam conforme a proposta da pesquisa, e assim, nos concebe uma ideia final de vulnerabilidade a partir de critérios adotados, de forma mais prática.

De maneira ampla, ao longo do tempo, os pesquisadores têm se empenhado na adaptação e aprimoramento dos princípios da álgebra de mapas para serem mais acessíveis e aplicáveis em contextos geoespaciais, especialmente em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e no campo do geoprocessamento (CREPANI, *et al.* 2001).

Estudos aplicados a análise morfodinâmica das unidades naturais da paisagem, é feita através dos princípios da Ecodinâmica Tricart (1977), estabelecendo diferentes critérios ou categorias da morfodinâmica que resultam dos processos da morfogênese ou pedogênese. Ou seja, nesta análise, consegue-se medir o grau de intensidade dos processos, afinal, quando predomina a **morfogênese**, assim prevalecem os processos erosivos, **modificadores do relevo**, e quando predomina a **pedogênese**, prevalece os processos **formadores do solo**.

A ideia principal é que os ecossistemas não são estáticos, mas sim dinâmicos, estando em constante evolução. Dessa forma, pode-se considerar fatores como clima, o relevo, a vegetação, a fauna e as atividades humanas para analisar as interações entre os componentes bióticos e abióticos para compreensão acerca da temática (TRICART, 1977).

Para este estudo, a abordagem através dos Sistemas Ambientais, na Bacia Hidrográfica, é interligada e relacionada intrinsecamente para obtermos os objetivos necessários.

Afinal, segundo Crepani (2001) as unidades da paisagem natural, podem ser compreendidas através de unidades territoriais básicas passíveis de georreferenciamento, contendo uma relação de trocas e energias, com eventos e interações, em determinadas localidades, resultando em eventos de baixa ou larga escala, perceptíveis ou não perceptíveis, que representam um elo entre a Geografia e a Ecologia, correlacionados através dos Sistemas de Informação Geográfica.

Os novos pesquisadores continuam a se basear nos autores clássicos como Tricart (1977). Segundo autores como Crepani *et al.* (2001), Grigio (2003, *et al.* 2004, 2009), as adaptações, com recursos tecnológicos e modelos desenvolvidos, conforme as metodologias

⁵ Conheça mais sobre o ArcGIS: <https://www.arcgis.com/index.html>.

⁶ Conheça mais sobre o QGIS: https://qgis.org/pt_BR/site/.

aplicadas a vulnerabilidade em relação a morfogênese e pedogênese, é essencial para nos conceber uma visão mais holística e sinótica da paisagem, pois a interpretação das camadas, considera diversos padrões, que nos revelam essenciais para interpretação das análises, bem como encontrar quais os sistemas mais susceptíveis e vulneráveis às ações antrópicas.

E os estudos que investigam a vulnerabilidade ambiental têm uma ampla gama de aplicações, dependendo de seus objetivos específicos. Dentre essas aplicações, pode-se destacar a análise da vulnerabilidade no contexto do zoneamento ecológico e ordenamento territorial, conforme mencionado por Crepani *et al.* (2001). Também é possível observar sua utilização na avaliação da vulnerabilidade à erosão hídrica em bacias hidrográficas, como demonstrado por Cuiabano *et al.* (2017).

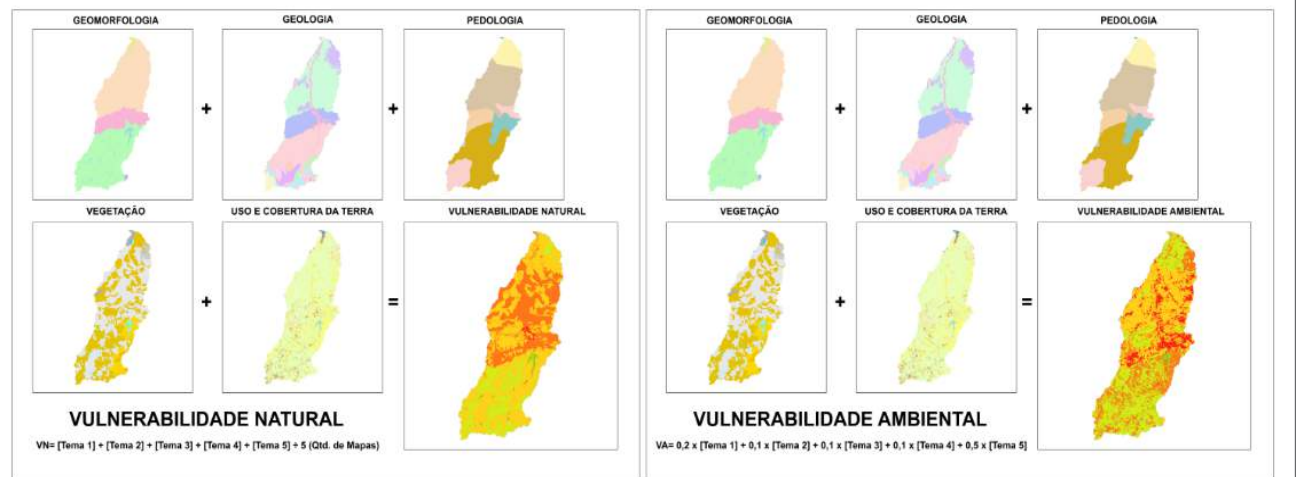
Destaca-se também pesquisas que abordam a vulnerabilidade relacionada à degradação ambiental de ambientes costeiros, como apresentado por Tagliani (2003) e Grigio *et al.* (2004). Outras áreas de estudo envolvem a análise da vulnerabilidade em nível municipal, conforme evidenciado por Klais *et al.* (2012), Pereira e Pereira (2013), Trevisan *et al.* (2018), e Belato e Serrão (2019).

E em outros estudos como Lopes *et al.* (2021), utilizando os conceitos de vulnerabilidade natural e ambiental, através da morfogênese e pedogênese de Tricart (1977), e adaptações de Grigio (2003) e Grigio *et al.* (2004), bem como Carvalho, Silva e Salvio (2022), em seus estudos de vulnerabilidade ambiental aplicado ao método do IVA, índice de vulnerabilidade ambiental, proposto por Tagliani (2003).

É importante ressaltar que esses trabalhos empregam uma variedade de métodos e indicadores específicos para avaliar a vulnerabilidade em suas respectivas áreas de enfoque, contribuindo para um diagnóstico mais abrangente e preciso, favorecendo uma visibilidade maior aos conceitos.

Baseando-se na ideia proposta por alguns autores, a Figura 4, apresenta um modelo representação de como é utilizada a álgebra de mapas, com o SIG, enfatizando-o seu uso em pesquisas.

Figura 4 - Modelo de representação da Vulnerabilidade Natural e Ambiental.



Fonte: Elaborado por autor, 2023. adaptado das ideias de Crepani et al. (2001) e Grigio (2003), Cardoso et al. (2015).

Em resumo, há um procedimento que passará pelo uso de equações, utilizando tipos de mapas diferentes, a partir das características físicas do meio, para que se chegue a um resultado. E como uma operação matemática, qualquer fator de soma empregado diferente na caracterização dos dados, resulta em uma informação diferente. [ver item 4.3.3].

A partir do cruzamento desses dados, por exemplo, conforme a paleta de cores, as áreas mais esverdeadas são aquelas em que há a maior estabilidade ambiental, prevalece a pedogênese, em contrapartida, as áreas avermelhadas estarão susceptíveis aos impactos e processos erosivos, e onde há menor estabilidade ambiental, prevalece a morfogênese. Como objetivo específico desta pesquisa, também é proposto comparações entre ambos os métodos.

Assim, moldam-se os como parâmetros para utilizar-se de um recorte específico, dentre as unidades territoriais com os temas (mapas) utilizados, tem por objetivo de identificar as áreas vulneráveis a partir da susceptibilidade ou fragilidade aos impactos antrópicos no meio natural e ambiental.

Em paralelo ao exemplo, Cardoso *et al.* (2015), em sua pesquisa, nos mostra a utilização de um sequenciamento de modelos e equações, que através desses procedimentos, mediante a aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), empregou-se o método da álgebra de mapas para a análise holística do ambiente, em que a área de estudo foi segmentada em três componentes distintos: o ambiente Físico, o Biótico, e o Antrópico e isso permitiu a obtenção de uma perspectiva abrangente que abarcou a totalidade do ambiente estudado, resultando na fragilidade dos ambientes.

Para o contexto da dissertação, Costa, Souza e Silva (2021), discutem sobre o uso e análise das vulnerabilidades natural e ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Doce no RN. A obra utiliza recursos metodológicos utilizados pelos mesmos autores supracitados, Tricart (1977), Crepani *et al.* (2001), Grigio (2003), bem como outros autores como Costa *et al.* (2006), Oliveira (2011) e Silva (2013), que abordam o referencial teórico das pesquisas utilizadas para esse tipo de estudo.

Miranda (2022), faz um estudo aprofundando na mesma área de estudo da pesquisa a BHRC, onde objetiva com outros métodos e objetivos, a partir de unidades geoecológicas, verificar o estado e grau ambiental da bacia. Segundo os dados de sua pesquisa, mostraram-se resultados satisfatórios com o uso dessas metodologias, sendo de grande importância para apurar informações valiosas no tocante a aplicação de estudos, e para nortear as políticas públicas na gestão de bacias hidrográficas, contribuindo para o desenvolvimento local, econômico, social e sustentável como também uma maior atenção às áreas de maiores suscetibilidades aos impactos antrópicos.

Grigio *et al.* (2004, 2009), Costa *et al.* (2006), Oliveira *et al.* (2009), Oliveira (2011) e Lopes *et al.* (2021), realizaram estudos em áreas conhecidas pela exploração e extração de petróleo, nas proximidades dos municípios de áreas próximas ao litoral do norte, e também em áreas de diferentes atividades econômicas, no litoral sul do estado do RN, e em bacias hidrográficas.

Com o objetivo de gerar mapas de vulnerabilidade natural e ambiental a partir de mapas base de geologia, solos, vegetação, geomorfologia e de uso e ocupação do solo, bem como identificar de forma analítica os impactos ambientais negativos e o grau de vulnerabilidade ambiental existentes. As classes de vulnerabilidade ambiental foram determinadas a partir de modelamentos por álgebra de mapas utilizando o SIG, e analisaram onde estão presentes os impactos ambientais analisados, especialmente nos campos de dunas, manguezais, faixas de praia e remanescentes, onde podem se configurar áreas mais susceptíveis aos impactos da ação antrópica.

Os estudos através de outras pesquisas, abordaram métodos semelhantes com a *eco-environmental vulnerability*. Estes abrangem mais indicativos para análises, com resultados a partir de Nguyen e Liou (2019), utilizou-se 16 indicativos para avaliar as condições da vulnerabilidade eco-ambiental, com um mapeamento global.

De acordo com os autores, por meio de estruturas conceituais para avaliar a vulnerabilidade eco-ambiental foram introduzidas de várias maneiras na literatura por meio de

(Adger et al., 2013; Eakin e Luers, 2006; De Lange et al., 2010; Hinkel, 2011; Berrouet et al., 2018). E os resultados fornecidos podem ser ferramentas poderosas para o desenho de instrumentos de política públicas para a conservação e gestão ambiental em níveis regionais. Porém, relatam que os métodos e definições podem apresentar inconsistências a depender da escala do estudo (NGUYEN e LIOU, 2019).

Para uma noção do grande desenvolvimento de pesquisas em volta desta temática, destacam-se Moraes, Uema e Montanher (2022), em que só na Revista Brasileira de Geomorfologia, foram encontrados um total de 582 publicações entre os anos de 2001 a 2020, constatando a importância e dimensão da aplicação desta metodologia, mostrando que a álgebra de mapas foi utilizada em 85 trabalhos, alcançando uma participação média anual de 15% ao longo das duas décadas de análise em trabalhos acadêmicos.

Dessa forma, é notável que o SIG e a álgebra de mapas são instrumentos valiosos para a tomada de decisões relacionadas à gestão e ao planejamento ambiental, fornecendo informações detalhadas e auxiliando na escolha de locais adequados para o uso. Assim, essas técnicas contribuem significativamente para o avanço da pesquisa e da tomada de decisões em questões ambientais.

3.3. Geossistema, Território e Paisagem: Análise dos Sistemas Ambientais e Unidades da Paisagem (Uma Análise Integrada)

No século XIX, o estudo da paisagem trabalhou a abordagem descritiva e morfológica que então abordava a natureza do ponto de vista de sua fisionomia e funcionalidade. Nesse período, destacavam-se Humboldt, Ferdinand von Richthofen (1833 – 1905), Alfred Hettner (1859 – 1941), Carl Troll (1899 – 1975) que tiveram um papel importante na orientação da Geografia alemã, além de Vasily Vasili'evich Dokoutchaev (1846 – 1903), que teve monta primordial nos estudos da paisagem em território soviético (CAVALCANTI, 2013).

No contexto da Geografia, pode-se citar duas escolas que foram as que mais contribuíram para a disseminação e aplicabilidade da abordagem geossistêmica nas análises das paisagens: a escola Russo-Soviética, representada, primariamente, por Sochava e a escola Francesa, liderada por Bertrand. Essas contribuições foram de grande importância para a Geografia, colocando em evidência uma série de premissas e de pressupostos necessários para o processo de planejamento e gestão territorial integrada do espaço geográfico (TROPPEMAIR e GALINA, 2006).

A geografia, ao estudar paisagens naturais foi por caminhos da biofísica, que partiu dos estudos de HUMBOLDT e DOKUCHAEV, onde originando as escolas alemãs e russo-soviética, conceberam a ideia da paisagem como um complexo natural, integral e sociocultural, em uma entidade perceptiva, e em uma visão fragmentada dos componentes naturais, surgindo também a essência das escolas francesa, anglo-saxônica e europeia-ocidental (RODRIGUEZ, SILVA e CAVALCANTI, 2017).

Ressalta-se que na década de 60, difundia-se amplamente o método sistêmico em diversas disciplinas científicas. De toda forma, as ideias geográficas têm sido essencialmente sistemáticas (CHRISTOFOLETTI, 1979).

Pois nas décadas de 1950 e 1960, o biólogo Ludwig von Bertalanfy, de origem austríaca desenvolveu seu trabalho nos Estados Unidos, explorou o conceito de "sistemas" em seu trabalho científico. Em suas obras, juntamente com outros autores, ele discutiu o tema "sistemas". Posteriormente, em seu livro "Teoria dos sistemas" (1968), consolidara e expandira essas ideias. É importante destacar que a Teoria dos Sistemas de Bertalanfy não se limitou ao campo da Biologia; seu princípio foi aplicado com sucesso em diversas outras áreas, incluindo a Geografia. Essa abordagem forneceu as bases para o conceito de "Geossistema" (MONTEIRO, 2001).

A importância da aplicação e uso prático das pesquisas geossistêmicas, da análise do território e da paisagem, com base nos estudos e releituras dos teóricos Bertrand (1972), Sochava (1977), Tricart (1977), Christofolletti (1990), entre outros, demonstrava a relevância das pesquisas, sempre visando o melhor uso do meio ambiente diante de sua fragilidade sistemas ambientais, aos impactos causados pela ação antrópica no meio natural.

Como ferramenta de análise da paisagem, a importante criação da teoria do Geossistema por Sochava em 1963 e resgatado por Bertrand em 1972, é considerado ainda um paradigma geográfico, a partir das discussões fundamentais acerca da importância do conhecimento geográfico, e sua proposta metodológica para compreender o estudo da paisagem. Sua trajetória baseada de maneira holística, estando voltada a estudar a paisagem e seus recursos naturais, em determinada localidade terrestre (REIS JÚNIOR; HUBSCHMAN, 2007), e se insere em um contexto propício a este método de análise no século XX, enfocando um caráter naturalista, assumindo a paisagem como conceito e objeto integrador da Geografia (SPOSITO e CLAUDINO, 2020).

À primeira vista, o conceito de ambiente e território lida com questões e problemas ecológicos, que remetem a superfície terrestre, e dinâmicas espaciais, que podem ser definidas

em um conceito geográfico. A ecologia política por exemplo, subteme-se a través do ambiente e território. Afinal, os elementos da natureza, como a litosfera, atmosfera, biosfera, hidrosfera e a criosfera, e como alguns chamam a “Tecnoesfera”, são palco das relações sociais, ou da Terra, propriamente dita (SOUZA, 2019).

Outra questão é a confusão entre os conceitos de Geossistema e Ecossistema. Ao estudar ecossistemas, examina-se apenas relações e processos com vínculos entre organismos, no qual o meio e fundo abiótico são examinados, e tem o intuito de conhecer propriedades do centro do sistema, sejam organismos vivos ou o ser humano (RODRIGUEZ, SILVA e CAVALCANTI, 2017), já o Geossistema tem caráter policêntrico, absorvendo maior número de componentes de relações que o próprio ecossistema, adotando um caráter territorial e espacial (TROPPMAIR, 1995).

O Geossistema pode incluir todos os elementos da paisagem como um modelo global, territorial e dinâmico, podendo ser aplicado a qualquer paisagem de forma concreta e ampla. Sochava definia como (1978, P. 318) “potencial ecológico de determinado espaço no qual há uma exploração biológica, podendo influir fatores sociais e econômicos na estrutura e expressão social”. É um grupo específico de sistemas que abrange todas as dimensões do espaço terrestre, onde os elementos individuais da natureza estão interligados de forma sistêmica. Esses elementos interagem com uma integridade distinta tanto com o universo cósmico quanto com a sociedade humana (SOCHAVA, 1978).

Tricart (1977), preocupava-se com a qualidade ambiental, e diferente das definições de Sochava, entendia o Geossistema como uma unidade dinâmica com uma organização geográfica própria, e que o espaço é o que permite a repartição e interação de todos os componentes de um geossistema, o que assegura a integridade funcional, entendendo de caráter dinâmico as relações da natureza com os conhecimentos básicos das técnicas científicas de uma visão conjunta sobre o meio. Assim, definia o geossistema um conjunto de fenômenos que se processam mediante fluxos de matéria e energia. Esses fluxos originam relações de dependência mútua entre os fenômenos. Surge daí uma entidade global nova, mas dinâmica (TRICART, 1977).

Já Bertrand (1972), definia o geossistema como uma unidade ou um nível taxonômico na categorização da paisagem, sendo concebido como uma categoria concreta do espaço geográfico, composto pela ação antrópica, exploração biológica e potencial ecológico.

Segundo Souza (2019), de maneira geral, o espaço geográfico subentende-se tanto quanto as ciências sociais quanto ciências naturais, e em princípio, o ambiente e o território, se

abrangem de maneira conjunta se remontando nas “esferas” sob o ângulo cultural e histórico das ações da paisagem visível, transformada através das relações, e assim sucessivamente, quando interpretamos seus conceitos.

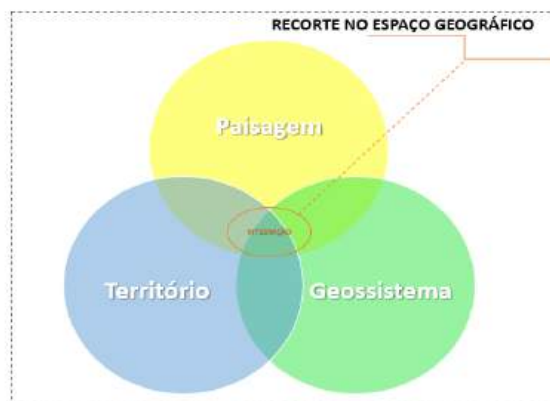
Se incluirmos no espaço geográfico, todos os seres vivos e as pessoas, assim como bens materiais e sociais produzidos, pode-se haver uma extensão demasiada da ideia do próprio conceito, confundido e perdendo valor de sua especificidade teórico-conceitual. Não se pode decretar uma espécie de fronteira absoluta entre o espaço, e os componentes do substrato espacial material (solo, cobertura vegetal, infraestruturas, bens materiais etc.) (SOUZA, 2019).

Perfazendo esse entendimento, pela impossibilidade da dissociação, é introduzindo a ideia da união de conceitos para análise da paisagem de forma integrada, Bertrand (1972, 2007) propõe uma classificação taxonômica, na qual a paisagem é entendida em Unidades Superiores (Zona, Domínio e Região Natural) e em Unidades Inferiores (Geossistema, Geofácia e Geótopo), e trata a partir de um sistema tripolar: Geossistema; Território e Paisagem – GTP, que permite uma análise integrada dos aspectos físicos (meio ambiente) e humanos (a partir da ação antrópica).

Na Figura 5, o método GTP, em recorte ao espaço geográfico, permite estabelecer a ideia inicial com a integração dos conceitos por meio da interação entre Geossistema, Território e Paisagem. De maneira geral, baseado no pensamento de suas primeiras obras Bertrand (*Op. cit.*, p. 24, 1972) entende a paisagem como:

Resultado da combinação dinâmica, portanto instável, de elementos físicos, biológicos e antrópicos que, reagindo dialeticamente uns sobre os outros, fazem da paisagem um conjunto único e indissociável, em perpétua evolução, numa porção do espaço, tem-se que pensar em normas legais que contemplem tanto o complexo dos elementos naturais, quanto o de elementos construídos, ou ainda, de ambos, considerados na sua dinâmica e identificados, como patrimônio paisagístico da coletividade.

Figura 5 - O método GTP de Georges Bertrand (2007).



Fonte: Elaborador por autor, 2022, adaptado de (Bertrand, 2007).

Dando enfoque a esse mosaico de meios naturais, destaca-se a paisagem, como algo além da imagem visual, em suma, composta desde os componentes do presente e do passado, dotados de aspectos culturais e naturais, seus elementos perfazem a ideia de um palco que apresentam a relação socioespacial e natural, em uma perspectiva que adota a convivência de indivíduos em um grupo entre as formas materiais e naturais (MENDONÇA, KOZEL, 2002).

E dentre o aspecto territorial, pode-se incluir a análise espacial de características geográficas, demográficas, econômicas, políticas e sociais de uma determinada área, entendendo o território como um espaço delimitado.

Na Geografia, há uma crescente compreensão de que os métodos que abordam a interação entre sociedade e natureza, nos levam a diálogos e resultados mais congruentes com as complexas dinâmicas que caracterizam esses sistemas.

Isso ocorre porque os componentes da sociedade e da natureza estão intrinsecamente ligados em um panorama unificado, no qual suas diversas partes interagem de maneiras distintas, levando em consideração diferentes escalas de tempo e espaço (G. OLIVEIRA, 2019).

De maneira integrada, um geossistema é caracterizado por uma combinação específica de fatores físicos, biológicos e humanos, que interagem entre si. Esses sistemas refletem as interações complexas entre os elementos físicos e bióticos da Terra, incluindo rochas, solo, clima, vegetação, fauna e atividades humanas (DUTRA-GOMES e VITTE, 2018).

Segundo Dutra-Gomes e Vitte (2018, p. 161), acerca de um geossistema singular complexo, “o humano e o natural são partes integrantes de um mesmo jogo de relações complexas e múltiplas em domínios e dimensões de manifestações; e neste jogo incluem como fatores o simbólico, o imaginário, as relações sociais, políticas, econômicas”.

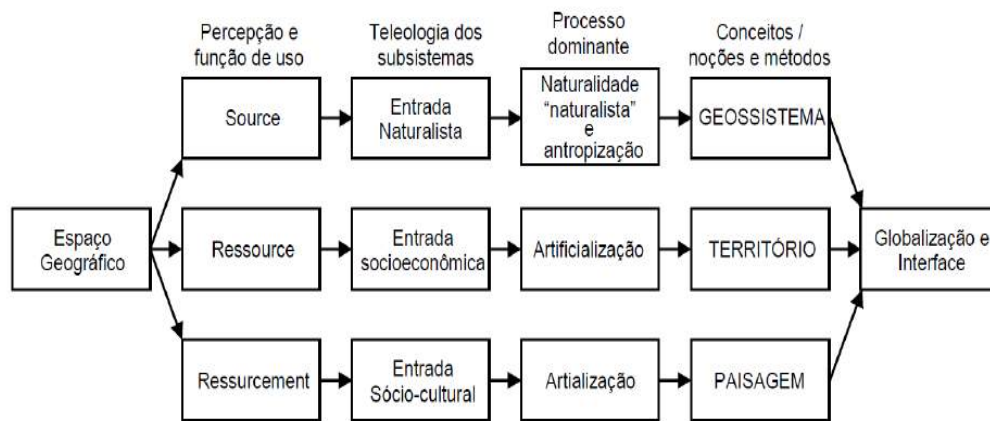
Entende-se dessa forma, que a ideia inicial do GTP, é julgar a partir da delimitação, aproximando da realidade geográfica, com a relação, como forma de relacionar as unidades com os elementos e fenômenos, e a escala, que seria a paisagem situada no tempo e no espaço (BERTRAND, 2007).

Pode-se destacar que os conceitos sobre o espaço geográfico, a região, paisagem, território, rede, lugar e meio ambiente, compreendem-se como complexo composto de teorias com a conjunção de diferentes categorias, sendo a natureza, sociedade e o espaço-tempo a principal conexão entre elas (MENDONÇA, KOZEL, 2002).

Nessa perspectiva, analisando o esquema sistemático proposto (Figura 6), a realidade do espaço geográfico, a partir da percepção, remonta forma de estudo baseada em um sistema tripolar e interativo: o Sistema GTP – Geossistema, Território e Paisagem.

Segundo Bertrand e Bertrand (2007), trata-se de três entradas ou três vias metodológicas que correspondem à trilogia fonte com recurso e aprisionamento e que são baseadas em critérios de antropização, de artificialização e de artialização, onde os conceitos se unem a partir da Globalização e Interface.

Figura 6 - O Sistema GTP – Geossistema – Território – Paisagem, segundo BERTRAND.



Fonte: BERTRAND, 2007.

Desse modo, a ideia de utilizar Sistemas Ambientais para uma pesquisa, enfoca conceitos e elementos que embasam a compreensão de estudos de maneira sistemática.

O retorno ao pensamento sistêmico, tanto na geografia física quanto humana, remonta estudos integrados, que foram experimentados na utilização de diversos modelos que simplificavam a visão integradora dos conceitos. Assim, escolher um recorte espacial para os estudos ambientais que se enquadre na perspectiva sistêmica, torna-se essencial para se realizar uma análise integradora (CHRISTOFOLETTI, 1979, 1990).

O zoneamento ambiental, por exemplo, passou a integrar o seu escopo no século XX, quando as preocupações relativas ao desenvolvimento sustentável e à preservação ambiental vieram à tona de maneira mais intensificada. Ademais, a realização de planejamentos urbanos em locais inadequados, este instrumento se tornou cada vez mais viável em estudos e análises ambientais. Assim, o planejamento ambiental passou a integrar as preocupações na elaboração de estudos em zonas com a delimitação espacial e territorial (zoneamentos), além de diagnósticos de impactos ambientais (SANTOS, 2004; PILACHEVSKY, 2013).

De modo geral, a perspectiva sistêmica na Geografia, permitiu e nos favoreceu um produto, em meio a estudos integrados, levando sempre em consideração os conceitos balizadores da geografia Espaço, Território, entre outros, mas em especial o conceito de Paisagem.

Desses estudos, os zoneamentos, são um exemplo que passa pela delimitação da área de estudo com as unidades da paisagem, a partir de uma análise holística e geossistêmica. De modo que sua análise passará pela identificação de potenciais de fragilidades em um determinado território, que resultam em problemas para o meio.

Segundo Rodriguez, Silva e Cavalcanti, 2017 P.41:

“A concepção sistêmica consiste em qualquer diversidade da realidade estudada (objetos, propriedades, fenômenos, relações, problemas, situações, etc.) pode-se considerar como uma unidade (um sistema) regulada em um ou outro grau que se manifesta mediante algumas categorias sistêmicas, tais como: estrutura, elemento, meio, relações, intensidade, etc.”

Em uma concepção sistêmica, a delimitação de Unidades de Paisagem apresenta a interação entre os diversos atributos do sistema natural e do sistema antrópico, assim, permite a identificação dos atributos responsáveis pela dinâmica da paisagem, e as principais fragilidades ambientais de cada unidade, elemento essencial na gestão do território (AMORIM, 2013).

As Unidades de Paisagens se individualizam pelo relevo, clima, cobertura vegetal, solos ou até mesmo pelo arranjo estrutural e o tipo de litologia ou exclusivamente por um desses elementos (ROSS, 2011).

Com os processos erosivos, as chuvas também são um fator chave, pois na erosão, que é o processo de remoção e transporte de sedimentos, quando há precipitação, a água flui pela superfície da bacia hidrográfica, carregando sedimentos erodidos das áreas mais elevadas para as áreas mais baixas. Isso pode levar à formação de ravinas, vales e aplainamentos devido à erosão (CHRISTOFOLETTI, 1980 e 1990).

Como o geossistema é resultado da combinação entre fatores geomorfológicos, climáticos, hidrogeológicos e ecológicos, sendo o potencial ecológico, a exploração biogeográfica do espaço (vegetação, solo e fauna) a partir das intervenções antrópicas, seu dinamismo é algo determinante para formação e desenvolvimento do meio, do conceito da organização dos elementos constituintes e de uma hierarquização do espaço (BERTRAND, 1972; TRICART, 1977; CHRISTOFOLETTI, 1990).

Em estudos da fragilidade ambiental baseada nos princípios da Ecodinâmica de Tricart, (1977), percebe-se que a biocenose tem influência direta nos ambientais naturais, aproximando dos processos pedogenéticos. Do contrário, quanto menor a biocenose, mais o ambiente estará

susceptível às fragilidades e processos erosivos do solo, aproximando-se da morfogênese, pois a cobertura vegetal atua como agente mitigador dos efeitos da morfodinâmica.

Nesse sentido, a gestão territorial se torna um mecanismo disciplinador das ações antrópicas no meio ambiente, nos estudos ambientais vinculados ao planejamento, o principal mecanismo de efetivação das ações no espaço territorial, sejam, por meio de diagnóstico, estudos de impactos, levantamentos físicos e territoriais, seja pela análise socioeconômica, enfim, que possibilitem antever quadros futuros de organização territorial (AMORIM, 2013).

Entendido o geossistema, como unidades naturais integrais, pode-se distinguir suas modificações e transformações como resultantes das ações dos diferentes tipos de ocupação (GUERRA e MARÇAL, 2006).

De fato, a exploração dos recursos naturais de forma biológica e antrópica, pode alterar a dinâmica do geossistema, levando a sua degradação. Somente em casos muito restritos que permanecem ainda sistemas naturais praticamente inalterados. Dessa forma, (Quadro 01), Rodriguez, Silva e Cavalcanti em 2002, propuseram que, de forma integrada, a degradação acentuada pode levar a destruição de um geossistema. Assim, analisar a produtividade, potencial, processos geoecológicos e problemas ambientais é de fundamental importância para o equilíbrio de um geossistema e a medição de impactos (RODRIGUEZ, SILVA e CAVALCANTI, 2017).

Quadro 1 - Sequência de degradação de Geossistemas.

CLIMA Processo Climabiogenético	Vegetação Clímax	→	Desflorestamento desaparecimento da vegetação natural	→	Cultivo incontrolado Aparecimento de pragas e enfermidades Perda do umbral	→	Capacidade produtiva e de potencial genético
RELEVO Morfogênese	Morfogênese Atenuada	→	Maior escoamento Menor infiltração	→	Erosão hídrica e eólica	→	Desequilíbrio hidrológico, desertificação e outros processos
SOLO Pedogênese	Pedogênese ativa	→	Degradação físico- biológico	→	Perda de nutrientes	→	Salinização Hidromórfica e outros processos
PAISAGEM Gênese e desenvolvimento da paisagem	Paisagem em estabilidade homeostática	→	Paisagem no primeiro estágio de alteração das relações homeostáticas. Ainda estão quase intactos o potencial natural e a integridade. A estabilidade natural se modifica antropogeneticamente	→	Paisagem instável à crítica que experimentou a perda parcial da estrutura espacial e funcional e da integridade que dá lugar à desestruturação (alteração das relações) homeostáticas	→	Paisagem esgotada em estado muito crítico que perdeu a estrutura espacial e funcional. Os mecanismos da estabilidade natural foram eliminados.
SISTEMA AGRÍCOLA	Geossistema Natural	→	Sistema agrícola adaptado. Produtivamente alta ou baixa (em dependência do ingresso de energia externa).	→	Sistema agrícola de compromisso. Produtividade média a muito alta (em dependência do ingresso de energia externa)	→	Sistema agrícola desintegrado. Produtividade baixa ou muito baixa (inclusive em dependência de ingresso de energia externa)
NÍVEL DE DEGRADAÇÃO	Sem degradação	→	Pouco degradada	→	Degradada	→	Muito degradada

Fonte: Rodriguez, Silva e Cavalcanti (2002).

Na área de estudo, a elaboração de classes como Sistemas Ambientais, permite identificar áreas homogêneas, a partir da combinação de diversos elementos naturais e sociais que fazem parte de um conjunto complexo, procurando individualizá-las.

Com a sequência do processo de degradação de Geossistemas, é possível compreender que a degradação em geossistemas refere-se à deterioração das características geológicas e do ambiente físico, em contraste com a degradação de ecossistemas, que se concentra na perda de biodiversidade e qualidade do ambiente natural, consequentemente, a perda de produtividade e desequilíbrios ecológicos.

Assim, a degradação em sistemas ambientais refere-se ao processo de deterioração das condições naturais e da qualidade do ambiente devido a várias atividades humanas e fenômenos naturais (RODRIGUEZ, SILVA e CAVALCANTI, 2017).

Pode-se destacar diversas questões e problemas ambientais ao redor mundo, sendo o desmatamento, com a remoção da vegetação natural e florestas, especialmente para fins agropecuários, urbanização e exploração dos recursos naturais, que contribuem para degradação e resulta em perda de biodiversidade, com a erosão do solo e impactos no ciclo da água. A poluição na água, no ar e no solo, por exemplo, gera diversos impactos nos ecossistemas, e a contaminação acaba resultando em fins negativos em aspectos socioambientais (CARVALHO, 2013; CARVALHO, GIRÃO e CABRAL, 2017).

Tudo isso pode estar interligado também às alterações climáticas, que são impulsionadas principalmente pela emissão de gases, aumento o efeito estufa, e causando perturbações significativas em sistemas ambientais, incluindo o aumento da temperatura, mudanças nos padrões de precipitação e eventos climáticos extremos (KEMP *et al.* 2022).

Analisando cenários e eventos climáticos extremos ao redor do mundo, Kemp *et al.* (2022), nos mostra que há uma abundância de evidências de que as mudanças climáticas podem se tornar catastróficas para toda a humanidade. E destacam que compreender os riscos extremos é crucial para tomadas de decisões robustas, desde o preparo até a consideração de medidas de emergência. Isso exige a exploração não apenas de cenários de temperaturas mais altas, mas também do potencial para os impactos das mudanças climáticas contribuírem para riscos sistêmicos e outras cascadas de consequências. E encarar um futuro de aceleração das mudanças climáticas enquanto permanecemos alheios aos cenários de pior caso é uma gestão de riscos ingênua na melhor das hipóteses e, na pior, fatalmente imprudente.

Já destacavam Foley *et al.* (2005), que o Uso da Terra, tem sido considerado um alvo constante das questões ambientais locais, mas que também está tomando uma força de importância global. E consideram que as terras agrícolas globais, pastagens, plantações e áreas urbanas têm se expandido nas últimas décadas, acompanhadas por aumentos significativos no

consumo de energia, água e fertilizantes, juntamente com perdas consideráveis de biodiversidade.

Com isso vem surgindo temas presentes, analisando processos erosivos, como a desertificação, que vem transformando terras que antes eram produtivas em desertos, causados pelo manejo incorreto dos solos, desmatamentos e práticas excessivas na agricultura. Assim como a mineração e extração de recursos naturais, que muitas das vezes alteram irreversivelmente a paisagem, corroborando para desastres e contaminações de lençóis freáticos e águas subterrâneas, poluindo aquíferos e perca da qualidade de água potável, bem como o assoreamento dos rios, que causam desequilíbrios nos ecossistemas (NETO *et al.*, 2021).

Dessa forma, pode-se considerar que a análise integrada da paisagem com os sistemas ambientais constitui-se como tema que compõe sistematicamente a realidade socioambiental e geográfica, e alteram significativamente a forma que compreendemos o mundo.

A análise da paisagem com os sistemas ambientais pode ser evidenciada em um recorte amplo, que atribui mecanismos para existência do Geossistema, em busca do uso sustentável e da conservação das unidades, portanto, é essencial que seja utilizada para fins de compreensão e melhor aplicação dos conceitos.

3.4. Bacia Hidrográfica como Unidade de Análise

As diversas razões pelas quais a análise de bacias hidrográficas como unidade de pesquisa é benéfica, se apropria tanto da gestão, quanto aplicação do seu uso. Propondo um recorte amplo, a escolha de utilizar uma bacia hidrográfica como unidade de análise em pesquisas, é uma abordagem muito relevante e útil, especialmente para estudos ambientais e de gestão de recursos hídricos.

A utilização de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possibilita uma gestão territorial mais precisa por meio da análise espacial. Isso permite uma análise detalhada das características da bacia, facilitando a classificação e identificação dos sistemas ambientais presentes.

O IBGE (2021), define bacia hidrográfica como uma área da superfície terrestre delimitada por divisores de águas, ou interflúvios, que capta e escoam, por meio de vertentes, rios e córregos, sejam permanentes ou temporários, as águas superficiais provenientes de precipitação para um exutório, isto é, um único ponto de saída, localizado em um ponto mais baixo do relevo.

Seus principais componentes, o solo, a água, a vegetação e a fauna, coexistem em permanente em uma dinâmica interação, que respondem às interferências naturais e antrópica, afetando todos os ecossistemas de forma geral. Em síntese, existem diversos fatores e elementos importantes para formação das bacias hidrográficas (CARVALHO, 2013).

Pode-se destacar a Geomorfologia, com a morfologia dos rios que influenciam a forma da qual estarão presentes os elementos, juntamente com outros fatores em sua extensão, como Clima, que a partir dos estudos morfoclimáticos, determina os padrões de precipitação que vão afetar diretamente o fluxo das águas em uma bacia, que vão desaguar conforme os níveis de hierarquia dos rios e os padrões de drenagem com a hidrografia (ANA, 2019; IBGE, 2021).

As chuvas desempenham um papel fundamental em uma bacia hidrográfica com processos de intemperismo e erosão, pois têm um impacto significativo na modelagem do relevo, no transporte de sedimentos e na formação e manutenção dos sistemas fluviais.

Para o Clima, de acordo com Christofletti (1980), o sistema climático se refere às condições atmosféricas e climáticas que prevalecem em uma região específica. Os elementos climáticos, como temperatura, precipitação, ventos e umidade, desempenham um papel essencial na modelagem do relevo. A ação do clima, ao longo de milhares de anos, influencia a erosão, sedimentação e outros processos geológicos que moldam o relevo.

O entendimento desses processos é essencial para a gestão sustentável da água e a prevenção de impactos ambientais negativos em bacias hidrográficas. De mesma maneira, analisar de forma integrada a formação para os sistemas ambientais é fundamental a partir dos processos morfoclimáticos e de modelagem do relevo, com o intemperismo e a erosão.

Nesse quesito, destaca-se que as pesquisas em bacias hidrográficas obtiveram êxitos na execução, tendo como resultado mapas de vulnerabilidade natural à erosão solo e a vulnerabilidade ambiental, servindo, principalmente, como fonte de dados para execução de planejamentos ambientais, em diferentes recortes espaciais (COSTA, SOUZA e SILVA, 2021).

A Geologia, conforme as características presentes na formação das rochas, influenciam a composição físico-química do solo, bem como determinadas áreas, com formação geológica específica que são indicadas para o uso de atividades em extração de recursos naturais, como mineradoras e petrolíferas, por exemplo (CARVALHO, 2013).

A Pedologia é outro fator importante, pela infiltração da água, e a capacidade de um solo absorvê-la. Afinal, solos com alta infiltração podem ajudar a recarregar os aquíferos, reduzindo a probabilidade das secas, bem como a erosão do solo, que desempenha fator

importante nas questões dos depósitos de sedimentos nos rios, e a susceptibilidade a vulnerabilidade ambiental (CARVALHO, 2013; CARVALHO, 2020).

Segundo Willett *et al.* (2014) as redes fluviais, são essenciais para a maioria das paisagens na Terra, coletam e transportam água, sedimentos, matéria orgânica e nutrientes das regiões montanhosas nos quais o fluxo da rede de drenagens é redirecionado para uma nova direção até os oceanos. Esse sistema dinâmico busca estabelecer o equilíbrio, e quando não obtivermos este equilíbrio, deverá haver mudanças necessárias para alcançá-lo.

Os elementos e fatores formadores de uma bacia hidrográfica exploram interações complexas, e é de suma importância da gestão sustentável dos recursos hídricos. Os estudos em bacias hidrográficas, com novos arranjos metodológicos, nos proporcionam uma maior compreensão acerca desse tema (IBGE, 2013).

No Brasil, se tornou público estudos recentes compilados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, com procedimentos metodológicos para a elaboração da Base de Bacias Hidrográficas do Brasil (BHB250) e da Base da Divisão Hidrográfica Nacional (DHN250), compatíveis na escala de 1:250.000, das quais, em conjunto, apresentam, de maneira sistematizada, os recortes hidrográficos do País (IBGE, 2021).

Há portanto uma descrição dos processos e métodos utilizados para a elaboração das referidas bases, estabelecendo limites, nomes e códigos para as unidades hidrográficas, agregando séries estatísticas essenciais às bacias hidrográficas de acordo com a estimativa de população que usufruem deste território, a disponibilidade hídrica, o uso e a qualidade da água, contribuindo de sobremaneira para a sistematização e a disseminação de indicadores relacionados à questão hídrica no Brasil (ANA, 2019; IBGE, 2021).

Para se compreender essa sistematização, propõe-se a utilização da hierarquia dos cursos d'água proposta por Strahler (1957), adaptada de Horton (1945), em que canais sem tributários são de primeira ordem, desde a sua nascente até a confluência com algum outro rio. A partir da confluência de dois canais de primeira ordem (1), surge um canal de segunda ordem (2) que, ao encontrar outro canal de segunda ordem, origina um canal de terceira ordem (3) e assim sucessivamente; os canais de uma bacia hidrográfica são hierarquizados da nascente até o exutório (IBGE, 2021).

Há também a ordem de Gravelius, onde um curso d'água evidencia a quantidade de canais e ramificações da rede de drenagem existentes entre ele e o mar. O canal que deságua

diretamente no mar tem ordem 1, o que deságua nele é de ordem 2, o tributário desse tem ordem 3 e assim sucessivamente (IBGE, 2021).

Importante mencionar, que para cada bacia hidrográfica delimitada são indicadas as quatro principais sub-bacias que a compõem, com os seus códigos associados e nomes identificados. O critério adotado para determinação das principais sub-bacias é o tamanho da área de contribuição, seguindo assim a metodologia de codificação de bacias hidrográficas de Otto Pfafstetter (1989), por isso o termo denominado ottobacias (IBGE, 2021).

A interação entre a precipitação, ou seja, as chuvas, e os divisores de água, que correspondem às características do relevo, desempenha um papel fundamental na formação das bacias hidrográficas. Esses divisores naturais são responsáveis por delimitar as bacias por meio da drenagem dos rios e seus afluentes. À medida que a água da chuva se acumula e percorre o relevo, ela segue caminhos naturais definidos pelas depressões ou declividades do terreno, formando riachos, córregos e rios que convergem para um curso principal.

Dessa forma, as bacias hidrográficas, assim, são áreas geográficas delimitadas pelos divisores de água, onde todas as águas precipitadas dentro de seus limites convergem para um único curso d'água principal. Essa água flui através dos afluentes até alcançar o trajeto do rio principal, que eventualmente deságua na foz ou exutório, seguindo em direção ao oceano.

Através do modelo de representação na Figura 7, utilizou-se da inteligência artificial, para simular a representação dos rios conforme a ordem de Strahler (1957), com o relevo e perfil topográfico de um rio ou bacia hidrográfica, a partir de áreas com maior a menor altitude.

Figura 7 - Modelo de representação de uma Bacia Hidrográfica.



Fonte: Autor, (2023). Imagem gerada através Free IA Image Generator Canva7.

Um dos métodos mais comuns em procedimentos de análises hidrológicas e ambientais é a delimitação de uma bacia hidrográfica. A utilização de informações de relevo em formato analógico, como mapas e cartas, fornece a fidelidade e a reprodução dos resultados devidos à carga de subjetividade inerente aos métodos manuais.

Com o advento e consolidação dos Sistemas de Informações Geográficas, o surgimento de formas digitais consistentes de representação do relevo, como os Modelos Digitais de Elevação (MDEs), métodos automáticos para delimitação de bacias têm sido desenvolvidos desde então (GARBRECHT e MARTZ, 1999). Dessa maneira, o SIG é um componente essencial para essas análises.

Segundo Carvalho (2020), em relação as bacias hidrográficas compreendem-se que estão de acordo ao planejamento territorial como a unidade básica de análise para o desenvolvimento de ações e medidas estruturais e não estruturais com a integração entre a gestão dos recursos hídricos e a gestão ambiental.

Este recorte territorial foi instituído através da Política Nacional de Recursos Hídricos, no Brasil, a partir da promulgação da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), sendo posteriormente empregado na Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (BRASIL, 2007); Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, (BRASIL, 2012) e, em normativas derivadas da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981).

⁷ Canva: <https://www.canva.com/ai-image-generator/>

E conforme definido pela Resolução n. 30, de 11.12.2002, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH, que estabeleceu ainda procedimentos de subdivisões em agrupamentos de bacias e regiões hidrográficas, no âmbito nacional (Brasil, 2002).

Discorre em resolução de dezembro de (2002, P. 1)

“Considerando a importância da redefinição da sistemática para codificação de bacias hidrográficas para a Política Nacional de Recursos Hídricos, o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e a gestão dos recursos hídricos no âmbito nacional, em particular para a elaboração do Plano Nacional de Recursos Hídricos; Considerando a necessidade de se adotar metodologia de referência que permita procedimentos padronizados de subdivisões e agrupamentos de bacias e regiões hidrográficas”.

E assim também com a criação do Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH) possibilitaram nos estados do Brasil, a abertura de espaço para diálogo, na perspectiva da integração regional de órgãos e entidades governamentais e não governamentais que, antes, atuavam de forma isolada, mas também o surgimento de novos agentes sociais participando do processo de tomada de decisões para os problemas hídricos de ordens regionais e locais (CHIQUITO, 2012; ANA, 2019).

Neste contexto, de forma abreviada, entende-se que para que a gestão hídrica possa ser efetuada de forma descentralizada considerando a participação popular, deve-se estimular o desenvolvimento e atuação de CBH, uma vez que, a partir deste organismo, pode-se então haver maior aproximação para compreensão da dimensão e da atuação do território, da produção social e dos impactos gerados, não meramente sobre os recursos hídricos, mas também, nos atores sociais envolvidos no processo de gestão (CARVALHO, 2020).

A noção da importância de estudos em bacias hidrográficas especialmente no semiárido nordestino se dá em fato dos relatórios da Agência Nacional de Águas – ANA (2024), onde apresenta informações que de 2020 a 2022, aproximadamente 25 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens no Brasil, o que corresponde a cerca de 6 vezes mais que por cheias. Foram quantificados 4.195 eventos de seca associados a danos humanos, cerca de 3,5 vezes mais que os de cheias (1.188). Em 2022, mais de 7 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens no Brasil, sendo contabilizados 1.212 eventos neste ano. Em termos de danos humanos, o ano de 2021 foi mais crítico que 2022, com cerca de 700 mil pessoas afetadas a mais por eventos de estiagem e seca. Em 2022, a maior parte dos eventos de secas ocorreu na Região Nordeste (45,1%).

Desde 2017, tem sido observada uma melhora progressiva na situação de seca nos estados da região Nordeste, que saíram da condição de seca muito severa em 2017, marcada pelas categorias mais intensas da escala do Monitor de Secas, para uma condição expressivamente mais atenuada em 2021, quando se verificou a seca sobre aproximadamente 50% da região (ANA, 2024).

Porto & Porto (2008), discutem sobre este tema mostrando que é na bacia hidrográfica que se desenvolvem as atividades humanas que estão representados todos os processos que fazem parte do seu sistema, ocorrendo ali a consequência das formas do uso da terra do seu território e da utilização das águas que para ali convergem. Todavia, evidencia-se que tais alterações ultrapassam as delimitações territoriais das bacias hidrográficas e, estas por muitas vezes, tornam-se resultados de impactos diretos de influência indireta do território da produção social a partir das ações antrópicas.

A água desempenha um papel crucial em todas as atividades, tanto no âmbito ecológico quanto no socioeconômico e no bem-estar humano. Além de ser vital para a vida do ponto de vista das necessidades biológicas e para o equilíbrio dos ecossistemas naturais, também é essencial para sustentar as diversas atividades que contribuem para com a sociedade. No entanto, em várias regiões do mundo, devido à escassez de água doce em relação à demanda global, observam-se variações significativas na disponibilidade de água ao longo do tempo e em diferentes lugares, resultando em situações de escassez em muitas partes do globo (MARTINS *et al.*, 2021).

As ações humanas, como urbanização, agricultura e desmatamento, tem um impacto significativo na qualidade da água e nos ecossistemas de uma bacia. São interligadas diretamente pelo Uso da Terra, conforme as atividades econômicas e as práticas agrícolas, que alteram a cobertura vegetal, que em alguns solos serão mais adequados, porém, se mal manuseadas poderão causar a poluição dos rios (MARTINS *et al.*, 2021).

Ao trazer a discussão para área de estudo, de acordo com Silva e Souza (2013), a Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo é palco de uma variedade de atividades econômicas, como aquicultura, produção salineira, exploração petrolífera e agricultura, incluindo o cultivo de melão, além de abrigar populações em cidades e povoados.

A partir de uma pesquisa, percebe-se que a influência da localização geográfica e das variações sazonais na região tem um impacto significativo nos valores dos parâmetros individuais e dos Índices de Qualidade da Água (IQAs). Portanto, torna-se evidente a necessidade de implementar ações e projetos que visem reduzir os impactos das atividades que

estão causando poluição no Rio do Carmo, especialmente nas proximidades das cidades em áreas adjacentes às operações de fruticultura irrigada intensiva (SILVA e SOUZA, 2013).

O crescimento rápido da população e sua industrialização submetem os recursos hídricos a pressões que eram consideradas consequências inevitáveis do processo de desenvolvimento e não havia dedicação para mitigação destes impactos uma vez que a sociedade acreditava em recursos naturais infinitos. A quebra de paradigma e a apresentação de um planeta que não consegue suprir a demanda da população em expansão, leva a busca de alternativas para melhor gestão e aproveitamento dos recursos existentes dentre os quais a água tem um papel de destaque (LIMA e CORRÊA, 2019).

Durante períodos de crises hídricas, sejam elas desencadeadas por secas ou enchentes, são observados impactos significativos tanto no meio ambiente quanto nas comunidades em termos socioeconômicos. Nessas circunstâncias, os diversos usos da água podem ser comprometidos, o que pode resultar em problemas para o fornecimento público de água e para a produção agropecuária, entre outros setores. As causas das crises hídricas são diversas e incluem fatores naturais, como variações sazonais e interanuais nos padrões de precipitação, bem como fatores humanos, como possíveis alterações climáticas globais e questões políticas e socioeconômicas, como o aumento populacional, o crescimento da demanda por água e a falta de medidas efetivas na gestão dos recursos hídricos (ANA, 2024).

Portanto, conforme citam Carvalho, Girão & Cabral (2017), a falta de planejamento e de controle do uso do solo podem ser responsáveis por consequências danosas à dinâmica hidrológica da bacia hidrográfica, especialmente quando os cursos d'água são poucos considerados ou até mesmo negligenciados no ordenamento territorial.

O vínculo inicial entre os estudos em bacias e o meio ambiente, compreensível em sua natureza, proporcionou uma plataforma propícia para o desenvolvimento da abordagem geossistêmica de Bertrand (1972) e da ecodinâmica de Tricart (1977). Dentro dessa perspectiva, a ação humana foi assimilada como um componente adicional do sistema, que exerce influência sobre os fluxos de matéria e energia, resultando em alterações no comportamento ou no equilíbrio natural dos geossistemas. Nessa perspectiva, a bacia hidrográfica surge geograficamente como um recorte espacial de compreensão sistêmica (CARVALHO, 2013).

Sobre isto, Tucci (1997) cita que o estudo a partir da bacia hidrográfica permite observar em detalhes a variação dos diferentes processos que ocorrem nela, e que, com base no registro das variáveis hidrológicas envolvidas, é possível entender melhor os fenômenos e procurar

representá-los matematicamente, permitindo a integração multidisciplinar entre diferentes sistemas de gerenciamento, estudo e atividade ambiental.

Assim, complementa Campos (2006), que a bacia hidrográfica, além da integração das águas com o meio físico, biótico e social, funciona como um sistema físico e dinâmico, e perfaz ainda uma ideia de unidade funcional básica de planejamento e gerenciamento ambiental.

O principal motivo de estudar uma bacia hidrográfica, como unidade de análise, é prezar pela segurança hídrica. Segundo Tucci e Chagas (2018), a segurança hídrica envolve a avaliação dos riscos associados à gestão sustentável da água, abrangendo considerações sobre a disponibilidade em termos de quantidade e qualidade. Esses fatores têm repercussões significativas na sociedade, na infraestrutura e nos ecossistemas, todos interligados com a vulnerabilidade em questão às condições climáticas, da sociedade e do meio ambiente.

Dessa forma, pode-se considerar o balanço hídrico para amostragem das análises, que independentemente da ocorrência de eventos extremos, o Balanço Hídrico se apresenta como uma ferramenta de gestão capaz de identificar pressões e potenciais conflitos que podem incidir sobre os recursos hídricos diante de diferentes cenários. É, portanto, um elemento fundamental para orientar a gestão e o planejamento nas bacias hidrográficas brasileiras, visando garantir a segurança hídrica (ANA, 2021).

As mudanças climáticas terão impactos variados nos recursos hídricos do Brasil, dependendo das características regionais. Geralmente, o aumento das temperaturas tende a acelerar o ciclo hidrológico, resultando em efeitos significativos. As principais consequências das mudanças climáticas nos recursos hídricos incluem o aumento da evapotranspiração devido ao aquecimento, alterações nos padrões de precipitação e uma possível intensificação na ocorrência de inundações e secas. Essas mudanças desafiam do padrão hidrometeorológico, que é fundamental no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (ANA, 2024).

Portanto, os gestores de recursos hídricos enfrentam o desafio de adaptar suas estratégias e políticas para lidar com as incertezas trazidas pelas mudanças climáticas. Isso requer uma abordagem flexível e adaptativa, que leve em consideração cenários futuros e promova práticas sustentáveis de gestão da água (ANA, 2013).

A partir disto, Fuller, Doyle, Strayer (2015), para compreender melhor os efeitos da degradação das redes fluviais, surgem com novos métodos para prática sustentáveis, onde se mostra necessário adotar novas abordagens adaptadas a esses sistemas. E recomendam desenvolver uma árvore de decisão para orientar o manejo dos ecossistemas. Sendo fundamental estabelecer novas áreas de pesquisa para avaliar paisagens fluviais degradadas, a

fim de entender melhor os impactos e desenvolver estratégias eficazes de conservação e restauração desses ambientes críticos.

Dessa forma, Dixon *et al.* (2016), discute sobre o aumento do crescimento de áreas vulneráveis com a frequência de eventos meteorológicos extremos devido às mudanças climáticas, que também são responsáveis pelo crescente risco de inundações.

Segundo Wohl, Lane e Wilcox (2015) novas considerações relacionadas às mudanças climáticas e à resiliência também se tornou uma prioridade crescente no planejamento de projetos de restauração de ecossistemas. Onde é relevante destacar as mudanças significativas que ocorreram na prática de restauração dos rios nas últimas décadas.

Segundo os autores supracitados, isso incluirá uma maior utilização de métodos para mitigação de impactos em cursos de água e bacias hidrográficas, com o desenvolvimento de novas ferramentas, tecnologias e a adoção de diferentes abordagens de recuperação ambiental baseadas nestes processos. E sinalizam para uma melhoria na qualidade da água resultante destes esforços, havendo uma comunicação mais eficaz entre os profissionais envolvidos e a comunidade científica especializada em recursos hídricos (WOHL, LANE e WILCOX, 2015).

Segundo Dixon *et al.*, (2016) para as bacias hidrográficas, a avaliação ambiental e a restauração desses sistemas, representa uma das áreas mais proeminentes dentro do campo da ciência aplicada aos recursos hídricos, expandindo consideravelmente para abranger uma ampla gama de atividades de gestão destinadas a aprimorar tanto os processos naturais quanto a morfologia dos rios.

Essas intervenções compartilham o objetivo comum de aprimorar os processos hidrológicos, geomorfológicos e/ou ecológicos em uma bacia hidrográfica degradada, bem como substituir elementos do sistema natural ou geossistema, que foram perdidos, danificados ou comprometidos. Entretanto, vale ressaltar a ideia mais viável é de que os sistemas também podem se regenerar de maneira individual, por meio da conservação natural, sem intervenções.

Desse modo, estudar uma bacia hidrográfica como unidade de análise ambiental é crucial, pois permite compreender de forma abrangente e integrada os processos naturais e antropogênicos que afetam a qualidade e a disponibilidade da água, contribuindo para a preservação do meio ambiente, a promoção do desenvolvimento sustentável e a mitigação de impactos relacionados à qualidade da água e processos erosivos.

4. METODOLOGIA

4.1. Localização e Caracterização da área de estudo

4.1.1. Dinâmica Territorial

O território total da bacia contempla uma área de 3596,85km² que se estende por diversos municípios, sendo 12 no RN, Açu, Campo Grande, Caraúbas, Governador Dix-Sept Rosado, Janduís, Messias Targino, Mossoró, Paraú, Patu, Serra Do Mel, Triunfo Potiguar e Upanema, e somente uma pequena parte na Paraíba (PB), em Belém do Brejo do Cruz.

No Quadro 2, percebe-se por exemplo que os maiores municípios da Bacia seriam o município de Mossoró com 2099,45 km², seguido de Açu com 1303,97 km².

Quadro 2 - Representação de áreas dos municípios na BHRC.

Código	Município	Sigla UF	Área (Km ²) [Municípios]	Área (Km ²) [Inserida na Bacia]	Percentual Área [Inserida na Bacia]	Média da Área/Total [Composto na Bacia]	Relevância (Acima de 5%)
2400208	Açu	RN	1303,97	113,63	3,16%	8,71%	SIM
2401305	Campo Grande	RN	897,00	749,33	20,83%	83,54%	SIM
2402303	Caraúbas	RN	1095,59	270,17	7,51%	24,66%	SIM
2404309	Gov. Dix-Sept Rosado	RN	1129,37	293,42	8,16%	25,98%	SIM
2405207	Janduís	RN	304,87	304,81	8,47%	99,98%	SIM
2407609	Messias Targino	RN	135,08	77,91	2,17%	57,68%	SIM
2408003	Mossoró	RN	2099,45	717,32	19,94%	34,17%	SIM
2408706	Paraú	RN	383,32	25,36	0,71%	6,62%	SIM
2409308	Patu	RN	319,07	102,28	2,84%	32,06%	SIM
2413359	Serra do Mel	RN	620,48	80,14	2,23%	12,92%	SIM
2414456	Triunfo Potiguar	RN	268,79	0,01	0,0003%	0,004%	NÃO
2414605	Upanema	RN	873,23	860,86	23,93%	98,58%	SIM
2502003	Belém do B. do Cruz	PB	601,56	1,61	0,04%	0,27%	NÃO
	Total		10031,77	3596,85	100%		

Fonte: IBGE, 2022; organizado por autor.

O menor município em extensão territorial é o município de Messias Targino com 135,08km², entretanto, percebe-se a bacia ocupa mais da metade de seu território com 57,68%.

Esta área inserida leva em consideração a área total de 3595,85 km², em relação ao total de área de cada município, que estão na bacia. Já o percentual de área por total composto na bacia, considera o total de área em que a bacia ocupa em cada município.

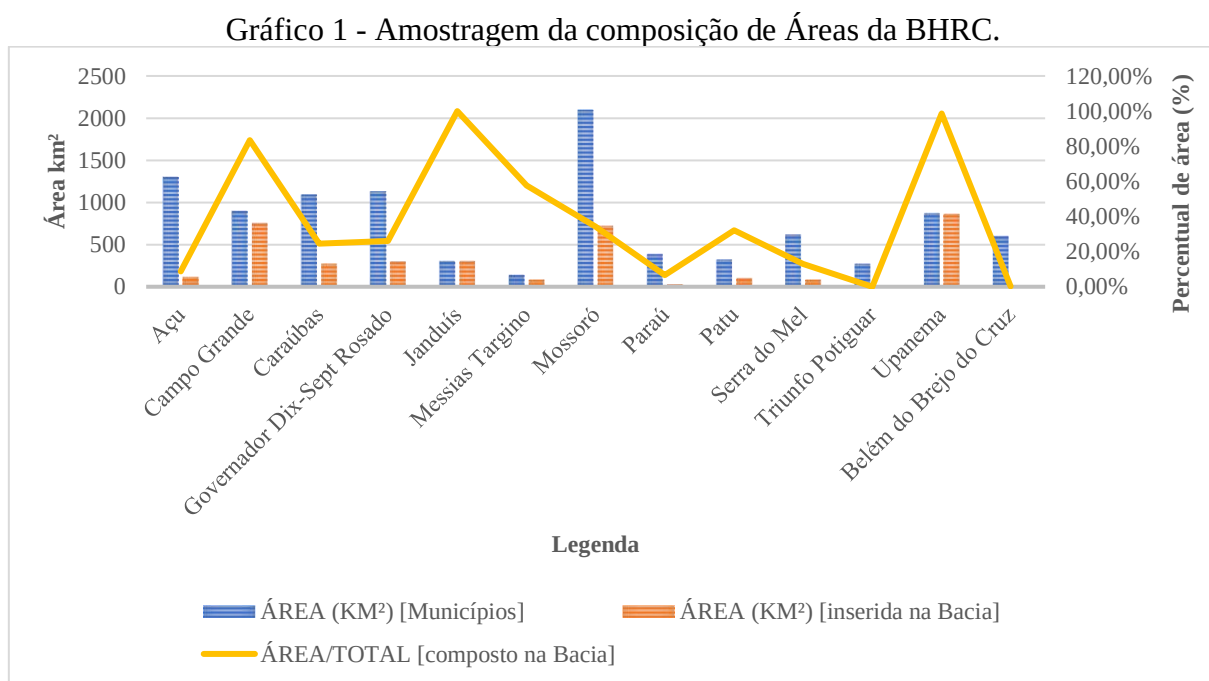
Nota-se, de fato, que com a representação da área inserida de cada município da BHRC, percebe-se que alguns deles não atingem nem 1% do território da bacia, como Belém do Brejo do Cruz-PB, Triunfo Potiguar-RN e Paraú-RN.

Já os municípios com maiores áreas compostas na bacia, evidenciando o total de sua área que está interseccionada, temos Janduís e Upanema, atingindo quase 100% da área total de seus municípios.

Ressalta-se que bacia hidrográfica é uma unidade territorial natural, em que o relevo é o divisor de águas, não sendo contabilizado as áreas com divisão política (IBGE, 2021).

Para esse fato, foi proposto também um grau de relevância para os municípios, em que destes, por composição de área acima de 5% do da área total do município, seriam considerados realmente relevantes para a pesquisa, estando fora Brejo do Cruz-PB, Triunfo Potiguar-RN.

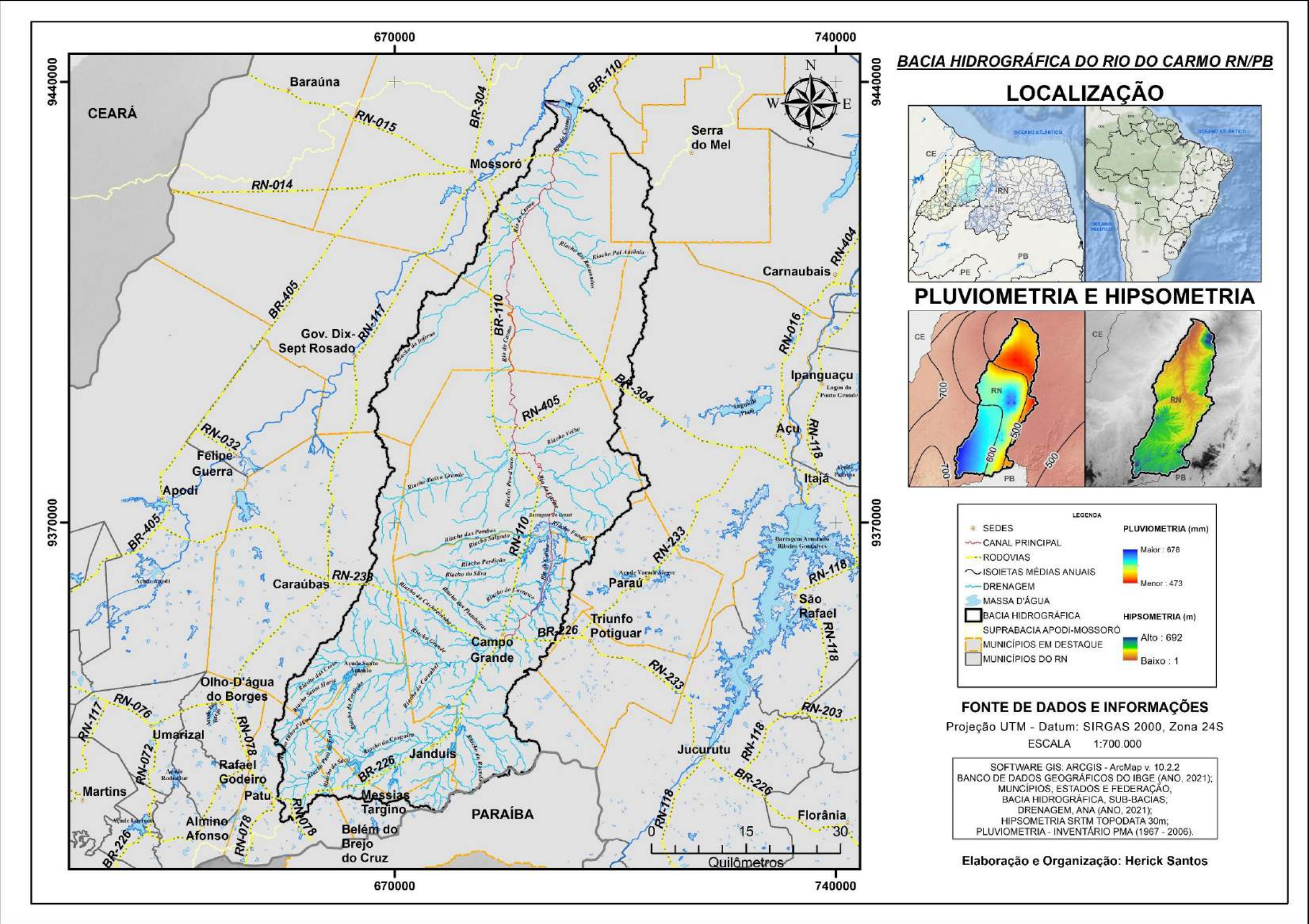
Apesar da composição de área, são importantes municípios que afetam diretamente a dinâmica econômica, social e territorial. No gráfico 01, percebe-se amostragem da composição de áreas de cada município, com as informações supracitadas no quadro 02.



Fonte: IBGE, 2022; organizado por autor.

Através desta concepção, uniu-se componentes gerais (Figura 08), para mostrar como funciona a dinâmica territorial através das principais rodovias, os limites territoriais de cada município, os principais corpos d'água presente ao entorno e dentro da bacia.

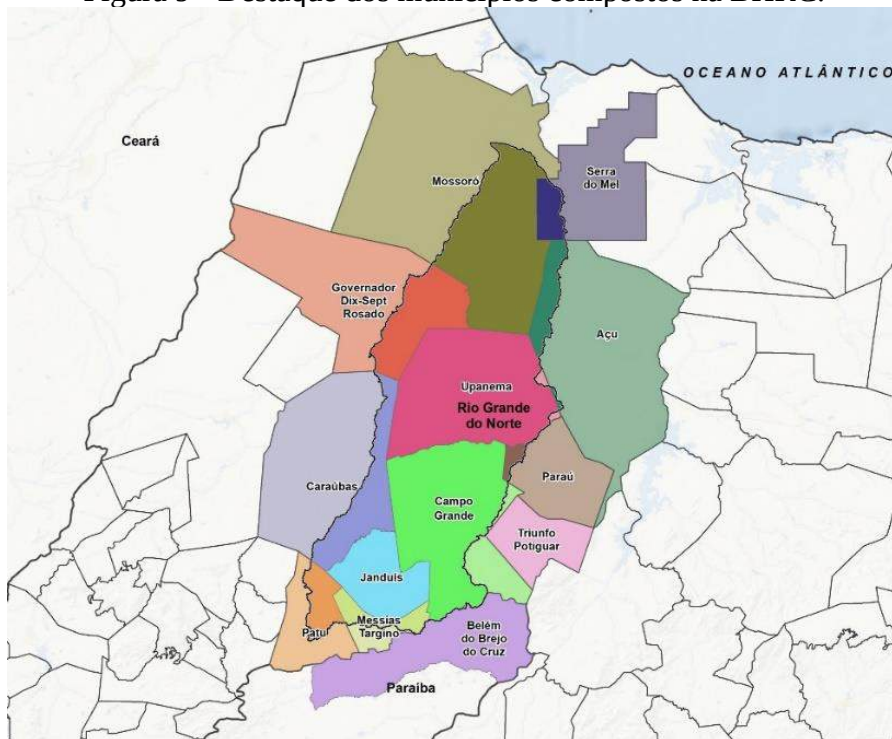
Figura 8 - Mapa de Localização Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo, RN/PB, Brasil.



Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

Na figura 09, destaca-se com mais visibilidade a área de cada município com a parcela do território ocupando na bacia, onde cada um representa uma parcela importante ou quase insignificante em seu território. Mas de forma geral, compõe-se a maioria dos dados que complementam o território total, onde observa-se no quadro 2, supracitado anteriormente, a distribuição das áreas nos municípios e na BHRC respectivamente.

Figura 9 - Destaque dos municípios compostos na BHRC.



Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

A partir dos dados populacionais (Quadro 03) dos municípios da BHRC, observa-se que a taxa de crescimento médio foi de 0,33%, com densidade demográfica média de 47,42 habitantes por quilômetro quadrado. Mesmo com uma baixa quantidade em números, pode-se afirmar, que os municípios estão crescendo e desenvolvendo sua população, mas de forma lenta e gradual, se compararmos os anos, em 2010, a soma da população total atingiu cerca de 413.447 habitantes e 422.242 habitantes para o ano de 2020 (IBGE, 2022).

Entretanto, o município no qual houve um maior crescimento de sua população foi Serra do Mel, com 27,26%, já Janduís foi o que teve a maior taxa de crescimento negativa no RN, com caindo para -11,21% e Belém do Brejo Cruz na PB -12,25%. O município com maior população é o município de Mossoró com 264.577, e apresentou uma taxa de crescimento de 1.83%, possui inclusive a maior densidade demográfica, com 126 habitantes por km². Já o

município que possuiu a menor população total foi Paraú com 3.587, com taxa de crescimento negativa de -7,05%, e densidade demográfica, respectivamente, de 9,36 habitantes por km².

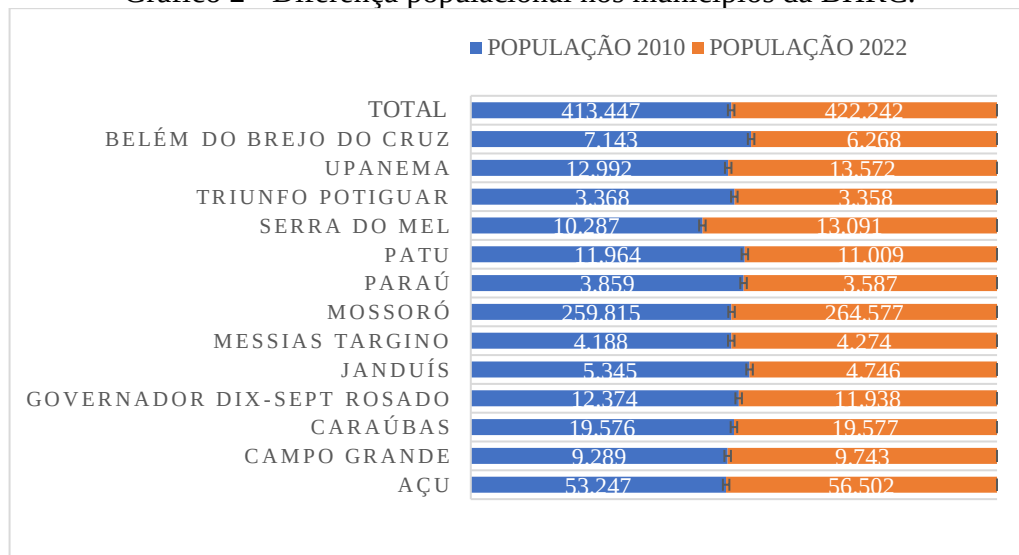
Quadro 3 - Representação da população dos municípios da BHRC.

MUNICÍPIO	POPULAÇÃO 2010	POPULAÇÃO 2022	TAXA DE CRESCIMENTO (%)	DENSIDADE DEMOGRÁFICA (h/km ²)
Açu	53.247	56.502	6,15%	43,35
Campo Grande	9.289	9.743	4,89%	10,94
Caraúbas	19.576	19.577	0,01%	17,87
Governador Dix-Sept Rosado	12.374	11.938	-3,52%	10,57
Janduís	5.345	4.746	-11,21%	15,64
Messias Targino	4.188	4.274	2,05%	29,97
Mossoró	259.815	264.577	1,83%	126,03
Paraú	3.859	3.587	-7,05%	9,36
Patu	11.964	11.009	-7,98%	34,50
Serra do Mel	10.287	13.091	27,26%	21,11
Triunfo Potiguar	3.368	3.358	-0,30%	12,50
Upanema	12.992	13.572	4,46%	15,54
Belém do Brejo do Cruz	7.143	6.268	-12,25%	10,42
Total / Médio	413.447	422.242	0,33%	47,42

Fonte: IBGE, 2022, organizado por autor.

A partir dos dados, nota-se uma amostragem mais bem definida no gráfico 2, com a diferença populacional de cada município, com base na população de 2010 e 2022 (IBGE, 2022).

Gráfico 2 - Diferença populacional nos municípios da BHRC.



Fonte: IBGE, 2010, 2022; organizado por autor.

A dinâmica socioeconômica da bacia, proporciona análises territoriais, em sua área, sendo utilizada para diversas atividades humanas, como o abastecimento de água para consumo humano e animal, pesca, carcinicultura, agropecuária, mineração e extração de petróleo.

Segundo dados do IBGE, 2020; 2010, os municípios da BHRC, possuem no Produto Interno Bruto (PIB) per capita média de R\$ 17,493,56, que se somados, no total, daria um montante de R\$ 227.416,30.

Já o IDH médio de 0,623, e 1,89 média geral dos salários médio mensal dos trabalhadores formais (2010) (Quadro 4).

Os municípios em que as atividades econômicas proporcionaram a maior renda per capita, está o município de Serra do Mel-RN com R\$ 50.795,43, um município com sua principal atividade econômica essencialmente agrícola, agora conta com o advento tecnológico do uso de energia renovável, com as usinas eólicas e também possui a maior média salarial entre os trabalhadores formais.

Seguidos de Açu; e Mossoró-RN, cujo este, é o município que também possui o maior índice de desenvolvimento municipal (IDHM) com 0,720, considerado um alto IDH, sendo um dos maiores do Estado, é o de Mossoró-RN. Sendo o menor IDH em Upanema-RN com 0,596. Já a menor renda per capita é o município de Campo Grande-RN com Belém do Brejo do Cruz na PB.

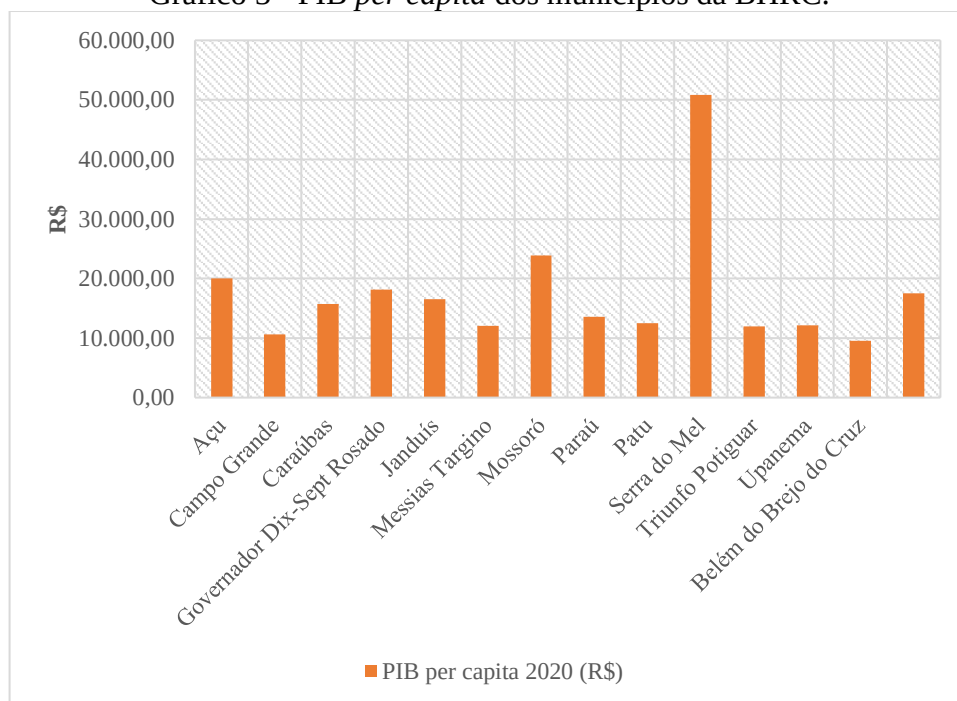
Quadro 4 - Índice de desenvolvimento humano e econômico dos municípios.

Município	IDHM - 2010 (IBGE)	PIB per capita 2020 (R\$)	Salário médio mensal dos trabalhadores formais (2010)
Açu	0,661	20.041,15	1,70
Campo Grande	0,621	10.628,57	1,80
Caraúbas	0,638	15.743,45	1,80
Governador Dix-Sept Rosado	0,592	18.135,41	1,90
Janduís	0,615	16.505,91	1,30
Messias Targino	0,644	12.031,97	2,00
Mossoró	0,720	23.838,91	2,20
Paraú	0,603	13.588,13	1,90
Patu	0,618	12.506,43	1,60
Serra do Mel	0,614	50.795,43	2,70
Triunfo Potiguar	0,602	11.943,65	1,80
Upanema	0,596	12.115,60	1,90
Belém do Brejo do Cruz	0,578	9.541,69	2,00
Média	0,623	R\$ 17.493,56	1,89

Fonte: IBGE, 2010, 2020; organizado por autor.

No gráfico 3, nota-se a amostragem do PIB per capita de cada município, destacando o maior e o menor, até a média entre os municípios supracitados com dados do quadro 4. Assim, pode-se compreender melhor a diferenciação das rendas *per capita* de cada município.

Gráfico 3 - PIB *per capita* dos municípios da BHRC.



Fonte: IBGE, 2020; organizado por autor.

4.1.2. Hidrografia

Segundo os dados BHO250 (Base Hidrográfica Ottocodificada 1:250.000) do IBGE e ANA (2017, 2021), a bacia hidrográfica do Rio do Carmo, BHRC, é localizada no estado Rio Grande do Norte, e abrange um total de 3596,85 km² de código 675562 (ottobacia, nível 6), faz parte da supra bacia do Apodi-Mossoró com o rio do Carmo sendo o seu curso principal medindo um total de 178,81 km, com seus afluentes sendo o Riacho Pai Antônio ou Riacho dos Raimundos, Riacho Baixo Grande, Riacho do Inferno, Riacho do Cangaíra ou Riacho do Cangaíra ou Rio do Adiquinhão, possuindo um total de 262 cursos de rios no total.

Com comprimento dos cursos sendo igual a 1520,80 m, com 0,073 Dh (densidade hidrográfica), 0,43 dd (densidade de drenagem), a demanda total hídrica disponível em 0,76 m³/s, subdividindo-se em demanda animal com 0,05 m³/s, demanda de irrigação com 0,60 m³/s e 0,12 m³/s pra demais demandas que podem incluir várias outras atividades (Quadro 05).

Quadro 5 – Informações Gerais sobre a BHRC.

Atributos	Nome/Valor	Atributos	Unidades
Código Ottobacia	675562	Comprimento médio dos cursos (m)	5,80 m
Nível da Ottobacia	6	Densidade hidrográfica (Dh)	0,073
Nome da Bacia	Bacia do Rio do Carmo (RN)	Densidade de Drenagem (dd)	0,43
Curso Principal	Rio do Carmo	Coefficiente de Manutenção	2364,99
Supra bacia	Bacia Apodi-Mossoró	Disponibilidade Hídrica	2,29
Área (km ²)	3596,85	Demanda Total (m ³ /s)	0,76
Comprimento do curso principal (km)	179	Demanda Animal (m ³ /s)	0,05
Número de cursos	262	Demanda Irrigação (m ³ /s)	0,60
Soma do comprimento dos cursos (m)	1520,80	Demais Demandas (m ³ /s)	0,12

Fonte: IBGE/ANA, 2017/2021; organizado por autor.

Segundo dados, o curso d'água principal de uma bacia é definido como aquele que tem a maior área de captação a cada confluência, verificada em uma análise no sentido foz-nascente IBGE /ANA (2021).

Para determinação do número de cursos d'água de cada bacia hidrográfica é utilizado a noção de que cada canal fluvial tem um código único da nascente até a foz no mar ou em outro canal principal do qual é tributário, independentemente do nome que o curso d'água receba na cartografia ou da quantidade de trechos de drenagem que o compõem. Já a densidade hidrográfica de uma bacia hidrográfica é calculada por meio da divisão do número de canais de primeira ordem, de acordo com Horton-Strahler (1945, 1957), da bacia pela sua área total (IBGE, 2021).

Assim como o número de cursos d'água de cada bacia hidrográfica, também foi obtido o total do comprimento dos cursos d'água compreendidos por cada uma das bacias, a partir do somatório sob mesmo código dos cursos d'água na BHO250 (IBGE, 2021), na qual há o comprimento de cada canal. O coeficiente de manutenção de uma bacia hidrográfica indica a área mínima necessária para a manutenção de 1 m de curso d'água na bacia. Ele é calculado como o inverso da densidade de drenagem multiplicado por 1000.

Seguindo a lógica e definição de regimes pluviais conforme as drenagens, dos afluentes aos maiores volumes que seriam os corpos d'águas, nas áreas em que a declividade é

montanhosa e escarpada, é onde teremos a presença dos rios de primeira ordem (Stralher, 1957). Em sequência, a formação dos rios de 2ª, 3ª, 4ª e 5ª ordem (rio do carmo), com a altitude diminuindo, conforme o perfil topográfico do terreno, a vazão aumenta, e o fluxo fluvial dos rios é conseqüentemente maior.

Para determinar a criticidade qualitativa, utilizou-se o indicador de capacidade de assimilação dos corpos d'água. O indicador utilizado na análise quantitativa representa a relação entre a demanda consuntiva (vazão de retirada) e a disponibilidade hídrica dos rios. A figura 10 mostra a matriz utilizada para enquadrar os trechos de rio segundo as duas condições (qualitativa e quantitativa).

O balanço hídrico quantitativo é um indicador do nível de comprometimento hídrico. Seu papel é identificar quanto da disponibilidade hídrica está sendo utilizada para atendimento de usos consuntivos. Isso é dado pela razão entre a demanda e a oferta e é apresentado em termos de percentuais de comprometimento (ANA, 2024).

Segundo informações da ANA, (2013), o balanço hídrico quali-quantitativo, para determinar a criticidade qualitativa, utilizou-se o indicador de capacidade de assimilação dos corpos d'água. O indicador utilizado na análise quantitativa representa a relação entre a demanda consuntiva (vazão de retirada) e a disponibilidade hídrica dos rios. O campo “Classe” do *shapefile* mostra a classificação de cada trecho, segundo essa análise integrada.

A metodologia utilizada encontra-se no Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos – 2013, disponível no sítio eletrônico da ANA.

Onde maior a criticidade, menor a capacidade para atender a demanda hídrica. Na matriz (Figura 10), pode-se elencar os valores segundo a condição qualitativa em 5 aspectos, desde os valores para excelente, confortável, preocupante, crítica, e muito crítica para os dados no eixo X, e a condição qualitativa, no eixo Y, com Péssima, Ruim, Razoável, Boa e Ótima. A união desses fatores, trará o resultado para a análise da pesquisa.

Figura 10 – Resumo da análise de criticidade dos trechos de rios.

Condição quantitativa	Condição qualitativa				
	Péssima	Ruim	Razoável	Boa	Ótima
Excelente	Criticidade qualitativa				
Confortável					
Preocupante					
Critica	Criticidade quali-quantitativa			Criticidade quantitativa	
Muita critica					

Fonte: ANA, 2013.

4.1.3. Clima

A BHRC, tem sua extensão territorial localizada em regiões de baixa umidade e baixo volume pluviométrico, a partir da classificação climática é considerado um clima semiárido quente (BSh) (Köppen; Geiger, 1928), conhecidos como climas de estepe, que são intermediários entre clima desérticos, classificados como um clima típico de regiões que recebem precipitação abaixo da evapotranspiração potencial, mas não tão baixa quanto um clima desértico. Possuem irregularidade das chuvas em índices pluviométricos com distribuição em poucos meses no período do ano. Os climas de estepe tendem a suportar uma vegetação constituída por gramíneas e pequenos arbustos ocupando solos expostos, com plantas de menor porte arbóreo.

Na BHRC, o domínio morfoclimático que prevalece é o da Caatinga ou Savana-Estépica, definido pelo Domínio das Depressões Intermontanas e Interplanálticas das Caatingas, constituído por quatro padrões morfológicos principais: Superfícies de Aplainamento da Depressão Sertaneja; Chapadas Sustentadas por Rochas Sedimentares; Serras Isoladas; Planalto da Borborema (AB'SABER, 2003).

Esse domínio com presença do clima semiárido, que passa por longos períodos de estiagem. É típico de regiões influenciadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é uma importante característica da climatologia. É importante observar que esses dados são consistentes com o comportamento climático de muitas regiões do semiárido e podem ter

implicações significativas na gestão de recursos hídricos e no planejamento para atividades agropecuárias (AB'SABER, 2003, DINIZ e PEREIRA, 2015).

Pela classificação climática do Rio Grande do Norte, com base em Diniz e Pereira (2015), estabelece 7 subdomínios climáticos: Tropical do Nordeste Oriental (Úmido – de 3 meses secos; Semiúmido – de 4 a 5 meses secos; Semiárido – brando de 6 meses secos e moderado de 7 a 8 meses secos) o Tropical de Zona Equatorial (Semiárido – brando de 6 meses secos; mediano de 7 a 8 meses secos e forte de 9 a 10 meses secos), e com base nesta classificação, toda a bacia está inserida, no subtipo semiárido-mediano.

Para classificação dos níveis de precipitação, utilizou-se a o balanço hídrico climatológico, que é uma análise que avalia a relação entre a entrada (*input*) e saída (*output*) de água em um sistema hidrográfico.

Para análise climatológica, considerará a precipitação como a entrada de água e a evaporação como a saída, levando em conta também o escoamento superficial como contribuintes para a saída total de água da bacia. Para aplicar esse balanço a uma área específica, são utilizadas médias mensais de precipitação e evapotranspiração potencial (EP), esta última calculada com base nas médias mensais de temperatura utilizando a fórmula de Thornthwaite e Matter (1955), descritas a partir da Figura 11.

Pode-se considerar que a evapotranspiração potencial é a máxima condição, a partir das condições atmosféricas reinantes, que com base nas condições climáticas e características é possível estimar.

Figura 11 - Método de Thornthwaite (1955).

Desenvolvido com base em dados restritos do hemisfério Norte:

- evapotranspiração medida;
- temperatura média mensal;
- para dias com 12 horas de brilho solar e
- mês com 30 dias.

F_c = Fator de correção em função da latitude e mês do ano

$$ETP = F_c \cdot 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T}{I} \right)^a$$

Onde:

- ETP = Evapotranspiração potencial (mm/mês)
- T = Temperatura média do mês (°C)
- $a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 0,01792 \cdot I + 0,49239$
- I = índice anual de calor, correspondente a soma de doze índices mensais;
- T_i = Temperatura média do mês i (°C)

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514}$$

Fonte: Thornthwaite e Matter (1955); Apud: UFPR, métodos de balanço hídrico, 2024.

4.1.4. *Geologia*

Nas unidades geológicas da BHRC, os domínios se dividem em sedimentos cenozóicos inconsolidados ou pouco consolidados, depositados em meio aquoso, complexos granito-gnaiss-migmatítico e granulitos, complexos granitóides não deformados, complexos granitóides intensamente deformados, ortognaisses, sedimentos cenozóicos inconsolidados do tipo coluvião e tálus, sedimentos cenozóicos pouco a moderadamente consolidados associados a tabuleiros, sequências sedimentares mesozóicas clasto-carbonáticas consolidadas em bacias de margem continentais (rift), sequências vulcanossedimentares proterozóicas dobradas metamorfizadas de baixo a alto grau (CPRM, 2004; IBGE, 2007, 2021).

As unidades geológicas do Cenozóico são Formação Barreiras, Serra dos Martins, Depósitos colúvio-eluviais e Depósitos aluvionares. No Mesozóico a Formação Açu e Formação Jandaíra. O Neoproterozóico com o Plúton Serra do João do Vale, Plútons sem denominação, Plúton Tourão-Caraúbas, Granitoides de quimismo indiscriminado e Formação Jucurutu. No Paleoproterozóico, Formação Caicó com ortogneiss e Poço da Cruz. Com sistemas geológicos subdivididos em Estratigráfico/Estrutural, Paleontológico e Isotópico radiogênico (CPRM, 2004; IBGE, 2007, 2021).

4.1.5. *Geomorfologia*

As Unidades Geomorfológicas se compartimentam através das Planícies do Litoral Setentrional Nordeste, Tabuleiros da Chapada do Apodi e Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu, as Depressões com a Depressão Sertaneja Setentrional, compartimentação do relevo com a formação geomorfológica das Serras com as Serras do Martins-Portalegre e João do Vale, em direção a SE e Corpo d'água continental (IBGE, 2021).

Segundo dados do IBGE, os domínios geomorfológicos da bacia compreendem-se em sua extensão territorial de NE a WS no planalto da Borborema, com Depósitos Sedimentares do Quaternários em sequência de Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, seguido de Corpos d'água Continental e Cinturões Móveis Neoproterozóicos (CPRM, 2004; IBGE, 2007, 2021).

Na área total da bacia, as altitudes são de 346 metros em média, com maiores altitudes em pontos de 692 m, em um relevo e declividade majoritariamente plano e suave ondulado, em

mais de 90% do território da bacia, de direção NW a NE, onde percebe-se que nos locais com maior altitude, também há um regime pluviométrico maior, se compararmos em locais mais baixos e planos, onde há uma baixa pluviosidade.

Segundo análise de autores, no alto curso da bacia do rio do Carmo, nota-se que possui um dos menores índices pluviométricos do Estado, cerca de 720 mm/ano, visto que, na sua área de abrangência, o período seco perdura em torno de oito meses em média (DINIZ e PEREIRA, 2015).

Segundo Peixoto et al. (2021), a BHRC, apresenta altitudes que variam entre 91 e 619 m, em seu curso superior. As áreas mais elevadas são formadas de cristas residuais cristalinas constituídas majoritariamente por suítes intrusivas graníticas e granitoides, e as áreas mais baixas (pediplanos) correspondem a litologias do Complexo Gnáissico Migmatítico (CPRM, 2004). O pediplano regional apresentam superfície aplainada, suavemente ondulada e levemente inclinada em direção à costa.

Dessa forma, na BHRC, o regime pluvial em determinadas altitudes, aliado a precipitações e níveis de umidade em conjunto, propiciam a formação da cobertura vegetal predominante, que é alterada pela ação antrópica.

4.1.6. *Vegetação*

A sua cobertura vegetal, caracteriza-se do Bioma de Savana Estépica ou de Caatinga sendo a vegetação natural predominante, divididas entre Formação Pioneira com influência fluviomarinha, Savana-Estépica Arborizada, Savana-Estépica Florestada, Savana-Estépica Parque. Em sequência a formação de Área Antrópica predominante, a partir das atividades humanas, subdivididas em Agricultura com Culturas Permanentes, Agropecuária, Indiscriminada, Influência urbana. E Corpo d'água continental, compostos por massas e corpos d'água, açudes e rios (IBGE, 2021).

4.1.7. *Pedologia*

Já a Pedologia, a formação do solo da bacia, se divide em 8 tipos sendo os CXVe - Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos, GZn - Gleissolos Sálcos Sódicos, LAd - Latossolos Amarelos Distróficos, LVAd - Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, PVAe - Argissolos

Vermelho-Amarelos Eutróficos, *RRe* - Neossolos Regolíticos Eutróficos, *SNo* - Planossolos Nátricos Órticos e *TCo* - Luvisolos Crômicos Órticos (IBGE, 2007, 2021).

4.1.8. *Uso e cobertura da Terra*

No Uso e Cobertura da Terra, com base no recorte e classificação do MapBiomas (2021), estarão presentes as seguintes classes: Floresta, sendo Formação Florestal, Formação de Savana e Restinga Arbórea; Formação Natural não Florestal com Restinga Herbácea e Afloramentos Rochosos; Agropecuária com Mosaicos de Agricultura e Pastagem, Mosaico de Colheitas, Pastagem (com formação herbácea), Pasto e Outras Culturas Perenes, Áreas não vegetadas, com Área Urbanizada, Praia e Duna e Outras áreas não vegetadas; bem como também a presença de Corpo D'água, com Aquicultura, Rio, Lago e Salinas.

4.2. **Materiais**

4.2.1. *Levantamento bibliográfico*

Para levantamento bibliográfico, e organização do Referencial Teórico desta pesquisa, utilizou-se plataformas internacionais e nacionais, a partir do Google Scholar⁸ principal ferramenta de busca para periódicos, o Scopus⁹, a Web of Science¹⁰, em busca de artigos e pesquisas mais atuais e relevantes na academia. Da contextualização da pesquisa, e embasamento teórico com autores clássicos.

A busca também contou com a leitura de diversas revistas e vários artigos de áreas multidisciplinares, por meio de Bibliotecas Universitárias, Bibliotecas Digitais e Repositórios Institucionais, dados e consultas aos Órgãos Públicos, como o IBGE¹¹ e ANA¹², para busca dos manuais, com dados de pesquisas, através da Scielo¹³ e do ResearchGate¹⁴.

Vale ressaltar que todos estes recursos também foram utilizados em busca de conteúdos referente ao tema, para definição da área de estudo, introdução ao conhecimento, objetivos da

⁸Google Scholar: scholar.google.com

⁹ Scopus: scopus.com

¹⁰ Web of Science: webofscience.com

¹¹ IBGE: <https://www.ibge.gov.br/>

¹² ANA: <https://www.gov.br/ana/pt-br>

¹³ SCIELO: <https://www.scielo.br/>

¹⁴ Research Gate: <https://www.researchgate.net/>

pesquisa, metodologia aplicada, resultados e discussões do trabalho, conclusão e considerações finais.

4.2.2. *Sistemas de Informação Geográfica (SIG)*

Para o processamento desses dados foi utilizado o software ArcMap (v.10.2.2, ESRI, 2014 - ArcGIS, licença teste v. trial), onde é tratado, organizado, sequenciado e selecionado todo banco de dados, em arquivos *shapefile*, para ser recortado na área de estudo que é a Bacia Hidrográfica do Rio do Camo RN-Brasil, e por fim, na elaboração de mapas.

Também o uso do software QGis (v3.4 LTR), de uso livre, que também foi auxiliador no uso de ferramentas e informações para processamento, gerenciamento dos recursos através de shapefiles (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2022), e tratamento de imagens do sensoriamento remoto, processamento de coordenadas coletadas em campo em representações via mapas.

4.2.3. *Aquisição de arquivos para construção do banco de dados geográficos*

Com a aquisição dos formatos *shapefiles* e *raster*, os dados de cada camada terão uma informação em sua tabela de atributos, com isso, utilizando o ArcMap, os dados foram exportados em planilha para serem tratados via Excel (v. 2021), na execução de quadros, gráficos e análises, com cálculos de áreas e percentuais das respectivas áreas das camadas.

Os dados contêm informações tabuladas e atribuídas para cada segmento específico, em especial os polígonos, que representam uma área medida, são georreferenciadas a partir de um sistema de coordenada geográfica, que alguns dados são disponibilizados no sistema de coordenadas WGS 84, Datum *World Geodetic System* 1984, e foram convertidos para Datum SIRGAS 2000, Zona 24 Sul, na ferramenta Project do software ArcMap¹⁵.

Sendo assim, através das análises, mediante o banco de dados geográficos, foi possível através do software ArcMap, usufruindo de suas ferramentas e recursos, a elaboração dos Mapas de Localização, Hipsometria e Hidrografia, Declividade, Pluviometria, Geologia,

¹⁵ Esse procedimento técnico é realizado porque os cálculos de geometria no ArcGIS são planimétricos - em outras palavras, eles ocorrem no espaço projetado, não no espaço esférico ou geodésico. Você só pode calcular a área, comprimento ou perímetro de recursos se o sistema de coordenadas usado for um sistema de coordenadas projetadas.

Geomorfologia, Pedologia, Cobertura da Vegetação, Uso e Cobertura da Terra, Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental.

Assim, destaca-se (Quadro 06) para este trabalho, que foram utilizados e adquiridos através de plataformas digitais da Internet, arquivos e compilados de dados, cartas, folhas, mapas, imagens, de órgãos e empresas públicas com estudos e pesquisas realizadas por pesquisadores renomados no país.

Quadro 6 - Obtenção de Bancos de Dados para Pesquisa.

Quadro de Banco de Dados Geográficos							
Aspecto	Folha	Dados	Fonte	Ano	Escala	Resolução	Tipo/Formato
Área de estudo	SB. 24 JAGUARIBE	Bacia hidrográfica	IBGE	2021	1:250.000	-	Shapefile
Morfológicos	SB. 24 JAGUARIBE	Geomorfologia	IBGE	2021	1:250.000	-	Shapefile
	SB. 24 JAGUARIBE	Geologia	IBGE	2021	1:250.000	-	Shapefile
	SB. 24 JAGUARIBE	Pedologia	IBGE	2021	1:250.000	-	Shapefile
	SB. 24 JAGUARIBE	Pedologia	IBGE	2021	1:250.000	-	Shapefile
Morfoclimáticos	SB. 24 JAGUARIBE	Pluviometria anual	Inventário PME (ANA)	1977-2006	1:5.000.000		Raster e shapefile
	SB. 24 JAGUARIBE	Temperatura	INMET	1981-2019	-	-	.csv
	SB. 24 JAGUARIBE	Estações pluviométricas	ANA	1931-2019	-	-	Shapefile
Morfométricos	SB. 24 JAGUARIBE	Hipsometria	Topodata	2011	1:250.000	30 metros	Raster
	SB. 24 JAGUARIBE	Declividade	Topodata	2011	1:250.000	30 metros	Raster
	SB. 24 JAGUARIBE	Drenagens e cursos de rios e balanço hídrico	ANA	2013/2021	1:250.000	-	Shapefile
Vegetação	SB. 24 JAGUARIBE	Cobertura da vegetação	IBGE	2021	1:250.000	-	Shapefile
Dinâmica Territorial	SB. 24 JAGUARIBE	Uso e cobertura da terra	MapBiomias	2021	1:100.000	30 metros	Raster e .csv

Fonte: Organizado por Autor, 2023.

Os estudos do Relevo, Pedologia, Uso da Terra, Vegetação, Geomorfologia e Geologia, divisão e delimitação territorial política, regional e de recursos naturais, seja de municípios, ou

das Bacias Hidrográficas com escala de 1:250.000, dispostos em acervos do IBGE¹⁶ (Instituto de Geografia Brasileira e Estatística) SGB/CPRM¹⁷, (Serviço Geológico do Brasil).

Drenagens, rios e massa d'água, balanço hídrico e dados estatísticos mais atuais de Estações Pluviométricas e Fluviométricas, e aspectos climáticos da Caatinga com índices de Pluviosidade e Isoietas foram medidos pela ANA¹⁸ (Agência Nacional de Águas).

A Hipsometria e Declividade através dos Modelos Digitais de Elevação MDE do INPE¹⁹ (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), nas folhas 05S39_ZN, 06S39_ZN, 06S375ZN e 05S375ZN²⁰.

Já os dados de Uso e Cobertura da Terra, foram baixados através da plataforma do Map Biomas²¹ (Ano de 2021), utilizando a ferramenta do Google Earth Engine²², e depois classificados conforme o número destacado através de arquivo .csv, que indica as classes de cada camada, e assim, transformados em polígonos na ferramenta do ArcMap: *Raster to Polygon*, e depois contabilizados em área.

A metodologia utilizada pelo MapBiomas é realizada segundo seus documentos técnicos e métodos empregados, com uma metodologia moderna através de dados e classificação da imagem do satélite Landsat com métodos e algoritmos para cada coleção, que foram evoluindo ao longo dos anos, sendo um projeto de resultado da colaboração interdisciplinar de especialistas em sensoriamento remoto, com o principal objetivo de criar uma extensa série histórica que rastreia a mudança na cobertura e uso da terra em todo o território brasileiro.

Este projeto fez uso de inteligência artificial para conduzir análises detalhadas, pixel a pixel, de imagens provenientes dos satélites da coleção Landsat, operados pela Agência Espacial Norte-Americana (NASA), possuem uma resolução espacial de 30 metros (Figura 12).

Todo o processo de mapeamento é conduzido utilizando o software Google Earth Engine (GEE). O GEE é especialmente adequado para essa tarefa, pois opera na nuvem, proporcionando robustez e capacidade de processamento expandida. Para a seleção de cenas Landsat para construção dos mosaicos por folha de mapa para o ano, dentro do período aceitável, foi aplicado um limite de 90% de cobertura de nuvens (MAPBIOMAS, 2023).

¹⁶ IBGE - <https://www.ibge.gov.br/geociencias/todos-os-produtos-geociencias.html>

¹⁷ CPRM - <https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>

¹⁸ ANA - <https://dadosabertos.ana.gov.br/>

¹⁹ INPE/TOPODATA - <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>

²⁰ CPRM – INVENTÁRIO PME - <https://www.sgb.gov.br/publique/?tpl=home>

²¹ MAP BIOMAS: <https://mapbiomas.org/>

²² GOOGLE ENGINE: <https://earthengine.google.com/>

Figura 12 - Processamento de Imagens para Uso e Cobertura da Terra.



Fonte: MAPBIOMAS.ORG, ano, 2023.

4.2.4. Aquisição de Imagens orbitais e dados de campo

A partir de cada local visitado em análise da área de estudo, foram fotografadas as áreas através do uso de um smartphone Redminote 9S da Xiaomi, que funciona com um GPS integrado, (Global Positioning System) desenvolvido e controlado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (U.S. DoD), permite que qualquer usuário saiba a sua localização, velocidade e tempo, 24 horas por dia e em qualquer ponto do globo terrestre (ROSA, 2005), sendo importante para localização na área de estudo.

Para facilitar o percurso e amostragem realizada através de um veículo (carro), o mapa foi exportado em arquivo .pdf, e utilizando o aplicativo AvenzaMaps²³, em cada local percorrido, há um ponto no mapa que o acompanha o usuário simultaneamente.

Conforme a amostragem das áreas na figura abaixo, obteve-se imagens a partir do Google Imagery ou Google Earth²⁴, que constitui diversos mosaicos de imagens de satélites como o Landsat/Copernicus²⁵, com a integração dos dados de diversas fontes, e das imagens em campo, foi possível elaborar a classificação e confirmar conforme o que estava presente.

Como destacados na Figura 13, foram propostos alguns de amostragem de forma aleatória, mas para evidenciar características e condições naturais da bacia, para reconhecimento de área conforme o roteiro utilizado nas viagens e elaboração para o relatório de campo, conforme análise em colaboração dos registros fotográficos, com os principais elementos cartográficos evidenciados.

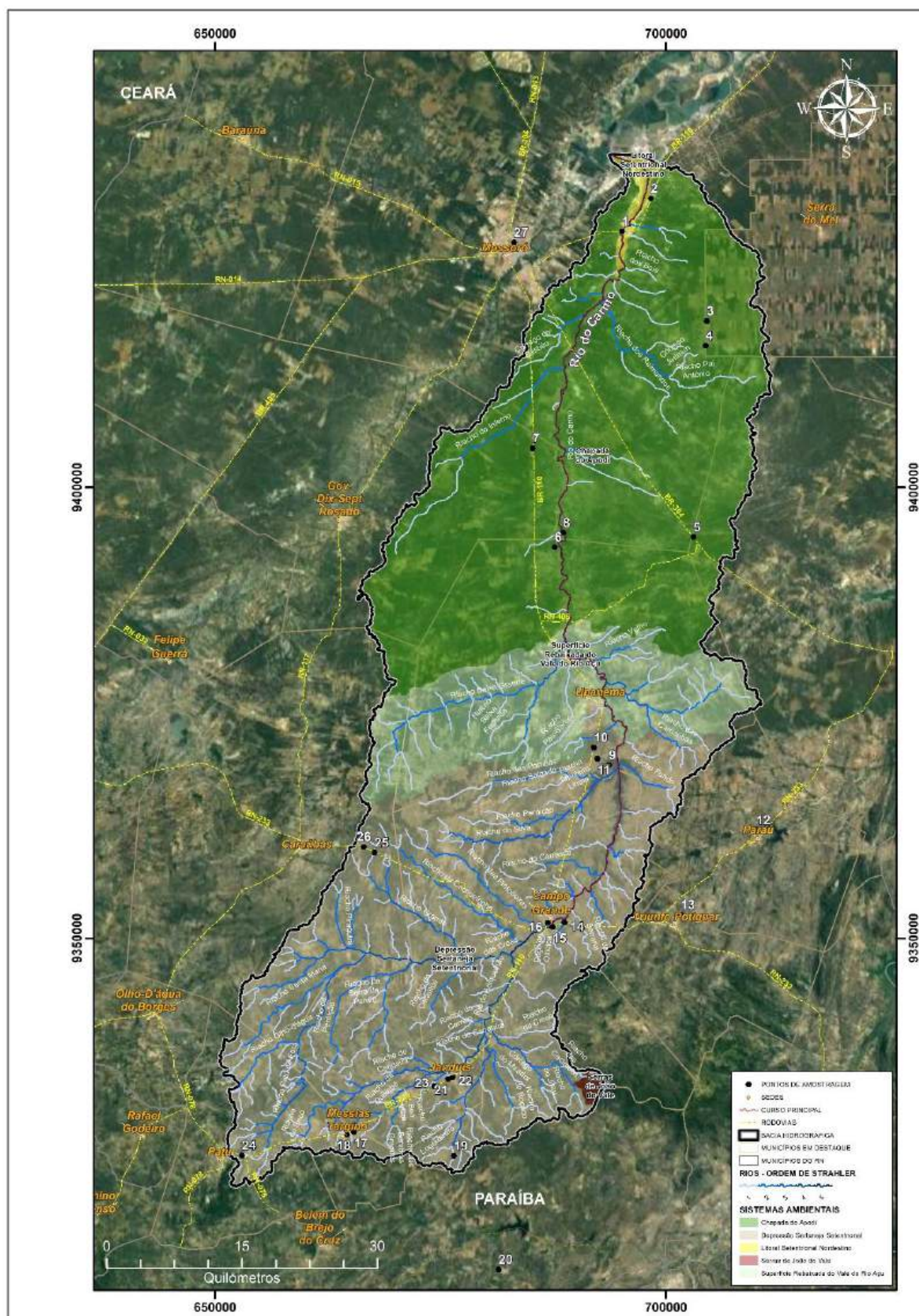
Já a delimitação destacada, se configura como os domínios geomorfológicos, que se utilizou como unidade de recorte e análise dos Sistemas Ambientais desta pesquisa.

²³ AvenzaMaps: <https://store.avenza.com/> disponível também em lojas de aplicativos.

²⁴ Google Earth: <https://www.google.com.br/earth/>

²⁵ Landsat/Copernicus: <https://land.copernicus.eu/en>

Figura 13 - Mapa de Campo - Pontos de Amostragem - Levantamento e Classificação.



Fonte: IBGE, 2021; Google Imagery 2021; elaborado por autor, 2023.

Seguindo através de informações gráficas com observações de campo, mapas, imagens e registros fotográficos, por meio de pontos de amostragem para fotografias e reconhecimento de área (Quadro 07). Foi realizada a classificação, interpretação e análises, gerando mapas e gráficos para melhor aproveitamento dos dados.

Assim, a partir da área de estudo, as informações textuais, com a literatura bibliográfica e levantamentos de campo, com informações estatísticas para as respectivas atividades antrópicas, impactos e padrões atribuídos nas áreas, possibilitou um melhor aproveitamento para análises e interpretações, favorecendo resultados cartográficos e analíticos.

Quadro 7 - Áreas propostas para confirmação de informações e reconhecimento da área.

Pontos	Áreas e pontos de visita em campo		Coordenadas (UTM)	
Nº	Município	Pontos de verificação em campo e de reconhecimento de área	Este	Norte
1	Mossoró/RN	Atividade petrolífera no curso do rio	695127,04	9428395,38
2		Atividade salina e manguezais	698331,91	9432063,37
3	Serra do Mel/RN	Uso agrícola	704533,18	9418458,77
4		Vegetação nativa	704398,34	9415715,75
5	Açu/RN	Vegetação nativa	703048,02	9394497,27
6	Governador Dix-Sept Rosado/RN	Relevo cárstico	687646,97	9393383,98
7		Solo exposto	685218,72	9404354,02
8		Vegetação nativa - mata ciliar	688614,58	9394980,16
9	Upanema/RN	Massa d'água – barragem de Umari	693686,80	9369197,96
10		Vegetação nativa	692015,05	9371159,70
11		Solo exposto	692408,62	9369884,23
12	Paraú/RN	Sede (urbano)	710043,77	9361988,62
13	Triunfo Potiguar/RN	Sede (urbano)	701659,08	9352598,70
14	Campo Grande/RN	Açude	688739,55	9351739,48
15		Vegetação nativa - mata ciliar	687430,39	9351231,12
16		Edificações	686904,33	9351703,22
17	Messias Targino/RN	Solo exposto	665400,25	9328503,23
18		Edificações	664645,53	9328227,27
19		Corpo d'água	676487,35	9325859,34
20	Belém do Brejo do Cruz/PB	Vegetação nativa	681444,41	9313240,49
21	Janduís/RN	Corpo d'água	675839,35	9334398,29
22		Edificações	676363,39	9334623,13
23		Vegetação nativa	674320,92	9333575,21
24	Patu/RN	Vale, serras e morros	652987,35	9325917,03
25	Caraúbas/RN	Vegetação nativa	667716,21	9359486,59
26		Solo exposto	666501,88	9360144,74
27	Retorno A Mossoró/RN	Sede (urbano)	683166,53	9427176,30

Fonte: Autor, 2023.

4.3. Métodos e Análises

4.3.1. Análise e Levantamento da Caracterização dos Parâmetros Biofísicos da BHRC

De forma geral, a análise da pesquisa foi baseada na conceituação do referencial teórico, e objetivos gerais. Seguindo a proposta mediante a caracterização da área de estudo, e dos materiais com o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), usufruiu das informações e dados do banco de dados geográficos, a partir dos recortes territoriais da bacia.

Assim, foram realizadas análises e discussões gerais através dos parâmetros biofísicos das Unidades da Paisagem, e Sistemas Ambientais, utilizando os mapas, gráficos, tabelas e quadros, com resultados sintéticos e analíticos, especificando a relação de cada parâmetro utilizado por meio de elementos e fatores de formação.

4.3.2. Análise do Uso e Cobertura da Terra

A partir dos dados da coleção 7.1 Landsat do MapBiomas (2021), trabalhados em um arquivo *raster*, a metodologia utilizou-se dos recursos do ArcMap, em que se converteu valores dos componentes de cada cobertura de área ocupada no uso terra (Quadro 8).

Quadro 8 - Classes de Uso e Ocupação da Terra da BHRC.

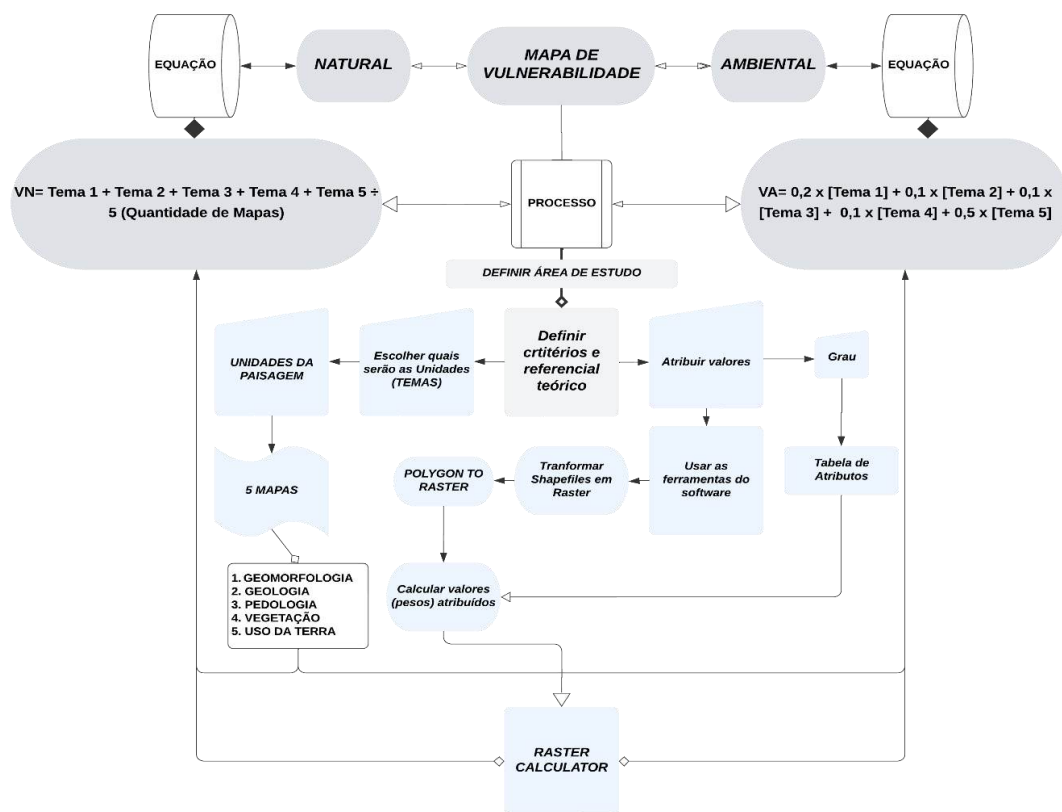
Nível I – Classe	Nível II - Subclasse
1- Áreas de Floresta ou Vegetação Nativa	Restinga Arbórea
	Formação Florestal
	Formação de Savana
2. Áreas de Formação Natural não Florestal	Restinga Herbácea
	Afloramento Rochoso
3. Agropecuária ou Áreas antrópicas agrícolas	Mosaico de Agricultura e Pastagem
	Mosaico de Colheitas
	Pastagem (Formação Herbácea)
	Pasto
	Outras Culturas Perenes
4. Área não vegetada	Área Urbanizada
	Praia e Duna
	Outra Área Não Vegetada
5. Corpo D'água	Aquicultura
	Rios e Lagos
	Salina

Fonte: MapBiomas (2021); organizado por autor, 2023.

4.3.3. Análise da pesquisa e Álgebra de Mapas

Para análise dos processos de áreas vulneráveis e vulnerabilidades de cada sistema ambiental da BHRC, foi proposta a elaboração de um fluxograma de ações (Figura 14), em que cada segmento do processo utilizado para esta pesquisa, poderá ser realizado em outros estudos seguindo a mesma lógica e fundamento, definindo uma área de estudo e critérios para referencial teórico, para chegar ao objetivo proposto.

Figura 14 - Fluxograma de ações para Vulnerabilidade Natural e Ambiental.



Fonte: Autor, 2023.

Após toda a definição dos componentes, o objetivo principal é chegar no processo e utilizar a ferramenta do *raster calculator*, onde volta-se a cadeia de processos até chegar nas equações que resultam no objetivo inicial que é o mapa de vulnerabilidade, tanto natural quanto ambiental.

Considerou-se para tal, a discussão da dinâmica que rege a organização da paisagem, e os parâmetros biofísicos, bem como a dinâmica de uso do solo como prerrogativas para análise dos sistemas ambientais, propondo assim um modelo de análise que seria a Álgebra de Mapas, adaptando os métodos de Grigio (2003, 2004 et. al, e 2009), e de Crepani *et. al.* (2001).

Foram atribuídos valores com base na estabilidade quanto à morfogênese e à pedogênese (Tricart, 1977), variando em uma escala de 1,0 a 3,0, com intervalo de 0,5, com adaptação de Crepani et. al, na qual, no valor 1,0 prevalece a pedogênese, no 2,0 o equilíbrio entre pedogênese e morfogênese e no 3,0 prevalece à morfogênese. Por fim, a média de intervalos entre as classes se dá pelo fato de que ao processar a equação, os números passarão de inteiros a decimais, com casas após a vírgula, interpretados como *float* (Quadro 9).

Quadro 9 - Graus de Vulnerabilidade – Relação da Morfogênese x Pedogênese.

Unidade	Relação Pedogênese/Morfogênese	Atribuição de Valores
Estável	Prevalece a Pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio Pedogênese/Morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a Morfogênese	3,0
Unidade	Nível - Grau de Vulnerabilidade	Intervalo entre as Classes
1	Muito Baixo - Estável	1,0
2	Baixo - Moderadamente Estável	1,5
3	Médio - Medianamente Estável/Vulnerável	2,0
4	Alto - Moderadamente Vulnerável	2,5
5	Muito Alto - Vulnerável	3,0
Unidade	Classificação para Valores	Média de Intervalo
1	Classificação Muito Baixa	1,0 – 1,3
2	Classificação Baixa	1,4 – 1,7
3	Classificação Média	1,8 – 2,2
4	Classificação Alta	2,3 – 2,5
5	Classificação Muito Alta	2,6 – 3,0

Fonte: Organizado por autor, 2023. Adaptado de Tricart (1977), Crepani *et al.* (2001).

A metodologia utilizada foi de acordo com o uso de parâmetros específicos para álgebra de mapas, com base nesses autores, a partir dos 5 temas (Geomorfologia, Geologia, Pedologia, Vegetação e Uso e Cobertura da Terra), resultando nos produtos finais, que seriam os Mapas de Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental.

A modelagem para o mapa de Vulnerabilidade Natural obedeceu aos critérios utilizados pelos autores supracitados, onde utiliza-se uma média aritmética para combinação dos resultados dos mapas, sendo:

VN= Vulnerabilidade Natural:

$$\text{VN} = \text{Tema 1} + \text{Tema 2} + \text{Tema 3} + \text{Tema 4} + \text{Tema 5} \div 5 \text{ (Quantidade de Mapas)}$$

Após isto, foi feita a classificação para Vulnerabilidade Ambiental das unidades baseando-se no método utilizado por Grigio (2004), onde temos a função:

VA= Vulnerabilidade Ambiental:

$$VA = 0,2 \times [\text{Tema 1}] + 0,1 \times [\text{Tema 2}] + 0,1 \times [\text{Tema 3}] + 0,1 \times [\text{Tema 4}] + 0,5 \times [\text{Tema 5}]$$

- Tema 1: R - Mapa das Unidades Geomorfológicas;
- Tema 2: G - Mapa de Geologia simplificado;
- Tema 3: P - Mapa de Pedologia (Solos);
- Tema 4: Vg - Mapa de Cobertura da Vegetação;
- Tema 5: U - Mapa de Cobertura e Uso da Terra.

Após a classificação, temos que atribuir a informação, em cada arquivo *shapefile* dos mapas, portanto, foi atribuído um valor ou peso na **tabela de atributos** para cada unidade da Paisagem, considerando alguns critérios para que se possa fazer o cálculo evidenciando os potenciais graus de vulnerabilidades de cada segmento. Posteriormente, utilizou-se nas ferramentas do ArcGIS, >*Polygon to Raster* transformando o que era um arquivo *shapefile* em *Raster*, e assim usa-se a ferramenta >*Raster Calculator*.

E o valor a ser considerado, passará a ser constituindo a partir do cruzamento de dados e atribuição de pesos, conforme grau vulnerável em que cada unidade se encontra. Onde quanto maior o grau de vulnerabilidade, maior o peso, dentro de um intervalo de 1,0 a 3,0.

A seguir, a definição dos pesos das classes a partir dos mapas (temas) no Quadro 10:

Quadro 10 - Grau de Vulnerabilidade das Classes.

Vulnerabilidade das classes para os mapas		
Geologia e Grau de Vulnerabilidade		
Sigla; Unidade Geológica; Litotipo das Rochas	Legenda	Grau
Depósitos aluvionares, Areia	Q2a	3,0
Barreiras, Arenito conglomerático, Argilito arenoso	ENb	2,5
Jandaíra, Calcarenito, Calcilutito, Folhelho	K2j	3,0
Açu, Arenito, Siltito	K12a	3,0
Caicó - ortognaisse, Migmatito, Metagranito, Ortognaisse granodiorítico, Augengnaisse	PP2cai2	1,0
Depósitos colúvio-eluviais, Areia, Argila, Cascalho	NQc	3,0
Plúton Tourão-Caraúbas, Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito	NP3_gamma_2it7	1,0
Jucurutu, Biotita gnaiss, Biotita xisto, Xisto, Gnaiss, Mármore, Muscovita quartzito	NP3sju	1,0
Plúton Serra do João do Vale, Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito	NP3_gamma_2it12	1,0
Plúton Sem Denominação, Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito	NP3_gamma_2it45	1,0
Poço da Cruz, Metagranito	PP3_gamma_pc	1,0
Granitoides de quimismo indiscriminado, Granito	NP3_gamma_3i	1,0
Serra dos Martins e João do Vale, Arenito, Arenito conglomerático, Arenito siltico-argiloso	ENsm	2,5

Geomorfologia e Grau de Vulnerabilidade		
Domínio Geomorfológico – Compartimento	Relevo e Declividade	Grau
Chapada do Apodi – Tabuleiros	Plano 0 a 3%	1,0
Corpo d'água Continental	Plano 0 a 3%	1,0
Depressão Sertaneja Setentrional – Depressões	Suave Ondulado 3 a 8%	1,5
Litoral Setentrional Nordeste – Planícies	Plano 0 a 3%	1,0
Serra de João do Vale – Serras	Forte Ondulado 20 a 45%	2,5
Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu – Tabuleiros	Suave Ondulado 3 a 8%	1,5
Uso e Cobertura da Terra da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo - Área Total 3596,85 (Km²)		
Camadas	Área (Km²)	Grau
Afloramento rochoso	6,8827	1,0
Aquicultura	3,6465	2,5
Formação de Savana	2359,2790	1,5
Formação Florestal	1,3341	1,5
Formação Herbácea	16,5895	3,0
Área Urbanizada	7,1161	3,0
Mosaico de Agricultura e Pastagem	834,6845	3,0
Mosaico de Colheitas	157,0668	2,5
Outra Área Não Vegetada	19,3534	3,0
Outras Culturas Perenes	22,1732	2,5
Pasto	115,2837	3,0
Praia e Duna	4,3413	2,5
Rio e Lago	48,9643	1,0
Salina	0,0961	2,5
Restinga Arbórea	0,0194	2,5
Restinga Herbácea	0,0146	2,5
Cobertura Vegetal e Classificação da Vegetação		
Classes e domínios	Legenda	Grau
Área Antrópica dominante (Agropecuária, Agricultura, Indiscriminada e de Influência Urbana)	3Ag, 3Acp, 3Ai, 3lu	3,0
Formação Pioneira com influência fluviomarinha	1Pf	2,5
Savana-Estépica Arborizada	1Ta	2,0
Savana-Estépica Florestada	1Td	1,5
Savana-Estépica Parque	1Tp	2,5
Corpo d'água Continental ou Massa d'água	5	1,0
Pedologia (Solos)		
Classe e Tipo de Solo	Legenda	Grau
Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos	CXve	2,5
Gleissolos Sálcos Sódicos	GZn	3,0
Latossolos Amarelos Distróficos	LAd	1,0
Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos	LVAd	1,0
Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos	LVAd	1,0
Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos	PVAe	2,0
Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos	PVAe	2,0
Neossolos Regolíticos Eutróficos	RRe	3,0

Planossolos Nátricos Órticos	SNo	2,0
Luvissolos Crômicos Órticos	TCo	2,0

Fonte: Autor, 2023; adaptado de Crepani *et al.* (2001) e Grigio, (2003 e 2004 *et al.*).

A seguir, a descrição dos métodos de classificação de cada área:

Geomorfologia:

Como a área da Bacia é de grande extensão, o método de classificação da Geomorfologia baseou-se nos conceitos do Ross (1994) e CREPANI *et al.* (2001), com adaptação de metodologia também empregada por Grigio (2009), em uma classificação dada através do banco de dados do IBGE, onde utilizando o SRTM de altitude com 30 metros do INPE, mesclou-se 4 imagens de satélite em formato raster, utilizando a ferramenta do ArcMap > *Mosaic To New Raster*. E assim, reprojetoado para Datum Sirgas 2000.

Após isso, calculou-se a Declividade através da ferramenta > *Slope*, na opção *Percent Rise*, para calcular a porcentagem de área predominante no relevo. Para ler os arquivos *raster* como área, utilizou-se o método de reclassificação com a ferramenta > *Reclassify*, em 6 classes, assim como as destacadas (Quadro 11).

Quadro 11 - Declividade Média da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo.

Declividade da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo - Área 3596,53 Km²			
Declividade	Área (Km²)	Valores do Percentual	Grau
Plano 0 a 3%	1421,04	39,51%	1,0
Suave Ondulado 3 a 8%	1861,61	51,76%	1,5
Ondulado 8 a 20%	268,55	7,47%	2,0
Forte Ondulado 20 a 45%	25,45	0,71%	2,5
Montanhoso 45 a 75%	16,59	0,46%	3,0
Escarpado >75%	3,61	0,10%	3,0
Total	3596,85	100%	-

Fonte: Elaborado por autor, 2023. Adaptado de Ross (1994) e Crepani *et al.* (2001).

Após este procedimento, une-se os polígonos com a ferramenta > *Dissolve*, através da classe escolhida, tendo assim a obtenção dos valores especializados, calcula-se a área e exporta ao Excel através da tabela de atributos.

E assim, para obtermos o maior nível de declividade de cada unidade Geomorfológica, utiliza-se o recorte de área para cada unidade, através da ferramenta > *Clip*, obtendo a camada média mais destacada em maior número de área percentual, que prevalece o nível de classificação da declividade do relevo mediante a análise dos dados na tabela de atributos, tendo assim o parâmetro com base no grau de vulnerabilidade.

De forma geral, conforme o quadro 11, a declividade mostra que o Relevo da BHRC é majoritariamente Suave Ondulado, seguido de Plano e Ondulado, mas diferente em cada unidade geomorfológica, do qual foi utilizado como parâmetro para se evidenciar as especificidades mostradas anteriormente.

Geologia:

A classificação das unidades Geológicas, baseou-se através dos estudos de Crepani *et al.* (2001) e Ross (1994) com adaptações de Grigio (2009). Através das classes do Litotipo, conforme a litologia das rochas, definida com base em suas características físicas, bem como o grau de denudação destas, assim classificou-se adaptando a ideia e conceito proposto pelos autores, intrínsecas ao conceito da vulnerabilidade do sistema geológico, conforme o intemperismo e erosão, quanto maior o grau de erosão e intemperismo sofrido pela formação geológica, maior o grau de vulnerabilidade.

Pedologia:

As camadas pedológicas obedeceram a classificação de seu tipo de solo, com base nos estudos realizados por Crepani *et al.* (2001), as suas características físicas e susceptibilidade ao grau de erosão e intemperismo, cujo processos são efeitos físicos e químicos e de agentes biológicos que atuam em diferentes condições climáticas e hidrológicas, corroboram para um maior ou menor grau de vulnerabilidade.

Cobertura da Vegetação:

Classificou-se a Vegetação com base nos estudos e classificação do Crepani *et al.* (2001), já que a cobertura vegetal funciona como uma camada protetora do solo, quanto maior for o porte da cobertura vegetal, mais estável será o tipo de vegetação, e quanto menor, maior susceptibilidade ao solo de sofrer processos de erosão e intemperismo, nos favorecendo assim o grau de vulnerabilidade desta unidade.

Uso e Cobertura da Terra:

Utilizou-se a mesma ideia e noção proposta por Crepani *et al.* (2001), adaptada de Grigio *et al.* (2005, 2006 e 2009) com base no aspecto da vegetação, porém, adicionando o fator antrópico que geraria mais impacto ao meio. Afinal, a importância de áreas menos afetadas pela ação antrópica compõe mais estabilização no solo e na superfície, pois, a ausência da vegetação expõe o solo a erosão, tornando-o mais suscetível a processos como deslizamentos de terra, solapamento e assoreamento dos rios, do contrário, a presença da vegetação atua como um agente estabilizador do solo, prevenindo esses processos, afetando diretamente a

vulnerabilidade destas camadas. Dessa forma, nota-se que as atividades antrópicas são fator condicionante aos impactos no solo, atribuindo um peso maior, a depender da atividade.

Por último, utilizou-se um método para se encontrar a média variação entre ambas fórmulas, medindo a diferença entre elas, através do cálculo de uma média entre valores [(**Valor maior** + **Valor menor** / 2)]. Assim, consegue-se notar a diferença média entre cada método utilizado, podendo-se apresentar e discutir o porquê dessa variação entre os estudos.

4.3.4. Análise da pesquisa para Classificação dos Sistemas Ambientais

Após a análise realizada das Vulnerabilidades Naturais e Ambientais, foi proposta a análise geral de cada sistema, para evidenciar e melhorar a compreensão.

O recorte para os Sistemas Ambientais foi o das Unidades Geomorfológicas, que se pode dividir em compartimentos e unidades geomorfológicas, com os códigos de (1) PLSN - Planícies do Litoral Setentrional Nordeste, (2) TCA - Tabuleiros da Chapada do Apodi, (3) TSR - Tabuleiros da Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu, (4) DSS - Depressão Sertaneja Setentrional, (5) SJV - Serras de João do Vale (Quadro 12).

Nota-se que Depressões e os Tabuleiros representam a maior porção, com mais da metade do perímetro total do território, seguido por uma pequena representação entre serras e planícies.

Quadro 12 - Classificação simplificada dos Sistemas Ambientais da BHRC.

Código	Compartimento	Unidades Geomorfológicas	Área (Km²)	Percentual de Áreas
(1) PLSN	Planícies	Litoral Setentrional Nordeste	23,68	0,66%
(2) TCA	Tabuleiros	Chapada do Apodi	1.528,84	42,51%
(3) TSR		Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu	464,18	12,91%
(4) DSS	Depressões	Depressão Sertaneja Setentrional	1572,23	43,71%
(5) SJV	Serras	Serras de João do Vale	7,92	0,22%
		Total	3.596,85	100%

Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

Por fim, como análise geral, a partir de um quadro de análise de cada área (Sistema Ambiental), empregada através dos resultados com base na classificação do banco de dados geográficos, para obter os objetivos da pesquisa, foi realizada a junção de dado, com base na

declividade, nos domínios geomorfológicos, nas unidades geológicas, na pedologia, na cobertura da vegetação, cobertura e uso da terra, calculando qual o percentual de área referente a cada camada vulnerável a partir da vulnerabilidade natural e ambiental.

Para avaliação dos impactos e condições naturais para aprimoramento das discussões dos resultados, utilizou-se análises a partir do sensoriamento remoto utilizando recortes de imagens de satélite do Google Earth.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise da Caracterização dos Parâmetros Biofísicos da BHRC

Neste capítulo, se discute os principais fatores e elementos de formação, em análise da caracterização da BHRC, evidenciando os parâmetros biofísicos.

Fatores importantes como a Geologia, dão origem aos processos geomorfológicos, que atuam diretamente as condicionantes aos fatores morfoclimáticos, com o clima e o relevo, para formação da hidrografia da região.

Esses elementos definem o bioma de cada região, portanto, as condições naturais para vegetação, pois mesmo a bacia ser caracterizada de forma geral como clima semiárido, a altitude se torna um elemento importante na alteração das características físicas do local, formando até mesmo um microclima em diferentes regiões, especialmente serranas.

Dessa forma, é importante tratar em cada aspecto de formação natural, a ilustre caracterização do objeto das principais atividades humanas da qual são atribuídas nas áreas de sua formação natural.

A discussão da caracterização dos parâmetros biofísicos, baseia-se no referencial teórico, conforme a análise da paisagem e a integração dos métodos utilizados. Entende-se como ideia principal por trás das análises, a união dos conceitos do Geossistema, Território e Paisagem (GTP) proposto por Bertrand (1972), a Ecodinâmica de Tricart (1977) e a visão sistemática do Geossistema abordada por Christofolletti (1990), entendendo a análise da paisagem de forma dinâmica.

Afinal, complementando, a noção dos conceitos, a partir de Tricart (1977), entende-se que o fluxo de matéria e trocas de energia demonstram que na natureza, os processos ocorrem por meio de um equilíbrio dinâmico, e uma relação lógica e sistemática.

5.1.1. Análise da Geologia

A geologia do Estado do Rio Grande do Norte compreende-se através de três grandes grupos de rochas, o mais antigo na era pré-cambriana, seguido pelo Cretáceo, representados especialmente na Bacia Potiguar e vulcânicas associadas ao terciário, pelas coberturas sedimentares cenozoicas (CPRM, 2010).

Para o sistema geológico, pode-se compreender como a base sobre a qual se desenvolvem todos os sistemas e atuam todos os processos, já que é o tipo de rocha, através da disposição e variação litológica, origem e formação geológica, que determinará o tipo de solo existente, e sua resistência ou não ao intemperismo (SOUZA e MULLER, 2010).

Em classificação Geológica de forma geral, pode-se observar na Figura 15, a análise do tempo geológico de cada estrutura, definidas por Escala de tempo geológico (em ordem decrescente, do mais recente para o mais antigo).

Figura 15 - Escala de tempo Geológico.

ÉON	ERA	PERÍODO	Idade (Ma)
FANEROZÓICO	Cenozóico	Quaternário	2,58
		Neogêneo	23
		Paleogêneo	65,5
	Mesozóico	Cretáceo	145,5
		Jurássico	199,6
		Triássico	251
	Paleozóico	Permiano	299
		Carbonífero	359,2
		Devoniano	416
		Siluriano	443,7
		Ordoviciano	488,3
		Cambriano	542
PROTEROZÓICO	Neoproterozóico	Ediacarano	635
		Criogeniano	850
	Mesoproterozóico	Toniano	1000
		Steniano	1200
		Ectasiano	1400
	Paleoproterozóico	Calimiano	1600
		Estateriano	1800
		Orosiriano	2050
		Riaciano	2300
		Sideriano	2500
ARQUEANO		4000	
HADEANO		4600	

Fonte: Escala do tempo geológico. Compilada da Comissão Internacional de Estratigrafia (ICS, 2009), retirada de Dias Cavalcanti, Jose & Cavalcante, José. (2014). Evolução Geológica In: GEODIVERSIDADE DO ESTADO DO CEARÁ.

Por meio da classificação do tempo geológico, a partir do Quadro 13, com as unidades geológicas, identificadas, consegue-se dimensionar e classificar em cada processo conforme a diversificação de todas as formações existentes na BHRC, dividindo-se conforme a junção das escalas cronológicas estudadas.

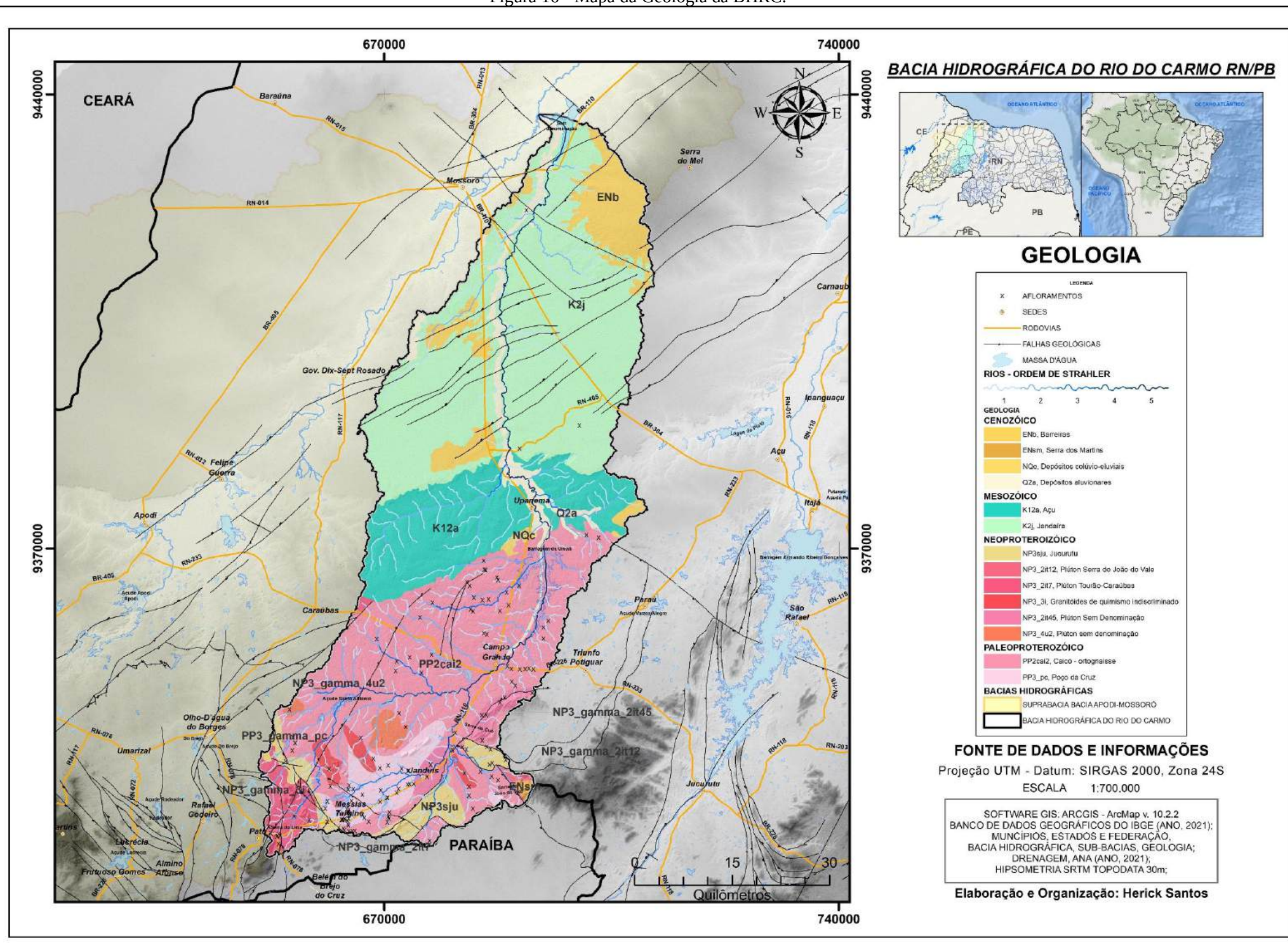
Em seguida, a partir do recorte territorial, a análise e discussão foi realizada de forma conjunta e sistemática por meio da junção das informações apresentadas, a partir da Figura 16 com o Mapa da Geologia da BHRC.

Quadro 13 - Classificação Geral por Eras Geológicas e Unidades Geológicas da BHRC.

ÉON	ERA	SIGLA	HIERARQUIA	UNIDADE GEOLÓGICA	LITOTIPO DAS ROCHAS	CLASSE DAS ROCHAS	SUBCLASSE DAS ROCHAS	AREA (KM²)	PERCENTUAL (%)
F a n e r o z ó i c o	Cenozóico	ENsm	Formação	Serra dos Martins	Arenito, Arenito conglomerático, Arenito siltico-argiloso	Sedimentar	Clástica	5,52	0,15%
	Cenozóico	ENb	Grupo	Barreiras	Arenito conglomerático, Argilito arenoso	Sedimentar	Clástica	250,19	6,96%
	Cenozóico	Q2a	Não definida	Depósitos aluvionares	Areia	Material superficial	Sedimento inconsolidado	135,22	3,76%
	Cenozóico	NQc	Não definida	Depósitos colúvio-eluviais	Areia, Argila, Cascalho	Material superficial	Sedimento inconsolidado	12,83	0,36%
	Mesozóico	K12a	Formação	Açu	Arenito, Siltito	Sedimentar	Clástica	460,31	12,80%
	Mesozóico	K2j	Formação	Jandaíra	Calcarenito, Calcilito, Folhelho	Sedimentar	Clasto-química, Clástica	1234,47	34,32%
P r o t e r o z ó i c o	Neoproterozóico	NP3sju	Formação	Jucurutu	Biotita gnaiss, Biotita xisto, Xisto, Gnaiss, Mármore, Muscovita quartzito	Metamórfica	Metamorfismo regional	106,83	2,97%
	Neoproterozóico	NP3_gamma_2it12	Corpo	Plúton Serra do João do Vale	Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito	Ígnea	Plutônica	8,30	0,23%
	Neoproterozóico	NP3_gamma_2it7	Corpo	Plúton Tourão-Caraúbas	Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito	Ígnea	Plutônica	88,61	2,46%
	Neoproterozóico	NP3_gamma_3i	Corpo	Granitóides de quimismo indiscriminado	Granito	Ígnea	Plutônica	39,71	1,10%
	Neoproterozóico	NP3_gamma_2it45	Corpo	Plúton Sem Denominação	Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito	Ígnea	Plutônica	56,17	1,56%
	Neoproterozóico	NP3_gamma_4u2	Corpo	Plúton Sem Denominação	Biotita granito	Ígnea	Plutônica	32,90	0,91%
	Paleoproterozóico	PP2cai2	Unidade	Caicó - ortognaisse	Migmatito, Metagranito, Ortognaisse granodiorítico, Augengnaiss	Metamórfica	Metamorfismo regional	1032,74	28,71%
	Paleoproterozóico	PP3_gamma_pc	Suíte	Poço da Cruz	Metagranito	Metamórfica	Metamorfismo regional	129,36	3,60%
Sem Classificação								3,68	0,10%
TOTAL								3596,85	100,00%

Fonte: CPRM, 2021; IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

Figura 16 - Mapa da Geologia da BHRC.



Fonte: CPRM, 2021; IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

No mapa, consegue-se notar onde estão geolocalizadas cada unidade, segundo as cores e identificação, assim como na tabela. A partir da discussão de cada unidade, é interessante considerar ambos os aspectos, com a Geologia e a cronologia das atividades e formações geológicas.

O estado do Rio Grande do Norte está geotectonicamente situado na Província Borborema. Sua composição geológica é predominantemente formada por rochas pré-cambrianas, que ocupam cerca de 65% de sua área total, enquanto as rochas sedimentares mesocenoicas cobrem a porção restante (CPRM, 2010).

A partir mapa das unidades geológicas (Figura 16), a disposição das falhas geológicas e distribuição de afloramentos rochosos, pode-se perceber que estão mais presentes no setor SE (sudeste), especialmente nos trechos próximos ao Embasamento Cristalino, com a formação das rochas em ígneas e metamórficas, sucessivamente, a partir do Neoproterozóico e Paleoproterozóico.

Mais ao norte, percebe-se a divisão das unidades a partir do Mesozóico e Cenozóico, com rochas de formação sedimentar, na Bacia Sedimentar Potiguar, com falhas na área do SW, que se configuram a partir principalmente dos Tabuleiros e Chapadas. Com sua composição principalmente de rochas sedimentares.

ÉON Fanerozóico – Era Cenozóica 65,5 a 2.58 milhões de anos

De forma conjunta, para a BHRC, pode se observar a classificação através da Formação da Serra dos Martins, em regiões Serranas, representam nos Planaltos Residuais Sertanejos, relevos de elevados platôs ou maciços montanhosos, apresentados como feições residuais em meio às vastas superfícies de aplainamento da Depressão Sertaneja, compostos por rochas do tipo Arenito, Arenito conglomerático, Arenito siltico-argiloso, de classe sedimentar e clástica com 5,52 km² e 0,15% do percentual de área da bacia (CPRM, 2010, 2021 e IBGE, 2021).

No Grupo Barreiras, com Arenito conglomerático, Argilito arenoso de classe sedimentar e clástica representando 250,19 e 6,96%. Os Depósitos aluvionares com Areia, sendo material superficial de sedimento inconsolidado de área 135,22 km² em 3,76%.

Nessa unidade há a presença de fácies típicas de um sistema fluvial entrelaçado e de fácies transicionais para leques aluviais e planícies litorâneas (fluviolagunares). A fácies fluvial entrelaçada ocorre próxima aos rios de grande porte e é formada por depósitos contendo cascalho e areias grossas a finas, em geral feldspáticas, com coloração esbranquiçada, creme-amarela a avermelhada de sedimentos mais recentes (CPRM, 2010, 2021 e IBGE, 2021).

Por último Depósitos colúvio-eluviais, compostos de Areia, Argila e Cascalho, de material superficial inconsolidado, com sedimentos arenosos e argilosos esbranquiçados e avermelhados, constituídos de depósitos conglomeráticos com presença de quartzo, são provenientes da sedimentação.

Esses depósitos são originados por processos viscosos do tipo fluxo de detritos, constituindo fácies de leques aluviais de enxurradas. São mais presentes nas regiões mais litorâneas ou próximas de corpos d'água e nas áreas próximas ao curso principal do Rio do Carmo, com 12,83 km² e 0,36% (CPRM, 2010, 2021 e IBGE, 2021).

ÉON Fanerozóico – Era Mesozoica (Cretáceo) 251 a 145,5 milhões de anos

Através da Bacia Sedimentar Potiguar, pode-se classificar através da Formação Açu que compreende a base da sequência da fase marinha transgressiva de margem passiva, constituída por arenitos fluviais de sistema entrelaçado, evoluindo para sistema meandrante e costeiro (estuarino e lagunar) com Arenito e Siltito, rochas da classe sedimentar e clástica com 460,31 km² e 12,80%.

Em primeiro plano, Formação Jandaíra, corresponde ao topo da sequência da fase marinha transgressiva, constituída por rochas carbonáticas de plataforma rasa, que recobriram concordantemente os arenitos da Formação Açu sobre toda a porção emersa da Bacia Potiguar que seriam a classe mais predominante de todas as formações da bacia, com litotipo de rochas Calcarenito, Calcilituto e Folhelo, de origem sedimentar, clasto química e clástica com 460,31 km² de extensão sendo 34,32% do território total (CPRM, 2010, 2021 e IBGE, 2021).

Onde observa-se as unidades citadas anteriormente, com a composição das rochas que sofreram mais processos de intemperismo, erosão e sedimentação.

ÉON Proterozóico – Era Neoproterozoica 1.000 a 542 milhões de anos

Nestas regiões, mais ao Sudeste ou Sul em direção ao estado da Paraíba, estão presentes principalmente os Escudos Cristalinos, onde pode-se observar a formação Jucurutu (NP3sju), com intercalações de mármore, rochas calcissilicáticas e *skarns*, quartzitos e metaconglomerados basais sugerem deposição em ambiente continental.

Com formação de rochas do tipo Biotita gnaiss, Biotita xisto, Xisto, Gnaiss, Mármore, Muscovita quartzito, classificadas como rochas metamórficas de metamorfismo regional, que nessa região são utilizadas principalmente para mineração, representando 106,83 km² e 2,97% (CPRM, 2010, 2021 e IBGE, 2021).

Segundo o CPRM, 2011, os processos internos (ou endógenos) estão relacionados às atividades que envolvem movimentos ou variações físicas e químicas das rochas que ocorrem

no interior da Terra, tais como: mobilização do magma, formando vulcões e intrusões plutônicas; orogênese (movimentos intensos com dobramentos e falhamentos).

Assim, pode-se destacar a formação com a hierarquia dos corpos plutônicos, como o Plúton Serra do João do Vale, com rochas ígneas, plutônicas de classificadas como Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito, com 8,30 km² e 0,23%. O Plúton Tourão-Caraúbas, com o mesmo litotipo do Plúton Serra do João do Vale, sendo obviamente, ígneas de subclasse plutônicas com 88,61 km² e 2,46%.

Em seguida Granitoides de quimismo indiscriminado, que são representados basicamente por rochas ígneas de Granito, sendo 39,71 km² e 1,10%.

Há também a formação de dois Plútons sem Denominação, na legenda NP3_gamma_2it, que compõe litotipos diferentes com Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito, com formação de rochas ígneas ou plutônicas, de 56,17 km² e 1,56% da área. Já a outra unidade, na legenda NP3_gamma_4u2, com somente Biotita granito, rocha ígnea de origem plutônica com 32,90 km² e 0,91%.

ÉON Proterozóico – Era Paleoproterozóica 2.500 a 1.600 milhões de anos

No domínio Rio Piranhas-Seridó, há a constituição principalmente de rochas paleoproterozoicas/riacianas do Complexo Caicó. Esta é a formação geológica mais antiga, sendo formadas de rochas metamórficas, dentre elas duas unidades.

A unidade Caicó – ortognaisse, formada a partir de rochas Migmatito, Metagranito, Ortognaisse granodiorítico, Augengnaisse, de metamorfismo regional, concebida como a maior unidade de formação geológica da BHRC, e a segunda maior na hierarquia, com 1032,74 km² de extensão sendo representado por 28,71%, está localizada principalmente na área da Depressão Sertaneja Setentrional, ao Sudeste.

Seguidos da única suíte de formação definida como a unidade Poço da Cruz, com rochas do tipo Metagranito, de metamorfismo regional com 129,36% e 3,60%.

Em resumo, pode-se simplificar através da Tabela 1, o reagrupamento dessas áreas, definindo o tempo de formação geológica, para compreender qual seria o principal.

Tabela 1 - Tempo Geológico Simplificado da BHRC.

Era Geológica	Milhões de anos	Percentual (%)
Cenozóico	66 a 2.58	11,23%
Mesozóico	251 a 145,5	47,12%
Neoproterozóico	1.000 a 542	9,24%
Paleoproterozóico	2.500 a 1.600	32,31%
Sem classificação	-	0,10%
Total		100,00%

Fonte: CPRM, 2021; IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

Sendo de maioria Mesozóica com 251 a 145,5 milhões de anos, o relevo da BHRC mais jovem (considerando o tempo geológico) com 47,12% das áreas, especialmente na Bacia Sedimentar Potiguar, com rochas especialmente sedimentares, seguidas do Paleoproterozóico, de formação principalmente Metamórficas e Ígneas, no Embasamento Cristalino no estado do RN, segundo os dados, datam de 2.500 a 1600 milhões de anos, representando 32,31% das áreas, onde temos também 11,23% do Cenozóico datado de 66 a 2.58 milhões de anos e o Neoproterozóico com 1000 a 542 milhões de anos com 9,24%.

Para melhor compreensão, observa-se na Tabela 2, que os fatores geológicos, formação tectônica e falhas e dobras, em conjunto da dinâmica pluvial e fluvial, com intemperismo e erosão, alteram a composição das rochas, que sofreram diversos processos em milhões e milhões de anos, por meio da classificação litológica das rochas.

Tabela 2 - Classificação da Litologia da BHRC.

Classificação das Rochas	Subclasse das Rochas	Aglomerado de Litotipo de Rochas	Área (Km²)	Percentual (%)
Ígnea	Plutônica	Biotita granito, Granodiorito, Monzonito e Granito	225,68	6,27%
Metamórfica	Metamorfismo regional	Biotita gnaiss, Biotita xisto, Xisto, Gnaiss, Mármore, Muscovita quartzito, Metagranito, Migmatito, Ortognaiss granodiorítico e Augengnaiss	1268,93	35,28%
Sedimentar	Clástica	Arenito conglomerático, Argilito arenoso, Arenito siltico-argiloso, Arenito, Siltito e Calcarenito, Calcilutito e Folhelho	1950,50	54,23%
Material superficial (Sedimentar)	Sedimento inconsolidado	Areia, Argila e Cascalho	148,05	4,12%
Sem Classificação			3,68	0,10%
Total			3596,85	100,00%

Fonte: CPRM, 2021; IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

O solo como subproduto do substrato das rochas, formados através dos processos supracitados de intemperismo e erosão, com a deposição dos sedimentos, classifica-se através da classificação das rochas, como rochas Ígnea, presentes na BHRC, sendo de subclasse

plutônica, com o aglomerado entre a informação do Litotipo das rochas com Biotita granito, Granodiorito, Monzonito e Granito, em 225,68 km² e 6,27% do percentual de área total.

As rochas metamórficas, podem-se considerar em segundo lugar como as rochas mais presentes de toda a bacia, com 35,28% sendo 1268,93 km² de área, com litotipo Biotita gnaiss, Biotita xisto, Xisto, Gnaiss, Mármore, Muscovita quartzito, Metagranito, Migmatito, Ortognaiss granodiorítico e Augengnaiss.

Na maioria do território da BHRC, em sua maioria, pode-se observar as rochas de classificação sedimentar, sendo clásticas, onde temos 1950,50 km², com 54,23% representadas segundo o litotipo Arenito conglomerático, Argilito arenoso, Arenito siltico-argiloso, Arenito, Siltito e Calcarenito, Calcilito e o Folhelho. De material superficial, sedimentar também, porém com sedimento inconsolidado, a Areia, Argila e Cascalho, com 4,12%, próximos da região litorânea, com percentual de área de 4,12% em 148,05 km². Somadas em rochas sedimentares, dariam um total de 58,34% e 2098,55 km². Por fim, um total de 3,68 km² de área representando 0,10% não foi classificado pelo CPRM e IBGE, 2021.

5.1.2. *Análise da Geomorfologia*

Ao definir as origens geológicas, é concebida a ideia da compreensão dos conceitos para entender como estão pré-estabelecidos os processos atuantes, com elementos e fatores de formação para o relevo.

O estado do Rio Grande do Norte apresenta uma grande variedade de formas de relevo que se estende por meio de seu território. Na BHRC, não é diferente, e o relevo é caracterizado por de meio de domínios geomorfológicos com as Depressões Intermontanas e Interplanálticas semiáridas presentes na região, condicionados por fatores que interferem em sua morfogênese, como a estrutura geológica, evolução morfoclimática e processos atuais resultando em uma diversidade de paisagens (CPRM, 2010).

Para a bacia, os condicionantes tecnoestruturais são marcados pelos terrenos das coberturas continentais cenozoicas, dividindo-se em bacia sedimentar potiguar e embasamento cristalino.

Pode-se caracterizar através do recorte territorial nos aspectos estruturas como Baixos platôs, advindos de um extremo a outro, de parte da Bacia Sedimentar Potiguar, em especial nos tabuleiros da Chapada do Apodi, onde a superfície é aplainada, domínios de colinas amplas e suaves, nas bacias e coberturas sedimentares fanerozóicas, seguidas de degraus estruturais e

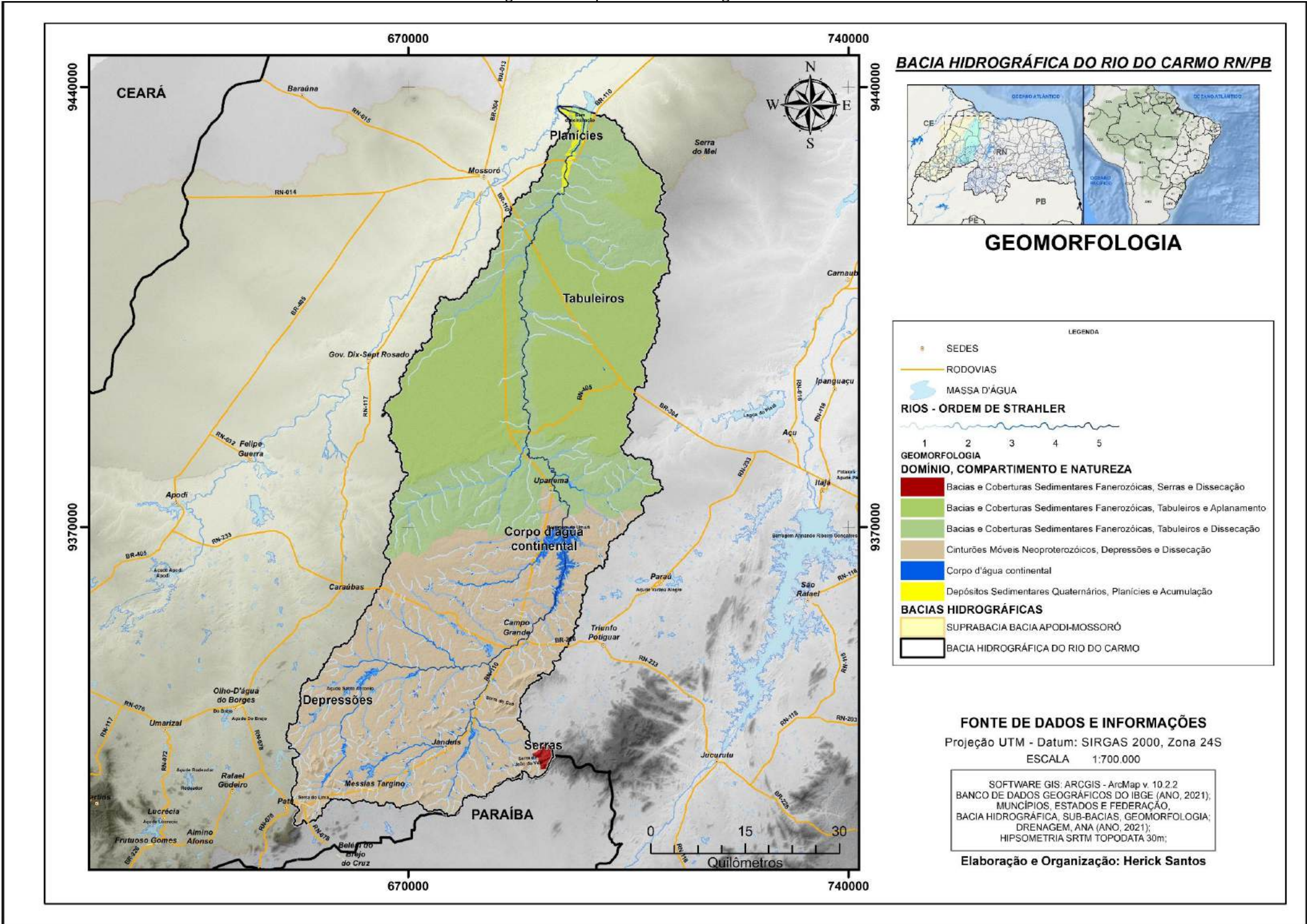
rebordos erosivos, mais próximas do rebaixamento da superfície do Vale do Rio Açu, com domínios de morros e serras baixas, e domínios de colinas amplas e suaves onde as bacias sedimentares fanerozóicas sofrem processo de disseção (CPRM, 2010).

Para o Embasamento cristalino, mais ao sul da bacia, as superfícies aplainadas retocadas ou degradadas são o principal aspecto, caracterizados na Depressão sertaneja ou nos Cinturões móveis do Proterozóico, que também sofreram processo de dissecção, onde também há presença de Inselbergs e outros relevos residuais (cristas isoladas), domínios de morros e serras baixas, como a de João do Vale (CPRM, 2010).

Ao atentar-se a estas características, consegue-se compreender como as unidades morfológicas e morfoestruturais de uma bacia delineiam e formam o relevo do qual observa-se na BHRC. Entretanto, além da caracterização teórica, torna-se necessário investigar os dados estudados, conforme recorte utilizado.

Em sua representação a partir do recorte territorial, pode-se localizar estas feições a partir da Figura 17.

Figura 17 - Mapa da Geomorfologia da BHRC.



Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

No quadro 14, desenvolveu-se a classificação Geomorfológica da BHRC, unindo os componentes estruturais desde o domínio geomorfológico, compartimentos, a região e unidade. Para isto, a formação da sua composição atrela a categoria, natureza e forma do relevo.

Quadro 14 - Classificação Geomorfológica da BHRC.

Domínio Geomorfológico	Compartimento	Região	Unidade	Categoria	Natureza	Característica	Forma	Área (Km²)	Porcentagem	Soma Total	(%) Total
Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas	Tabuleiros	Chapadas Do Nordeste Oriental	Chapada Do Apodi	Homogênea Tabular	Dissecação	Dissecação Homogênea ou Diferencial	Topo Tabular	475,62	13,22%	1997,86	55,54%
				Pediplano Degradado Inumado	Aplanamento	Degradado Inumado	Pediplano	1052,57	29,26%		
		Chapadas Do Litoral Norte	Superfície Rebaixada Do Vale Do Rio Açu	Pediplano Degradado Inumado	Aplanamento	Degradado Inumado	Pediplano	4,83	0,13%		
				Homogênea Tabular	Dissecação	Dissecação Homogênea ou Diferencial	Topo Tabular	456,92	12,70%		
	Serras	Aplanamentos Residuais Do Domo Da Borborema	Serras Do Martins-Portalegre e João Do Vale	Homogênea Convexa	Dissecação	Dissecação Homogênea ou Diferencial	Topo Convexo	7,92	0,22%		
Corpo D'água Continental	Corpo D'água Continental	Corpo D'água Continental	Corpo D'água Continental	-	-	-	-	69,4	1,93%	69,4	1,93%
Cinturões Móveis Neoproterozóicos	Depressões	Depressão Sertaneja	Depressão Sertaneja Setentrional	Homogênea Aguçada	Dissecação	Dissecação Homogênea ou Diferencial	Topo Aguçado	20,35	0,57%	1505,91	41,87%
				Homogênea Tabular			Topo Tabular	1123,89	31,25%		
				Homogênea Convexa			Topo Convexo	361,67	10,06%		
Depósitos Sedimentares Quaternários	Planícies	Planícies Deltáicas, estuarinas e Praias	Litoral Setentrional Nordeste	Planície Fluvioamarinha	Acumulação	Fluvioamarinho	Planície	23,68	0,66%	23,68	0,66%
Total								3596,85	100,00%	3596,85	100,00%

Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor.

Observa-se ao NE da área que para BHRC, a maior classe de formação do relevo são os Domínios Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, representando um total de 1997,86 km², com 55,54%, em mais da metade da bacia. Estruturas compartimentadas através dos Tabuleiros, são representadas a partir Região das Chapadas do Nordeste Oriental e Chapadas do Litoral Norte, com a unidade da Chapada do Apodi e da Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu.

Subentende-se que a bacia hidrográfica representa uma unidade de análise fundamental na Geomorfologia por se constituir na superfície de coleta e recipiente de armazenagem da precipitação, configurando o sistema através do qual a água e os sedimentos são transportados para o oceano ou lago interior (IBGE, 2013).

Segundo o CPRM (2010), o sistema de drenagem principal apresenta entalhes superficiais. Essas áreas são caracterizadas pela predominância de processos de formação de solo, resultando em solos espessos e bem drenados, geralmente com baixa a moderada suscetibilidade à erosão. Essas superfícies são ligeiramente elevadas em relação aos terrenos circundantes, com pouca dissecação em formas tabulares.

Ocasionalmente, podem ocorrer processos de laterização. Essas paisagens apresentam superfícies planas em altitudes modestas dentro de bacias sedimentares antigas, como os platôs

inferiores da Bacia do Parnaíba no Piauí, ou a Chapada do Apodi na Bacia Potiguar no Rio Grande do Norte CPRM (2010).

Ao observar a categoria do relevo, é distribuído homogênea tabular, de natureza dissecada e característica resumida com dissecação homogênea ou diferencial de forma topo tabular somando um total de 475,62 km², representado por 13,22%. Presente também o pediplano, degradado inumado, com aplanamento da superfície, de forma pediplana, com uma parcela maior de 29,26% das áreas, em 1052,57 km².

Assim, deste domínio também são formadas as Serras no SE, com Aplanamentos Residuais do Domo da Borborema, parcela da formação do Planalto da Borborema, apresentando desnivelamentos totais sempre superiores a 300 ou 400 m e com deposição de rampas de colúvio e depósitos de tálus na base das escarpas inclusa no com a formação das Serras de Martins e João do Vale, de categoria homogênea convexa, com um relevo que sofre dissecação, caracterizada homogênea ou diferencial, em seu topo convexo, representando uma pequena parcela de 7,92 km² em 0,22% (IBGE, 2021).

De acordo com dados do IBGE, 2021, também considera a classe de Corpos d'água Continental, com áreas espalhadas ao redor da bacia, mas preferencialmente localizada na Depressão Sertaneja ao SW, que representam somente 69,40 km² da bacia em 1,93%.

A Depressão Sertaneja, conforme definida pelo IBGE (2021), é uma área periférica em relação aos Baixos Platôs da Bacia Potiguar. Essa região abrange uma variedade de padrões de relevo, com uma predominância significativa de superfícies aplainadas com relevo plano e levemente ondulado, resultantes de um processo generalizado de desgaste do relevo sobre diferentes tipos de rochas. Essas amplas superfícies planas são intercaladas por inselbergs e maciços montanhosos isolados, que por vezes se desdobram em morros e serras de baixa altitude.

Os Cinturões Móveis do Neoproterozóico no SW, são formações que representam a segunda maior parte, com 1505,91 km² e 41,87% no total, as configuram compartimentadas como Depressões, classificadas em região e unidade como Depressão Sertaneja e Setentrional, dividem-se em categorias quanto a forma, homogêneas; aguçada, tabular e convexa, com dissecação das rochas, de característica homogênea ou diferencial, em que a maior parcela, dentre as diferentes formas do relevo, seria a tabular com 31,25% da área, com 1123,89 km² (IBGE, 2021).

Por último segundo os dados do IBGE, 2021, os Depósitos Sedimentares Quarentenários com 23,68 km² e 0,66% ao NW, que são a região das planícies deltaicas, estuárias e praias, e

tem por unidade o Litoral Setentrional Nordeste, áreas próximas as regiões litorâneas, categorizadas na planície fluviomarinha, por processos de acumulação de sedimentos, que são compactados em forma de planície.

Levando em consideração as áreas com essas formações, elaborou-se uma tabela de forma simplificada (Tabela 03), em que mostram o somatório das características e da natureza do relevo com a geomorfologia local.

Tabela 3 - Total de áreas de naturezas e características geomorfológicas.

Natureza	Característica	Area (Km ²)	Porcentagem
Acumulação	Fluviomarinho	23,68	0,66%
Dissecação	Dissecação Homogênea ou Diferencial	2446,37	68,01%
Aplanamento	Degradado Inumado	1057,40	29,40%
Corpo D'água Continental	Corpo D'água Continental	69,40	1,93%
Total		3596,85	100,00%

Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor.

Segundo Christofolletti (1980), nos processos de acumulação, as camadas sedimentares, por exemplo, são importantes fontes de informação e registros preciosos na interpretação de processos atuantes no passado, bem como as condições ambientais reinantes naquela época. É o seu aspecto visível, a sua configuração, que caracteriza o modelo topográfico de uma área.

As formas de relevo constituem o objeto da Geomorfologia. Dessa forma, pode-se definir processo como sendo uma sequência de ações regulares e contínuas que se desenvolvem de maneira relativamente bem especificada e levando a um resultado determinado (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Pode-se considerar, que a BHRC, tem sua geomorfologia caracterizada majoritariamente por meio de processos naturais de dissecação, caracterizados homogêneos ou diferencial com 2446,37 km² e 68,01%, seguidos dos processos de Aplanamento da superfície de forma degradada e inumado, com 1057,40 km² e 29,40%, e corpos d'água continentais de 69,40 km² com 1,93% do total da bacia, sendo uma pequena parcela por meio de acumulação fluviomarinha em 23,68 km², como citado anteriormente, representando 0,66%.

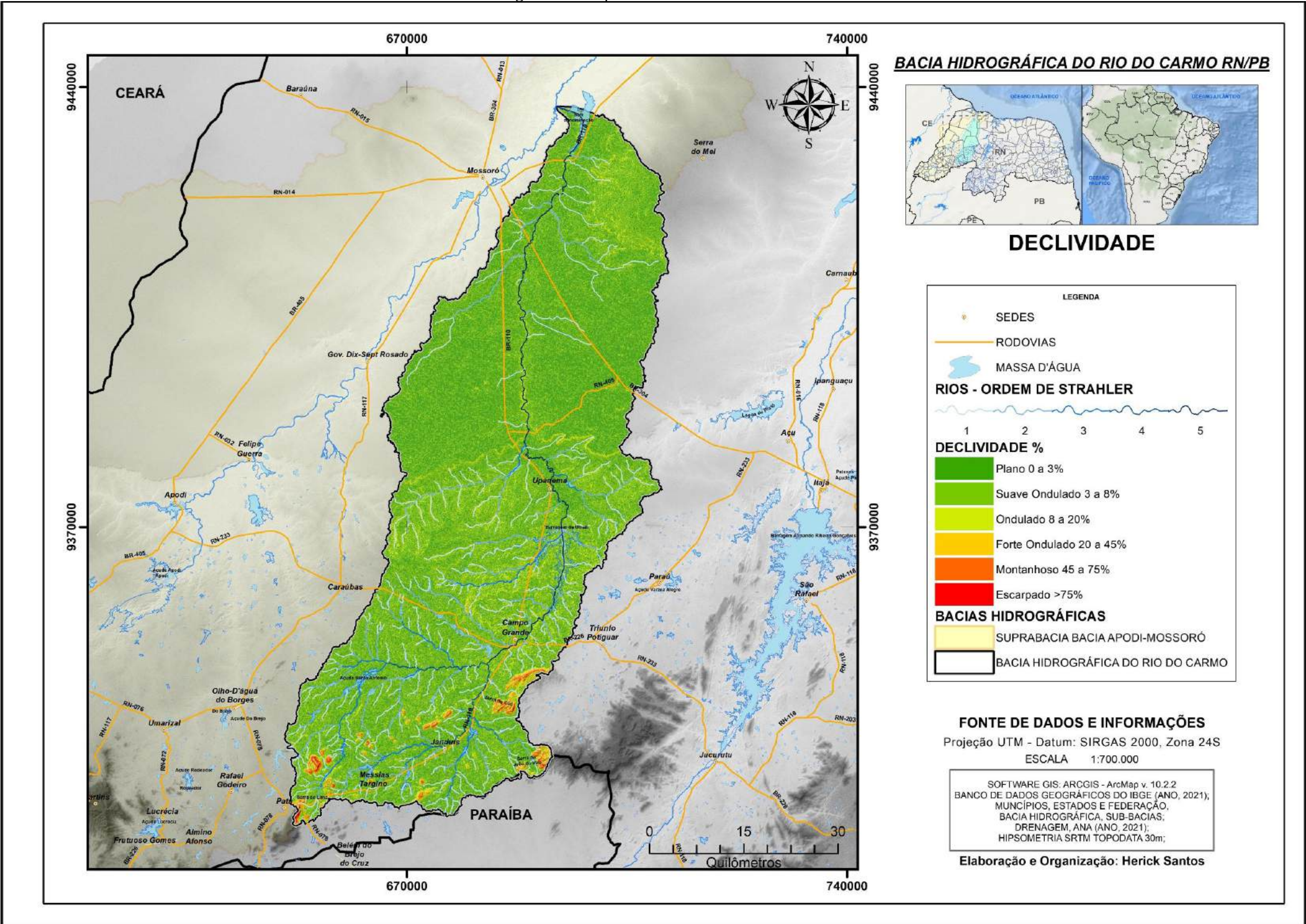
Segundo observa-se nos mapas, as áreas de maiores declividade, vão estar dispostas nas áreas com maiores altitudes, justamente onde houve uma maior modelagem da superfície em regiões. O grau de formação dessas estruturas, é definida com base na sua formação geomorfológica, e de ativação tectônica, conforme a distribuição dos tempos geológicos.

Um elemento crucial na análise do relevo está relacionado à abordagem do sistema hidrográfico.

De acordo com Argento (2007), a Geomorfologia Fluvial concentra-se na investigação dos cursos de água que compõem as bacias hidrográficas. Enquanto o primeiro enfoque se dedica aos processos fluviais e às formas geológicas decorrentes do fluxo das águas, o segundo aborda as principais características das bacias hidrográficas que influenciam o padrão de fluxo de água, conhecido como regime hidrológico.

Tendo em vista a questão do relevo, torna-se fundamental abordar os aspectos da declividade, onde pode-se considerar segundo o mapa (Figura 18).

Figura 18 - Mapa da Declividade da BHRC.



Fonte: STRM, 2011; elaborado por autor, 2023.

A análise das interações entre os processos envolvidos na formação do relevo, com base em cartas topográficas e investigações quantitativas e qualitativas, é uma abordagem eficaz e essencial. Isso nos permite compreender como a litosfera pode ser modificada por fenômenos de natureza tectônica, erosiva ou de acumulação. Essa abordagem constitui um meio valioso por meio do qual se pode interpretar as características e configurações de uma determinada área geográfica (SOUZA, *et al.* 2013).

Nesse sentido, é importante destacar que segundo Ross (1994), conforme a classificação utilizada em sobre as Unidades de Fragilidades Naturais, entende-se que são um importante produto que subsidia o zoneamento ambiental e, conseqüentemente, o planejamento estratégico. A identificação dos ambientes naturais e suas fragilidades permite definir diretrizes e ações a serem implementadas no espaço físico-territorial.

Desta forma, nas áreas onde os graus de fragilidade forem mais baixos favorecem determinados tipos de inserção, já nas áreas mais frágeis exigem ações tecnicamente mais adequadas a essas condições.

Assim, o autor destacou com base no relevo, um grau de fragilidade para declividades. Segundo a proposta, a BHRC, tem a classificação segundo quadro supracitado para metodologia utilizada [ver quadro 10 no item 4.1.3].

Segundo classificação de Ross (1994), essas informações são dispostas na Tabela 4.

Tabela 4 - Declividade da BHRC.

Declividade da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo - Área 3596,85 Km ²		
Declividade	Área (Km ²)	Valores do Percentual
Plano 0 a 3%	1421,04	39,51%
Suave Ondulado 3 a 8%	1861,61	51,76%
Ondulado 8 a 20%	268,55	7,47%
Forte Ondulado 20 a 45%	25,45	0,71%
Montanhoso 45 a 75%	16,59	0,46%
Escarpado >75%	3,61	0,10%
Total	3596,85	100%

Fonte: ROSS, 1994, STRM, 2011; elaborado por autor.

Considera-se a área total da BHRC, em que as áreas estão divididas com o relevo Plano, segundo maior percentual de área, entre 0 a 3 % de declividade, com 1421,04 km²,

representando uma camada de 39,51%, Suave Ondulado entre 3 a 8%, representando com 1861,61 km², com 51,76%, com mais da metade da área da bacia, sendo a maior parte.

Em contrapartida, em áreas com menos de 1%, da bacia, estão presentes o relevo Ondulado entre 8 a 20%, com 268,55 km². Seguidos de 7,47%, com o relevo Forte Ondulado de 20 a 45%, representados em 25,45 km². Em 0,71%, o relevo Montanhoso de 45 a 75% com 16,59 km², e por último com 0,46%, o Escarpado, sendo maior que >75% com 3,61 km² e 0,10% da área total da bacia.

Em resumo, na BHRC, nas áreas de maiores declividades, estão as áreas de maiores altitudes, já as áreas de altitudes médias para baixas, estarão o menor índice de declividade no relevo, configurando áreas mais planas, onde há o rebaixamento e aplanamento da superfície.

Pode-se considerar de forma geral, o relevo da bacia Suave Ondulado para Plano, com parcelas onduladas, pouco montanhoso e escarpado.

Ao observar a formação do relevo e da declividade, torna-se fundamental considerar e entender como se deu esse processo. Portanto, é necessário ir à origem destes, partindo do pressuposto das formações geomorfológicas. Afinal, a Geomorfologia tem como principal objeto de estudo as formas do relevo, além de investigar os processos que deram origem a essas formas e os materiais que foram trabalhados pelos processos para resultar em diferentes feições.

Dessa forma, torna-se interessante, para objeto de análises em bacias hidrográficas, a utilização do relevo, pois entende-se como divisores de águas em bacias hidrográficas, o que nos proporciona a caracterização e entendimento, proposto através do fluxo de drenagem da água, desde as áreas mais altas às mais baixas, presentemente nessas áreas de estudo.

5.1.3. *Análise da Hidrografia*

Em uma bacia hidrográfica, o intemperismo, que é o processo de desgaste e decomposição das rochas e minerais, revela que a água da chuva contém dióxido de carbono dissolvido, o que a torna levemente ácida. À medida que a água da chuva entra em contato com as rochas, ela pode causar reações químicas que resultam na decomposição das rochas, desgastando-as ao longo do tempo, conhecidos também como os processos de denudação das rochas (CHRISTOFOLETTI, 1980, CREPANI *et al.* 2001; CARVALHO, 2013).

Destaca-se que esses corpos d'água incluem rios, lagos, lagoas, riachos, açudes (reservatórios) e outras formas de água que estão localizadas em áreas além das oceânicas. Os

corpos d'água continentais desempenham papéis vitais em muitos ecossistemas, e usos essenciais para as comunidades humanas.

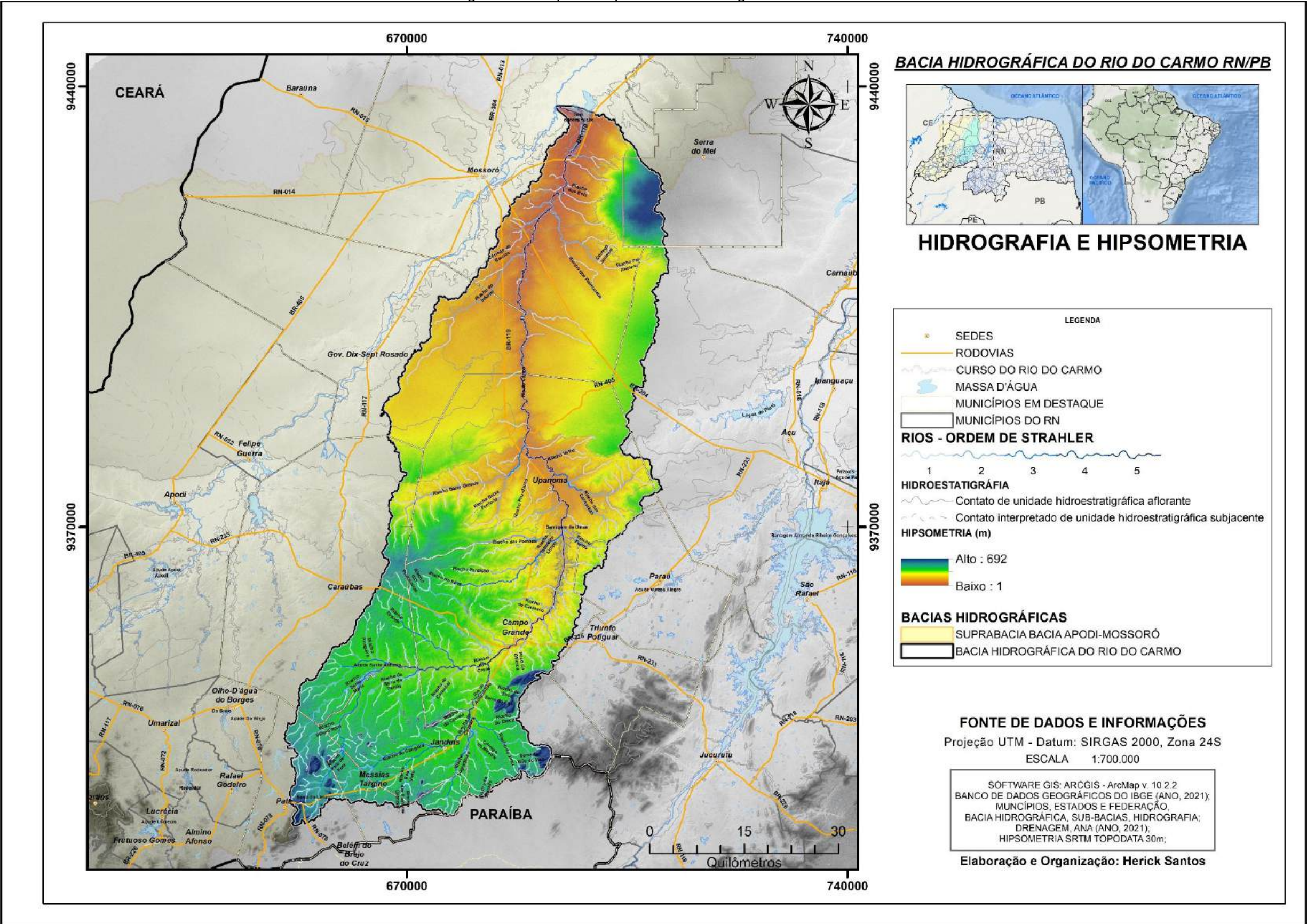
Entende-se da primeira ordem os rios de áreas formadores de nascentes, geralmente em maiores altitudes, seguindo o fluxo e desaguando em rios de segunda ordem e assim por diante. São estes, rios e alguns canais meandantes, que desaguam em sequência para formação de novos rios, dos rios tributários, assim, subsequentemente, corpos d'água são formados a partir de áreas mais planas, em que houver esse acúmulo de água (IBGE, 2013, ANA, 2021).

Para geomorfologia, de maneira geral, é possível caracterizar o relevo por meio de diferentes superfícies, que incluem as erosivas, dobradas e falhadas. Essas características podem apresentar variações ou combinações em uma determinada área, ou mesmo formar uma unidade morfológica única de grande extensão.

O processo de evolução do relevo, comandado pelo sistema hidrográfico, ocorre por meio da erosão regressiva, resultando na ramificação de cursos de primeira ordem e, como consequência, na formação de formas residuais, como os morros-testemunhos, que podem ou não ser sustentados por coroas litoestruturais, como o somital, associado a materiais resistentes (SOUZA e MULLER, 2010).

Na figura 19, estabelece uma prévia da distribuição territorial do relevo e da hidrografia com os principais rios que estão na BHRC, percebe-se na formação da BHRC, como os elementos do fluxo da água por meio da drenagem está condicionada aos fatores do relevo e da geomorfologia, entre os fluxos utilizado pela ordem de Straler (1957), nota-se rios de ordem da 1ª até a ordem 5ª ordem.

Figura 19 - Mapa da Hipsometria e Hidrografia da BHRC.



Fonte: ANA, 2021; IBGE, 2021; SRTM, 2011; elaborado por autor, 2023.

Segundo Rodriguez, Silva e Cavalcanti (2017), que trazem um visão sistemática para análise ambiental, o pressuposto dos conteúdos teóricos de qualquer disciplina científica, é a união de caráter conceitual, das relações entre o objeto e o estudo, desenvolvido através de leis e regulamentos, que regem sua base teórica e metodológica.

Portanto, utilizar parâmetros científicos que nos dê a compreensão de forma geral, nos proporciona um melhor entendimento acerca dos resultados, a saber principalmente o porquê da ocorrência de determinados fenômenos.

As áreas de maiores altitudes, consideradas como alto curso da Bacia, estão em direção ao estado da Paraíba, com a formação de Serras e Depressões, onde justamente, temos a principal área de formação das nascentes da BHRC.

A Serra do Lima e a Serra do Cuó, por exemplo, é formada a partir dos domínios dos Cinturões Móveis Neoproterozóicos com a Depressão Sertaneja Setentrional, tem sua forma topo tabular e topo aguçada, e uma natureza de dissecação, a Serra de João do Vale, formadas a partir dos Aplanamentos Residuais do Domo da Borborema que está presente ao SE, de categoria convexa que também sofre dissecação em sua natureza, estes são fatores de formação que proporcionaram a modelagem do relevo (IBGE, 2021).

Essas áreas, estão presentes principalmente nos territórios dos municípios de Patu, Campo Grande, Caraúbas, Janduís, Messias Targino e Belém do Brejo Cruz-PB.

Percebe-se um maior acúmulo de corpos d'água nessas regiões, tendo em vista a dinâmica hídrica com um maior potencial de precipitação dessas áreas, agindo de forma conjunta, por meio da trajetória dos rios até áreas de menor altitudes.

Em direção ao NE, também se encontra as áreas próximas a de Serra do Mel, a partir da divisa dos municípios, com altitudes elevadas na Chapada do Apodi, em sua natureza possui disseção e aplanamento da superfície sendo de categoria pediplana e homogênea tabular, que é onde se encontra o compartimento dos Tabuleiros (IBGE, 2021).

Já as áreas de altitudes médias, ou médio curso, se aproximam, em direção ao NE da BHRC, com a formação geomorfológica das Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, com as Chapadas do Litoral Norte e a Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu, ambas de categoria Homogênea e forma topo tabular e sofrem processo de dissecação em sua natureza.

É se aproximando do litoral do Norte do estado, no médio curso da bacia, que as áreas começam a se aplainar em formatos pediplanos, por meio de um aplanamento em sua superfície. Percebe-se, com Pediplano degradado inumado, a partir da Chapada do Apodi, áreas das Bacias

e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas e das Chapadas do Nordeste Oriental, em especial no município de Upanema e Caraúbas (IBGE, 2021).

Devido as coberturas sedimentares, é que há a produção e exploração em larga escala de petróleo nessas regiões, especialmente no município de Mossoró, considerado o maior produtor *onshore* (em terras) do Brasil.

Por fim, as planícies fluviomarinhas, com as menores altitudes, no baixo curso, no Litoral Setentrional Nordestino, há a formação Depósitos Sedimentares Quaternários, de planícies fluviomarinhas, em forma planície, com Planícies Deltaicas, Estuarinas e Praiais, onde estarão próximas ao nível do mar.

Com a presença da foz do Rio do Carmo, em direção ao litoral, nos municípios de Mossoró, de Grossos, Areia Branca, conhecidos pela atividade salineira em sua localidade, produzindo até 95% do sal de todo território brasileiro, e atividades petrolíferas (IBGE, 2022).

Ressalta-se também a importância da compreensão do ciclo da água e do funcionamento do clima, nessas regiões, especialmente semiáridas, onde a precipitação das chuvas tem papel importante e função reguladora para abastecimento dos recursos hídricos, a partir dos dados de vazões reguladoras, afinal, são má distribuídas em diferentes épocas do ano, e isso causa severos períodos de estiagem, dessa forma é importante considerar o balanço hídrico.

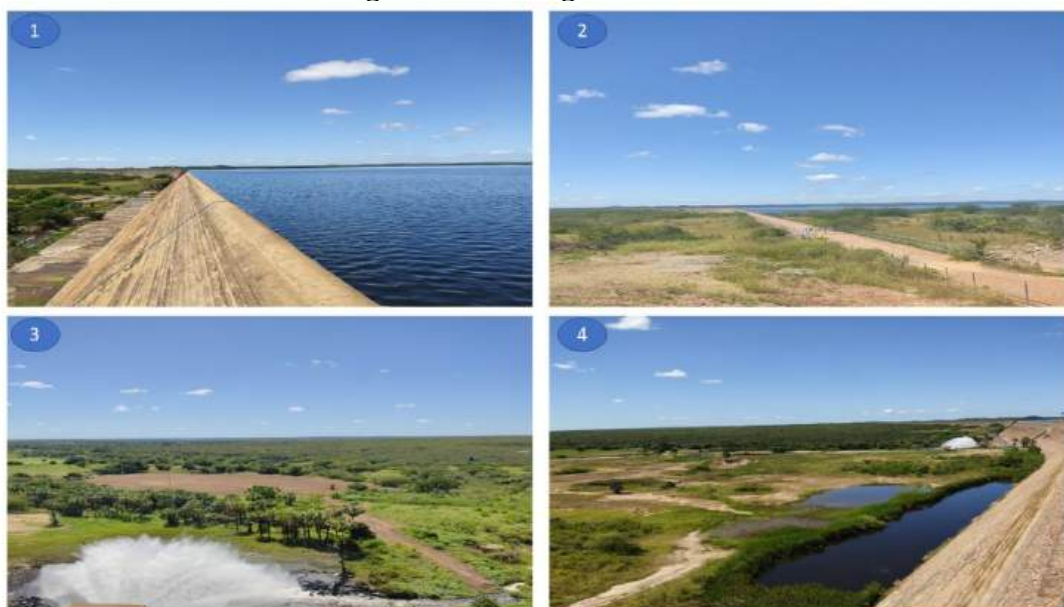
Nestas regiões, há uma grande quantidade de rios intermitentes, dessa forma, é utilizado áreas para grandes reservatórios de água como a Barragem de Umari, localizado entre os municípios de Upanema, Paraú e Campo Grande no RN, (Figura 19), sendo o mais importante reservatório de água da BHRC, e o terceiro maior reservatório de todo o estado do RN.

Segundo o Instituto de Gestão das Águas do Rio Grande do Norte (IGARN), a capacidade total do reservatório é de 292.813.650 m³ de água. E suas obras foram concluídas em 2002. Notadamente, essas áreas contribuem para o aumento da segurança hídrica e auxiliam no desenvolvimento das atividades agropecuárias, possibilitam o desenvolvimento da atividade pesqueira e, em pontos com maiores incentivos, atraem atividades turísticas.

Na figura 20, foi compilado 4 fotos da região. Para foto (1) observa-se o topo do reservatório praticamente cheio. Na foto (2) conforme o relevo da região, apesar de estar localizada na Depressão Sertaneja, justamente pela propiciação do acúmulo de água e formação de corpos hídricos, é vista partir dos Tabuleiros da Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu, mais ao norte, após leve ondulação, um aplanainamento da superfície. Na foto (3), por exemplo destaca-se que o relevo é plano em seu horizonte, com pequenas variações de altitudes. Na foto (4) há a vazão excedente da barragem no trecho abaixo, e uma quantidade de cobertura da

vegetação maior, levando-se em consideração que não há contingentes ou cidades tão próximas a barragem. Para este momento, leva em consideração um fato de que na data do campo realizado (2023), a barragem sangrou pela terceira vez em sua história, fato este que não acontecia desde 2009, onde a água do reservatório transbordou²⁶.

Figura 20 - Barragem de Umari



Fonte: Acervo do autor, 2023.

Pode-se considerar para outros reservatórios inseridos na Bacia do Apodi-Mossoró (Tabela 05), a partir da suprabacia da BHRC. Em que há Santa Cruz do Apodi, com capacidade hídrica de 599,71 hm³ considerado o maior reservatório do estado, porém, se encontra além do recorte estudado por esta pesquisa, em seguida Umari, com 292,81 hm³. Já a barragem de Araupuí, possui a menor capacidade hídrica com 4,30 (hm³) (ANA, 2017).

²⁶ Fato confirmado em reportagem no G1 – Rio Grande do Norte - INTERTV, 2023: <https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/2023/04/09/terceiro-maior-reservatorio-de-agua-do-rn-barragem-de-umari-volta-a-sangrar-depois-de-14-anos-veja-video.ghml>

Tabela 5 - Sistemas de Reservatórios da Bacia do Rio Apodi.

Sistema	Código ANA	Reservatório	UF	Capacidade (hm³)
Apodi	2067	Apanha Peixe	RN	10,00
	2201	Arapuá	RN	4,30
	2220	Bonito II	RN	10,86
	1702	Marcelino Vieira	RN	11,20
	1768	Pau dos Ferros	RN	54,85
	1850	Riacho da Cruz II	RN	9,60
	2047	Santa Cruz do Apodi	RN	599,71
Carmo/Apodi	1836	Santo Antônio das Caraúbas	RN	8,54
	2046	Umari	RN	292,81
Umari/Apodi	1825	Brejo	RN	6,45
	1796	Lucrécia	RN	24,75
	1798	Rodeador	RN	21,40
	1817	Tourão	RN	7,99
Total				1062,46

Fonte: Relatório Síntese da ANA, 2017; organizado por autor, 2023.

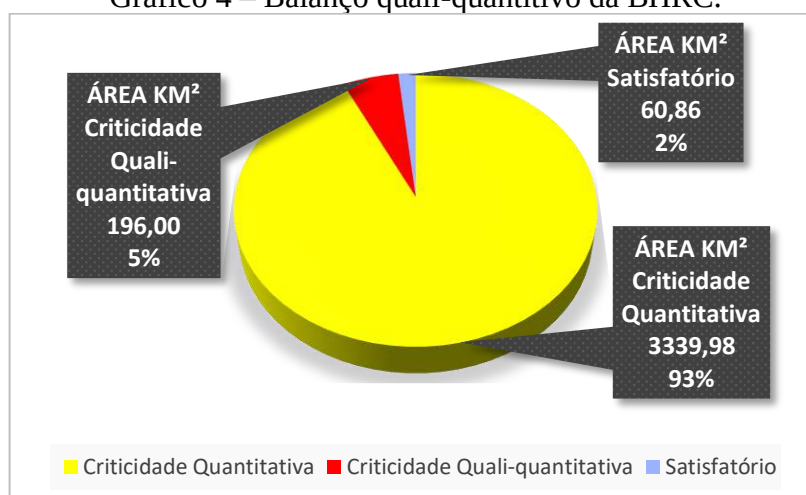
Para compreender essa lógica, portanto, percebe-se segundo visualização dos dados da ANA, (2021) fluxos de água de primeira ordem a quinta ordem, como o Riacho Olho-d'água, Riacho Santa Maria, Riacho do Saco, Riacho da Cangaíra, Riacho das Coroas etc. Nascentes de água que vão tributando parte de seu fluxo no alto curso, até o rio principal de quinta ordem, que seria o curso principal da BHRC, denominado Rio do Carmo, este, se estende do alto ao baixo curso da bacia, até atingir a foz.

Em meio a trajetória dos rios e riachos, há a formação de espelhos d'águas e açudes, com reservatórios de água, em contatos de massas d'água na região. Tanto os rios, quanto os reservatórios, são importantes para comunidades ribeirinhas e a sociedade como um todo, como fonte de água potável, para atividades econômicas como a pesca, silvicultura, dessedentação animal e consumo humano. Manter a qualidade da água para essas atividades, e regular a demanda hídrica, são índices que podem ser atribuídos para uma melhor gestão hídrica.

Nesse sentido, realizou-se o diagnóstico das bacias críticas brasileiras, considerando, de forma integrada, a análise de criticidade sob o ponto de vista qualitativo e quantitativo.

Para a BHRC, a partir do recorte das áreas, foi-se utilizado com base no parâmetro da análise da criticidade e segurança hídrica da bacia conforme os dados coletados pela ANA (2013), descritos na metodologia da matriz de qualidade e balanço hídrico quali-quantitativo, com a apresentação dos dados a partir do Gráfico 4.

Gráfico 4 – Balanço quali-quantitativo da BHRC.



Fonte: ANA, 2013, organizado por autor.

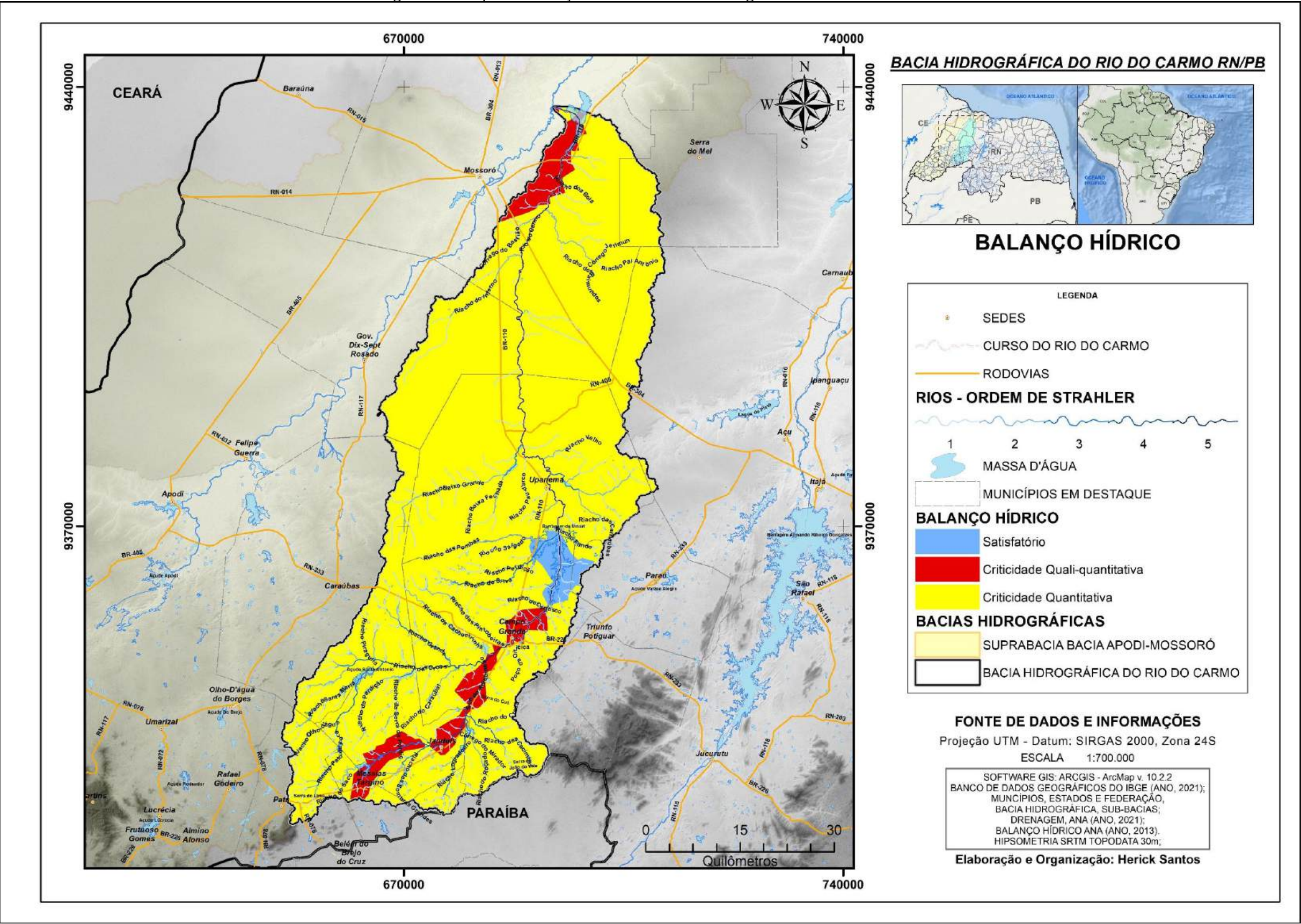
Em análise ao Gráfico 4, percebe-se, portanto, a avaliação de áreas conforme os índices de Críticidade Quantitativa sendo a maior parte para esta bacia em amarelo, com cerca de 93% em 3339,98 km², para as áreas próximas dos corpos hídricos avaliados. Em segundo plano, pode-se observar com 5% a Críticidade Quali-quantitativa em vermelho, em 196,00 km² com 5% da bacia. Por último, em menor número, nota-se somente 60,86km² das áreas em 2%, representados em azul.

Embora o balanço hídrico quali-quantitativo determinado no Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos seja calculado a partir de dados secundários, ele é um indicativo da criticidade de alguns corpos hídricos. Na Região Nordeste ocorre grande ocorrência de rios classificados com criticidade quantitativa devido à baixa disponibilidade hídrica dos corpos d'água (ANA, 2013). Fato que explica através do grande quantitativo de secas, devido a uma região com menor volume de precipitação, onde não supre a demanda hídrica.

Mas para exemplificar onde estão localizados os pontos de criticidade pelo balanço hídrico, devemos considerar as diferentes localidades, pois para determinadas regiões, é interessante entender onde está localizado o balanço hídrico favorável ou menos favorável, afim de realizar estudos e diagnósticos mais precisos.

Devido essa questão, foi elaborado o mapa na Figura 21. Percebe-se que o único ponto que há um balanço satisfatório é próximo a barragem de Umari. Já os pontos de criticidade quali-quantitativa, estão a partir do exúltório e em trechos no município de Messias Targino e Campo Grande, localizados reservatórios e corpos hídricos, até próximo da barragem. Já as demais áreas em criticidade quantitativa, estão localizadas ao entorno da bacia.

Figura 21 - Mapa do Balanço Hídrico da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo.



Fonte: IBGE 2021; ANA (1967 – 2006); elaborado por autor, 2023.

5.1.4. *Análise da Climatologia*

Majoritariamente, as bacias hidrográficas do Nordeste Oriental, encontram-se sob a influência do bioma da Caatinga (Savana Estépica). Sob esse domínio, as características peculiares, como o regime intermitente e sazonal dos seus rios é reflexo direto das precipitações escassas e irregulares, associada à alta taxa de evaporação hídrica (AB'SABER, 1995).

Na classificação mundial do clima, o semiárido é aquele que apresenta precipitação de chuvas média entre 200 mm e 500 mm. Na classificação brasileira, o clima semiárido é aquele com precipitação inferior a 1000 mm por ano, com precipitação média anual inferior a 300 mm por ano e estiagens que duram às vezes mais de dez meses, dependendo da região (IBGE, 2021).

A evapotranspiração no semiárido brasileiro é fenômeno crucial para compreender as interações e funcionamento do clima nessa região. Através do processo combinado da evaporação da água, superfície do solo e transpiração das plantas, é desempenhado um importante papel para o ciclo da água e regulação.

Assim como abordado no tópico anterior sobre o balanço hídrico, devido às altas temperaturas e a falta de umidade do ar, a taxa de evapotranspiração do semiárido tende a ser elevada, isto é, a água disponível no solo e nos corpos d'água evapora rapidamente, o que contribui para a seca e escassez de água. Influenciando diretamente as atividades humanas como a agricultura e os recursos hídricos da região (ANA, 2024).

O clima controla o intemperismo diretamente, através da precipitação pluviométrica e da temperatura de uma região, e indiretamente, através dos tipos de vegetação que cobrem a paisagem (CREPANI, *et al.* 2001). Dessa forma, é necessário considerar que a ação climática é um fator importante da manutenção e preservação dessas áreas.

Como proposto na metodologia, utilizando a fórmula de Thorthwait e Matter (1955), foi aplicado o balanço hídrico as áreas da BHRC, utilizando-se de médias mensais de precipitação e evapotranspiração potencial (ETP).

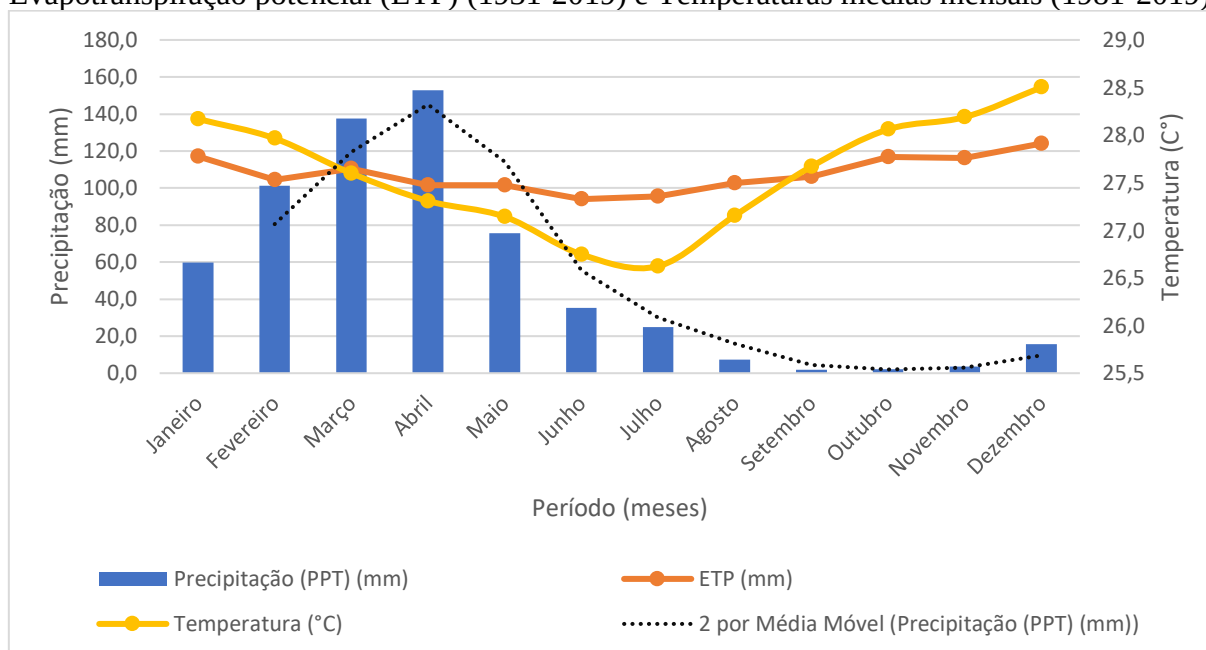
No gráfico 4, observa-se a partir dos dados o Climograma das 4 principais estações presentes na bacia do Rio do Carmo, com a soma média das principais estações operadas pela CPRM, com a fonte de dados da ANA, dentre a série histórica de 1931 a 2019. E os dados de temperatura são do INMET, das principais estações meteorológicas que compõem a bacia, dentre a série histórica de 1981 a 2019.

Ao estudar os dados de uma série histórica de 88 anos, observa-se o período de distribuição das chuvas principalmente entre os meses de fevereiro a maio, onde a precipitação

atinge médias acima dos 100 mm ou mais, com um volume de chuvas maior no mês de abril em 152,8 mm.

Já os meses de janeiro a maio atingem médias entre 60 a 80 mm, com os demais meses do ano entre 0 a 40 mm, com atenção aos meses de agosto a novembro onde o índice é menor que 10 mm, sendo o período mais seco o mês em setembro com 1,7 mm (Gráfico 5). No geral, para a precipitação (PPT) calcula-se uma média anual de 617,6 mm/ano.

Gráfico 5 - Climograma da BHRC com Médias mensais de Precipitação das Estações Pluviométricas de Açú, Augusto Severo, Fazenda Angicos e Upanema, com dados de Evapotranspiração potencial (ETP) (1931-2019) e Temperaturas médias mensais (1981-2019).



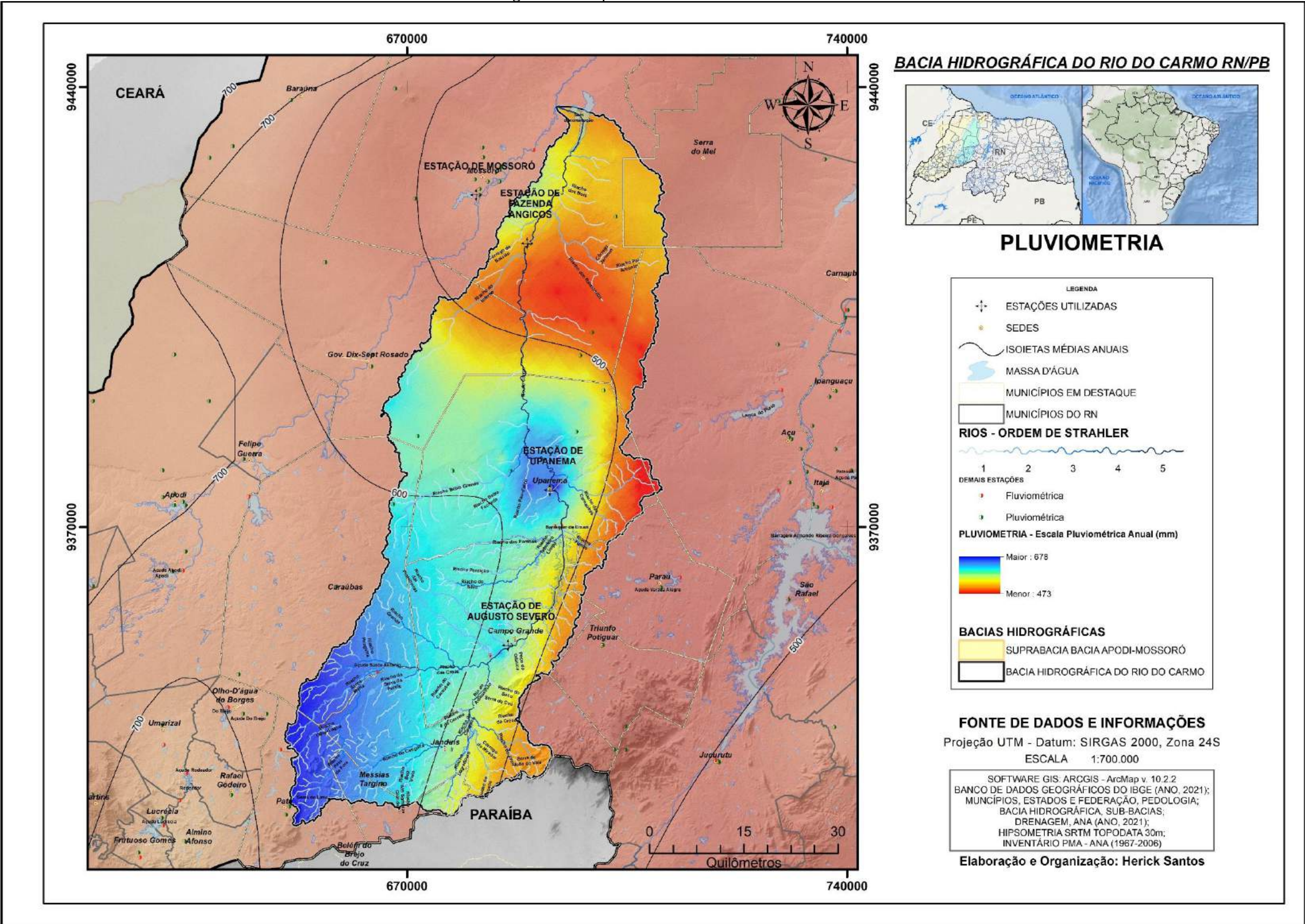
Fonte: ANA; INMET (2019); organizado por autor.

Nota-se que a relação com os dados de temperatura que possuem média anual de 27,6 °C, que de fundamental uso, através dos demais meses, nos apresenta uma baixa a partir do período chuvoso, e uma alta quando há menos chuvas, levando em consideração que as chuvas corroboram principalmente para umidade relativa do ar, onde quanto menor os índices de precipitação, maior será a temperatura do ar.

Isso nos favorece os resultados para os dados de evapotranspiração potencial (ETP), a partir do método utilizado, que possuem valores somados a 1.290,72 mm/ano, que ocorre de forma intensificada no mês de março e abril. Dessa maneira, mesmo havendo uma alta nos índices pluviométricos, não é capaz de haver um processo de saturação do solo, pois os meses subsequentes registram grandes retiradas.

Como se pode observar (Figura 22), segundo inventário PMA (Pluviometria Média Anual), neste caso, utilizou-se dados entre os anos de 1967 a 2006 disponibilizados pelo ANA, CPRM, com isoietas, em análises climáticas da precipitação dentro do período de 39 anos, para representar em um recorte espacial na bacia hidrográfica, a pluviometria anual ficou entre 678 mm, para as regiões no alto curso na bacia e 473 mm em área próximas ao baixo curso, da nascente em direção ao norte na foz do rio do Carmo, da qual consegue-se visualizar conforme a dinâmica hidrográfica e da geomorfologia fluvial, a partir dos elementos e fatores cartográficos dispostos no mapa.

Figura 22 - Mapa da Pluviometria da BHRC.



Fonte: IBGE 2021; ANA (1967 – 2006); elaborado por autor, 2023.

5.1.5. Análise da Pedologia

Segundo Moreira e Sene (2007), os conceitos relacionados ao solo variam de acordo com as atividades humanas em que está envolvido e com as diferentes disciplinas científicas que o estudam. Para a indústria da mineração, o solo é percebido como um material indesejado que precisa ser separado dos minerais explorados e posteriormente removido do local. Em contraste, áreas da ciência, como a ecologia, enxergam o solo como um sistema vivo composto por partículas minerais e matéria orgânica, proporcionando um ambiente propício para a diversidade de ecossistemas.

E como a pedogênese é o processo de origem dos solos, inicia-se com as modificações causadas nas rochas pelas intempéries atmosféricas, pela ação dos seres humanos e de outros organismos vivos (ação antrópica e biológica), entre outros fatores.

A partir destas questões, segundo os dados do IBGE, 2021, foram elaborados a definição e composição destes elementos por meio da Tabela 6.

Tabela 6 - Pedologia da BHRC.

Legenda Simplificada	Legenda Descritiva	Símbolos	Área (Km ²)	Percentual (%)
CXve - Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos	CXve11 - Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos + Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos	CXve11	1123,51	31,24%
GZn - Gleissolos Sálcos Sódicos	GZn1 - Gleissolos Sálcos Sódicos	GZn1	2,17	0,06%
LAd - Latossolos Amarelos Distróficos	LAd9 - Latossolos Amarelos Distróficos + Neossolos Quartzarênicos Órticos	LAd9	342,63	9,53%
LVAd - Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos	LVAd5 - Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	LVAd5	246,47	6,85%
PVAe - Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos	PVAe6 - Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos e PVAe9 - Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Latossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Neossolos Quartzarênicos Órticos	PVAe6 e PVAe9	464,42	12,91%
RRe - Neossolos Regolíticos Eutróficos	RRe2 - Neossolos Regolíticos Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos	RRe2	13,88	0,39%

SNo - Planossolos Nátricos Órticos	SNo2 - Planossolos Nátricos Órticos + Neossolos Litólicos Eutróficos	SNo2	267,91	7,45%
TCo - Luvisolos Crômicos Órticos	TCo10 - Luvisolos Crômicos Órticos + Neossolos Litólicos Eutróficos + Planossolos Nátricos Órticos	TCo10	1135,85	31,58%
		Total	3596,85	100,00%

Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

De forma geral, a bacia possui em maior número dois tipos de solos, seriam os Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos, que são formados a partir da junção dos Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos + Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos, representando uma área total de 31,24% em 1123,51 km². E os Luvisolos Crômicos Órticos, formados a partir de Luvisolos Crômicos Órticos + Neossolos Litólicos Eutróficos + Planossolos Nátricos Órticos, com 1135,85 km² de área representada por 31,58%, sendo este o tipo de solo mais abundante na BHRC.

Segundo os dados do CPRM (2010), os Baixos Platôs geralmente repousam sobre rochas como calcários, calcarenitos, folhelhos e calcilutitos da Formação Jandaíra.

Os rebordos erosivos, por sua vez, estão sendo erodidos principalmente sob arenitos e siltitos da Formação Açu, que está abaixo da Formação Jandaíra. Nessas áreas, predominam solos espessos de alta fertilidade natural e grande potencial agrícola, devido à presença predominante de rochas carbonáticas, como Cambissolos Háplicos estróficos (CPRM, 2010).

Os Gleissolos Sálcos Sódicos representam somente 2,17 km² do território sendo 0,06%. Esses solos são típicos de regiões sujeitas a alagamento, como margens de rios, ilhas, grandes planícies e lagoas, apresentando problemas de aeração e drenagem deficientes como resultado. Devido à redução de ferro, eles exibem tonalidades acinzentadas ou esverdeadas.

Latossolos Amarelos Distróficos é a formação dos Latossolos Amarelos Distróficos + Neossolos Quartzarênicos Órticos com 342,63 km² com 9,53% da área.

Para os latossolos, as variações de temperatura entre o dia e a noite, por exemplo, agiram sobre as rochas, fragmentando-as em partes menores e a água das chuvas, a partir de uma ação pluvial e fluvial, a partir das substâncias e reações químicas, reagem com os minerais e os transporta a partir de processos erosivos. Quando já existe por exemplo uma camada superficial das rochas degradadas, surge a vegetação e os microrganismos que agem intensamente na formação dos solos (MOREIRA, SENE, 2007).

Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, com formação de Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Latossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Neossolos Quartzarênicos Órticos, possui 464,42 km² e 12,91% da área da bacia.

A predominância é de solos espessos e com baixa fertilidade natural, como Latossolos Amarelos distróficos, Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos e Neossolos Quartzarênicos. Esses solos, planos e bem drenados, em regiões de clima úmido, são adequados para o cultivo extensivo de cana-de-açúcar, principalmente no sul do estado (CPRM 2010).

Os neossolos Regolíticos Eutróficos com formação de Neossolos Regolíticos Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos possuem 13,88 km² da área sendo somente 0,39%. Por último os Neossolos Regolíticos Eutróficos com formação de Neossolos Regolíticos Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos com 267,91 km² e 7,45% da área total.

Segundo CPRM (2010), nessas áreas, os solos são geralmente rasos, às vezes com presença de pedras, e apresentam uma fertilidade natural moderada a boa. Tipos de solo comuns incluem Luvisolos Crômicos, Neossolos Litólicos eutróficos, além de Planossolos Nátricos, Neossolos Regolíticos, Planossolos Hidromórficos eutróficos, e afloramentos de rocha (Lajedos). Essas áreas são utilizadas principalmente para pecuária extensiva e agricultura de subsistência, com baixa produtividade (EMPRAPA, 2022).

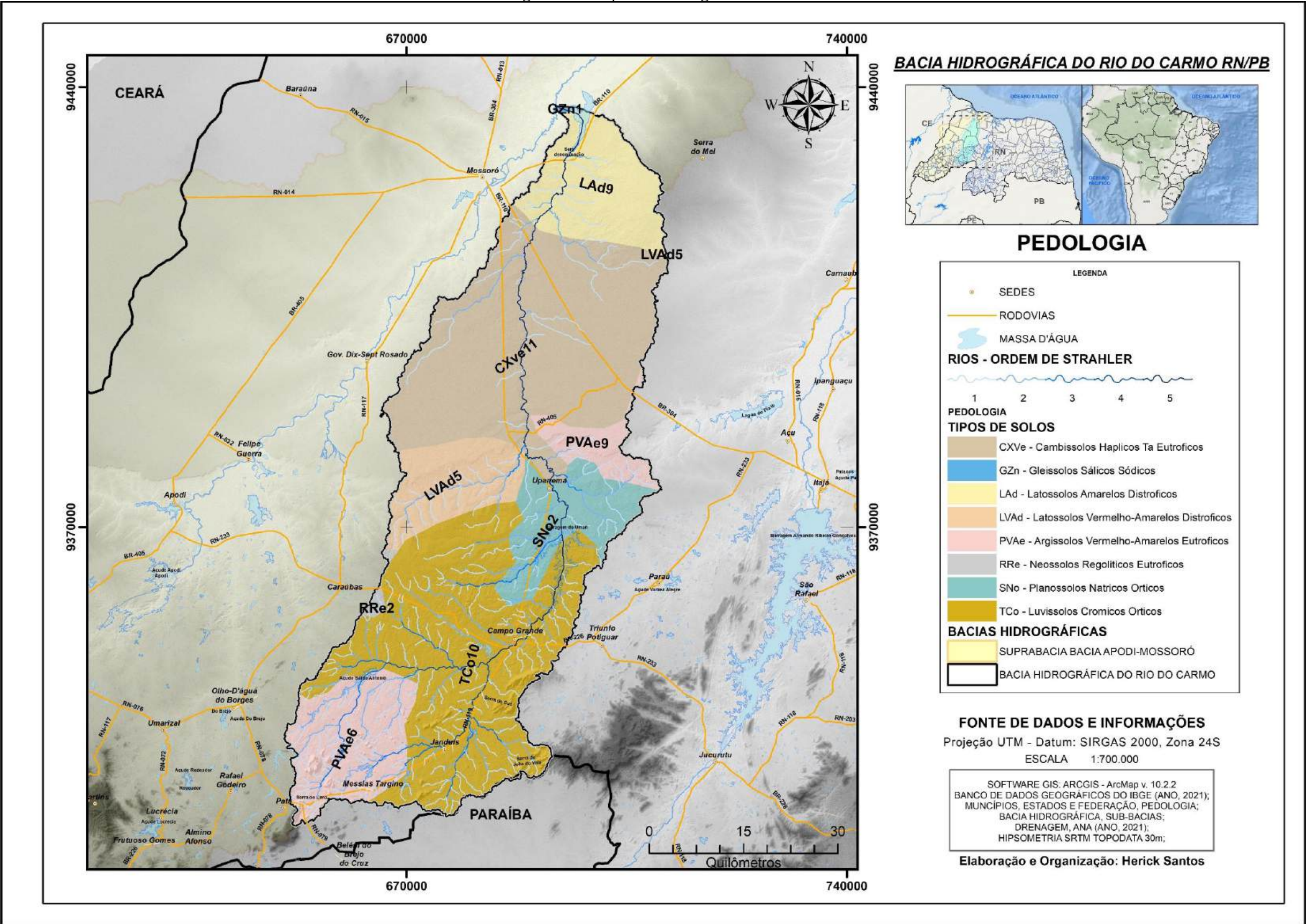
Nesse sentido, torna-se fundamental a compreensão de como estão pré-definidos os tipos de solo ou a Pedologia da BHRC.

Na perspectiva da Geografia, especialmente da pedologia, o solo é considerado uma obra natural integrada à paisagem, fornecendo suporte para o crescimento das plantas que nele se desenvolvem. Cada abordagem destaca uma faceta diferente do solo, dependendo das necessidades e interesses das respectivas disciplinas e atividades humanas (CHRISTOFOLETTI, 1980, MOREIRA e SENE, 2007, EMPRABA, 2022).

Para localização destes elementos, foi elaborado o Mapa da Pedologia, Figura 23, onde pode observar a distinção dos tipos de solos, que compreendem-se em todo território da extensão da bacia hidrográfica.

Percebe-se que os solos, de forma geral, são férteis, em especial nas áreas da bacia sedimentar, o que evidencia a quantidade principalmente de atividades agrícolas e agropecuárias para essas áreas. Configurando em uma boa distribuição a partir das áreas estudadas.

Figura 23 - Mapa da Pedologia da BHRC.



Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

5.1.6. Análise da Vegetação

Na Geografia, a relação da Ecodinâmica de Tricart (1977) com a vegetação é bastante evidente, pelo fato de concentrar-se em uma análise dinâmica e geossistêmica. Afinal, a Cobertura Vegetal, funciona como uma camada protetora do solo, e sua diminuição ou comprometimento resulta em grandes perdas para o meio ambiente de maneira geral.

Assim, a intensidade dos processos erosivos constantes nas áreas susceptíveis a degradação por meio das atividades humanas, é um ponto a ser levado em consideração, pois a vegetação é um forte indicador das condições ecológicas de uma região, se afetada, as interações com estes processos serão diretamente influenciadas.

A influência humana em atividades como o desmatamento, agricultura, agropecuária, e a expansão urbana (urbanização), com o uso da terra, tem impactos significativos.

Para isto, considerou-se a utilização da definição dos tipos de vegetação dentro do Bioma da Caatinga, a partir da classificação do IBGE, 2021. Ao observar o quadro 15, consegue-se distinguir qual a ocupação de cada respectiva classe e tipo de domínio conforme a cobertura vegetal das áreas da BHRC.

A classificação de um bioma é determinada pela interação complexa de várias variáveis físicas em uma área geográfica específica. Essa categorização considera principalmente fatores biológicos e geográficos, como clima, geomorfologia, tipos de vegetação, hidrografia, características geológicas e composição do solo (IBGE, 2021).

Quadro 15 - Cobertura Vegetal e Classificação das Áreas da BHRC.

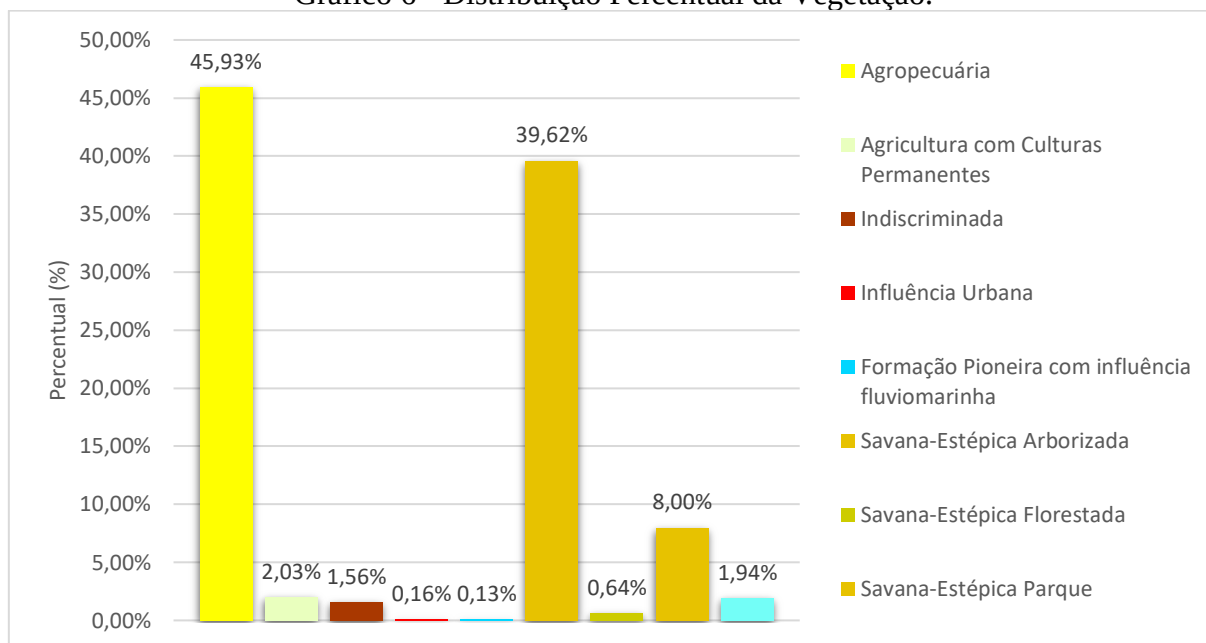
Classe	Área (Km²)	%	Tipo	Legenda	Área (Km²)	%
Área Antrópica Dominante	1786,97	49,68%	Agropecuária	3Ag	1651,96	45,93%
			Agricultura com Culturas Permanentes	3Acp	73,16	2,03%
			Indiscriminada	3Ai	56,17	1,56%
			Influência Urbana	3lu	5,67	0,16%
Vegetação Natural Dominante	1740,21	48,38%	Formação Pioneira com influência fluviomarinha	1Pf	4,52	0,13%
			Savana-Estépica Arborizada	1Ta	1425,14	39,62%
			Savana-Estépica Florestada	1Td	22,92	0,64%
			Savana-Estépica Parque	1Tp	287,62	8,00%
Massa d'água	69,67	1,94%	Corpo d'água Continental	5	69,67	1,94%
TOTAL	3596,85	100,00%		TOTAL	3596,85	100,00%

Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

Observa-se através do Gráfico 6, a distribuição percentual da Vegetação. A partir das primeiras observações levando em consideração o montante de área de cada classe dominante, percebe-se que a Área Antrópica Dominantes com 49,68% e 1786,97 km², já supera o montante

da Vegetação Natural Dominante representando 48,38% equivalente a 1740,21 km², o que pode confirmar o fato de que o Geossistema já foi devidamente impactado pelas ações humanas, onde a massa d'água na superfície, subdividida em corpos d'água continentais, somam 69,67 km² e 1,94%, onde pode-se incluir rios, lagoas e reservatórios de água, de maneira geral.

Gráfico 6 - Distribuição Percentual da Vegetação.



Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

Pode-se compreender as áreas antropizadas subdivididas em 4 tipos, considerando a Agropecuária, representando a maior parte das áreas antropizadas, com 1651,96 km² em 45,93% da área, seguida de Agricultura com Culturas Permanentes com 73,16 e 2,03%, considerando estas como a principal atividade comprometedora do ambiente da BHRC.

Esse processo de remoção da vegetação próximas ao curso dos rios, considerado com áreas preservação permanente, pode ser um impacto severo especialmente para matas ciliares.

Considera-se Indiscriminada com 56,67 km² em 1,56%, o que poderia ser compreendida como áreas que não foram passíveis de identificação, mas consolidaram a vegetação da região. Por fim, a Influência Urbana, onde pode-se considerar as áreas presentes com urbanização, representando somente 0,16%, sendo menos comprometedora para manutenção da vegetação nativa local.

Para as áreas da Vegetação Natural Dominante, considera-se a subdivisão também em 4 tipos de áreas diferentes, onde a Savana-Estépica Arborizada aparece sendo a maior vegetação

da área da bacia, com 39,62% das áreas, presente principalmente em regiões do bioma da Caatinga.

Este conjunto de formação apresenta uma clara estrutura bifásica: em sua porção superior, há uma distribuição esparsa de vegetação arbustiva e arbórea, tipicamente com características semelhantes às da Savana Estépica Florestada, presente também nesta região da BHRC, em menor quantidade. Enquanto isso, na camada inferior, observa-se um componente gramíneo-lenhoso de significativa relevância fitofisionômica. (IBGE, 2012).

Segundo IBGE, 2012, como citado anteriormente, a Savana-Estépica Florestada com 22,92 km² e 0,64%, este subgrupo de formação é essencialmente organizado em dois estratos distintos: o superior, caracterizado pela presença predominante de nanofanerófitas que perdem suas folhas periodicamente.

Neste estrato, é comum observar uma densidade variável dessas plantas, muitas vezes acompanhadas por troncos robustos, amplamente ramificados e dotados de espinhos ou acúleos. O estrato inferior, por sua vez, consiste principalmente em vegetação gramíneo-lenhosa, geralmente descontínua e com pouca expressão fisionômica.

Em sequência, a segunda maior parcela dos tipos de vegetação pode ser caracterizada pela Savana-Estépica Parque – 1Tp, o termo Parque (de Parkland) foi introduzido na Fitogeografia por Tansley e Chipp (1926) para designar uma fisionomia do Chaco Argentino (IBGE, 2012).

As características fisionômicas distintivas deste subgrupo de formação se manifestam através da presença de arbustos e árvores de pequeno porte, frequentemente pertencentes à mesma espécie, dispostos de maneira bastante espaçada, criando a impressão de um plantio deliberado.

Este cenário assemelha-se a uma organização pseudo-ordenada de plantas lenhosas sobre um tapete denso, predominantemente composto por herbáceas e gramíneas e durante a estação das chuvas, essas áreas são propensas a alagamentos devido à sua limitada capacidade de drenagem dos solos dessas áreas (IBGE, 2012).

Na depressão Sertaneja, conforme a classificação geomorfológica, esse tipo de Vegetação representa uma área de 280,29 km² com 18% da área (IBGE, 2021).

Considera-se áreas que estão próximas aos rios, em especial o curso principal do Rio do Carmo, com baixo domínio da vegetação natural, predominando as áreas antropizadas. Dessa forma, torna-se importante ressaltar que há uma perda considerável da mata ciliar desses rios e corpos hídricos. E isso contribui para o assoreamento dos rios, conseqüentemente, há a perda

da biodiversidade local, e degradação do Geossistema, estando passíveis de impactos os recursos naturais e a segurança hídrica local em alerta.

As regiões semiáridas são caracterizadas por uma crise climática sazonal que afeta todos os elementos que compõem seu sistema físico-natural e humano. Com a intervenção humana nesses ambientes, é inevitável lidar com as pressões que suas atividades, diretas ou indiretas, exercem sobre essa área (ALVES, 2007). Podendo desencadear em perdas consideráveis para sistemas ambientais, devido a fragilidade, e susceptibilidade aos impactos e processos erosivos.

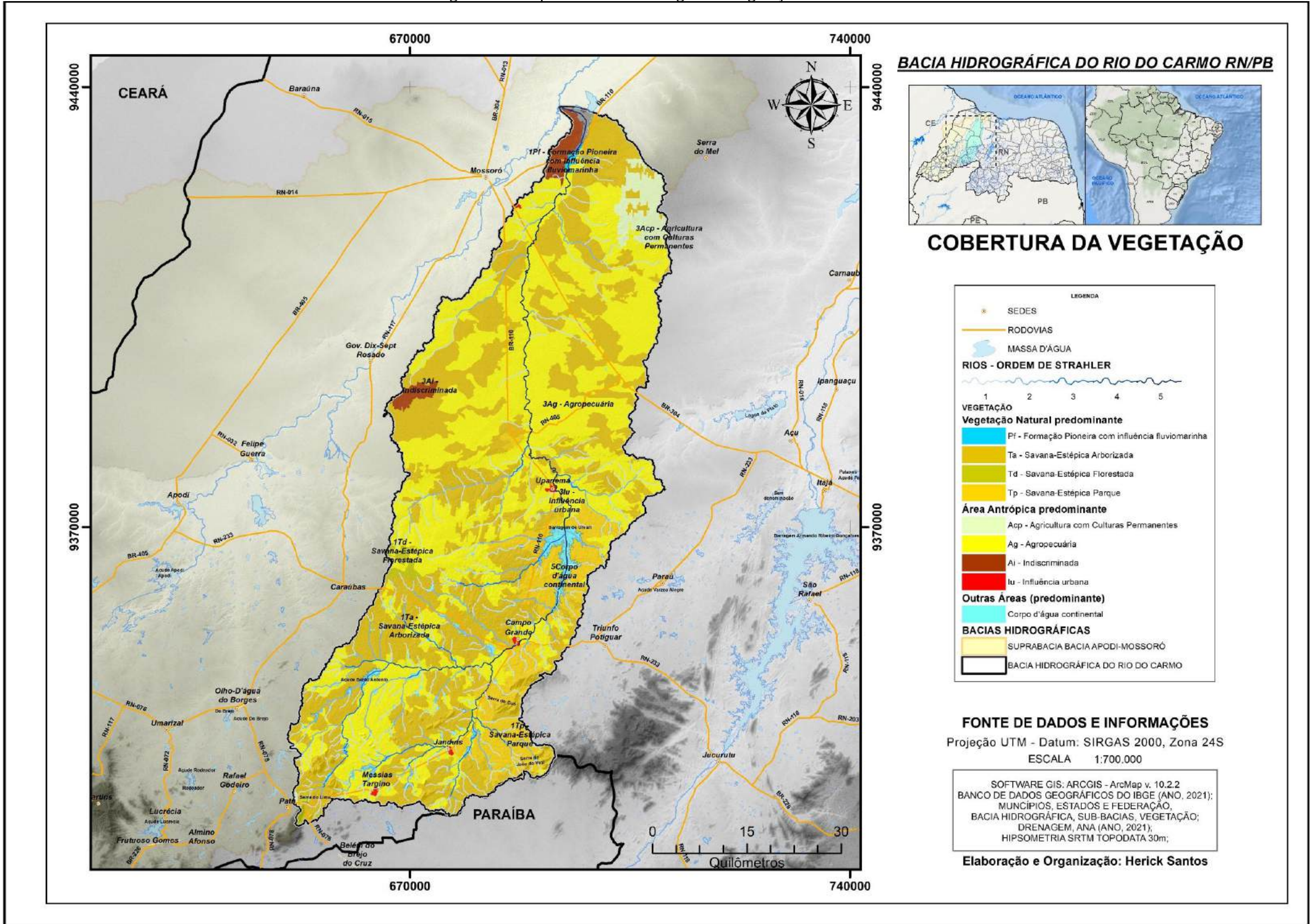
A dinâmica hídrica da região propicia variações no solo, resultando na formação de um determinado tipo de vegetação.

Essas variações são predominantemente influenciadas pelo clima, que define o regime hidrológico da área e os elevados níveis de evapotranspiração. A bacia hidrográfica é composta por uma diversidade de elementos, como rios de fluxo contínuo e intermitente, nascentes de água, lagos, açudes e córregos que aparecem somente durante o período chuvoso e desaparecem na estação seca (CORTEZ et al., 2013).

Devido à variação na disponibilidade hídrica nas regiões semiáridas do Brasil, a vegetação da Caatinga é altamente sazonal. Essa particularidade torna desafiante a tarefa de categorizar seus diferentes tipos de paisagem com o objetivo de criar mapeamentos precisos (SILVA e CRUZ, 2018).

Em análise da fitogeografia, a localização das unidades da Cobertura Vegetal se encontra georreferenciadas através do Mapa da Vegetação (Figura 24) distribuídas de forma variada no território da BHRC, de acordo com seus elementos geográficos.

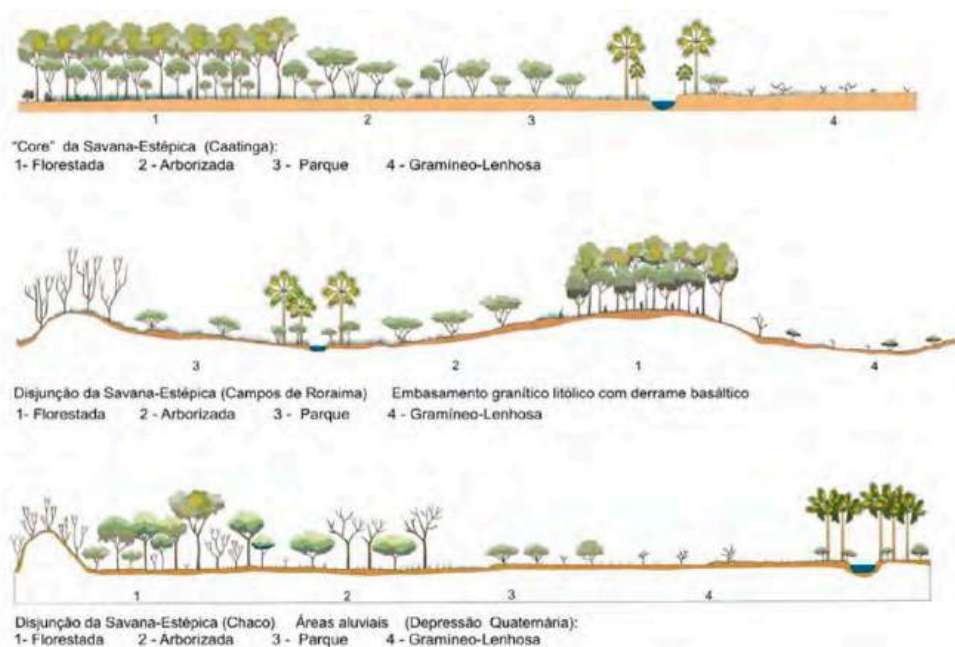
Figura 24 - Mapa da Cobertura Vegetal – Vegetação da BHRC.



Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

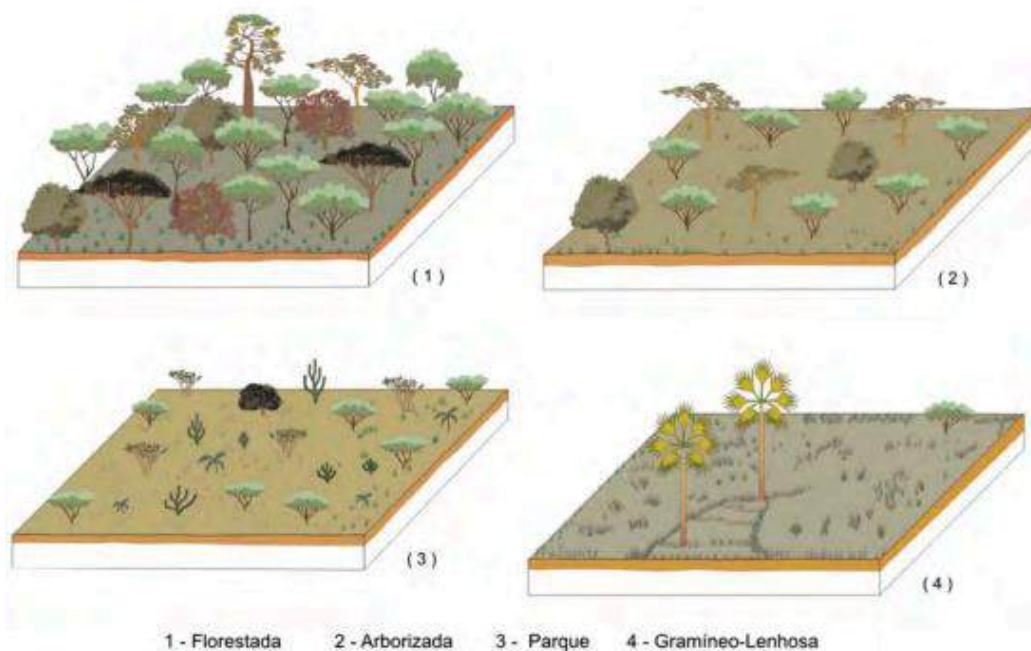
Já nas Figuras 25 e 26, segundo perfis esquemáticos da Savana-Estépica e os Blocos-diagramas das Fisionomias ecológicas, consegue-se ter uma representação da realidade através do esquema mostrado e discutido conforme percentual de áreas.

Figura 25 - Perfis esquemáticos da Savana-Estépica.



Fonte: Veloso, Rangel Filho e Lima (1991); IBGE, 2012.

Figura 26 - Blocos-diagramas das Fisionomias Ecológicas da Savana-Estépica

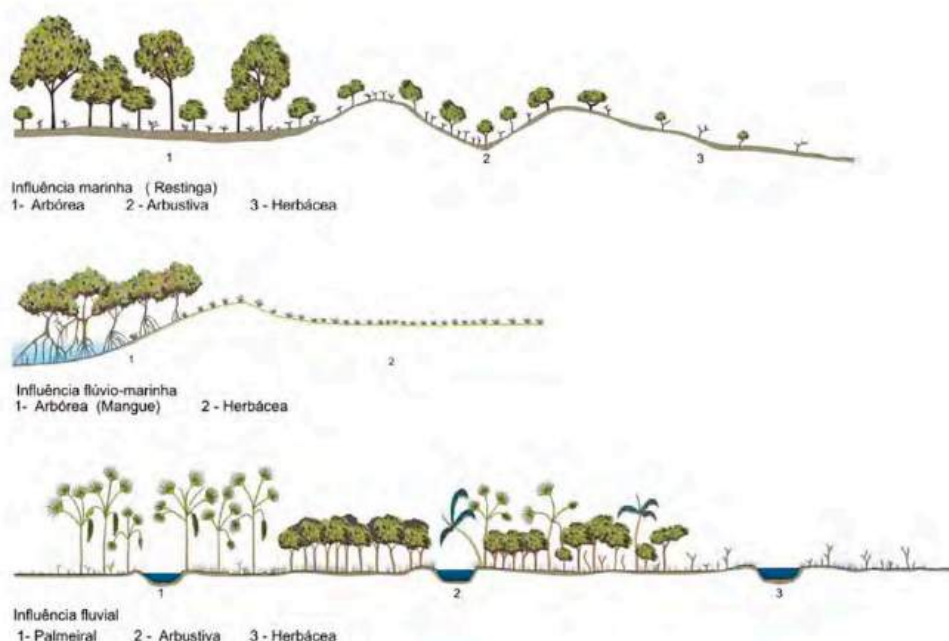


Fonte: Veloso, Rangel Filho e Lima (1991); IBGE, 2012.

Por último a Formação Pioneira com influência fluviomarinha – 1Pf, podem ser compreendidos como Manguezais e Campos Salinos, O Manguezal é a comunidade microfanerófitica de ambiente salobro, situada na desembocadura de rios e regatos no mar, onde, nos solos limosos (manguitos), cresce uma vegetação especializada, adaptada à salinidade das águas, cuja as espécies variam conforme a latitude (IBGE, 2012).

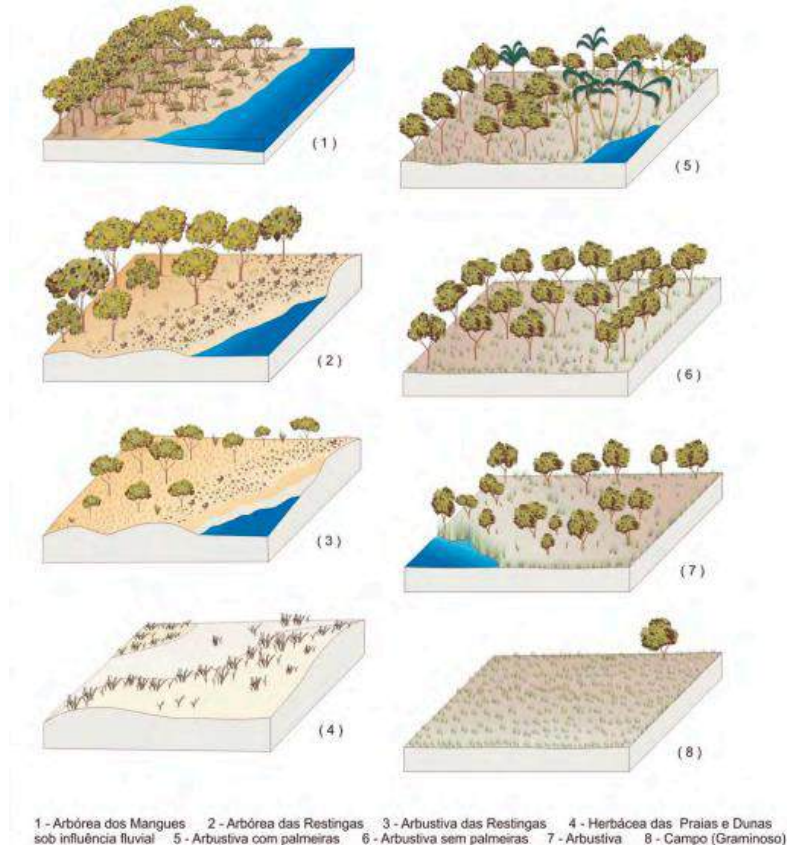
Estão presente em 4,52 km² e 0,13% do total de área da BHRC, presente especialmente nas áreas do Litoral Setentrional Nordeste, representando 17% da área (IBGE, 2021). A representação dos Perfis esquemáticos e Blocos-diagramas das Formações Pioneiras sob Influência Marinha, Fluviomarinha e Fluvial, são representadas através das Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Perfis esquemáticos das Formações Pioneiras sob Influência Marinha, Fluviomarinha e Fluvial.



Fonte: Veloso, Rangel Filho e Lima (1991); IBGE, 2012.

Figura 28 - Blocos-diagramas das Fisionomias Ecológicas das Formações Pioneiras sob Influência Marinha, Fluviomarinha e Fluvial



Fonte: Veloso, Rangel Filho e Lima (1991); IBGE, 2012.

5.1.7. Análise do Uso e Cobertura da Terra

A análise territorial através do uso e cobertura da terra de uma região, é feita baseando-se nas atividades antrópicas que estão presentes nas áreas, e como elas desencadearam a formação de cada classe de uso, baseando-se nas áreas que sofreram antropização como Agropecuária ou Áreas antrópicas agrícolas, e Áreas não vegetadas de forma geral, com exceção das Praias e Dunas, que em contrapartida, também estão presentes as áreas que se mantiveram naturais, como a formação de áreas de Floresta ou Vegetação Nativa ou Áreas de Formação Natural não Florestal.

Além de Corpos d'água, que são formados a partir dos divisores naturais, que seria o relevo, com a ação do ciclo da água e os processos de drenagem que trabalham na morfologia dos rios, proporcionando o que se concebe como uma bacia hidrográfica, porém, neste caso, também é considerado atividades humanas que também usufruem dos recursos hídricos, como Aquicultura e Salinas por exemplo. A partir dessa classificação, foram utilizados os dados do MapBiomas do ano de 2021 no Quadro 16.

Quadro 16 - Uso e Ocupação da Terra da BHRC.

Uso e Cobertura da Terra da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo - 2021					
Nível I - classe	Área (km ²)	Percentual	Nível II - subclasse	Área (km ²)	Percentual
1- Áreas de Floresta ou Vegetação Nativa	2360,63	65,63%	Formação de Savana	2359,28	65,59%
			Formação Florestal	1,33	0,04%
			Restinga Arbórea	0,02	0,001%
2. Áreas de Formação Natural não Florestal	6,90	0,19%	Afloramento rochoso	6,88	0,19%
			Restinga Herbácea	0,01	0,0004%
3. Agropecuária ou Áreas antrópicas agrícolas	1145,80	31,86%	Pastagem (Formação Herbácea)	16,59	0,46%
			Mosaico de Agricultura e Pastagem	834,68	23,21%
			Mosaico de colheitas	157,07	4,37%
			Outras Culturas Perenes	22,17	0,62%
			Pasto	115,28	3,21%
4. Área não vegetada	30,81	0,86%	Área Urbanizada	7,12	0,20%
			Outra Área Não Vegetada	19,35	0,54%
			Praia e Duna	4,34	0,12%
5. Corpo D'água	52,71	1,47%	Aquicultura	3,65	0,10%
			Rio e Lago	48,96	1,36%
			Salina	0,10	0,003%
Total	3596,85	100%	Total	3596,85	100%

Fonte: MapBiomas, 2021. Organizado por autor, 2023.

Pode-se considerar através das áreas de Nível I, um aglomerado de classes do Nível II, que seriam as subclasses de cada domínio da cobertura da terra.

Na Classe 1 – As áreas de Floresta ou Vegetação Nativa compreendem a maior área de 2360,63 km² e 65,63% do percentual, que segundo os dados, diferente da abordagem na Vegetação Nativa, temos uma maior área considerada ainda em seu aspecto natural, e a maior área seria a Formação de Savana com 65,59%, devido principalmente as áreas da BHRC se encontrarem no bioma da Caatinga e a presença de um clima semiárido em que esse tipo de vegetação é predominante. As demais Formação Florestal com uma pequena parcela de 0,04%, e Restinga Arbórea com 0,001%.

Na Classe 2 – Áreas de Formação Natural não Florestal com 6,90 km² de extensão com 0,19% de área, representam uma pequena quantidade de áreas com esse domínio em subclasses de Afloramento rochoso de 6,88 km² que em números arredondados dariam 0,19%, já que a Restinga Herbácea representaria uma parcela praticamente nula de 0,1 km² e 0,0004%.

A Classe 3 – Agropecuária ou Áreas antrópicas agrícolas, a segunda maior parcela com 1145,80 km² de área com 31,86% de áreas antropizadas e de uso agropecuário ou agrícola, levando em consideração as Subclasses, com Pastagem (Formação Herbácea) de 16,59 km² com 0,46% da área, mosaico de Agricultura e Pastagem com 834,68 km² e 23,21% da área, representada como a maior parcela na Subclasse, Mosaico de Colheitas com 157,07 km² e 4,37% das áreas. Outras culturas Perenes com 22,17 km² em 0,62% da área, e Pasto com 115,28 km² e 3,21% do total das áreas.

Na Classe 4 – Área não vegetada, temos 30,81 km² e 0,86% das áreas da bacia, representadas através das Subclasses de Nível II com Área Urbanizada em 7,12 km² sendo 0,20%, outra área não vegetada com 19,35 km² e 0,54%, Praia e Duna com 4,34 km² e 0,12%, estando principalmente ao Norte próximo as áreas dos Oceanos.

Que neste caso, estariam representados principalmente na Classe 5 – Corpo D'água, com 52,71 km² de extensão e 1,47%, representados através das atividades antrópicas da Aquicultura com 3,65 km² em pequenas parcelas de 0,10%, juntamente com a Salina em 0,10 km² e 0,0003%, em maior parte, Rio e Lago, com 48,96 km² e 1,36% das áreas.

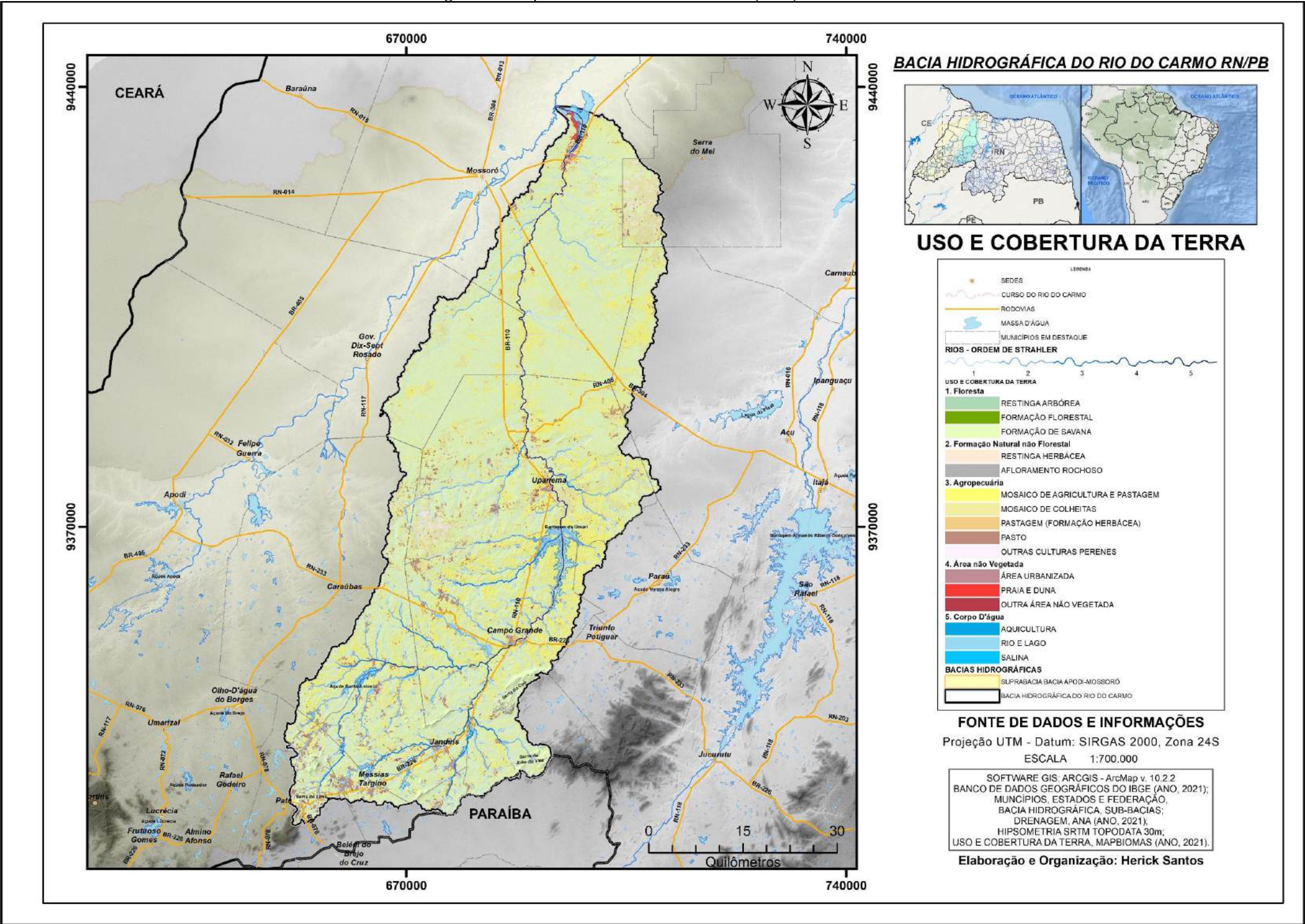
Segundo Oliveira e Mattos (2014) a cobertura vegetal desempenha um papel crucial na estabilidade da superfície, oferecendo proteção contra processos erosivos intensos, como dissecação acelerada e movimentos de massa, como voçorocamentos. Sua presença indica um controle ecológico mais forte na área, sugerindo uma influência positiva no controle dos processos pedogenéticos e, conseqüentemente, na redução da vulnerabilidade ambiental. O mapeamento da cobertura e uso da terra identifica claramente as áreas florestadas, independentemente de sua densidade, sendo, portanto, agrupadas sob esse tema. Assim, a vegetação é essencialmente considerada como uma forma de cobertura da terra.

Todas as classes estão representadas na Figura 29, que apresenta o Mapa do Uso e Cobertura da Terra na BHRC.

Consegue-se observar, que a uma parte da atividade antrópica se concentra próximo aos Corpos d'água, caracterizando a importância de uma boa gestão dos recursos hídricos, para preservação das áreas susceptíveis a essas atividades.

Entretanto, é praticamente impossível fazer uma distinção dos aspectos, pois o uso e ocupação da terra, mistura vários aspectos dentro do território, e suas áreas são utilizadas em diferentes regiões e localidades. De toda forma, através do mapa, percebe-se que o substrato vegetal é maior que ação antrópica, o que confirma através das análises nas tabelas.

Figura 29 - Mapa do Uso e Cobertura da Terra (2021) na BHRC.



Fonte: IBGE, 2021; MAPBIOMAS, 2021; elaborado por autor, 2023.

5.2. Análise das Vulnerabilidades da BHRC

Como descrito na metodologia, a partir das classes utilizadas para os mapas, contabilizando as unidades da paisagem com a Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso e Ocupação da Terra, foram obtidos resultados para confirmação dos parâmetros utilizados, para evidenciar as áreas de vulnerabilidade da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo.

Para os mapas, também serão geolocalizados os Sistemas Ambientais utilizados para pesquisa que serão abordados de forma mais ampla no capítulo seguinte.

Para conceituar, de acordo com os estudos de Tricart (1977), Crepani (2001) e Grigio (2003), a vulnerabilidade natural e a vulnerabilidade ambiental são conceitos relacionados, mas distintos, que se referem à capacidade de um ambiente ou sistema natural de ser afetado por determinados eventos, pressões e trocas de energia, a partir da ecodinâmica.

Vulnerabilidade Natural refere-se à susceptibilidade intrínseca de uma região, ecossistema ou sistema natural a determinados eventos ou processos naturais, como secas, inundações, terremotos, entre outros. Relacionada às características físicas e geográficas de uma área, como sua topografia, clima, geologia e hidrologia, que influenciam a probabilidade e a magnitude dos eventos naturais.

Por exemplo, uma região localizada em uma área de falhas geológicas ativas pode ser considerada naturalmente mais vulnerável a terremotos do que uma região localizada em uma área estável geologicamente.

Já a Vulnerabilidade Ambiental, refere-se à susceptibilidade de um ambiente ou sistema natural a ser impactado negativamente por atividades humanas ou pressões externas, como poluição, desmatamento, urbanização descontrolada, mudanças climáticas, entre outros.

A Vulnerabilidade Ambiental está relacionada à capacidade de um ambiente de resistir ou se recuperar de impactos humanos ou antrópicos. Por exemplo, uma floresta tropical pode ser ambientalmente vulnerável ao desmatamento, enquanto um ecossistema aquático pode ser ambientalmente vulnerável à poluição por produtos químicos.

Em resumo, a vulnerabilidade natural está relacionada à susceptibilidade de um ambiente às forças naturais, enquanto a vulnerabilidade ambiental está relacionada à susceptibilidade desse ambiente às atividades humanas e às pressões externas resultantes delas. Ambos os conceitos são importantes para entender os desafios de conservação, manejo de recursos naturais e adaptação às mudanças ambientais (TRICART, 1977; CREPANI, 2001 e GRIGIO, 2003).

5.2.1. Vulnerabilidade Natural

No Quadro 17, por meio da análise da Vulnerabilidade Natural, os resultados finais podem considerar de maneira geral, que a Vulnerabilidade Natural é igual a Média, ou seja, de acordo com a Ecodinâmica, há um equilíbrio entre a Pedogênese e Morfogênese, nos processos de trocas de energia na bacia.

A leitura dos aspectos será do maior quantitativo de área para o menor, evidenciando em larga escala as áreas mais ou menos afetadas pelos processos pedogenéticos e morfogenéticos.

Quadro 17 - Análise da Vulnerabilidade Natural da BHRC.

Vulnerabilidade Natural da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo			
Classe	Área (Km²)	Percentual	Média de Intervalo
Muito Baixa	34,80	0,97%	Prevalece a Pedogênese - Muito Baixo - Estável
Baixa	564,44	15,69%	Prevalece a Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	1948,79	54,18%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	1009,59	28,07%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Muito Alta	12,96	0,36%	Prevalece a Morfogênese - Vulnerável
Sem Classificação	26,26	0,73%	
Total	3596,85	100%	

Fonte: Autor, 2023.

Para análise dos dados, assim, considerou em sua maioria com 1948,79 km² de áreas, representando em 54,18%, representando a classe Média. Onde atesta que para Vulnerabilidade Natural da bacia, houve um equilíbrio maior nas áreas, estando ela medianamente estável e vulnerável, em sua maioria, levando em consideração que mais da metade está nesta condição.

Em segundo plano, a partir dos processos estudados, pode-se considerar que a Vulnerabilidade Natural também está com um alto valor se aproximando da morfogênese, e os cálculos equacionais consideraram 28,07% das áreas em 1009,59 km², com a classe de Alta Vulnerabilidade, estando em quantitativo de áreas, moderadamente vulnerável aos processos erosivos do solo.

Em terceiro lugar, pode-se considerar as áreas de Baixa Vulnerabilidade, onde prevalece a pedogênese, sendo moderadamente estável com 564,44 km² em 15,69% das áreas. Considerando que os processos considerados menos erosivos, ou que se aproximam dos processos formadores do solo, estão recobrando a paisagem, evidenciando a pedogênese, além

dessas áreas, em comparação as demais, se deve ao fato da maior parte do substrato vegetal já estar comprometido.

Da mesma maneira, na classe Muito Baixa, onde prevalece a pedogênese, os processos que atingem a estabilização estão em 34,80 km² com 0,97% das áreas, considerando uma pequena parcela das áreas.

Do contrário, para classe Muito Alta, foram considerados somente 12,96 km² e 0,36% de áreas vulneráveis, prevalecendo a morfogênese, que nos leva a compreensão de que poucas áreas estariam em estado vulnerável, ou mais crítico, aos processos morfogenéticos.

Já as áreas consideradas Sem Classificação, para pesquisa, subentendem-se que não foram possíveis medir, com 26,26 km² e 0,73%. Entende-se que áreas Sem Classificação, significam que o cálculo não foi possível identificar ou mensurar os valores, pois não se enquadraram no mínimo de 1,0 ponto, conforme a metodologia.

Por meio das análises, considerou que as áreas mais utilizadas ou vulneráveis, seriam os Tabuleiros, a partir do meio ao norte da Bacia Sedimentar, nos Tabuleiros da Chapada do Apodi e Superfície Rebaixada do Vale do Açu, no baixo curso, levando em consideração os aspectos utilizados, mesmo com um relevo mais plano, se acentua a utilização das áreas para atividades antrópicas, que ao remover o substrato ou cobertura vegetal, seriam as principais responsáveis pelo maior quantitativo de áreas em média ou alta vulnerabilidade.

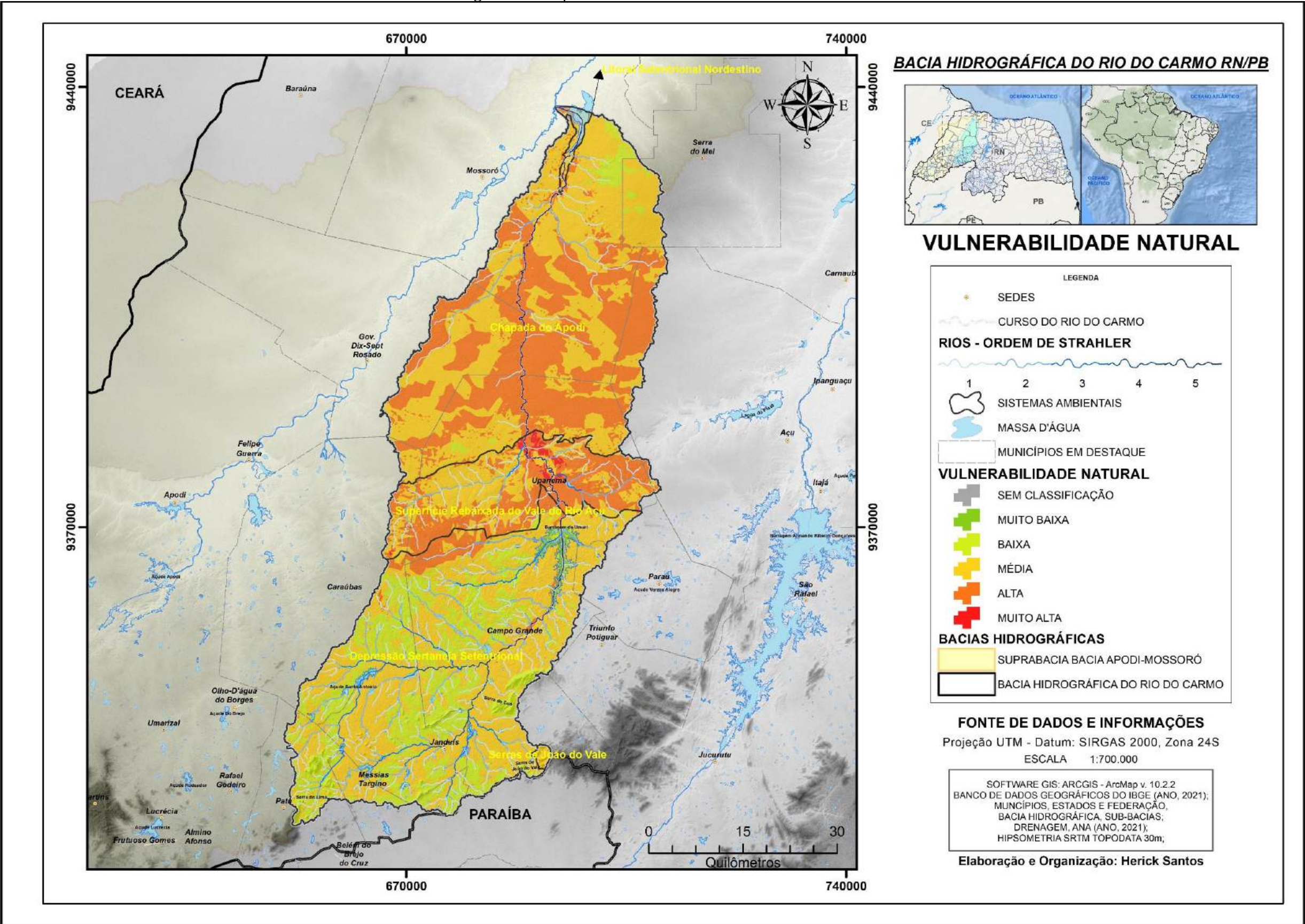
Já mais ao sul no substrato do Embasamento Cristalino, na Depressão Sertaneja, mesmo tendo uma resposta maior aos processos erosivos a partir do grau de inclinação ou declividade do relevo, no alto curso, tendo as rochas com processos de denudação mais acentuados, o quantitativo de corpos hídricos e uma maior conservação da vegetação, poderá ter sido um fator que desencadeou menos áreas vulneráveis ou que se aproximariam dos processos de formação.

Pela análise das classes e distribuição no mapa, percebe-se por exemplo que a vulnerabilidade da classificação muito baixa é pouco visível.

Na Figura 30, com o Mapa da Vulnerabilidade Natural, pode-se observar onde estão localizadas as áreas com menor e maior vulnerabilidade. A partir das cores destacadas no Quadro 17, utilizou-se a mesma classificação para as áreas no mapa.

Atenuando-se principalmente as áreas com Vulnerabilidade Média e Alta, próximas as áreas de atividade agrícola e agropecuária, onde pode-se observar através das cores descritas na legenda.

Figura 30 - Mapa da Vulnerabilidade Natural da BHRC.



Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

A vulnerabilidade da classificação de baixa, já se consegue visualizar mais aspectos de sua variante, espalhadas principalmente ao Sul da bacia.

Na classe da vulnerabilidade média, considerou diversas áreas, e ficou de forma mais variada em toda bacia.

Para classe da vulnerabilidade alta, considerou principalmente em áreas de uso antrópico e agrícola, levando em consideração aspectos como o desmatamento dessas áreas e remoção do substrato vegetal.

Por fim, a classe muito alta, ficou especialmente localizada na superfície rebaixada, acima da barragem de Umari, em uma região mais central, com pouca visibilidade, devido a menor incidência das áreas.

5.2.2. Vulnerabilidade Ambiental

Para Vulnerabilidade Ambiental, considerou-se através dos processos metodológicos, diferente da vulnerabilidade natural, a utilização de alguns pesos para diferentes usos, de acordo com os métodos empregados, onde geraram os seguintes resultados (Quadro 18).

Quadro 18 - Análise da Vulnerabilidade Ambiental da BHRC.

Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio do Carmo			
Classe	Área (km²)	Percentual	Média de Intervalo
Muito Baixa	39,75	1,11%	Prevalece a Pedogênese - Muito Baixo - Estável
Baixa	1298,59	36,10%	Prevalece a Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	1138,96	31,67%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	761,28	21,17%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Muito Alta	331,63	9,22%	Prevalece a Morfogênese - Vulnerável
Sem Classificação	26,64	0,74%	
Total	3596,85	100%	

Fonte: Autor, 2023.

Da mesma maneira, a leitura dos aspectos será do maior quantitativo de área para o menor, evidenciando em larga escala as áreas mais ou menos afetadas pelos processos pedogenéticos e morfogenéticos.

De antemão, já se pode-se considerar que as áreas da Vulnerabilidade Ambiental foram mais distribuídas entre os percentuais em comparação a Vulnerabilidade Natural, nota-se que em maior número, segundo a Vulnerabilidade Ambiental foram consideradas de Baixa

Vulnerabilidade, onde prevalece a pedogênese, sendo considerada moderadamente estável, representando 1298,59 km² em 36,10%.

Em segundo plano a Vulnerabilidade Ambiental considerada Média com 1138,96 km² e 31,67% das áreas, onde há equilíbrio entre os processos pedogenéticos e morfogenéticos, sendo medianamente estável ou vulnerável, levando em consideração que os dois métodos puderam evidenciar um maior quantitativo de áreas para esta classe.

Já em terceiro lugar, a classe da Vulnerabilidade Alta, que prevalece a morfogênese, sendo moderadamente vulnerável, com 761,28 km² em 21,27% das áreas, o que indica que uma parcela das áreas atesta mais para alta susceptibilidade aos processos erosivos do solo.

Considerando também em quarto plano a Vulnerabilidade Muito Alta, com um aumento considerável, em 331,63 km² e 9,22% das áreas. Levando em consideração que para Vulnerabilidade Ambiental, os métodos foram capazes de evidenciar uma maior vulnerabilidade aos processos morfogenéticos em algumas áreas

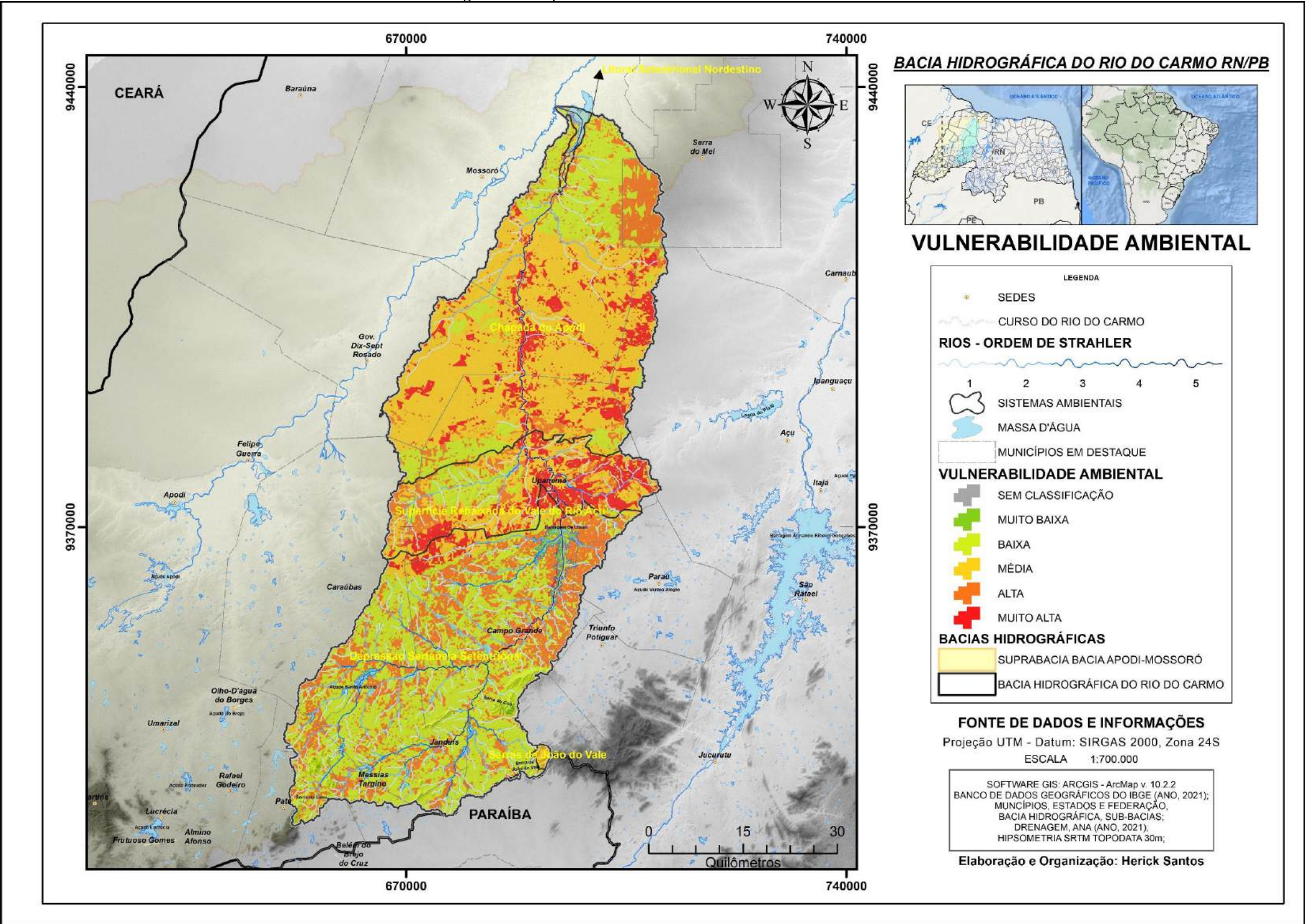
A Vulnerabilidade Muito Baixa foi semelhante a Vulnerabilidade Natural, com 1,11% em 39,75 km² das áreas. O que também pode-se confirmar que as áreas estão com um menor substrato vegetal, portanto, já condicionadas aos aspectos antropogênicos que alteraram a composição das áreas onde prevalece a pedogênese, formadora do solo.

Considera-se também 26,64 km² e 0,74% de áreas Sem Classificação onde não foram possíveis medir valores equacionais, conforme o mesmo método utilizado anteriormente.

No mapa da Vulnerabilidade Ambiental, na Figura 31, utilizando a mesma paleta de cores descritas no quadro 18, pode-se observar onde estarão presentes as áreas de acordo com a vulnerabilidade.

Devido a intensificação das atividades humanas, pode-se considerar através do Mapa, em regiões próximas a atividade agropecuária, presente nos Tabuleiros da Chapada do Apodi, com processos morfogenéticos característicos da área. Onde nota-se que cobertura vegetal está com menor substrato conservado, em comparação as demais áreas.

Figura 31 - Mapa da Vulnerabilidade Ambiental da BHRC.



Fonte: IBGE, 2021; elaborado por autor, 2023.

Por meio da classificação muito baixa, foi possível evidenciar pouco seu aspecto, onde pode-se visualizar principalmente na região da serra do Cuó, mais ao sul da bacia. Principalmente devido a conservação ambiental dessas áreas.

Para a classe baixa, nota-se principalmente seu aspecto sendo evidenciado nas áreas da Depressão Sertaneja e ao Norte dos Tabuleiros da Chapada do Apodi, em partes na Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu, espalhadas entre outros trechos, próximas ao exutório do rio, na formação dos depósitos sedimentares com vegetação fluviomarinha.

A partir da classe de uso e ocupação, consegue-se evidenciar a conservação das áreas, por meio do substrato vegetal presente em sua maioria.

Para a classe média, nota-se aspectos de suas áreas espalhadas ao entorno da bacia, principalmente na região da Chapada do Apodi, especialmente nas áreas onde há uma grande de atividades antrópicas, mas atestaram que houve um equilíbrio entre a pedogênese e morfogênese.

Para as áreas mais vulneráveis, onde também se nota a presença da classe alta e desta vez, a muito alta, que houve um aumento em comparação a anterior, pela disposição das áreas, percebe-se muito próxima aos rios e recursos hídricos, em especial ao curso principal do Rio do Carmo, em áreas de açudes e reservatórios de água, levando em consideração as atividades agrícolas que consolidaram a vegetação nativa como áreas antropizadas.

Chama-se atenção para áreas principalmente próxima ao curso principal do Rio do Carmo, que são consideradas áreas de preservação permanente, onde considerou-se praticamente toda trajetória do rio sendo moderadamente vulnerável, com prevalecimento dos processos morfogenéticos ou medianamente vulnerável, havendo assim equilíbrio entre a pedogênese e morfogênese.

Através disto, compreende-se a relação da ação antrópica através das atividades e uso dos recursos hídricos próximas as áreas de rios, do ponto de vista ambiental, pode ser que essas atividades desencadeiem a remoção da mata ciliar, onde aumentará a vulnerabilidade desses sistemas.

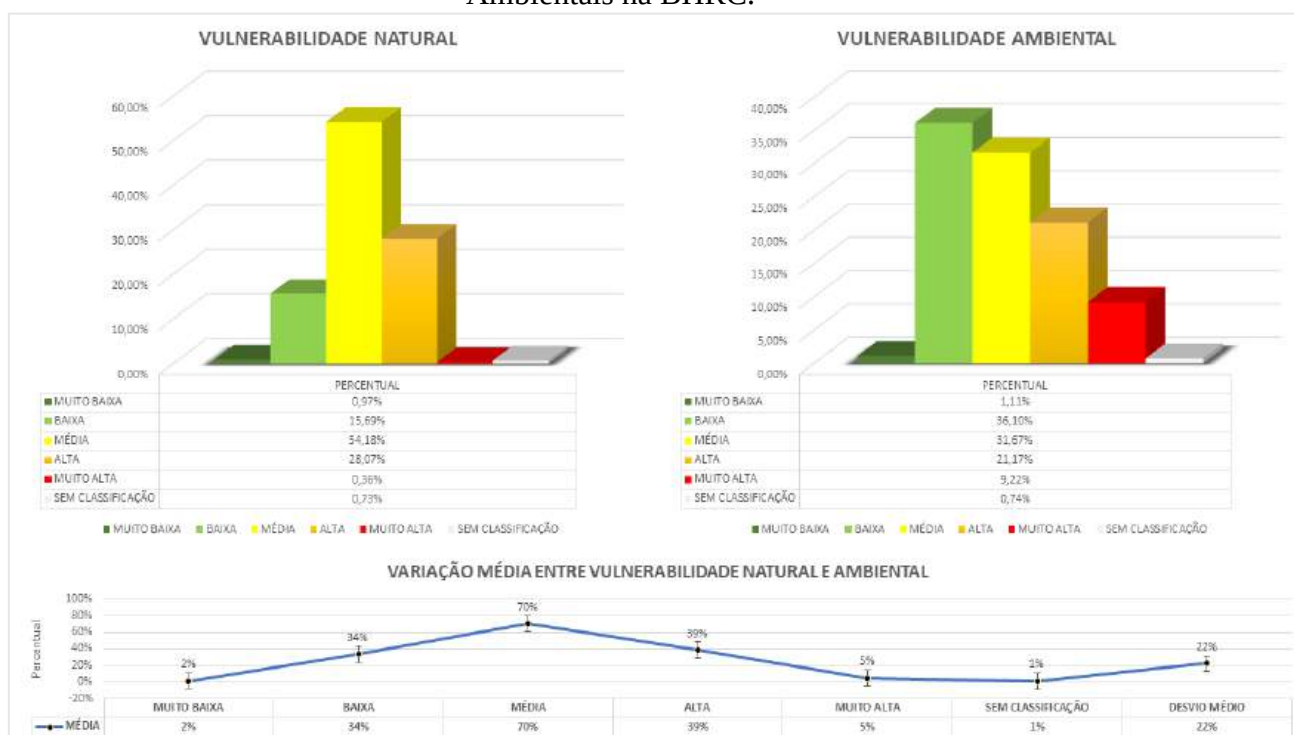
5.2.3. *Comparativo da Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental*

Levando em consideração a diferenciação entre dois métodos, utilizou-se a classificação com diferença percentual, para perceber as diferenças percentuais de cada área em amostragem,

e notar quais métodos trazem o maior aspecto entre eles, observando qual classe mais evidente. A leitura das classes partiu da Classe Muito Baixa até a Muito Alta.

No Gráfico 7, conforme a fórmula utilizada descrita na metodologia, houve uma variação média entre os métodos aplicados, que foi discutido e analisado de maneira integrada, com os seguintes resultados:

Gráfico 7 - Compilado entre Diferenças Percentuais de Vulnerabilidades Naturais e Ambientais na BHRC.



Fonte: Elaborado por autor, 2023.

Percebe-se que há uma pequena diferença entre a Vulnerabilidade Natural com 0,97% e Vulnerabilidade Ambiental 1,11% na classe Muito Baixa, 14%, havendo um maior percentual na Vulnerabilidade Natural e maior percentual na Vulnerabilidade Ambiental, ambas não ultrapassam 5% das áreas, considerando uma pequena parcela.

A partir disto, pode-se considerar que há poucas áreas que se aproximam da classificação estável, onde prevalece a pedogênese. A partir da diferença entre ambos os métodos, foi encontrado somente 2% de variação média.

A Vulnerabilidade Baixa, se atenta que houve um maior percentual de áreas na Vulnerabilidade Ambiental com 36,10% em comparação a Natural com 15,89%, com diferença média de 34%, considerando que este valor mais que duplicou na Vulnerabilidade Ambiental,

isso explica o fato de que houve áreas com maior conservação da biodiversidade e menos processos erosivos em comparação ao natural.

Na Vulnerabilidade Média há um maior percentual em relação a Vulnerabilidade Natural com 54,18%, considerando que são as áreas são majoritariamente medianamente vulneráveis, em equilíbrio na Vulnerabilidade Natural, já na Vulnerabilidade Ambiental este valor se mantém em 31,67%, considerando que há uma diferença média de 70% entre estes métodos de análise, o que se subentende, que as áreas nos valores equacionais da Vulnerabilidade Ambiental, conserva mais processos pedogenéticos, entretanto, há algumas ressalvas.

Pois o mesmo fator aparece com a comparação na classe da Vulnerabilidade Alta, onde ficou em 28,07% das áreas na Vulnerabilidade Natural, considerado um valor considerável também na Vulnerabilidade Ambiental, em 21,17%, mas que caem 7 pontos percentuais, havendo assim uma diferença média percentual de 39% entre os métodos.

Na diferença percentual entre as classes Muito Alta, são os números da Vulnerabilidade Ambiental para classe Muito Alta em expressivos 9,22% e somente 0,36% na Vulnerabilidade Natural, de quase 9 pontos percentuais, porém, em uma diferença percentual média de valores com 5%, um aumento em comparação as áreas.

Considerando os valores equacionais para Vulnerabilidade Ambiental, que dá ênfase nas áreas antropizadas, que cooperam para erosão do solo, podendo considerar que mesmo sendo menos afetadas, em comparação as áreas que mais conservaram o aspecto pedogenético, poderão atingir um valor mais extremo nos processos erosivos.

Em último estágio, as áreas Sem Classificação mantiveram a lógica e tiveram diferença de 1%. Processos e informações que se detalham através do Gráfico 7.

De toda forma, chegando-se a um resultado final, somou-se as duas porcentagens de cada respectiva classe entre as vulnerabilidades, e se fez a média entre os valores, onde foi possível constatar que a área da Classe Média foi a mais evidente com 70%, e em segundo plano a Classe Alta com 39%.

A Classe Baixa com 34%, a Classe Muito Alta com 5% e a Classe Muito Baixa, com 2%.

Áreas sem classificação permaneceram em 1%. E o desvio médio entre os métodos utilizados para ambas as classes foi de 22%.

5.3. Análise dos Sistemas Ambientais da BHRC

Notou-se que os mapas abordados anteriormente trouxeram a análise da vulnerabilidade natural e ambiental a partir do aspecto visual, com o recorte dos sistemas ambientais.

Em análise dos Sistemas Ambientais, conforme principal objetivo do trabalho, foram separadas áreas de acordo com os domínios geomorfológicos, considerando o relevo um dos principais fatores de análise das categorias, para evidenciar os aspectos da vulnerabilidade, de acordo com diferentes áreas, para medirmos o grau e nível de impactos introduzidos na natureza, por meio da ação antrópica.

Os cinco Sistemas Ambientais são evidenciados na BHRC, com o recorte das Unidades Geomorfológicas, que se pode na junção de compartimentos e unidades, com os códigos de (1) PLSN - Planícies do Litoral Setentrional Nordeste, (2) TCA - Tabuleiros da Chapada do Apodi, (3) TSR - Tabuleiros da Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu, (4) DSS - Depressão Sertaneja Setentrional, (5) SJV - Serra de João do Vale.

Por meio da caracterização, reuniu-se todos os aspectos e características biofísicas trabalhadas, por meio das classes, que forneceram características específicas para análise e fundamentação teórica a partir dos resultados. Assim, dividindo-se categorias de análise, como supracitado nos procedimentos metodológicos.

Considerado como aspecto principal para análise de impactos no meio ambiente, considerando a ação antrópica no meio, utilizou-se os dados de Uso e Ocupação trabalhados no capítulo 5.1.6, subdividindo-se como classe de Nível I.

As cores dispostas no quadro significam de acordo com as utilizadas por meio da paleta de cores do verde sendo mais propício aos processos pedogenéticos e se aproximando dos processos morfogenéticos, descritos em vermelho.

A análise de cada sistema será feita de maneira individual, analisando a partir da metodologia, com a análise de sensoriamento após a apresentação de suas características, onde são identificados os impactos e condições naturais da bacia.

Todos os dados, agrupados de maneira conjunta, forneceu análises concisas para compreensão dos resultados da pesquisa. Afinal, quando se analisa a sistemática envolvendo todos os aspectos naturais, geológicos, geomorfológicos e do uso e ocupação, percebe-se o envolvimento dos conceitos de geossistema, território e paisagem.

Por meio do Quadro 19, observa-se toda a análise integrada dos Sistemas Ambientais da BHRC.

Quadro 19 - Análise dos Sistemas Ambientais da BHRC.

CÓD	COMPARTIMENTO	SISTEMAS AMBIENTAIS	ÁREA (km²)	%	COBERTURA E USO DA TERRA	ÁREA (km²)	%	DECLIVIDADE	REGIÃO E DOMÍNIO GEOMORFOLÓGICO	GEOLOGIA - UNIDADES GEOLÓGICAS	PEDOLOGIA	COBERTURA DA VEGETAÇÃO	IMPACTOS E CONDIÇÕES NATURAIS IDENTIFICADAS	CLASSIFICAÇÃO ECODINÂMICA VULNERABILIDADE NATURAL - MAIOR	CLASSIFICAÇÃO ECODINÂMICA VULNERABILIDADE AMBIENTAL - MAIOR
(1) PLSN	PLANÍCIES	LITORAL SETENTRIONAL NORDESTINO	23,68	0,66%	1. Áreas de Floresta ou Vegetação Nativa	3,05	13%	Relevo majoritariamente Plano meio Suave Ondulado e pouco Ondulado	Planícies Deltaicas, Estuarinas e Praiais com Depósitos Sedimentares Quaternários, sendo planícies de natureza acumuladora de sedimentos com características Fluviomarinhas	Áreas formadas em maioria da Formação Jandaíra, e uma parcela de Depósitos aluvionares, do Fanerozóico, com rochas principalmente de material sedimentar e superficial inconsolidado	Áreas formadas majoritariamente por Latossolos Amarelos Distróficos e uma pequena parcela de formação com Gleissolos Sálcos Sódicos	Áreas de maioria Indiscriminada, com presença da Formação Pioneira com influência fluviomarinha e parcelas de Savana-Estépica Arborizada e Agropecuária	(1) Atividade Petrolífera (2) Processos erosivos, (3) Atividade Salineira, (4) Assoreamento e perda de mata ciliar de rios ou cursos d'água, (5) Agropecuária (6) Impactos da vegetação Fluviomarinha (Manguezais), (7) Aquicultura e (8) Impactos na Restinga Arbórea	SISTEMA AMBIENTAL MEDIANAMENTE ESTÁVEL/VULNERÁVEL - EQUILÍBRIO PEDOGÊNESE/MORFOGÊNESE	SISTEMA AMBIENTAL MODERADAMENTE ESTÁVEL - ESTÁVEL - PREVALECE A PEDOGÊNESE
					2. Áreas de Formação Natural não Florestal	0,01	0%								
					3. Agropecuária ou Áreas antrópicas agrícolas	3,90	16%								
					4. Área não vegetada	6,58	28%								
					5. Corpo D'água	10,13	43%								
(2) TCA	TABULEIROS	CHAPADA DO APODI	1.528,84	42,50%	1. Áreas de Floresta ou Vegetação Nativa	1.161,00	76%	Relevo majoritariamente Plano,meio Suave Ondulado e pouco Ondulado	Chapadas do Nordeste Oriental, Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, com natureza de dissecação e aplanamento do relevo, com parcelas de Corpo D'água Continental	Áreas em sua maioria com a Formação Jandaíra, e grandes parcelas com Depósitos aluvionares, Formação Açú, e Grupo Barreiras do Fanerozóico, com rochas de principalmente de material sedimentar e superficial inconsolidado	Áreas formadas majoritariamente por Cambissolos Haplicos Ta Eutroficos Latossolos, seguidos de parcelas de Latossolos Vermelho-Amarelo e Amarelo Distroficos e Argissolos Vermelho-Amarelo Eutroficos	Áreas em sua maioria de Agropecuária, seguidas de Savana-Estépica Arborizada, e pequenas parcelas entre Savana-Estépica Parque, Savana-Estépica Florestada, Formação Pioneira com influência fluviomarinha, Influência urbana e Corpo d'água continental	(9) Atividade Petrolífera e Estações de coletoras (10) Urbanização, (11) Uso agrícola e agrovilas (12) Usinas eólicas, (13) Agricultura, (14) Agropecuária e (15) Mineração	SISTEMA AMBIENTAL MEDIANAMENTE ESTÁVEL/VULNERÁVEL - EQUILÍBRIO PEDOGÊNESE/MORFOGÊNESE	SISTEMA AMBIENTAL MEDIANAMENTE ESTÁVEL/VULNERÁVEL - EQUILÍBRIO PEDOGÊNESE/MORFOGÊNESE
					3. Agropecuária ou Áreas antrópicas agrícolas	361,76	24%								
					4. Área não vegetada	5,75	0%								
					5. Corpo D'água	0,33	0%								
(3) TSR		SUPERFÍCIE REBAIXADA DO VALE DO RIO AÇU	464,18	12,91%	1. Áreas de Floresta ou Vegetação Nativa	255,69	55%	Relevo majoritariamente Suave Ondulado, meio Plano e pouco Ondulado	Chapadas do Litoral Norte, Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, com natureza de aplanamento e dissecação do relevo, com parcelas de Corpo D'água Continental	Áreas em sua maioria com a Formação Açú, Depósitos aluvionares, Formação Jandaíra, e Grupo Barreiras do Fanerozóico com rochas de origem sedimentar, e pequena parcela do Proterozóico com Caicó - Ortognaisse com rochas de origem metamórfica	Áreas formadas em sua maioria por Latossolos Vermelho-Amarelos Distroficos, seguidos de parcelas com Neossolos Regolíticos Eutroficos, Luvisolos Cromicos Orticos, Planossolos Natricos Orticos, Argissolos Vermelho-Amarelos Eutroficos e Cambissolos Haplicos Ta Eutroficos	Áreas em sua maioria de Agropecuária, seguidas de Savana-Estépica Arborizada, e pequenas parcelas entre Savana-Estépica Parque, Savana-Estépica Florestada, Influência urbana e Corpo d'água continental	(16) Agropecuária, (17) Assoreamento e perda de mata ciliar de rios ou cursos d'água, (18) Áreas de pouso ou atividade pecuária, (19) Assentamento ou povoado, (20) Urbanização e (21) Erosão e solo exposto	SISTEMA AMBIENTAL MODERADAMENTE VULNERÁVEL - INSTÁVEL - PREVALECE A MORFOGÊNESE	SISTEMA AMBIENTAL MEDIANAMENTE ESTÁVEL/VULNERÁVEL - EQUILÍBRIO PEDOGÊNESE/MORFOGÊNESE
					3. Agropecuária ou Áreas antrópicas agrícolas	204,23	44%								
					4. Área não vegetada	4,04	1%								
					5. Corpo D'água	0,22	0%								
(4) DSS	DEPRESSÕES	DEPRESSÃO SERTANEJA SETENTRIONAL	1.572,23	43,71%	1. Áreas de Floresta ou Vegetação Nativa	932,97	59%	Relevo majoritariamente Suave Ondulado, meio Plano e pouco Ondulado	Depressão Sertaneja com Cinturões Móveis Neoproterozóicos com natureza de dissecação no relevo e Corpo D'água Continental	Áreas em sua maioria de Caicó - ortognaisse, do Proterozóico, seguidos de Poço da Cruz e Jucuru do Proterozóico e com rochas metamórficas, e parcelas do Fanerozóico entre Plúton Tourão-Caraúbas, Plúton Serra do João do Vale, Plúton Sem Denominação, Granitóides de quimismo indiscriminado com rochas ígneas, e Formação Açú, Serra dos Martins, Depósitos aluvionares com rochas de origem sedimentar	Áreas com maioria de Luvisolos Cromicos Orticos, seguidos de Argissolos Vermelho-Amarelos Eutroficos, e parcelas Neossolos Regolíticos Eutroficos, Luvisolos Cromicos Orticos e Planossolos Natricos Orticos	Áreas com maioria de Savana-Estépica Arborizada, e grandes áreas com Agropecuária, seguidos de parcelas de Savana-Estépica Florestada, Savana-Estépica Parque, Agricultura com Culturas Permanentes, Agropecuária, Influência urbana e Corpo d'água continental	(22) Represamento ou barramento de água, (23) Grande Reservatório de Água (Barragem de Umari), (24) Agropecuária e (25) Áreas de relevo escarpado - Serra do Lima, (26) Áreas de relevo escarpado – Serra do Cuó, (27) Urbanização e (28) Solo exposto	SISTEMA AMBIENTAL MEDIANAMENTE ESTÁVEL/VULNERÁVEL - EQUILÍBRIO PEDOGÊNESE/MORFOGÊNESE	SISTEMA AMBIENTAL MODERADAMENTE ESTÁVEL - ESTÁVEL - PREVALECE A PEDOGÊNESE
					2. Áreas de Formação Natural não Florestal	6,88	0%								
					3. Agropecuária ou Áreas antrópicas agrícolas	575,91	37%								
					4. Área não vegetada	14,44	1%								
					5. Corpo D'água	42,03	3%								
(5) SMPJ	SERRAS	SERRAS DO MARTINS-PORTALEGRE E JOÃO DO VALE	7,92	0,22%	1. Áreas de Floresta ou Vegetação Nativa	7,92	100%	Relevo majoritariamente Forte Ondulado, meio Montanhoso e Ondulado	Aplanamentos Residuais do Domo da Borborema e Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas com natureza de dissecação no relevo	Áreas divididas em sua maioria com Formação da Serra dos Martins do Proterozóico e rochas de origem Ígneas e do Fanerozóico com Plúton Serra do João do Vale e rochas sedimentares	Somente Luvisolos Cromicos Orticos	Áreas de maioria Savana-Estépica Arborizada, presença de Savana-Estépica Parque e pequenas parcelas de Agropecuária	(29) Áreas de relevo escarpado – Serra de João do Vale	SISTEMA AMBIENTAL MEDIANAMENTE ESTÁVEL/VULNERÁVEL - EQUILÍBRIO PEDOGÊNESE/MORFOGÊNESE	SISTEMA AMBIENTAL MEDIANAMENTE ESTÁVEL/VULNERÁVEL - EQUILÍBRIO PEDOGÊNESE/MORFOGÊNESE
					4. Área não vegetada	0,00	0%								
	SOMA	TOTAL	3.596,85	100%	TOTAL	3596,85									

Fonte: Autor, 2023.

5.3.1. Planícies do Litoral Setentrional Nordeste (PLSN)

No Sistema Ambiental (1) PLSN, se localiza uma área de importantes atividades e extração de recursos naturais, compreende-se a partir do Uso e Cobertura da Terra, que a maior parte deste Sistema Ambiental está envolvido em Corpos D'água com 43%, que podem ser compreendidos entre atividades de aquicultura e salinas, que são evidenciadas com graus de impactos elevados, porém, de forma menos acentuada nas áreas dos rios e lagos

As áreas não vegetadas com 28%, podem ser evidenciadas através de solo exposto, ou áreas com áreas urbanizadas, áreas não vegetadas de maneira geral, onde percebe-se atividades petrolíferas na região, próximas às áreas que deveriam ser consideradas de preservação.

Nota-se Agropecuária ou áreas antrópicas agrícolas, com 16% das áreas, levando em consideração os processos erosivos, atuam de forma evidente na paisagem, como não é possível considerar áreas petrolíferas com base na classificação do MapBiomias (2021), subentende-se áreas de desmate que podem ser observadas nas imagens de satélite em conjunto.

Percebe-se que há pontos que os sedimentos de areia cobrem a superfície da base de poços de petróleo, onde também há erosão nessas áreas, já as áreas de floresta ou vegetação nativa com 13%, ainda mantém seu aspecto de vegetação nativa natural. Já as áreas de formação Natural não Florestal, atingiram somente 0,01 km² das áreas, não sendo relevantes neste sistema.

Importante ressaltar que os usos das áreas, a partir do substrato vegetal, já foram em sua maioria comprometidos.

O relevo do PLSN, é considerado majoritariamente Plano, sendo meio Suave Ondulado e pouco Ondulado, isso se dá por serem de áreas localizadas próximas ao nível do mar, onde próximos a região costeira e litorânea, há um aplanamento da superfície.

Afinal, a geomorfologia caracteriza-se por Planícies Deltaicas, Estuarinas e Praiais com Depósitos Sedimentares Quaternários, sendo planícies de natureza acumuladora de sedimentos com características Fluviomarinhas, que podem ser compreendidas por manguezais com grande biodiversidade.

A Geologia caracterizou-se por meio de áreas formadas em maioria da Formação Jandaíra, e uma parcela de Depósitos aluvionares, do Fanerozóico, com rochas principalmente de material sedimentar e superficial inconsolidado, logicamente, é evidenciado este aspecto principalmente por essas áreas se encontrarem na Bacia Sedimentar Potiguar.

Os solos do Sistema Ambiental, são de áreas formadas majoritariamente por Latossolos Amarelos Distróficos, que são solos desenvolvidos principalmente de sedimentos do Grupo Barreiras, que constitui a faixa sedimentar costeira paralela ao litoral e uma pequena parcela de formação com Gleissolos Sálcos Sódicos, solos encontrados especialmente em áreas alagadas ou próximas de mangues (EMBRAPA, 2022).

A cobertura de sua vegetação é de áreas de maioria Indiscriminada, com presença da Formação Pioneira com influência fluviomarinha, com parcelas de Savana-Estépica Arborizada e Agropecuária.

De acordo com os processos metodológicos foi considerado a Vulnerabilidade Natural e Ambiental destas áreas, para observar os resultados de cada classe de análise, proposta no Quadro 20, onde evidenciará o quantitativo de áreas, de qual classe terá o maior percentual de vulnerabilidade, considerando a ecodinâmica.

Considerando o maior percentual de áreas, foi considerado por meio da Vulnerabilidade Natural um Sistema Ambiental medianamente estável/vulnerável, com equilíbrio entre a pedogênese e morfogênese.

Em contrapartida, para Vulnerabilidade Ambiental, foi considerado um Sistema Ambiental moderadamente estável, ou seja, onde prevalece a pedogênese.

Quadro 20 - Análise das Vulnerabilidades no Sistema Ambiental (1) PLSN.

Vulnerabilidade Natural - Litoral Setentrional Nordeste - (1) PLSN			
Classe	Área (Km ²)	(%)	Média de Intervalo
Baixa	0,17	0,74%	Prevalece a Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	17,39	73,44%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	4,04	17,05%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Sem Classificação	2,08	8,78%	
Total	23,68	100%	
Vulnerabilidade Ambiental - Litoral Setentrional Nordeste - (1) PLSN			
Classe	Área (Km ²)	(%)	Média de Intervalo
Muito Baixa	0,22	0,92%	Prevalece a Pedogênese - Muito Baixo - Estável
Baixa	8,90	37,58%	Prevalece a Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	8,51	35,92%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	3,94	16,66%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Sem Classificação	2,11	8,92%	
Total	23,68	100%	

Fonte: Elaborador por autor, 2023.

Assim como observado no quadro 20, na classificação ecodinâmica, nota-se que as áreas com maior Vulnerabilidade Natural foram consideradas média com 73,44% das áreas. Ressalta em segundo plano, também, áreas com classe de Alta vulnerabilidade em 17,05%. Em

sequência de 8,78% Sem Classificação, de áreas que não foram possíveis classificar, e 0,74% considerada Baixa.

Para a Vulnerabilidade Ambiental, foram consideradas na maior parte sendo Baixa, com 37,58%, seguidos da classe Média com 35,92% e 16,66% sendo a classe Alta, com 8,92% de áreas Sem Classificação e somente 0,92% sendo Muito Baixa.

Observa-se que para esse Sistema Ambiental não foram encontradas áreas com a classe de Alta Vulnerabilidade. E quase 10% das áreas sem classificação, isso se deve ao fato dessas áreas terem considerados uma grande quantidade de corpos d'água, onde podem se classificar de forma nula em valores equacionais.

A partir da amostragem das informações, no Quadro 21, é realizado uma análise sobre os impactos e condições naturais, de acordo com os objetivos previstos na pesquisa, onde também é possível observar, como estão presentes os aspectos geomorfológicos, geológicos, pedológicos e da cobertura da vegetação, bem como a avaliação dos impactos identificados mediante as análises.

O limite da faixa da BHRC destacado em preto, e em magenta a identificação do limite territorial deste sistema, o trecho em vermelho é o curso de rio principal, como indicado nas imagens, em azul, os trechos de drenagem definidos pelo banco de dados de 2021 da ANA.

Os pontos descritos com a informação em laranja, são a identificação dos impactos e condições naturais relacionadas.

Foram evidenciados 8 tipos de impactos com a (1) Atividade Petrolífera, (2) Processos erosivos, (3) Atividade Salineira, (4) Assoreamento e perda de mata ciliar de rios ou cursos d'água, (5) Agropecuária, (6) Impactos da vegetação Fluvio-marinha (Manguezais), (7) Aquicultura e (8) Impactos na Restinga Arbórea.

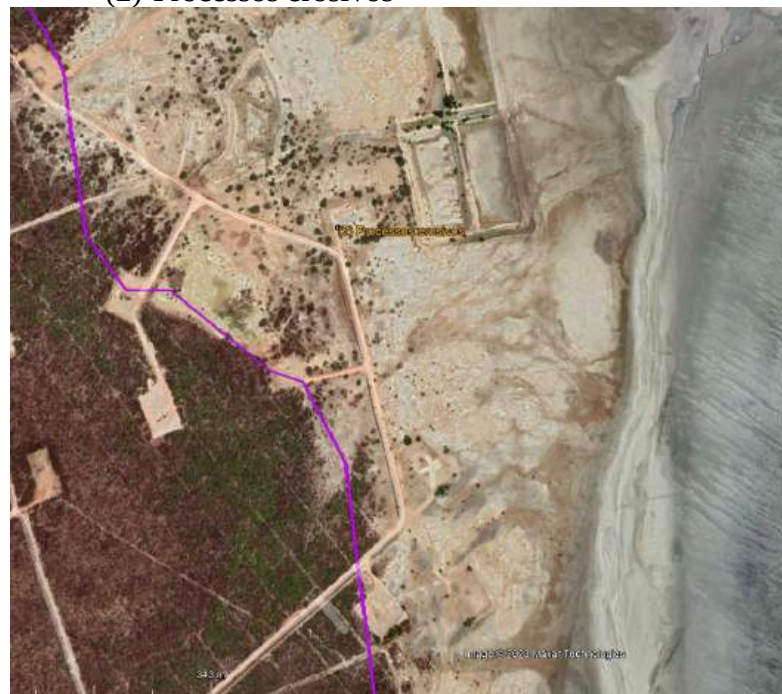
Quadro 21 – Análise Ilustrativa compilado de imagens do Sistema Ambiental (1) PLSN.

(1) Atividade Petrolífera



As atividades petrolíferas próximas aos manguezais, são componentes intrinsecamente relacionado aos processos erosivos destas áreas. As denominadas áreas de Formação Pioneira com influência Fluviomarinha, são visíveis neste substrato vegetal, onde há áreas de maioria indiscriminada, misturam processos morfogenéticos. De toda forma, percebe-se nesta imagem, um equilíbrio destas áreas com a pedogênese e a morfogênese, especialmente por haver conservação de parte da vegetação em meio a estas áreas.

(2) Processos erosivos



As atividades petrolíferas nesta região, são responsáveis pela erosão do solo, devido a construção de bases e acessos para os poços petrolíferos, estima-se que neste sistema há perdas consideráveis da vegetação devido a ação nessas áreas, atuando em processos morfogenéticos, porém, com os manguezais e corpos d'água, proporcionará um equilíbrio nas áreas evidenciadas.

(3) Atividade Salineira



A implantação de salinas para a produção de sal pode gerar diversos impactos ambientais como a destruição da mata nativa, dos mangues, do ecossistema marinho e estuarino, bem como a poluição das águas subterrâneas, degradando esses sistemas.

(4) Assoreamento dos rios e perda de mata ciliar



Nessas áreas são passíveis de acúmulos de sedimentos nos rios, onde há um processo de degradação das áreas, consequentemente há perda da mata ciliar, que é a vegetação entorno dos rios, através dos processos erosivos, onde vemos que nessas áreas ao entorno, há diversos processos erosivos, e inclusive atividade petrolífera.

(5) Agropecuária



A partir dos desmatamentos das áreas, é removido a cobertura vegetal para fins agropecuários, nessas áreas, acontecem processos erosivos e deposição de sedimentos, nota-se também que foram próximas ao Rio do Carmo, onde neste caso há alguns trechos de maior conservação da biodiversidade e da mata ciliar do rio principal.

(6) Impactos da vegetação Fluviomarinha (Manguezais)



Nota-se através da imagem de satélite, que há impactos da biodiversidade dos manguezais, mas com alerta as áreas mais próximas via a costa por conta da utilização da atividade salineira.

(7) Aquicultura



Nessas áreas há a utilização de atividades salineira, mas também a utilização de Aquicultura, consiste no cultivo de organismos cujo ciclo de vida em condições naturais se dá total ou parcialmente em meio aquático. Pode ser continental ou marinha, bem evidente em áreas alagadiças e próximas a manguezais, categorizando atividade importante na BHRC.

(8) Impactos na Restinga Arbórea



Com a atividade petrolífera, a remoção da Vegetação de Restinga Arbórea provoca impactos, pois é considerada uma área de preservação, pois se localizam próximas a ecossistemas fluviais marinhos e costeiros, tornando essencial a preservação para manutenção da biodiversidade e do ecossistema.

Fonte: Google Earth (2023), organizado por autor.

5.3.2. Tabuleiros da Chapada do Apodi (TCA)

Em segundo plano, o Sistema Ambiental (2) TCA, que representa os Tabuleiros da Chapada do Apodi, fazem parte de 42,50% da BHRC, representando cerca de 1.528,84 km², considerado o segundo maior Sistema em extensão de área.

O agrupamento das áreas de maneira sistematizada, baseou-se no Uso e Cobertura da Terra, onde considera que 76% das áreas são formadas por áreas de floresta ou vegetação nativa em 1.161,00 km², mantendo ainda seu aspecto natural, já a ação antrópica vem por meio da agropecuária ou áreas antrópicas agrícolas, que representam 24% das áreas, em 361,76 km².

Área não vegetada representa com 5,75 km² e Corpo D'água com 0,33 km², não chegam a representar nem 1% das áreas.

O relevo desta região é formado especificamente por áreas mais planas, sendo considerado Plano, com áreas em meio Suave e Ondulado e pouco ondulado, isso se dá o fato dessas áreas serem na sua formação geomorfológica, por meio da Chapada do Nordeste

Oriental, que são formados por Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, com natureza de dissecação, e aplanamento da superfície do relevo.

A formação Geológica é de maioria da Formação Jandaíra, e grandes parcelas com Depósitos aluvionares, onde há deposição de sedimentos da bacia sedimentar potiguar, Formação Açu e Grupo Barreiras do Fanerozóico, com rochas principalmente de material sedimentar e superficial inconsolidado, principalmente nas áreas próximas a vegetação fluviomarina e do Sistema supracitado anteriormente (1) PLSN.

A Pedologia deste sistema é formado majoritariamente por Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos Latossolos, seguidos de parcelas de Latossolos Vermelho-Amarelo e Amarelo Distróficos e Argissolos Vermelho-Amarelo Eutróficos.

Em geral, possuem textura argilosa, muito argilosa ou média. Suas condições físicas aliadas ao relevo plano ou suavemente ondulado favorecem sua utilização para a agricultura (Embrapa, 2022).

A vegetação possui áreas em sua maioria de Agropecuária, efetivando a ação antrópica dominante destas áreas.

O substrato vegetal é formado de Savana-Estépica Arborizada, e pequenas parcelas entre Savana-Estépica Parque, Savana-Estépica Florestada, Formação Pioneira com influência fluviomarina e a Influência urbana, através dos processos de urbanização com o desenvolvimento de centros urbanos principalmente do município de Mossoró, Açu, entre outras cidades circunvizinhas. E também há a presença de Corpo d'água continental.

Em análise da Vulnerabilidade destas áreas, vemos que segundo o Quadro 22, foram compreendidos que de maneira igual, às áreas foram consideradas de Classe Média, onde foi considerado um Sistema Ambiental Medianamente Estável/Vulnerável com equilíbrio entre a Pedogênese/Morfogênese.

Quadro 22 - Análise das Vulnerabilidades do Sistema Ambiental (2) TCA.

Vulnerabilidade Natural - Tabuleiros da Chapada do Apodi - (2) TCA			
Classe	Área (Km²)	(%)	Média de Intervalo
Baixa	39,31	2,57%	Prevalece A Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	777,56	50,86%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	700,85	45,84%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Muito Alta	0,005	0,0003%	Prevalece a Morfogênese - Vulnerável
Sem Classificação	11,11	0,73%	
Total	1528,84	100%	
Vulnerabilidade Ambiental – Tabuleiros da Chapada do Apodi - (2) TCA			
Classe	Área (Km²)	(%)	Média de Intervalo
Muito Baixa	0,10	0,007%	Prevalece a Pedogênese - Muito Baixo - Estável
Baixa	306,36	20,04%	Prevalece a Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	872,00	57,04%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	163,86	10,72%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Muito Alta	175,21	11,46%	Prevalece a Morfogênese - Vulnerável
Sem Classificação	11,31	0,74%	
Total	1528,84	100%	

Fonte: Elaborador por autor, 2023.

Considerou-se para Vulnerabilidade Natural, 50,86% sendo de classe Média, e em segundo plano 45,84% das áreas consideradas de Alta vulnerabilidade, isso se dá ao fato dessas áreas terem alta atividade e antropização de áreas naturais, pelo alto índice de atividades agropecuárias, atividade petrolífera, com mosaicos de agricultura e pastagem, e urbanização, onde todas essas atividades participam ativamente do processo de erosão e remoção da cobertura vegetal através dos processos de desmatamento.

Em terceiro plano temos a classe Baixa com 2,57%, 0,73% das áreas Sem Classificação, e 0,0003%, praticamente nulo, de áreas classificadas como Muito Alta.

Interessante ressaltar que para este sistema, esse processo se inverte na Vulnerabilidade Ambiental, onde os valores saltam para 11,46%.

Leva-se em consideração que a Vulnerabilidade Ambiental tem um peso maior para ações antrópicas, onde os processos de áreas mais críticas vão ser consideradas mais evidentes, assim como de áreas menos críticas.

Por exemplo, a Vulnerabilidade Ambiental, considerou a maior classe sendo também a classe Média, com 57,04%, mas seguidas de 20,04% com a classe Baixa, invertendo a ordem de classe Alta que estava em segundo plano, trazendo-a para terceiro lugar na representação das áreas, com 10,72%.

Classes Sem Classificação permaneceram praticamente os mesmos valores, com 0,74% e 0,007% de valores para Muito Baixa, onde antes a classe Muito Alta para Vulnerabilidade Natural se considerou com valores quase nulos.

Foram encontrados impactos como (9) Atividade Petrolífera e Estações de coletoras (10) Urbanização, (11) Uso agrícola e agrovilas (12) Usinas eólicas, (13) Agricultura, (14) Agropecuária e (15) Mineração.

A partir da amostragem das informações, o Quadro 23, foi desenvolvido para caracterização das condições naturais e evidência dos impactos identificados.

De mesma maneira, o limite da bacia hidrográfica é considerado em preto, a parte magenta significaria o limite do Sistema TCA, o trecho em vermelho é o curso principal do Rio do Carmo, e em azul, as drenagens e corpos hídricos da ANA.

Quadro 23 - Análise Ilustrativa compilado de imagens do Sistema Ambiental (2) TCA.



é devido a compilação e mosaico de fotos, com o uso de satélites ou bandas diferentes).

(10) Urbanização



Processos de urbanização, mostram a região urbanizada do município de Mossoró, que é o município com maior número de habitantes da BHRC [ver item 4.1.1], precisamente no bairro Sumaré, este município proporciona altos índices de desenvolvimento econômico e social, em comparação a demais municípios, conseqüentemente, a urbanização poderá ocasionar impactos como o desmatamento das áreas para construção de casas, vias, sem contar problemas em torno da drenagem, que proporcionam inundações nas regiões onde a água não faz o devido escoamento na bacia.

(11) Uso agrícola e agrovilas



Na Chapada do Apodi, o Município de Serra do Mel se destaca pela sua utilização de agrovilas, que utilizam da agricultura para plantação de fruticultura como Cajú, e outras

atividades ligadas a pecuária, na imagem, consegue-se visualizar um processo de grande atividade agropecuária, com intenso desmatamento e utilização do solo.

(12) Usinas Eólicas



Apesar de ser considerada como energia limpa e renovável, e proporcionar grande desenvolvimento econômico na região, as usinas eólicas também são responsáveis por processos erosivos, para construção de seus empreendimentos. Na paisagem, vemos a união das áreas agricultáveis com a produção de Caju no município de Serra do Mel, onde desenvolvem-se de maneira integrada, de acordo com os recursos naturais da região, e parte da cobertura vegetal visível, participando do processo de equilíbrio ecodinâmico.

(13) Agricultura



A agricultura mecanizada consegue obter níveis de produção em larga escala, porém, grandes áreas são utilizadas para o

desmatamento dessas regiões, para produção agrícola, em especial do melão.

(14) Agropecuária



Para os processos de agropecuária, consegue-se notar maior intensidade dos processos morfogenéticos, onde ocasiona um aumento dos níveis de classes vulneráveis.

(15) Mineração



Conhecida como uma das atividades mais impactantes ao meio ambiente, os processos de mineração são responsáveis por desenvolvimento econômico das regiões do interior do RN, essas áreas, são principalmente utilizada para extração de calcário, segundo as licenças da Agência Nacional de Mineração - ANM (2024), porém, vale ressaltar a conservação do substrato vegetal e áreas de fruticultura.

Fonte: Google Earth (2023), organizado por autor.

5.3.3. *Tabuleiros da Superfície Rebaixada do Vale do Açu (TSR)*

No Sistema Ambiental (3) TSR, a partir dos Tabuleiros, temos a Superfície Rebaixada do Vale do Açu, representando uma área de 464,18 km² e 12,91%.

Pode-se considerar que os Tabuleiros, se somados como compartimento, representariam mais da metade das áreas totais da BHRC.

Pode-se compreender estas áreas em Áreas de floresta ou vegetação nativa com 255,69 km² em 55%, com mais da metade das áreas em seu substrato vegetal natural, e um aumento abrupto das áreas antropizadas.

Em comparação ao outro Sistema (2) TCA, que se encontra dentro da compartimentação dos Tabuleiros, e em comparação aos demais sistemas, este obteve maior ação antrópica, onde consideradas como Áreas de agropecuária ou áreas antrópicas agrícolas com 44% do total, em 204,23 km².

Até inclusive as áreas não vegetadas, vemos um aumento de 1%, com 14,44 km². Os corpos d'água nesse sistema ainda não representam uma grande parcela, em comparação ao (1) PLSN, devido a sua localização, composição e extensão de área, mas se expressam em 0,22 km².

O relevo destas regiões é considerado Suave Ondulado, sendo em segundo lugar considerados Planos e parcelas com o Ondulado. Isso deve ao fato desse Sistema se encontrar nas Chapadas do Litoral Norte, onde há presença de Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, com natureza de dissecação, essas com um maior nível, e aplanamento do relevo, na superfície, com parcelas de Corpo D'água Continental.

A Geologia considerou áreas em sua maioria com a Formação Açu, Depósitos aluvionares, Formação Jandaíra, e Grupo Barreiras do Fanerozóico com rochas de origem sedimentar, e pequena parcela do Proterozoica com Caicó - Ortognaisse com rochas de origem metamórfica, nesta região, apesar da presença na Bacia Sedimentar Potiguar, já se inicia a inserção territorial no Embasamento Cristalino.

A Pedologia considera áreas formadas em sua maioria por Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, seguidos de parcelas com Neossolos Regolíticos Eutróficos, Luvisolos Crômicos Órticos, Planossolos Nátricos Órticos, Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos e Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos. Solos também voltados principalmente ao uso de atividades agropecuárias e agriculturas.

Na cobertura da vegetação, considera áreas em sua maioria de Agropecuária, o que confirma o fator de aumento de áreas críticas e atuação de processos morfogênicos com a erosão e remoção da camada natural da superfície, seguidas de Savana-Estépica Arborizada, e pequenas parcelas entre Savana-Estépica Parque, Savana-Estépica Florestada, Influência urbana e Corpo d'água continental.

Pode-se considerar, de maneira geral, que o Sistema Ambiental (3) TSR, é considerado um Sistema de análise crítica, onde requer mais atenção dentro da BHRC. Fato este, que se confirma através das informações previstas e avaliadas por meio das análises das Vulnerabilidades no Quadro 23.

Considerou-se a partir dos dados previstos, que a Vulnerabilidade Natural do Sistema (3) TSR, é um Sistema Ambiental Moderadamente Vulnerável, sendo este instável, onde prevalece a morfogênese.

Já a Vulnerabilidade Ambiental, de forma mais dividida entre as classes, considerou um Sistema Ambiental medianamente estável/vulnerável, onde há equilíbrio entre a Pedogênese/Morfogênese.

Para a Vulnerabilidade Natural, a classe Alta foi a mais evidente, com 52,41% das áreas, sendo mais da metade. Em segundo plano, a Vulnerabilidade Média, considerou 44,16% das áreas, isso se dá ao fato dessas áreas terem ações antrópicas bastante evidentes, que com ao longo dos anos, por meio de atividades, foi suprimido o substrato vegetal, atenuando os processos erosivos. Inclusive, a classe Mais Alta, aparece em terceiro plano.

Seguidos de pequenas parcelas com Baixa em 0,37% e 0,02% em Muito Baixa. Áreas sem Classificação mantiveram 0,26%.

Já a Vulnerabilidade Ambiental, considerou a Vulnerabilidade de classe Média, sendo a mais evidente, com 38,30%, seguidos de 26,15% na Classe Muito Alta, um aumento de quase 24 pontos percentuais em comparação a ambos os métodos de análise.

Que evidenciou um aumento em relação as áreas de Vulnerabilidade Baixa com 17,03%, crescendo praticamente 17 pontos percentuais. Áreas sem Classificação mantiveram 0,25%.

Quadro 24 - Análise das Vulnerabilidades do Sistema Ambiental (3) TSR

Vulnerabilidade Natural - Tabuleiros da Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu - (3) TSR			
Classe	Área (Km²)	(%)	Média de Intervalo
Muito Baixa	0,08	0,02%	Prevalece a Pedogênese - Muito Baixo - Estável
Baixa	1,70	0,37%	Prevalece a Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	204,99	44,16%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	243,29	52,41%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Muito Alta	12,90	2,78%	Prevalece a Morfogênese - Vulnerável
Sem Classificação	1,22	0,26%	
Total	464,18	100%	
Vulnerabilidade Ambiental - Tabuleiros da Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu - (3) TSR			
Classe	Área (Km²)	(%)	Média de Intervalo
Baixa	79,05	17,03%	Prevalece a Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	177,78	38,30%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	84,79	18,27%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Muito Alta	121,39	26,15%	Prevalece a Morfogênese - Vulnerável
Sem Classificação	1,16	0,25%	
Total	464,18	100%	

Fonte: Elaborado por autor, 2023.

Os impactos identificados foram as áreas de (16) Agropecuária, (17) Assoreamento e perda de mata ciliar de rios ou cursos d'água, (18) Áreas de pousio ou atividade pecuária, (19) Assentamento ou povoado, (20) Urbanização e (21) Erosão e solo exposto. A partir da amostragem das informações, o Quadro 25, fará uma amostragem analítica por meio das condições naturais e impactos identificados.

De mesma maneira, o limite da bacia hidrográfica é considerado em preto, a parte magenta significaria o limite do Sistema TSR, o trecho em vermelho é o curso principal do Rio do Carmo, e em azul, as drenagens e corpos hídricos da ANA.

Quadro 25 - Análise Ilustrativa compilado de imagens do Sistema Ambiental (3) TSR.

(16) Agropecuária



A agropecuária, pela questão do desmatamento, é um dos principais impactos nas áreas, pois a supressão da vegetação é em larga escala, proporcionando um solo mais exposto sujeito a processos erosivos e interpéries, consequentemente, aumenta as áreas suceptíveis aos processos erosivos, isto, se aproximando da morfogênese

(17) Assoreamento e perda de mata ciliar de rios ou cursos d'água



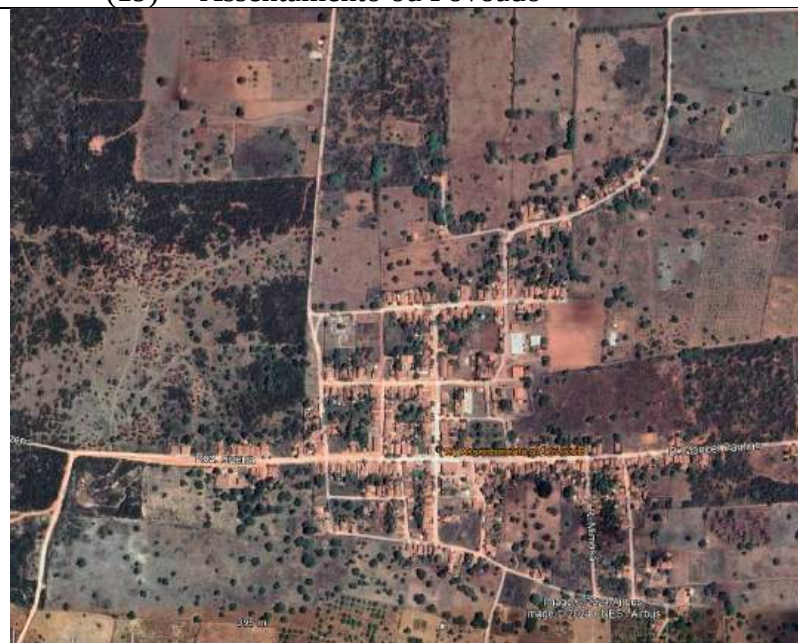
O assoreamento e mata ciliar nos rios, assim como visto no sistema anterior, é uma das confirmações do porquê que as áreas vulneráveis estão mais próximas dos corpos hídricos, pois é comum a utilização de atividades que usufruam dos recursos hídricos próximos essas áreas, como agricultura e agropecuária, consequentemente, influenciará um aumento nos processos morfogenéticos.

(18) Áreas de pousio ou atividade pecuária



As áreas de pousio são reconhecidas como áreas em processos de regeneração, com pequenas parcelas nesta imagem, pode-se perceber uma ação maior das atividades agropecuaristas, o que é um fator condicionante aos processos erosivos no solo.

(19) Assentamento ou Povoado



Os assentamentos e povoados são espalhados na região deste sistema, e a utilização das áreas em sua maiores suprimiram a vegetação, havendo solos mais expostos aos processos erosivos, consequentemente, caracterizando uma maior vulnerabilidade para as áreas.

(20) Urbanização



De mesma maneira, os processos de desmatamentos das regiões, suprimiram grandes contingentes de cobertura da vegetação, que deixarão uma maior vulnerabilidade as áreas, percebe-se que de toda forma, em alguns trechos há um equilíbrio entre os processos da pedogênese e morfogênese.

(21) Erosão e solo exposto



A erosão e solo exposto, estão especialmente ligada aos processos de mineração e extração de calcário nas áreas, segundo licenças da ANM (2024), consequentemente, aumenta os níveis de erosão, cadenciando fatores morfogenéticos.

Fonte: Google Earth (2023), organizado por autor.

5.3.4. *Depressão Sertaneja Setentrional (DSS)*

Para o Sistema Ambiental (4) DSS, Depressão Sertaneja Setentrional, considerado o maior Sistema Ambiental presente na BHRC, temos 1.572,23 km² em 43,71%. As classes de cobertura do Uso e cobertura da Terra mencionam áreas, em sua maioria com 59% das áreas como áreas de floresta ou vegetação nativa, considerando que mais da metade das áreas estão presentes o substrato natural vegetal, as áreas de formação natural não florestal não chegam a números expressivos no contingente total da área, mas perfazem 6,88 km².

As áreas de ações antrópicas, consideradas como agropecuária ou áreas antrópicas agrícolas, em segundo lugar, totalizam 37% da área deste Sistema Ambiental, conforme informações mencionadas no Quadro 18.

As áreas descritas para área não vegetada somam 1%. E há um aumento novamente da classe de Corpos D'água Continental, considerando 42,03 km² em 3%, e isso se deve ao fato da maior quantidade de rios, reservatórios e corpos d'água espalhados entorno da área das depressões, passíveis de acúmulo de água, por suas características do relevo.

O relevo é majoritariamente Suave Ondulado, seguido de partes em Plano e algumas áreas onduladas. A geomorfologia local, é identificada por meio da Depressão Sertaneja com Cinturões Móveis Neoproterozóicos com natureza de dissecação no relevo e Corpo D'água Continental, este Sistema é considerado por um aumento abrupto da altitude da Bacia, onde há presença de morros e áreas elevadas, inclusive serras, como a Serra do Lima, a Serra do Cuó e parte da Serra de João do Vale.

A Geologia são formadas por áreas em sua maioria da unidade Caicó - ortognaisse, do Proterozóico, seguidos de Poço da Cruz e Jucuru, também do Proterozóico, com rochas metamórficas, presentes no Embasamento Cristalino, e parcelas do Fanerozóico entre Plúton Tourão-Caraúbas, Plúton Serra do João do Vale, Plúton Sem Denominação, Granitoides de quimismo indiscriminado com rochas ígneas, e Formação Açu, Formação Serra dos Martins, e algumas parcelas de Depósitos aluvionares com rochas de origem sedimentar, nas áreas da Bacia Sedimentar.

Neste sistema está representada a composição pedológica com os solos de sua maioria com áreas de Luvisolos Crômicos Órticos, solos pouco drenados, e desenvolvidos a partir de gnaisses e xistos, seguidos de Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos, que variam com sua estrutura predominantemente granular com grau de desenvolvimento que varia de fraco a

moderado, e parcelas Neossolos Regolíticos Eutróficos, Luvisolos Crômicos Órticos e Planossolos Nátricos Órticos (EMBRAPA, 2023).

Apesar, de menor quantidade, esses solos representam os principais processos pedogenéticos nos solos da Caatinga são a formação de argila, elutriação, salinização e sodificação. Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos, Luvisolos, Cambissolos e Planossolos representam 61% do bioma, também solos voltados para agricultura devido sua estrutura e composição (EMBRAPA, 2023).

As regiões da Depressão Sertaneja na caatinga, são formadas principalmente de áreas com maioria de Savana-Estépica Arborizada, e grandes áreas com Agropecuária, seguidos de parcelas de Savana-Estépica Florestada, Savana-Estépica Parque, Agricultura com Culturas Permanentes, Agropecuária, Influência urbana e Corpo d'água continental.

A partir do Quadro 26, será realizada a análise ecodinâmica a partir das vulnerabilidades deste sistema.

Quadro 26 - Análise das Vulnerabilidades do Sistema Ambiental (4) DSS.

Vulnerabilidade Natural - Depressão Sertaneja Setentrional - (4) DSS			
Classe	Área (Km²)	(%)	Média de Intervalo
Muito Baixa	34,72	2,21%	Prevalece a Pedogênese - Muito Baixo - Estável
Baixa	523,15	33,27%	Prevalece a Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	941,61	59,89%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	61,32	3,90%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Muito Alta	0,06	0,004%	Prevalece a Morfogênese - Vulnerável
Sem Classificação	11,38	0,72%	
Total	1572,23	100%	
Vulnerabilidade Ambiental - Depressão Sertaneja Setentrional - (4) DSS			
Classe	Área (Km²)	(%)	Média de Intervalo
Muito Baixa	39,43	2,51%	Prevalece a Pedogênese - Muito Baixo - Estável
Baixa	903,99	57,50%	Prevalece a Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	73,56	4,68%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	508,67	32,35%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Muito Alta	35,03	2,23%	Prevalece a Morfogênese - Vulnerável
Sem Classificação	11,56	0,74%	
Total	1572,23	100%	

Fonte: Autor, 2023.

Em análise da Vulnerabilidade Natural, observa-se que as áreas em sua maioria consideram um sistema ambiental medianamente estável e vulnerável, com equilíbrio entre a pedogênese e morfogênese.

Já a vulnerabilidade ambiental irá considerar um sistema ambiental moderadamente estável - estável - prevalece a pedogênese.

Pode-se considerar que a Vulnerabilidade Natural as áreas da classe Média atingiram 59,89%, onde há uma grande diferença se comparado a Vulnerabilidade Ambiental com 4,68%.

Para Vulnerabilidade Natural, a Vulnerabilidade Baixa segue em segundo lugar com maior percentual em 33,27%, seguidos de parcelas com classes Alta em 3,90%, Muito Baixa em 2,21% e 0,004%, com poucas áreas, onde há classe de Vulnerabilidade Muito Alta. Áreas sem classificação obtiveram 0,72%.

Para Vulnerabilidade Ambiental, a maior classe é a Vulnerabilidade Baixa, seguidas de Vulnerabilidade Alta com também crescimento expressivo em comparação as duas áreas, com 32,35% na Vulnerabilidade Ambiental, em comparação aos 3,90% supracitados.

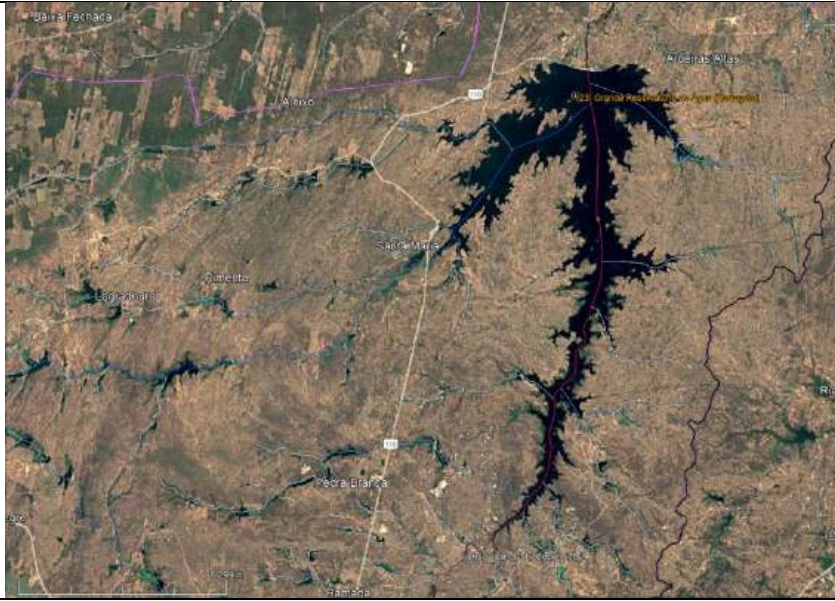
Na classe Muito Baixa houve pouca diferença percentual entre as classes, com 2,51% e um aumento expressivo na classe Muito Alta com 2,23%. As áreas Sem Classificação, de semelhante modo, chegaram a uma pequena parcela com 0,74%.

Em análise de sensoriamento remoto, percebeu que os principais impactos e características para esse Sistema Ambiental, estão entre processos e atividades de (22) Represamento ou barramento de água, (23) Grande Reservatório de Água (Barragem de Umari), (24) Agropecuária e (25) Áreas de relevo escarpado - Serra do Lima, (26) Áreas de relevo escarpado – Serra do Cuó, (27) Urbanização e (28) Solo exposto.

A partir da amostragem das informações, o Quadro 27, de mesma maneira, o limite da bacia hidrográfica é considerado em preto, a parte magenta significaria o limite do Sistema DSS, o trecho em vermelho é o curso principal do Rio do Carmo, e em azul, as drenagens e corpos hídricos da ANA.

Quadro 27 - Análise Ilustrativa compilado de imagens do Sistema Ambiental (4) DSS.

(22) Represamento ou barramento de água

Ao aproveitar o relevo, e a drenagem dos rios da bacia, represamentos e barramentos de água, conhecidos como açudes, podem evidenciar uma alta atividade nas áreas do Sistema Ambiental da Depressão Sertaneja. Pela imagem, percebe uma maior conservação da biodiversidade local, com poucas áreas degradadas, favorecendo a pedogênese, e pontos de relevo mais ondulados e escarpados.
(23) Grande Reservatório de Água (Barragem de Umari)

Nessas áreas, a partir da drenagem dos rios, levando em consideração a declividade do relevo nas Depressões Sertanejas, há um processo de represamento de corpos hídricos na região, sendo utilizados principalmente para desenvolvimento de atividades agropecuárias. Na vista da foto, mostra a Barragem de Umari, o maior reservatório de água da BHRC.

(24) Agropecuária



Para as atividades agropecuárias neste sistema, há uma maior presença de corpos hídricos ao entorno, consequentemente, apesar de um grande impacto e grau de vulnerabilidade, os corpos hídricos são um indicativo para diminuição dos processos erosivos, devido a preservação ambiental e fato da água para valores equacionais, se aproxima mais da pedogênese.

(25) Áreas de relevo escarpado - Serra do Lima



As áreas de relevo escarpado retratam a Serra do Lima, no município de Patu, percebe-se sua influência e formação das áreas, com corpos hídricos ao redor. De acordo com os dados da pesquisa, foram considerados rochas que sofrem processos de denudação, que consequentemente, aproximasse da morfogênese, porém, o substrato vegetal na maioria das regiões é preservado, com uma carga maior de corpos hídricos, nesse

caso, evidenciando um equilíbrio entre pedogênese e a morfogênese.

(26) Áreas de relevo escarpado – Serra do Cuó



Na Serra do Cuó, de mesma maneira, como a geomorfologia fluvial retratada na drenagem dos mapas, percebe-se a disposição de corpos hídricos, e conservação da biodiversidade local.

(27) Urbanização



Nesta imagem, mostra processos de urbanização, que através de desmatamentos removem a cobertura vegetal, consequentemente, se aproximando da morfogênese, entretanto, há também a presença de um represamento de água.

(28) Solo exposto



Nesse processo, há um equilíbrio entre a pedogênese e a morfogênese, devido a divisão entre condições naturais com substrato da vegetação e corpos hídricos, com áreas afetadas com solo exposto.

Fonte: Google Earth (2023), organizado por autor.

5.3.5. *Serras de João do Vale (SJV)*

Por último o (5) SJV, no compartimento das Serras, temos o Sistema Ambiental Serras de João do Vale, apesar da unidade geológica e geomorfológica da região considerar a formação Serra do Martins-Portalegre e João do Vale, esse sistema é formado basicamente por uma parcela contabilizando a Serra de João do Vale, representando um total de 7,92 km² com somente 0,22% das áreas da BHRC, considerado o menor sistema evidenciado em composição territorial.

Como descrito no nome e compartimento, o relevo deste Sistema é classificado como Forte Ondulado, devido a presença de grandes altitudes e inclinação através dos topos de morros. Nessas áreas a partir da Geomorfologia, pode-se considerar Aplanamentos Residuais do Domo da Borborema e Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas com natureza de dissecação no relevo.

A Geologia pode ser classificada em áreas divididas em sua maioria com Formação da Serra dos Martins do Proterozóico com rochas de origem Ígneas e do Fanerozóico com Plúton Serra do João do Vale em rochas sedimentares.

A pedologia deste Sistema está classificada somente como Luvisolos Crômicos Órticos que segundo o Embrapa (2022), estes solos variam de bem a imperfeitamente drenados, sendo normalmente pouco profundos com nítida diferenciação entre os horizontes A e B, devido ao contraste de textura, cor e/ou estrutura entre eles. Grande parte dos solos desta classe possui mudança abrupta em sua textura. São considerados moderadamente ácidos a ligeiramente alcalinos, indicando atividade alta da argila. Podem ou não apresentar pedregosidade na parte superficial e/ou caráter sódico, na parte subsuperficial.

A cobertura da vegetação nestas áreas é formada praticamente de Savana-Estépica Arborizada, com presença de Savana-Estépica Parque e pequenas parcelas de Agropecuária, não atenuante os processos erosivos.

No Quadro 28, pode-se considerar as áreas de Vulnerabilidade Média, tanto para Vulnerabilidade Natural quanto para a Vulnerabilidade Ambiental, como um Sistema Ambiental medianamente estável/vulnerável, portanto, possui equilíbrio entre os processos da Pedogênese/Morfogênese.

Quadro 28 - Análise das Vulnerabilidades do Sistema Ambiental (5) SJV.

Vulnerabilidade Natural – Serra de João do Vale (5) SJV			
Classe	Área (Km²)	(%)	Média de Intervalo
Baixa	0,10	1,29%	Prevalece a Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	7,24	91,42%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	0,10	1,22%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Sem Classificação	0,48	6,07%	
Total	7,92	100,00%	
Vulnerabilidade Ambiental – Serra de João do Vale (5) SJV			
Classe	Área (Km²)	(%)	Média de Intervalo
Baixa	0,29	3,69%	Prevalece a Pedogênese - Moderadamente Estável
Média	7,12	89,91%	Equilíbrio - Medianamente Estável/Vulnerável
Alta	0,01	0,18%	Prevalece a Morfogênese - Moderadamente Vulnerável
Sem Classificação	0,49	6,22%	
Total	7,92	100,00%	

Fonte: Elaborado por autor, 2023.

Assim, foi analisado o Sistema Ambiental a partir das Vulnerabilidade Natural e Ambiental como um Sistema Ambiental medianamente estável/vulnerável, onde há equilíbrio entre a Pedogênese/Morfogênese.

Isso se deve ao fato de que, nesse caso, o relevo é o processo mais atenuante para erosão, em um sistema onde há um maior índice de declividade, apesar de existir poucas atividades e impactos antrópicos na região.

Para Vulnerabilidade Natural, conforme análise, a classe Média foi marcante em 91,42% das áreas, sendo o restante dividido entre classe Baixa com 1,29% e 1,22%. Assim como o (1) PLSN, houve mais áreas consideradas como Sem Classificação com 6,07% na Vulnerabilidade Natural e 6,22% para Vulnerabilidade Ambiental.

Isso deve ao fato de no processamento do *raster calculator*, áreas próximas a borda limite do arquivo são mais difíceis de serem classificadas, por quanto da geração de polígonos e tamanho do pixel que não se moldam, como se fosse uma falha no processamento, mas nada tão relevante a ponto de modificar o resultado final.

Para Vulnerabilidade Ambiental, de semelhante modo, a classe Média atingiu a maioria dos valores com 89,91%, sendo o restante dividido em classe Baixa com 3,69% e 0,18% para Alta.

Os impactos possíveis atenuaram em (29) Áreas de relevo escarpado – Serra de João do Vale. A partir da amostragem das informações, o Quadro 29:

Considera-se para identificação as cores em magenta, indicando os limites do Sistemas (5) SJV, com a drenagem da ANA de 2021, e os limites em preto, indicando os limites da bacia, próximos aos limites estaduais da pequena parcela que atinge o estado da Paraíba, que equivalente a menos 1% da área do território.

Quadro 29 - Análise Ilustrativa compilado de imagens do Sistema Ambiental (5) SJV.



Apesar de não haver grande atividades antrópicas, o relevo escarpado foi um indicativo para o aumento da vulnerabilidade das áreas desse sistema, afinal, as áreas com essas declividades proporcionam maior ação e denudação das rochas, consequentemente, aumento dos processos erosivos. Por haver um substrato de vegetação maior, essas áreas foram consideradas em equilíbrio ecodinâmico.

Fonte: Google Earth, 2023.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De antemão, a partir da análise dos resultados e discussões, conclui-se de maneira sucinta, que a classificação dos sistemas ambientais de uma bacia é essencial para o planejamento ambiental, tendo em vista o método e o recorte utilizado para pesquisa. E destaca que o planejamento e gestão hídrica a partir de uma bacia, considerando todos os aspectos naturais e antrópicos, é uma excelente alternativa em meio a vulnerabilidade das áreas.

Assim, utilizar um recorte geomorfológico se torna uma excelente classificação para sistemas ambientais, tendo em vista a variabilidade e multiplicidade dos tipos diferentes, e interação entre os elementos biofísicos e fatores encontrados nas classes das Unidades da Paisagem entre a Geologia, Geomorfologia, e Hidrologia, Climatologia, Pedologia, Cobertura da Vegetação e cobertura do Uso da Terra, onde cada segmento pode influenciar diretamente nos resultados, tendo em vista a susceptibilidade aos impactos e possíveis degradações, inclusive sobre o balanço hídrico quanti-qualitativo, a partir do recorte da bacia, que segundo os dados da ANA (2013), considerou a alta demanda hídrica e qualidade da água, como uma análise crítica.

Segundo as análises dos índices de Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental, aplicada aos Sistemas Ambientais, segundo as obras e trabalhos dos autores supracitados conforme referencial teórico e metodologia, considerou que:

O Sistema Ambiental (1) PLSN - Planícies do Litoral Setentrional Nordeste, representa um percentual de 0,66% de área da BHRC, segundo a Vulnerabilidade Natural possui equilíbrio entre a Pedogênese e Morfogênese, considerado assim um Sistema Ambiental medianamente estável ou vulnerável, isto é, Intermediário. Já a Vulnerabilidade Ambiental considerou um sistema ambiental moderadamente estável onde prevalece a Pedogênese.

A partir das análises, isso se deu em fato deste sistema considerar grandes quantidades de corpos hídricos que funcionam a partir de atividades antrópicas.

O Sistema Ambiental (2) TCA – Tabuleiros da Chapada do Apodi, representa 1.528,84 km² com um percentual de 42,50% de área da BHRC, possui equilíbrio entre a Pedogênese e Morfogênese, considerado assim, segundo a Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental, de semelhante modo, considerou um Sistema Ambiental medianamente estável ou vulnerável, isto é, Intermediário.

Isso se deu em fato de haver um grande equilíbrio em um contingente de áreas antrópicas, em relação a um grande substrato vegetal.

O Sistema Ambiental (3) TSR – Tabuleiros da Superfície Rebaixada do Vale do Rio Açu, representa 464,18 km² com um percentual de 12,91% de área da BHRC, considerou em sua Vulnerabilidade Natural, um Sistema Ambiental com Alta Vulnerabilidade, sendo moderadamente instável, que prevalece a Morfogênese. Em contrapartida, com processos menos atenuantes, a Vulnerabilidade Ambiental, considerou um Sistema Ambiental medianamente estável ou vulnerável, isto é, Intermediário.

A partir das análises, foi concebido uma grande quantidade de áreas que suprimiram o substrato vegetal, alterando a composição natural do solo, conseqüentemente, desencadeou a susceptibilidade aos processos erosivos.

O Sistema Ambiental (4) DSS – Depressão Sertaneja Setentrional, representa um 1.572,23 km² com percentual de 43,71% de área da BHRC, segundo a Vulnerabilidade Natural é um Sistema Ambiental que possui equilíbrio entre a Pedogênese e Morfogênese, considerado medianamente estável ou vulnerável, isto é, Intermediário. Já a Vulnerabilidade Ambiental considera um Sistema Ambiental moderadamente estável, prevalecendo a Pedogênese, ou seja, Estável.

Desse modo, explica-se através da grande quantidade de represamentos e barramentos de corpos hídricos, que apesar da denudação do relevo, as áreas proporcionaram maior conservação da biodiversidade, tendo em vista que o relevo ondulado ou escarpado, com maior inclinação, não é indicado para boa parte das ações antrópicas desenvolvidas na bacia, em comparação a outras áreas que tiveram aplainamentos do relevo, como em outros sistemas. Bem como as atividades agropecuárias ou agrícolas, e menos atividades petrolíferas, pois se encontra no Embasamento Cristalino, ao invés da Bacia Sedimentar.

O Sistema Ambiental (5) SJV Serras do João do Vale, representam 7,92 km² com percentual de 0,22% de área da BHRC, de semelhante modo, segundo a Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental, é Sistema Ambiental medianamente estável ou vulnerável, onde há um equilíbrio entre a Pedogênese e a Morfogênese, isto é, Intermediário.

Atesta-se a pequena parcela analisada ser em uma área serrana, com poucas atividades antrópicas, mas evidenciadas pelo processo de denudação das rochas e inclinação que acentuam processos erosivos. Apesar disto, há uma grande conservação da biodiversidade por meio do substrato vegetal na região.

De maneira geral, a maioria dos sistemas foram considerados medianamente estáveis ou vulneráveis, tanto para Vulnerabilidade Natural quanto para Vulnerabilidade Ambiental, sendo

em algumas análises da Vulnerabilidade Ambiental estáveis e somente um classificado a partir da Vulnerabilidade Natural como instável.

E a partir dos resultados, não foram considerados nenhum Sistema Ambiental vulnerável ou de vulnerabilidade Muito Alta, assim como não foi observado nenhum Sistema Ambiental sendo totalmente estável ou de vulnerabilidade Muito Baixa, o que confirma que as alterações foram suficientes para a modificação do geossistema, mas não para degrada-lo por completo, a partir de sua vulnerabilidade.

Quando analisados de maneira geral, na extensão total do território da BHRC, considerou áreas de vulnerabilidade média, em mais da metade das áreas, possuindo equilíbrio intermediário entre a pedogênese e morfogênese.

Em contrapartida, a Vulnerabilidade Ambiental, considerou percentuais que corroboram para Baixa Vulnerabilidade, onde há processos pedogenéticos mais acentuados. Apesar disto, houve análises bastante divididas, em que os valores equacionais partiram para mais variantes devido aos pesos utilizados em cada classe, considerando um aumento em graus de vulnerabilidade Muito Alta, atenuando-se nos de maneira expressiva.

Assim, levou-se em consideração que a Vulnerabilidade Ambiental tem um peso maior para ações antrópicas, onde os processos de áreas mais críticas vão ser consideradas mais evidentes, onde aumentam o índice de grau de vulnerabilidade, assim como de áreas menos críticas, onde haverá essa diminuição dos processos erosivos, sendo um excelente método de comparação para com a Vulnerabilidade Natural.

De toda forma, considerou a partir da discussão dos resultados, que é de suma importância propor análises a partir da Ecodinâmica, e sugere que haja mais pesquisas que evidenciem a atuação dos processos de impactos e degradação no meio ambiente por meio da ação antrópica, com comparação em décadas diferentes, unindo também a análise social e econômica para avaliar melhor estes processos, em busca da sustentabilidade e conservação dos Sistemas Ambientais presentes em Bacias Hidrográficas.

Essas pesquisas poderão trabalhar com outros pesos e diferentes critérios, unindo a análise da influência dos aspectos populacionais e sociais, na vulnerabilidade social, por exemplo, com a união dos conceitos, para tratar o lado socioambiental, através dos bancos de dados geográficos, destacando os desafios enfrentados por grupos marginalizados e em situação de risco, examinando uma variedade de dimensões na economia, educação, saúde, urbanização e serviços básicos. Levando em consideração fatores demográficos, como idade, gênero, etnia e localização geográfica, que influenciam significativamente para com a vulnerabilidade social.

7. REFERÊNCIAS

AB’SÁBER, A. N. **Os Domínios de Natureza do Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo, Ateliê Editorial, 2003.

AMORIM, Raul Reis. UM NOVO OLHAR NA GEOGRAFIA PARA OS CONCEITOS e APLICAÇÕES DE GEOSSISTEMAS, SISTEMAS ANTRÓPICOS e SISTEMAS AMBIENTAIS. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia v. 13, n. 41 mar/2012 p. 80 – 101. <http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html> . ISSN 1678-6343.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Comitês de Bacias Hidrográficas. Disponível em: http://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/14c8098157454aeb9e49d0bebee97c67_0 . Ano 2017. Acesso em 10 de maio de 2022.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Conjuntura dos Recursos Hídricos. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Ano 2024 - Acesso em 5 de fevereiro de 2024.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Dados de consulta de processos minerais com o sistema de informação geográfica de mineração. Disponível no site: <https://geo.anm.gov.br/portal/apps/Cascade/index.html?appid=2780a91dc5324e5080b1fb962a93285f>. Ano 2024 - Acesso em 1 de fev de 2024.

ARCGIS Enterprise – ESRI. Disponível em: <https://enterprise.arcgis.com/en/>. Acesso em 15 de out de 2023.

ARGENTO, M. S. F. Mapeamento geomorfológico: In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 7. ed. Rio de Janeiro: **Bertrand Brasil**, 2007, p. 365-390.

BARBOSA, C. C. F. **ÁLGEBRA DE MAPAS e SUAS APLICAÇÕES EM SENSORIAMENTO REMOTO e GEOPROCESSAMENTO**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto (1997). INPE-7115-TDI/667, São José dos Campos, 1999.

BELATO, L. S.; SERRÃO, S. L. C. 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, jan. 2019.

BERTRAND, G. Paisagem e Geografia Física global: esboço metodológico. Cruz, Olga (trad.) Cadernos de Ciências da Terra. São Paulo: **USP-IGEOP**, nº 43), 1972.

BERTRAND, G.; BERTRAND, C. Uma Geografia transversal e de travessias: o meio ambiente através dos territórios e das temporalidades. Maringá: **Massoni**, 2007.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm. Acesso em 09 de outubro de 2022.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997: Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em 18 de outubro de 2022.

BRASIL. Minuta de Resolução: Diretrizes para elaboração dos Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas e outras providências. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm Acesso em 09 de outubro de 2022.

CÂMARA, G; DAVIS, C; MONTEIRO, A. M G. **INTRODUÇÃO À CIÊNCIA DA GEOINFORMAÇÃO**. INPE – São José dos Campos, 2001. INPE-10506-RPQ/249.

CAMPOS, H. L. Gestão de bacia hidrográfica: pressupostos básicos. In: SÁ, A. J.; CORRÊA, A. C. B. **Regionalização e análise regional: perspectivas e abordagens contemporâneas**. Recife: Editora Universitária, p. 91-111, 2006.

CARDOSO, O. A.; ROCHA, N. S. da; XAVIER, R. A.; VALDUGA, E. T.; DISCONZI, G. S.; RADTKE, L. (2014). Análise de fragilidade ambiental na bacia do rio Pardo - RS, frente à instalação de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). RBRH - **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. RBRH vol. 20 nº .2 Porto Alegre abr./jun. 2015 p. 507-522. 10.21168/rbrh.v20n2.p507-522.

CARVALHO, A. T. F. BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO: DISCUSSÃO SOBRE OS IMPACTOS DA PRODUÇÃO SOCIAL NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n. 42, v. 1, p. 140-161, jan-jun, 2020. ISSN: 2176-5774.

CARVALHO, A. T. F.; GIRÃO, O. da S. & CABRAL, J. J. da S. P. Efeitos do revestimento de canal e impermeabilização do solo à dinâmica de inundação do Rio Arrombados – PE. *Revista Geociências*, v. 36, n. 1, 2017. p. 76-88

CARVALHO, Andreza Tacyana Felix. BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO: DISCUSSÃO SOBRE OS IMPACTOS DA PRODUÇÃO SOCIAL NA

CARVALHO, G. O. T. de; SILVA, N. C. da; SALVIO, G. M. M. Vulnerabilidade ambiental em Áreas de Proteção Ambiental (APA) do Bioma Mata Atlântica na região sudeste brasileira. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 1575–1593, 2022. DOI: 10.5902/1980509867261. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/67261>. Acesso em: 24 out. 2023.

CASANOVA, M. A. CÂMARA, G. JUNIOR, C. A. D. VINHAS, L. QUEIROZ, G. R. de; Organizadores e Editores. **Banco de Dados Geográficos**. Maio, 2005. Editora Mundogeo.

CAVALCANTI, L. C. S. **Da descrição de áreas à teoria dos geossistemas: uma abordagem epistemológica sobre síntese naturalista**. Recife, 2013. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco.

CHIQUITO, E. A. “A Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguaí: do planejamento de vale aos polos de desenvolvimento”. (tese de doutorado) São Carlos: IAUUSP, 2012.

CHRISTOFOLETTI, A **Geomorfologia**. São Paulo Ed. Edgard Blucher, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. A aplicação da abordagem em sistemas na Geografia Física. **Revista Brasileira de Geografia**, 52. São Paulo, 1990. P. 21-35.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia**. Introdução. São Paulo: Hucitec, 1979. 106p.

COSTA Franklin R., SOUZA Raquel F., SILVA, Sebastião M. P.; ANÁLISE DAS VULNERABILIDADES NATURAL e AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (RN). São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 40, n. 2, p. 459 - 475, 2021. UNESP. ISSN: 1980-900X (online).

COSTA, F.H.S; PETTA, R.A.; LIMA, R.F.S.; MEDEIROS, C.N. Determinação da vulnerabilidade na bacia potiguar, Região de Macau (RN), utilizando Sistemas de Informações Geográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**. Rio de Janeiro, UFRJ, n. 58, v. 2, p.119-12, 2006.

COSTA, Luis Ricardo Fernandes da. OLIVEIRA, Vlândia Pinto Vidal de. OS SISTEMAS AMBIENTAIS e A ANÁLISE AMBIENTAL NO CONTEXTO SEMIÁRIDO: o caso da sub-bacia hidrográfica do Riacho Santa Rosa. PPGeo. **Revista Equador** (UFPI), Vol. 4, Nº 2, p.56 - 76 (2015) Home: <http://www.ojs.ufpi.br/index.php/equador>.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA e RECURSOS MINERAIS. Serviço Geológico Brasileiro – SGB – Carta geológica da folha Jaguaribe SB 24, 2004.

CPRM - Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. Serviço Geológico Brasileiro – SGB. PROGRAMA GEOLOGIA DO BRASIL. Levantamento da Geodiversidade. Geodiversidade do estado do Rio Grande do Norte / Org. Pedro Augusto dos Santos Pfaltzgraff e Fernanda Soares de Miranda Torres. Rio de Janeiro – Brasil, 2010.

CREPANI E; MEDEIROS J. S; FILHO P. H; FLORENZANO T. G; DUARTE V; BARBOSA C. C. F. **SENSORIAMENTO REMOTO e GEOPROCESSAMENTO APLICADOS AO ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO e AO ORDENAMENTO TERRITORIAL**. (INPE-8454-RPQ/722) São José dos Campos - junho de 2001.

CUIABANO, M. N.; NEVES, S. M. A. S.; NUNES, C. M.; SERAFIM, M. E.; NEVES, R. J. Vulnerabilidade ambiental a erosão hídrica na sub-bacia do Córrego do Guanabara/ Reserva do Cabaçal – MT, Brasil. **Revista Geociências**, Mato Grosso, v. 36, n. 3, p. 543 –556, 2017.

DINIZ, M. T. M.; PEREIRA, V. H. C. Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, Brasil: sistemas atuantes e mapeamento de tipos de clima. **Boletim Goiano de Geografia**. v. 35, n. 3, p. 488-506, 2015.

DIXON, Simon J. SEAR, David A. ODoni, Nicholas A. SYKES, Tim. LANE, Stuart N. The effects of river restoration on catchment scale flood risk and flood hydrology. **Earth Surface Process and Landforms**. BSG Geomorphology. 12 de fevereiro de 2016. <https://doi.org/10.1002/esp.3919>

DUAILIBI [et al.] **Tutorial: análise da cobertura vegetal** [livro eletrônico]. Maringá, PR; Uniedsul, 2022. ISBN 978-65-80277-87-2. DOI: 10.51324/80277872.

EMBRAPA, Portal do Embrapa - Solos do Brasil. Conteúdo atualizado em 2022. <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais> acesso em 10/11/2023.

FILHO, A. C. P; MIOTO, C. L.; PESSI, D. D; GAMARRA, R. M; SILVA, N. M; RIBEIRO, V. O; CHAVES, J. R. **GEOTECNOLOGIAS PARA APLICAÇÕES AMBIENTAIS**. Editora Uniedsul 2021.

FULLER, Matthew R.; DOYLE, Martin W.; STRAYER, David L.; Causes and consequences of habitat fragmentation in river networks. **ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES**. Agosto de 2015. <https://doi.org/10.1111/nyas.12853>

GARBRECHT, J.; MARTZ, L.W. **Digital elevation model issues in water resources modeling**. ESRI, USERS CONFERENCE, 19., 1999, San Diego. Proceedings... San Diego: 1999. CD-ROM.

GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n. 42, v. 1, p. 140-161, jan-jun, 2020. ISSN: 2176-5774.

GIRÃO, O. da S. & CORRÊA, A. C. B. Progressos nos estudos de Geomorfologia fluvial urbana ao final do século XX. **Geo UERJ** n. 26, p. 245-269, 2015.

GRIGIO, A. L. M., Amaro, V. E., Diodato, M. A. 2009. **Dinâmica espaço-temporal do uso e ocupação solo, no período de 1988 a 2004, do baixo curso rio Piranhas-Assu (RN): sugestões acompanhamento integrado das atividades socioeconômicas impactantes na área costeira**. Geografia, v. 34, p. 141-161.

GRIGIO, A. M., Souto, M. V. S., Castro, A. F., Amaro, V. E., Vital, H. & Diodato, M. A. 2004. 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**, 39: 1427-1431.

GRIGIO, A.M. 2003. **Aplicação de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do Município de Guamaré (RN)**. p. 181, nº 34

GUERRA, Maria Daniely Freire; SOUZA, Marcos José Nogueira de; LUSTOSA, Jacqueline Pires Gonçalves. REVISITANDO A TEORIA GEOSSISTÊMICA DE BERTRAND NO SÉCULO XXI: APORTES PARA O GTP. **Geografia em questão**. V.05. N. 02. 2012. Pág. 28 – 42. ISSN 2178-0234.

HARDER, Christian; BROWN, Clint, and Editors. **The Arcgis Book, 10 Big Ideas about Applying The Science of Where**. 2ª edição. Disponível em www.thearcgisbook.com ESRI 2017. ISBN 978-1-58948-487-0. ESRI PRESS - USA.

HASSANALIAN, M. ABDELKEFI, A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. **Progress in Aerospace Sciences**. Volume 91, May 2017, Pages 99-131. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>.

HOFER, Barbara. Uses of online geoprocessing technology in analyses and case studies: a systematic analysis of literature. **International Journal of Digital Earth** - Volume 8, 2015 - Issue 11. Outubro de 2014. Acesso em: <https://doi.org/10.1080/17538947.2014.962632>

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. GSA Bulletin, Boulder: Geological Society of America - GSA, v. 56, n. 3, p. 275-370, Mar. 1945. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2). Acesso em: out. 2022

IBGE. Dados das Cidades. Ano 2022 – disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/> acesso em outubro de 2023.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira** 2ª ed, revista e ampliada. Manuais técnicos em geociências divulga os procedimentos metodológicos utilizados nos estudos e pesquisas de geociências. ISBN 978-85-240-4272-0 (meio impresso). ISSN 0103-9598. Rio de Janeiro, 2012.

IBGE. **Manual Técnico de Pedologia** 2ª ed. Manuais técnicos em geociências divulga os procedimentos metodológicos utilizados nos estudos e pesquisas de geociências. Rio de Janeiro, 2007. ISSN 0103-9598.

IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra** 3ª ed. Manuais técnicos em geociências divulga os procedimentos metodológicos utilizados nos estudos e pesquisas de geociências. Rio de Janeiro, 2013. ISSN 0103-9598.

IBGE. **Série Relatórios Metodológicos – Bacias e Divisões Hidrográficas Do Brasil**. Volume 48. Rio de Janeiro, 2021. ISSN 0101-2843, ISBN 978-65-87201-80-1.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – SPRING**. Versão 4.3.3. São José dos Campos: INPE, 2007. ISBN: 85-7282-148-1

KEMP, L., Xu, C., DEPLEDGE, J., Ebi, K. L., GIBBINS, G., Kohler, T. A., ROCKSTRÖM, J., SCHEFFER, M., Schellnhuber, H. J., STEFFEN, W., & LENTON, T. M. (2022). Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 119(34), e2108146119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2108146119>

KLAIS, T. B. A.; DALMAS, F. B.; MORAIS, R. P.; ATIQUE, G.; LASTORIA, G.; FILHO, A. C. P. Vulnerabilidade natural e ambiental do município de Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, Brasil. Revista Ambiente & Água, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 277-290, jun. 2012.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-Map 150cmx200cm. 1928.

LEE, Saro. Current and Future Status of GIS-based Landslide Susceptibility Mapping: A Literature Review. **Korean Journal of Remote Sensing**, Vol.35, No.1, 2019, pp.179~193. ISSN 2287-9307 (Online). 16 de fevereiro de 2019. Acesso em: <https://doi.org/10.7780/kjrs.2019.35.1.12>

LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W. and CHIPMAN, J.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 5th Edition, John Wiley, New York, 2004.

LIMA, Évio Marcos; CORRÊA, Antônio Carlos Barros. COMPARTIMENTAÇÃO DA PAISAGEM EM BASES GEOSISTÊMICAS DO ALTO CURSO DO RIO CANHOTO, PLANALTO DA BORBOREMA, NORDESTE DO BRASIL. UFPE, Pernambuco, PE, Brasil. **GEOUERJ**. 2019. DOI: 10.12957/geouerj.2019.38012

LIMA, Gabriela Cristina; BRITO, Anderson Geóva Maia de; FARIAS, Juliana Felipe. UM RESGATE A OBRA DE GEORGES BERTRAND: CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS e METODOLÓGICAS NA ANÁLISE DA PAISAGEM. <https://doi.org/10.46551/rvg2675239520211320>. **Revista Verde Grande. Geografia e Interdisciplinaridade**. Volume 3, nº. 1 (2021). ISSN: 2675-2395

LOPES, D. Nogueira; SILVA, M. Targino da; DUARTE, C. Romariz; Grigio, A. Marcelo; DAMASCENO, A. Moreira; RODRIGUES, L. I. de Castro. Análise da Vulnerabilidade Natural e Ambiental do Município de São Gonçalo do Amarante, litoral do Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.14, n.05 (2021) 3057-3066. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

MARTINS, E.S.P.R. *et al.* Unveiling water security in Brazil: current challenges and future perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, v. 66, n. 5, p. 759 – 768, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1899182>

MENDONÇA, F. Dualidade e dicotomia da Geografia moderna. **Ra'EGA: o Espaço Geográfico em análise**. Curitiba: UFPR, v. 2, n. 2, p. 153-165, 1998.

MENDONÇA, F.; KOZEL, S. (ORGS.) **Elementos de epistemologia da geografia contemporânea**. Curitiba: Ed. da UFPR, 2002.

MIRANDA, M. S. A. **ESTADO AMBIENTAL e GRAUS DE SUSTENTABILIDADE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DO CARMO-RN, BRASIL**. Dissertação de Mestrado. Natal-RN, 2022.

MONTEIRO C. A. F. **Geossistemas: a história de uma procura**. 2 ed. São Paulo: Contexto. 2001.

MORAES, MEB., and LORANDI, R., orgs. Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas [online]. Ilhéus, BA: **Editus**, 2016, 283p. ISBN 978-85-7455-443-3. Available from SciELO Books <http://books.scielo.org>.

MORAIS, E. S. UEMA, D. Y. MONTANHER, O. C. Álgebra de mapas em publicações da Revista Brasileira de Geomorfologia: período entre 2001 e 2020. **Revista Brasileira de Geomorfologia** v. 23, nº 2 (2022) <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i2.2196>.

MOREIRA, J. C. SENE, J. E.; Geografia para o ensino médio: geografia geral e do Brasil. 1ª. ed. São Paulo: Scipione, 2007. v. 2. 160 p.

NETO, J. F. JARDIM, A. M. R. SOUZA, L. S. SILVA, T. G. Desertification: an overview of processes and concepts, based on the application of orbital indices through remote sensing. **Research, Society and Development**. 2021. Vol. 10 NO. 11. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19950>.

NGUYEN, K. LIOU, Y. Global mapping of eco-environmental vulnerability from human and nature disturbances. **Elsevier**, Science of The Total Environment - Volume 664, 10 May 2019, Pages 995-1004.

OLIVEIRA, F.F.G. **Aplicação das técnicas de geoprocessamento na análise dos impactos ambientais e na determinação da vulnerabilidade ambiental no litoral sul do Rio Grande do Norte**. Tese (Doutorado em Geografia) Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP – Rio Claro, 2011, 250p.

OLIVEIRA, Glaucia S. **O SISTEMA GTP (GEOSSISTEMA – TERRITÓRIO - PAISAGEM) NO MUNICÍPIO DE ARCOS – MG: Uma análise da paisagem**. Dissertação. UFMG. Belo Horizonte, 2019.

OLIVEIRA, P.T.S.; RODRIGUES, D.B.B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI, E. Processo analítico hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. **Geociências**, São Paulo, UNESP, v.28, n.4, 2009, p.417-424.

PEIXOTO, F. S. DIAS, G. H. FILGUEIRA, R. F.; DANTAS, J. CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA e DO USO e COBERTURA DA TERRA NO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DO CARMO – RN/BRASIL. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n. 43, v. 2, p. 138-158, mai-ago, 2021. ISSN: 2176-5774

PEREIRA, L. E.; PEREIRA, J. G. Identificação e análise das áreas de vulnerabilidade ambiental da cidade de Corumbá (MS). *Revista Geografia (Londrina)*, Londrina, v. 21, n. 1, p. 085-101, jan./ abr., 2013.

PFAFSTETTER, O. Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Codificação de bacias hidrográficas pelo método de Otto Pfafstetter: aplicação na ANA. Brasília, DF: ANA, [2014]. p. 25-41. Manuscrito. Anexo I. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/104/1/apostila.pdf>. Acesso em: out. 2022.

PILACHEVSKY, T. **Zoneamento geoambiental do município de São João da Boa Vista (SP)**. Rio Claro, 2013. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

PORTO, M. F. A. & PORTO, R. L. L. **Gestão de bacias hidrográficas**. *Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

PROJETO MAPBIOMAS. MapBiomas – Documento Geral, Coleção 8 - MapBiomas General “Handbook” Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Versão 1. Disponível em: <http://plataforma.mapbiomas.org/map>. Acesso em: 5 set. 2023.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **Changelog for QGIS 3.28**. 2022. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/forusers/visualchangelog328/index.html. Acesso em: 05 dez 2022.

REIS JÚNIOR, D. F. da Costa.; HUBSCHMAN, Jacques. PENSAMENTO GEOSISTÊMICO ORIENTAL (VOZ e REVERBERAÇÃO) **GEOGRAFIA**, Rio Claro, v. 32, n. 3, p. 555-569, set./dez. 2007.

RIBEIRO, Karoline Veloso; ALBURQUERQUE, Emanuel Lindemberg Silva. SISTEMAS AMBIENTAIS NO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO POTI, ESTADO DO CEARÁ. PPGE. **Revista Equador** (UFPI), Vol. 6, Nº 1, p.57 – 73. Home: <http://www.ojs.ufpi.br/index.php/equador>

RIDLEY, D. **The Literature Review: A Step-by-step Guide for Students**. London: Sage, 2008. RODRIGUEZ, J. M. Mateo; SILVA, Edson V. da S.; CAVALCANTI, A. P. Brito. Geoeecologia das Paisagens. **Uma visão geossistêmica da análise ambiental**. Edições UFC. Fortaleza 2017.

ROSA, R. Geotecnologias na Geografia Aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, Universidade Federal de Uberlândia, v.16, p.81-90, 2005.

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.

ROSS, J. L. S. O REGISTRO CARTOGRÁFICO DOS FATOS GEOMORFOLÓGICOS e A QUESTÃO DA TAXONOMIA DO RELEVO. **Revista do Departamento de Geografia**, [S. l.], v. 6, p. 17-29, 2011. DOI: 10.7154/RDG.1992.0006.0002. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47108>. Acesso em: 28 out. 2022.

SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SHAH, Seema; SHINDE, P. P., "A Review of Machine Learning and Deep Learning Applications," 2018 **Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation** (ICCUBEA), Pune, India, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCUBEA.2018.8697857. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8697857/authors#authors>.

SILVA, A. G. SOUZA, L. D. EFEITOS ANTRÓPICOS E SAZONAIS NA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO DO CARMO. **HOLOS**, Ano 29, Vol. 5. ISSN 1807 – 1600.

SILVA, Diego V. S. da, CRUZ, Carla B. M. Tipologias de Caatinga: Uma Revisão em Apoio a Mapeamentos Através de Sensoriamento Remoto Orbital e GEOBIA. **REVISTA DO DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**. www.revistas.usp.br/rdg - ISSN 2236-2878 V.35 (2018) DOI: 10.11606/rdg.v35i0.142710. Universidade de São Paulo, 2018.

SILVA, F.M. **Análise da vulnerabilidade ambiental no estuário do rio Curimataú/Cunhaú, Baía Formosa e Canguaretama – RN, Brasil**. Natal, 2013, 152 p. Dissertação (Mestrado em

Geografia) Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SOCHAVA, V. B. **O estudo de geossistemas. Métodos em questão**. São Paulo: Instituto de Geografia. USP. 1977. 51 p.

SOUZA, A. J. Muller R. B.; **GEOMORFOLOGIA**. UNIASSELVI, 2010. ISBN 978-85-7830-304-4.

SOUZA, A. S. FURRIER, M.; VALADARES, D. N; NÓBREGA, W. R.; SANTOS, A. D. G. S. A GEOMORFOLOGIA: UMA REFLEXÃO CONCEITUAL. **Cadernos do Logepa**. v. 8, n. 1-2, p. 37-53, jan./dez. 2013. ISSN: 2237-7522

SOUZA, Lucas Barbosa e; LIMA, Péricles Souza. SANTOS, Simoni Rodrigues. DA TEORIA DOS GEOSSISTEMAS À GEOGRAFIA FÍSICA CRÍTICA: o que há de novo na busca por abordagens integradoras na ciência geográfica? **Revista OKARA: Geografia em debate**, v. 14, n. 1, p. 122-136, 2020. ISSN: 1982-3878 João Pessoa, PB, DGEOC/CCEN/UFPB – <http://www.okara.ufpb.br>

SOUZA, Marcelo Lopes de. Ambientes e territórios: uma introdução à ecologia política. 1ª ed. Rio de Janeiro: **Bertrand Brasil**, 2019. ISBN 978-85-286-2437-3.

SOUZA. C.G., *et al.* Caracterização e manejo integrado de bacias hidrográficas. Belo Horizonte: EMATER, 2002. 124p.

SPOSITO, E. CLAUDINO, G (org). **Teorias na Geografia: avaliação crítica do pensamento geográfico**. - Rio de Janeiro, RJ: Consequência Editora, 2020. ISBN: 978-65-87145-12-9.

STRAHLER, A.N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology**. New Halen: Transactions: American Geophysical Union, 1957. v.38. p. 913-920.

TAGLIANI, C. R. A. 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, 2003. p. 1657-1664.

TEIXEIRA, M. N. O sertão semiárido. Uma relação de sociedade e natureza numa dinâmica de organização social do espaço. **Revista Sociedade e Estado**, v. 31, n. 3, 2016.

TEIXEIRA, Samantha. Qualitative Geographic Information Systems (GIS): An untapped research approach for social work. **Qualitative Social Work. Sage Journals**. 16 de junho de 2016. Acesso em: <https://doi.org/10.1177/1473325016655203>

TEXEIRA, Marcelo Richter. **A utilização do geoprocessamento na análise ambiental e sua importância na tomada de decisões: um estudo sobre o uso do geoprocessamento em pesquisas sobre ocupação desordenada do solo**. 2015. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Análise Ambiental e Desenvolvimento Sustentável, Instituto Ceub de Pesquisa e Desenvolvimento - Icpd, Centro Universitário de Brasília (Uniceub/Icpd), Brasília, 2015.

TREVISAN, D. P.; MOSCHINI, L. E.; DIAS, L. C. C.; GONÇALVES, J. C. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de São Carlos – SP. *Revista Ra'ega – O Espaço Geográfico em Análise*, Curitiba, v. 44, p. 272-288, mai. 2018.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro, IBGE-SUPREM, 1977.

TROPPMAIR, H.; Galina, M. H. Geossistemas. **Mercator**, v. 5, n. 10, p. 79-89, 2006. <http://www.mercator.ufc.br/index.php/mercator/article/view/69/44>

TROPPMAIR, R.H. **Biogeografia e meio ambiente**. Graf-Set, Rio Claro, 1995. 259p.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 1997. 943 p.

TUCCI, C. M., CHAGAS, M. F. Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, Brasil, v. 14, n. 1, p. 1–16, 2018.

VICENS, Raul Sanchez; RODRIGUEZ, José Mateo (In Memoriam); CRONEMBERGER, Felipe Mendes. A PAISAGEM FÍSICO-GEOGRÁFICA: REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA. UFF, Universidad de la Habana, IBGE. **Revista Brasileira de Geografia**. Rio de Janeiro, v. 64, n. 2, p. 2-17, jul./dez. 2019.

WILLETT, S. D., MCCOY, S. W., PERRON, J. T., GOREN, L., CHEN, C. Dynamic Reorganization of River Basins. **SCIENCE**. 7 março 2014 Vol 343. Issue 6175 – Acesso em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1248765>. DOI: 10.1126/science.12487

WOHL, Ellen. LANE. Stuart N., WILCOX, Andrew C. The science and practice of river restoration. **Water Resources Research**. 24 de julho de 2015. Acesso livre em: <https://doi.org/10.1002/2014WR016874>