



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Janaína Silva de Oliveira

João Pessoa/PB

Abril/2023

JANAÍNA SILVA DE OLIVEIRA

**FLORESTAS TROPICAIS SAZONALMENTE SECAS NA PERSPECTIVA DA
ECOLOGIA DE PAISAGENS: uma análise geoambiental dos fragmentos de Caatinga
no Cariri Paraibano**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da
Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial para obtenção
do título de Doutor na linha de pesquisa em Gestão do Território e
Análise Geoambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima

Co-orientador: Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza

João Pessoa/PB

Abril/2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

O48f Oliveira, Janaína Silva de.

Florestas tropicais sazonalmente secas na perspectiva da ecologia de paisagens : uma análise geoambiental dos fragmentos de Caatinga no Cariri Paraibano / Janaína Silva de Oliveira. - João Pessoa, 2023.

129 f. : il.

Orientação: Eduardo Rodrigues Viana de Lima.

Coorientação: Bartolomeu Israel de Souza.

Tese (Doutorado) - UFPB/CCEN.

1. Geografia - Planejamento territorial. 2. Caatinga. 3. Componentes geoambientais. 4. Conectividade estrutural. 5. Ecologia de paisagens. I. Lima, Eduardo Rodrigues Viana de. II. Souza, Bartolomeu Israel de. III. Título.

UFPB/BC

CDU 9:71(043)



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Geografia

**ATA DA SESSÃO PÚBLICA DA DEFESA DE TESE
DE DOUTORADO DA ALUNA JANAÍNA SILVA DE
OLIVEIRA, CANDIDATA AO TÍTULO DE DOUTORA
EM GEOGRAFIA, NA ÁREA DE TERRITÓRIO,
TRABALHO E AMBIENTE.**

Aos 28 (vinte e oito) dias do mês de Abril de dois mil e vinte e três, às 14:00 (quatorze) horas, no Auditório do Departamento de Geociências, reuniram-se, em caráter de solenidade pública, os membros da comissão designada para avaliar Janaína Silva de Oliveira, candidata ao grau de doutora em Geografia, na área de Território, Trabalho e Ambiente. Foram componentes da banca examinadora os professores Eduardo Rodrigues Viana de Lima (orientador) – Doutor em Geografia; Bartolomeu Israel de Souza (coorientador) – Doutor em Geografia; Rafael Albuquerque Xavier (examinador interno) – Doutor em Geografia; Dirce Maria Antunes Suertegaray (examinadora interna) – Doutora em Geografia; Eduardo Martins Venticinqu (examinador externo) – Doutor em Ciências Biológicas; e Marcelo Dutra da Silva (examinador externo) – Doutor em Ciências, sendo o primeiro, o segundo, o terceiro e quarto integrantes do corpo docente da UFPB, o quinto do corpo docente da UFRN, e o sexto integrante do corpo docente da FURG. Dando início aos trabalhos, o Presidente da banca, Prof. Eduardo Rodrigues Viana de Lima, após declarar os objetivos da reunião, apresentou a candidata Janaína Silva de Oliveira, a quem concedeu a palavra para que defendesse, oral e sucintamente, sobre o tema apresentado, intitulado: "FLORESTAS TROPICAIS SAZONALMENTE SECAS NA PERSPECTIVA DA ECOLOGIA DE PAISAGENS: uma análise geoambiental dos fragmentos de Caatinga no Cariri Paraibano". Após discorrer sobre o referido tema, a candidata foi arguida pelos examinadores, na forma regimental. Ato contínuo, passou a comissão em caráter secreto, a proceder à avaliação e julgamento do trabalho, concluindo por atribuir-lhe o conceito Aprovada. Face à aprovação, declarou o Presidente achar-se a avaliada legalmente habilitada a receber o Grau de doutora em Geografia, cabendo à Universidade Federal da Paraíba, providências, como de direito, à expedição do Diploma a que o mesmo fez jus. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a Ata, que segue assinada e aprovada pela Comissão Examinadora.

Documento assinado digitalmente



EDUARDO RODRIGUES VIANA DE LIMA
Data: 26/05/2023 15:24:40-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima
Orientador

Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza
Coorientador

Documento assinado digitalmente



BARTOLOMEU ISRAEL DE SOUZA
Data: 24/05/2023 11:38:11-0800
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62

Documento assinado digitalmente
 RAFAEL ALBUQUERQUE XAVIER
Data: 11/06/2023 12:25:14-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br/>

Prof. Dr. Rafael Albuquerque Xavier
Examinador interno

Prof.^a Dr.^a D  Documento assinado digitalmente ray
DIRCE MARIA ANTUNES SUERTEGARAY
Data: 16/06/2023 11:23:03-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br/>

Documento assinado digitalmente
 EDUARDO MARTINS VENTICINQUE
Data: 08/07/2023 10:43:45-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br/>

Prof. Dr. Eduardo Martins Venticinque
Examinador Externo

Documento assinado digitalmente
 MARCELO DUTRA DA SILVA
Data: 12/06/2023 22:00:01-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br/>

Prof. Dr. Marcelo Dutra da Silva
Examinadora externo

Dedico a meu filho, pela distância e momentos perdidos.
Nunca desista em seguir o caminho do conhecimento.
Apesar dos desafios e dificuldades, ele sempre será libertador.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos são para todos que, direta ou indiretamente, participaram desta conquista. Em tempos obscuros, familiares, amigos, professores, pesquisadores e colegas iluminaram mais esta trajetória acadêmica e pessoal.

Ao Prof. Eduardo, pela orientação e apoio nos momentos difíceis; e ao Prof. Bartô, que viabilizou os trabalhos de campo e permitiu ampliar meu olhar para a Caatinga com suas belezas efêmeras. Obrigada pela confiança de vocês! Aos membros da Banca Examinadora do trabalho final de tese, professores Marcelo Dutra, Eduardo Venticinque, Dirce Suertegaray e Rafael Xavier, agradeço o aceite e as contribuições.

Ao Prof. Rafael Xavier, obrigada pelo suporte nos momentos iniciais da pesquisa. Ao PPGG e PRPG, pela ajuda de custo necessária para viabilizar minha ida à Universidade Estadual do Rio de Janeiro e realizar a classificação supervisionada baseada a objetos no Laboratório de Dinâmicas Ambientais e Geoprocessamento. Ao Prof. Vinícius Seabra, que não apenas coordenou as atividades da pesquisa com aplicações do *software Definiens eCognition* no DAGEOP, mas manteve suas contribuições técnicas e científicas. À colega Mikaella, pela parceira desde a difícil tarefa de interpretar as imagens orbitais da Caatinga até a consolidação do mapa final. À Prof. Ana Cláudia e família, agradeço por toda hospitalidade durante os momentos em São Gonçalo. Vocês foram essenciais nessa jornada!

Aos colegas do Laboratório de Estudos do Semiárido (LAESA) e ao Professor Richarde, que proporcionou a utilização do Laboratório de Ensino, Projetos e Pesquisa em Análise Especial (LEPPAN) nos momentos essenciais para continuidade da pesquisa. Agradeço também aos novos colegas do PPGG: Cláudia, Andréia e Marcos, pelas companhias na praia e momentos de *happy hour* tão necessários; e Chris, pelas conversas e troca de saberes!

Os desafios da pesquisa também se refletiram em conciliar o tempo com trabalho, sobretudo nos dois últimos anos. Assim, julgo indispensável a compreensão da empresa, cliente e colegas para essa realização. Agradeço em especial aqueles que me “suportaram” nos meus momentos de elevado estresse durante esse período: Rodolfo, Davi, Gilson e Thais, que disponibilizaram momentos de dedicação à tese; Ariel, Romeu, Felipe, Vinniccius, Joaquim, Everaldo, Monara e demais colegas, reconheço o excelente trabalho em equipe de todos!

Por fim, mas não menos importante, agradeço o apoio imensurável da minha família, que tornou mais leve a trajetória. Obrigada mãe, você é meu porto seguro que facilita alçar voos em busca da realização pessoal; e meu pai (*in memoriam*), pelos ensinamentos deixados. Vocês sempre serão meus exemplos de vida, que norteiam minha caminhada alicerçada nos valores

éticos e morais transmitidos. Meu irmão, agradeço os momentos de companhia. Meu filho, Arthur, agradeço sua existência, motivo de superação pessoal em qualquer adversidade! Em especial, meus agradecimentos são para Luciano, companheiro de vida! Obrigada por mais essa jornada, com o privilégio de ter sua participação nas atividades de campo, durante as fundamentais contribuições na interpretação geológica apresentada na tese e nos ensinamentos que incorporaram as geociências na minha formação de bióloga. Como é fascinante a integração das Ciências da Natureza!

*“Tudo aquilo que o homem ignora não existe para ele.
Por isso, o universo de cada um se resume no tamanho de seu saber”*
(Albert Einstein)

RESUMO

A Caatinga é a maior e mais isolada Floresta Tropical Sazonalmente Seca da América do Sul. Em meio a florestas úmidas, o endêmico bioma se destaca pela geodiversidade e biodiversidade adaptada ao clima semiárido. No entanto, pesquisas científicas e políticas públicas adequadas às especificidades da Caatinga são incipientes e ainda predomina o senso comum de uma região com extrema pobreza social e paisagística. Inserida na Caatinga, a região do Cariri Paraibano apresenta um histórico processo de uso e ocupação do solo composto pela agricultura, pecuária de subsistência e extrativismo vegetal de espécies nativas, que tem resultado em grandes extensões de áreas suscetíveis à desertificação e na fragmentação de habitats. A tese se embasou nas hipóteses que os componentes geoambientais análogos viabilizam a manutenção de fragmentos com maior densidade de vegetação, onde estruturas geológicas se tornam elementos facilitadores para a conectividade estrutural da paisagem. A verificação das hipóteses ocorreu a partir dos preceitos geográficos da Ecologia de Paisagens, tendo como objetivo analisar o padrão estrutural da paisagem para propor modelos de conectividade entre fragmentos de Caatinga Densa na região do Cariri Paraibano. O mapeamento da área de estudo foi realizado pela classificação GEOBIA, com a definição de sete classes temáticas: Corpo Hídrico, Afloramento Rochoso, Ambiente Antrópico, Mata Exótica, Caatinga Antropizada, Caatinga Rarefeita e Caatinga Densa. Após validação estatística do mapa, a análise da paisagem se baseou na dinâmica de uso e ocupação do território e na aplicação de métricas da paisagem. Os resultados apresentaram um padrão de distribuição das áreas invadidas pela Mata Exótica, com destaque para as faixas nas margens de rios afluentes do Paraíba; e a alteração da Caatinga pelas atividades antropogênicas identificadas. Destacou-se também a forte pressão ao patrimônio cultural, geológico e geomorfológico ocasionada pela extração de bentonita no município de Boa Vista, onde há proposta de criação do Geoparque do Cariri. Apesar disso, as métricas revelaram a baixa fragmentação da Caatinga Rarefeita, analisada como unidade dominante da paisagem conforme modelo mancha-corredor-matriz. Já a Caatinga Densa demonstrou elevada fragmentação, com tamanho das manchas pouco expressivos no contexto da paisagem. A modelagem resultante do Índice Integral de Conectividade mostrou um cenário alarmante, onde o arranjo estrutural dos fragmentos destacados pela métrica não percorrem pela matriz – e indica a baixa efetividade na formação de *stepping stones* entre as manchas dispersas na paisagem. As Unidades de Conservação demonstraram ser muito importantes para a proteção dos remanescentes de Caatinga Densa, embora apresentem fragilidades na gestão. Com evidente processo de isolamento desses ambientes, os lineamentos de altos topográficos e as zonas de cisalhamento foram identificados como elementos facilitadores para a formação de corredores ecológicos, embasados na teoria dos fractais, onde feições geomorfológicas dos relevos residuais se repetem na escala regional. Desta forma, concluiu-se que os componentes geoambientais analisados podem ser incorporados como estratégia ao planejamento territorial para disciplinar o uso e ocupação da terra e conectar áreas relevantes para a proteção ambiental.

Palavras-chave: Ecologia de Paisagens, Caatinga, componentes geoambientais, conectividade estrutural, planejamento territorial.

ABSTRACT

The Caatinga is the largest and most isolated Seasonally Dry Tropical Forest in South America. Amidst humid forests, the endemic biome stands out for its geodiversity and biodiversity adapted to the semi-arid climate area. However, scientific research and public policies to the specificities of the Caatinga are incipient, where still prevails the common sense of a region with extreme social and landscape poorness. Located in the Caatinga biome, the Cariri region, state of Paraíba, is characterized by a historical process of land use and occupation composed of agriculture, subsistence farming and plant extractivism of native species, which has resulted in large extensions of areas susceptible to desertification and habitat fragmentation. This research was based on the hypotheses that analogous geoenvironmental components enable the maintenance of fragments with greater vegetation density, where geological structures become facilitating elements for the structural connectivity of the landscape. The verification of the hypotheses took place from the geographical precepts of Landscape Ecology, with the objective of analyzing the structural pattern of the landscape to propose connectivity models between fragments of Dense Caatinga of Cariri in Paraíba state. The map land use and land cover of the study area was carried out using the GEOBIA classification, with seven thematic classes: Hydrous body, Rocky outcrop, Anthropogenic Environment, Exotic Forest, Anthropized Caatinga, Rarefied Caatinga and Dense Caatinga. After statistical validation of the map, the landscape analysis was based on the dynamics of use and occupation of the territory and the application of landscape metrics. The results showed a pattern of distribution of the areas invaded by the Exotic Forest, with emphasis on the strips on the banks of tributary rivers of Paraíba; and alteration of the Caatinga by identified anthropogenic activities. Also noteworthy was the strong pressure on the cultural, geological and geomorphological heritage caused by the extraction of bentonite in the municipality of Boa Vista, where there is a proposal to create the Cariri Geopark. Despite this, the metrics revealed the low fragmentation of the Caatinga Rarefied, analyzed as the dominant unit of the landscape according to the patch-corridor-matrix model. Dense Caatinga, on the other hand, showed high fragmentation, with the size of the patches not very expressive in the context of the landscape. The resulting modeling of the Integral Connectivity Index showed an alarming scenario, where the structural arrangement of the fragments highlighted by the metric do not travel through the matrix – and indicates the low effectiveness in the formation of stepping stones among the scattered spots in the landscape. The Conservation Units proved to be very important for the protection of the remnants of Caatinga Densa, although they present weaknesses in management. With an evident process of isolating these environments, lineaments of topographic heights and shear zones were identified as facilitating elements for the formation of ecological corridors, based on fractal theory, where geomorphological features of residual reliefs are repeated on a regional scale. In this way, it was concluded that the analyzed geo-environmental components can be incorporated as a strategy to territorial planning to discipline the use and occupation of land and connect relevant areas for environmental protection.

Keywords: Landscape Ecology, Caatinga, geoenvironmental components, structural connectivity, territorial planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuição das ecorregiões da Caatinga.....	24
Figura 2.2 – Domínio Fitogeográfico conforme condições ambientais e estudos florísticos da Caatinga.	25
Figura 2.3 -Sub-regiões biogeográficas florísticas da Caatinga.	26
Figura 3.1 - Área de Estudo contextualizada conforme biomas brasileiros, limite do semiárido, da Província Borborema, Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba e divisão política.	47
Figura 3.2 – Áreas protegidas na região de estudo.....	52
Figura 3.3 - Principais procedimentos metodológicos e técnicas utilizados.	55
Figura 3.4 – Açude Epitácio Pessoa, popularmente conhecido como Açude Boqueirão (à esquerda); açude no município de Caraúbas (à direita).....	61
Figura 3.5 – Afloramentos rochosos no município de Prata (à esquerda); e lajedo do Pai Mateus, no município de Cabaceiras (à direita).	61
Figura 3.6 - Zona urbana do município de Boqueirão (à esquerda); extração de bentonita no município de Boa Vista (à direita).....	62
Figura 3.7 - Algarobas formando “mata ciliar exótica” em trechos dos Rios Paraíba, município de São Domingos do Cariri (à esquerda) e Taperoá, município de Cabaceiras (à direita).....	62
Figura 3.8 - Extrativismo vegetal em Boa Vista (à esquerda) e área de pastagem no município de Prata (à direita).....	63
Figura 3.9 - Vegetação com presença de bromeliáceas, cactáceas e representantes arbustivos e arbóreos de pequeno porte no município de São Sebastião do Umbuzeiro (à esquerda) e vegetação marcada pela caducifolia no município de Sumé (à direita).	63
Figura 3.10 - Vegetação de caatinga densa caducifólia na APA das Onças, município de São João do Tigre (à esquerda) e espécimes arbóreos margeando o afloramento rochoso Pluton Bravo, no município de Cabaceiras (à direita).	64
Figura 3.11 - Hierarquia e descritores utilizados no processo de classificação GEOBIA top-down.	66
Figura 3.12 - Fluxo e fórmula para o cálculo do TWI.....	72
Figura 4.1 - Áreas inseridas em poligonais de mineração no município de Boa Vista, que pela característica do solo e sensibilidade do índice MNDWI, resultou na classe corpo hídrico....	76
Figura 4.2 - Mapa de composição RGB 4-3-2 com pontos verificados por verdade terrestre e caminhamento realizado em campo (à esquerda) e mapa de cobertura e uso da terra da área de estudo (à direita).	77

Figura 4.3 - Classe Mata Exótica, composta predominantemente por algaroba.	79
Figura 4.4 - Mapa de relevo (à esquerda) e padrão de distribuição das classes Caatinga Antropizada e Ambiente Antrópico.....	85
Figura 4.5 - Áreas degradadas em zona de exploração de bentonita, município de Boa Vista, com plantio de mudas identificadas em campo (coordenadas UTM 9188761mS/808670mE e 9187401mS/809645mE).....	87
Figura 4.6 - Processos minerários e áreas de interesse para conservação existentes na região de estudo.....	89
Figura 4.7 – Gráfico das métricas de forma aplicadas em nível de paisagem.....	94
Figura 4.8 - Métrica de densidade de borda (ED) das classes de vegetação na paisagem.	95
Figura 4.9 - Distribuição das áreas núcleo considerando bordas de 50m e 100m.....	100
Figura 4.10 - Resultados do IIC para distâncias de 1,5km e 7,5km.	104
Figura 4.11 – Tipos de solos da região do Cariri Paraibano.....	109
Figura 4.12 – Mapa Geológico da região do Cariri Paraibano.....	111
Figura 4.13 - Índice Topográfico de Umidade, Modelo Digital de Elevação e mapa de declividade na região do Cariri Paraibano.....	113
Figura 4.14 - Reservas Legais e Corredores Ecológicos destacados para conectividade estrutural na região do Cariri Paraibano.	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Domínios da Caatinga propostos por Andrade-Lima.....	22
Tabela 2.2 - Descrição geral das ecorregiões de Caatinga.	23
Tabela 3.1 – Resolução Radiométrica e Espacial do Sentinel-2.	57
Tabela 3.2 – Índices Espectrais de Vegetação e Água.	58
Tabela 3.3 – Divisão das classes de qualidade resultantes do índice Kappa.....	67
Tabela 3.4 - Métricas utilizadas na extensão V-Late.....	69
Tabela 4.1 – Matriz de confusão do mapeamento temático.	74
Tabela 4.2 – Precisão da classificação GEOBIA (em porcentagem).	74
Tabela 4.3 - Área de cada classe temática obtida no mapa de cobertura e uso da terra.	76
Tabela 4.4 – Distribuição da Mata Exótica (hectare e porcentagem) por município.	80
Tabela 4.5 - Dados do Censo Agropecuário com os principais usos da terra nos municípios da área de estudo.	83
Tabela 4.6 – Resultados das métricas de área e tamanho em nível de paisagem.	91
Tabela 4.7 - Resultados das métricas de área e tamanho em nível de classe.	92
Tabela 4.8 - Métricas de Área Núcleo em nível de classe para borda de 50m.....	97
Tabela 4.9 - Métricas de área núcleo aplicadas em nível de paisagem.	98
Tabela 4.10 - Métricas de Subdivisão aplicadas em nível de paisagem para as classes de vegetação.	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	FLORESTAS TROPICAIS SAZONALMENTE SECAS	19
2.2	ECOLOGIA DE PAISAGENS: UMA CIÊNCIA EM MATURAÇÃO.....	31
2.2.1	<i>MODELAGEM E MÉTRICAS DA PAISAGEM</i>	36
2.3	PLANEJAMENTO REGIONAL DE PAISAGENS MODIFICADAS	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	46
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	54
3.2.1	<i>MAPA DE USO E COBERTURA DA TERRA</i>	55
3.2.2	<i>ANÁLISE DA PAISAGEM</i>	68
3.2.3	<i>RELAÇÃO DOS COMPONENTES GEOAMBIENTAIS ENTRE FRAGMENTOS DA PAISAGEM</i>	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1	VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DO MAPA TEMÁTICO	73
4.2	ANÁLISE DA PAISAGEM.....	78
4.3	MÉTRICAS DA PAISAGEM.....	90
4.3.1	<i>MÉTRICAS DE ÁREA E TAMANHO</i>	90
4.3.2	<i>MÉTRICAS DE FORMA, BORDA E ÁREA NÚCLEO</i>	94
4.3.3	<i>MÉTRICAS DE SUBDIVISÃO</i>	101
4.3.4	<i>ÍNDICE INTEGRAL DE CONECTIVIDADE</i>	102
4.4	RELAÇÃO DOS COMPONENTES GEOAMBIENTAIS ENTRE FRAGMENTOS DE CAATINGA Densa	108
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	118
6	BIBLIOGRAFIAS	122

1 INTRODUÇÃO

A Caatinga é a maior e mais isolada Floresta Tropical Sazonalmente Seca da América do Sul. Trata-se de um bioma endêmico do Brasil que apresenta condições particulares de paisagens e relações sociais, porém pouco estudado quando comparado com as florestas úmidas predominantes no país (SANTOS *et al.*, 2011). De acordo com Kremen e Merenlender (2018), o conhecimento científico tem buscado compreender a interação e integração entre sociedades e ecossistemas, de modo a garantir o bem-estar humano e a manutenção da biodiversidade frente aos diversos usos antropogênicos sobre os recursos naturais.

Neste sentido, a Ecologia de Paisagens surge enquanto uma ciência transdisciplinar, ainda em fase de solidificação de conceitos e de aplicações para auxiliar o planejamento e a gestão sustentável do território. Esta nova disciplina se embasa na espacialidade e possui duas abordagens: a geográfica, onde a paisagem é vista como conjunto de unidades de uso e cobertura da terra sob a perspectiva humana; e a ecológica, onde a escala espacial é definida por uma espécie ou um processo ecológico de interesse (METZGER *et al.*, 2007; TURNER, 2005). Para Cheung, Brierley e O'Sullivan (2016), Lausch *et al.* (2015), Metzger *et al.* (2007), Paese *et al.* (2012) e Salomão, Silva e Machado (2019) a constante maturação da Ecologia de Paisagens está associada com o avanço das geotecnologias, nas quais foram desenvolvidos algoritmos específicos para modelar e quantificar os efeitos e as consequências das mudanças da paisagem.

Inserida na Caatinga, a área de estudo deste trabalho (Cariri Paraibano) abriga biodiversidade e geodiversidade peculiares pelo contexto da semiaridez; e uma população estimada em 125.086 habitantes, grande parte composta por pequenos produtores rurais que sobrevivem em meio à sazonalidade climática e hidrológica. No entanto, a pecuária extensiva, o sistema agrícola e o extrativismo vegetal que embasam a ocupação do Cariri Paraibano têm desencadeado mudanças significativas da paisagem. Com o uso intensivo e a redução da cobertura vegetal, estas atividades promovem a degradação ambiental e podem desencadear a desertificação, processo que modifica as propriedades biológicas, químicas, físicas e econômicas do solo (MEIADO *et al.*, 2020; SOUZA; ARTIGAS; LIMA, 2015; VENDRUSCOLO *et al.*, 2021; VIEIRA *et al.*, 2021).

Apesar da perda da cobertura vegetal e das áreas susceptíveis à desertificação, Lima *et al.* (2019) apontam que o controle estrutural da drenagem e do relevo podem ser pensados como importantes fatores de conexão entre remanescentes de Caatinga na região do Cariri Paraibano. Conforme Maia e Nascimento (2018), nos compartimentos e feições dos relevos residuais há

eventual acúmulo de sedimentos e matéria orgânica, que viabilizam a ocorrência da vegetação nativa. Estes ambientes tendem a ser mais preservados pela baixa condição de antropismo, concentrada nas partes mais baixas do relevo.

Ao considerar as especificidades da Caatinga e a degradação ambiental proveniente do uso e ocupação do solo, o foco do trabalho está em parte da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba inserida na região do Cariri Paraibano. Conforme a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA, 2006), essa bacia é dividida em três regiões (Alto, Médio e Baixo Curso) e a sub-bacia do Rio Taperoá. Assim, a área de estudo incluiu todo o Alto Curso do Rio Paraíba e a parte da sub-bacia do Rio Taperoá, contemplando 21 municípios do Cariri.

A tese propôs analisar o uso e cobertura da terra sob a ótica geográfica da Ecologia de Paisagens, com o intuito de subsidiar o planejamento e a gestão do território voltado para a conectividade estrutural entre fragmentos de Caatinga existentes na região do Cariri Paraibano. Segundo Herrmann (2011), Pereira e Cestaro (2016), Pomianowski e Solon (2020) e Ziolkowska *et al.* (2014), as medidas de conectividade estrutural se baseiam na ocorrência, distribuição espacial e relações entre fragmentos de vegetação associados com outros aspectos abióticos, como topografia e hidrografia.

Trata-se de uma análise inédita e inovadora, realizada em escala regional, tendo a paisagem como objeto de estudo. A tese foi baseada na hipótese de que em baixa condição de antropismo, as estruturas geológicas se tornam elementos facilitadores na conectividade entre fragmentos de Caatinga com maior densidade de vegetação. Como hipótese secundária, acredita-se na relação direta entre componentes geoambientais (geologia, relevo, solo e densidade da vegetação) análogos, que viabilizam a manutenção e a conectividade desses fragmentos. Para verificação das hipóteses, foram traçadas quatro perguntas norteadoras:

- Onde estão localizadas as áreas com maior e menor condição de antropismo?
- A disposição geográfica dos fragmentos de Caatinga com menor grau de intervenção antrópica apresenta condições de conectividade favoráveis para manutenção da diversidade?
- Há relação entre a disposição espacial dos fragmentos de Caatinga e fatores abióticos nos modelos de conectividade?

- Os fragmentos-chave para conectividade e as Unidades de Conservação compartilham aspectos abióticos análogos?

O objetivo geral da tese foi analisar o padrão estrutural da paisagem para propor modelos de conectividade entre fragmentos de Caatinga Densa na região do Cariri Paraibano. Para atingir o objetivo geral, foram estruturados cinco objetivos específicos:

- Analisar o uso e cobertura da terra na área de estudo;
- Avaliar a composição e a configuração espacial dos fragmentos de vegetação conforme os preceitos da Ecologia de Paisagens;
- Apresentar os fragmentos mais relevantes de Caatinga Densa para a conectividade estrutural da paisagem embasada na Teoria dos Grafos;
- Verificar a relação entre componentes geoambientais e os fragmentos-chave de Caatinga Densa destacados nos modelos de conectividade;
- Estabelecer critérios estruturais para subsidiar uma proposta de corredores ecológicos enquanto estratégia de planejamento e ordenamento territorial.

A tese foi desenvolvida em quatro seções. A primeira refere-se à Fundamentação Teórica, que envolve aspectos teóricos sobre os temas da pesquisa: as Florestas Tropicais Sazonalmente Secas, com ênfase no bioma Caatinga e suas singularidades bióticas, abióticas e sociais; a Ecologia de Paisagens e sua trajetória enquanto ciência; e finaliza com apresentação de ferramentas de planejamento regional e de gestão de paisagens modificadas pelos usos antropogênicos.

A segunda seção descreve os Materiais e Métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente há uma contextualização da área de estudo conforme dados secundários referentes a fatores abióticos, bióticos e socioeconômicos; em seguida, apresenta-se detalhadamente os materiais e procedimentos metodológicos adotados para atingir os objetivos aqui propostos.

A terceira e quarta seções compreendem, respectivamente, aos resultados e às considerações finais da tese. Os resultados obtidos foram descritos de modo sequencial, interpretados e discutidos conforme a revisão da literatura, em conexão com os objetivos, com as perguntas norteadoras e com as hipóteses da tese. Já as considerações finais o trabalho resgata a ideia principal da tese, como ela foi desenvolvida e as reflexões motivadas pelos resultados alcançados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção envolve aspectos teóricos sobre os temas da pesquisa. O primeiro item caracteriza as Florestas Tropicais Sazonalmente Secas e enfatiza o endêmico bioma da Caatinga com suas singularidades bióticas, abióticas e sociais. O segundo item faz um resgate histórico sobre a trajetória da Ecologia de Paisagens enquanto ciência, suas bases teóricas e conceituais e os principais modelos adotados. O terceiro item finaliza a seção, que apresenta ferramentas de planejamento regional e de gestão em paisagens modificadas pelos usos antropogênicos.

2.1 Florestas Tropicais Sazonalmente Secas

As Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS) representam cerca de 40% da superfície terrestre e, atualmente, têm sido reconhecidas como *hotspots* globais pelos significativos níveis de riqueza de espécies, endemismo e serviços ecossistêmicos (SANTOS *et al.*; 2011; SMITH *et al.*, 2019). Conforme Lima *et al.* (2018), a atual distribuição das FTSS na América do Sul evidencia um padrão similar de distribuição de espécies não relacionadas filogeneticamente, que formam quatro núcleos disjuntos dispostos na ‘diagonal seca’ ao sul da Amazônia.

O Brasil, país mundialmente conhecido pela megadiversidade, abriga a maior e mais isolada FTSS da América do Sul, representada pela Caatinga, com excepcional natureza em meio a grandes e contínuas terras úmidas. Este heterogêneo e endêmico bioma é caracterizado pela vegetação herbácea, arbustiva e arbórea com dominância de espécies xerófitas e decíduas, que sob condições particulares de solo e relações sociais, apresentam variadas feições. A Caatinga abrange grande parte do Nordeste e uma pequena porção ao norte de Minas Gerais, correspondendo a cerca de 10% do território nacional, onde predomina o clima semiárido (AB’SÁBER, 2011; LIMA *et al.*, 2018; BRASIL, 2004; MEIADO *et al.*; 2020; SANTOS *et al.*, 2011; SMITH *et al.*, 2019; SOUZA; ARTIGAS; LIMA, 2015).

No entanto, Santos *et al.* (2011) e Velloso, Sampaio e Pareyn (2002) enfatizam que este ambiente foi cientificamente negligenciado por décadas em vários aspectos, principalmente quando comparado às florestas tropicais úmidas. Apesar dos estudos incipientes, a singularidade deste ecossistema pode ser representada pela baixa precipitação, elevado potencial de evapotranspiração e vegetação adaptada ao clima semiárido, que se desenvolve em solos férteis (LIMA *et al.*, 2018).

O entendimento geral da Caatinga é considerado subjetivo, muitas vezes utilizada como um termo regionalizado para o semiárido brasileiro ou como sinônimo de pobreza social e

paisagística. Porém, as diversas variáveis que caracterizam as caatingas revelam a complexidade do bioma, composto por fitofisionomias interligadas com enclaves de Mata Atlântica e manchas de Cerrado e Carrasco (BRASIL, 2004; 2010).

Via de regra, a Caatinga é caracterizada como um mosaico de vários tipos de solo onde formam florestas baixas compostas por árvores de pequeno porte, arbustos e predominância de suculentas da família Cactaceae, com herbáceas efêmeras durante a curta estação chuvosa (LIMA *et al.*, 2018). Apesar de esporádicas, Meiado *et al.* (2020) destacam que as chuvas são concentradas e têm forte potencial erosivo, o que afeta diretamente os solos pouco desenvolvidos predominantes na Caatinga, além da conversão histórica de áreas naturais em pastagens – já que a vegetação, seca na maior parte do ano, é vista como uma área sem valor econômico, social ou ecológico.

Ademais, há falta de consenso entre os vários setores da sociedade sobre os limites da Caatinga, considerada como uma região natural; e do semiárido brasileiro, associado à uma política de fronteiras recém-expandidas¹ para promover o desenvolvimento social. No entanto, trata-se da região semiárida mais populosa e com maior biodiversidade do mundo, que em virtude destas dissonâncias socioambientais, tem o real desenvolvimento local comprometido pela deficiência de políticas e de recursos públicos (BEUCHLE *et al.*, 2015; MEIADO *et al.*, 2020).

Esquecidos pela política pública, Ab'Sáber (2011) lembra que o cotidiano do sertanejo e a sobrevivência de sua família ainda são impostos pelas irregularidades climáticas, agravadas por secas prolongadas e rupturas. Ainda assim, o autor aponta uma diferenciação do espaço social dos sertões secos nordestinos em relação às demais regiões semiáridas mundiais: ao invés de formar “*ilhas de humanidade*”, as famílias povoam todos os recantos da região seca brasileira, fazendo com que haja a presença humana em praticamente toda parte.

2.1.1 – As Singularidades na Caatinga

A Caatinga é formada pelo arranjo geográfico de elementos históricos, climáticos, bióticos e abióticos (MEIADO *et al.*, 2020). Devido à esta complexidade, a província fitogeográfica ou o domínio morfoclimático das caatingas carece de um sistema unificado adequado à classificação fisionômica. Silva e Souza (2018) destacam que desde o século XIX,

¹ A Resolução nº 107, de 13 de setembro de 2017, estabelece critérios técnicos e científicos para a delimitação do semiárido brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência conforme precipitação pluviométrica, índice de aridez e percentual diário de déficit hídrico.

com a expedição de von Martius, em 1824, a Caatinga é reconhecida como uma unidade biogeográfica distinta, com cerca de 15 tipos de classificação diferentes. Conforme os autores, as propostas estruturais de classificação se baseiam na severidade da seca, na distinção florística e na congruência de solo, geomorfologia, flora e fauna.

Andrade-Lima (1981) propôs uma classificação da vegetação que integra aspectos físicos (climáticos e pedológicos) e bióticos (fisionomia vegetal), considerando os limites transicionais da Caatinga com a Mata Atlântica e o Cerrado. O autor classificou 12 tipos de caatinga inseridas em seis grandes unidades (Tabela 2.1), que embora não tenham sido mapeadas na época pela transição gradual, continuam a subsidiar estudos recentes.

Tabela 2.1 - Domínios da Caatinga propostos por Andrade-Lima.

UNIDADE	TIPO	VEGETAÇÃO	DESCRIÇÃO
I	1	<i>Tabebuia-Aspidosperma-Astronium-Cavanillesia</i>	Floresta alta de caatinga (porção norte de MG e centro-sul da BA). Principalmente rochas calcárias do Grupo Bambuí (Sul) e predominantemente rochas cristalinas do pré-cambriano (leste). Índice xerotérmico 100-150.
II	2	<i>Astronium-Schinopsis-Caesalpinia</i>	Floresta média de caatinga (mais na porção central do domínio). Principalmente rochas cristalinas do pré-cambriano. Índice xerotérmico 150-200.
II	3	<i>Caesalpinia-Spondias-Bursera-Aspidosperma</i>	Floresta média de caatinga, um pouco mais seca que a anterior. Principalmente rochas cristalinas do pré-cambriano. Índice xerotérmico 150-200.
II	4	<i>Mimosa-Syagrus-Spondias-Cereus</i>	Floresta baixa de caatinga (porção central da Bahia). Principalmente rochas cristalinas do pré-cambriano. Índice xerotérmico 150-200.
III	5	<i>Pilosocereus-Poeppigia-Dalbergia-Piptadenia</i>	Floresta baixa de caatinga em solos arenosos da Série Cipó. Índice xerotérmico 150-200.
II	6	<i>Cnidoscolus-Bursera-Caesalpinia</i>	Caatinga arbórea aberta (sudoeste do Ceará e outras áreas secas com solos soltos e ácidos). Índice xerotérmico 150-200.
IV	7	<i>Caesalpinia-Aspidosperma-Jatropha</i>	Caatinga arbustiva (áreas mais secas do vale do São Francisco). Principalmente rochas cristalinas pré-cambrianas. Índice xerotérmico 150-300.
IV	8	<i>Caesalpinia-Aspidosperma</i>	Caatinga arbustiva aberta (Cariris Velhos, PB). Principalmente rochas cristalinas pré-cambrianas. Índice xerotérmico 150-300.
IV	9	<i>Mimosa-Caesalpinia-Aristida</i>	Caatinga arbustiva aberta (Seridó, RN e PB). Principalmente rochas cristalinas pré-cambrianas. Índice xerotérmico 150-300.
IV	10	<i>Aspidosperma-Pilosocereus</i>	Caatinga arbustiva aberta (Cabaceiras, PB). Principalmente rochas cristalinas pré-cambrianas. Índice xerotérmico 150-300.
V	11	<i>Calliandra-Pilosocereus</i>	Caatinga arbustiva aberta (pequenas áreas dispersas com solos pedregosos). Principalmente rochas metamórficas precambrianas. Índice xerotérmico 150-200.
VI	12	<i>Copernicia-Geoffroea-Licania</i>	Caatinga de floresta ciliar (nos vales dos rios do PI, CE e RN). Principalmente solos aluviais ao longo dos vales dos rios. Índice xerotérmico 100-200.

Fonte: Andrade-Lima (1981).

Outro viés de classificação é a subdivisão das caatingas em ecorregiões. Cada ecorregião é uma “*unidade relativamente grande de terra e água delineada pelos fatores bióticos e abióticos que regulam a estrutura e a função das comunidades naturais que lá se encontram*” (VELLOSO; SAMPAIO; PAREYN, 2002, p. 8). Elas integram os solos, a disponibilidade de água e os mosaicos da vegetação, geralmente caducifólia, xerófila e espinhosa. As ecorregiões apresentadas pelos autores estão descritas de modo sucinto na Tabela 2.2 e ilustradas na Figura 2.1.

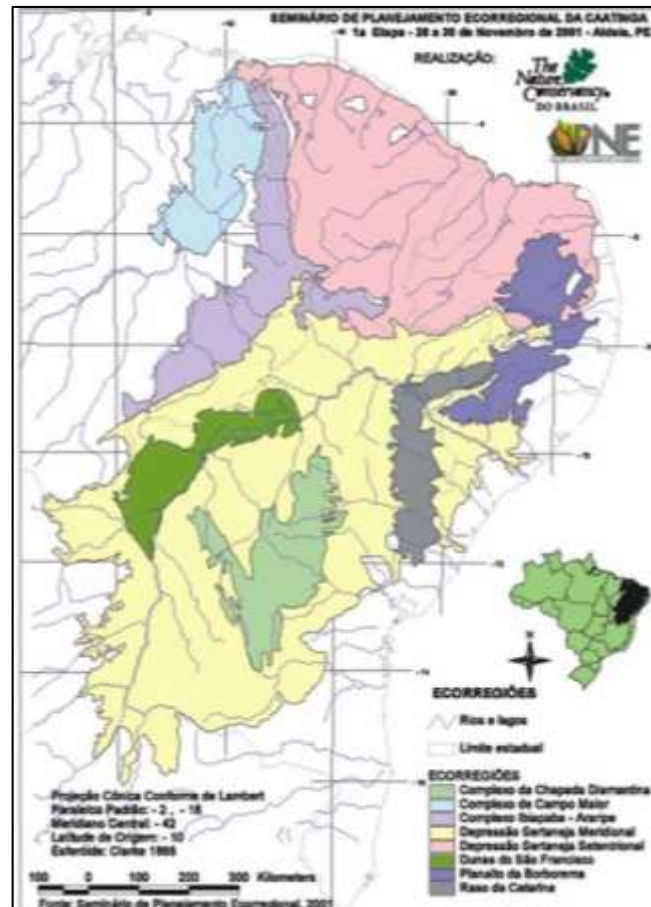
Tabela 2.2 - Descrição geral das ecorregiões de Caatinga.

ECORREGIÃO	ÁREA (km ²)	DESCRIÇÃO
Complexo de Campo Maior (PI e MA)	41.420	Ecótonos de Cerrado/Caatinga e Cerrado/Mata (vegetação caducifólia e sub-caducifólia estacionais). Inundações periódicas das planícies de solos sedimentares são o principal fator controlador da biota.
Complexo Ibiapaba-Araripe (CE e PI)	69.510	Floresta pluvial nas encostas das chapadas; Cerradão nos topos (pouca relação com Cerradão do Planalto Central e nenhuma do sudeste); e Carrasco nas demais áreas. Solos arenosos, profundos e pouco férteis, e a pluviosidade (maior a norte e sobre as chapadas, onde há formação de nascentes) são fatores característicos da ecorregião.
Depressão Sertaneja Setentrional (PB, RN, CE, PI)	206.700	Caatinga arbórea e arbustiva sobre solos de origem cristalina. Diferenciados pelos extremos climáticos do Seridó (vegetação aberta com predomínio de herbáceas) e Cariris Velhos (caatinga nanificada). Solos rasos em processos erosivos, irregularidade pluviométrica e deficiência hídrica são principais características dessa região (a última menos acentuada na Chapada do Apodi, cujos solos são capazes de reter mais água).
Planalto da Borborema* (RN, PB, PE e AL)	41.940	Matas úmidas e formação de Brejos de Altitude (enclaves de Mata Atlântica) restritos na vertente oriental até metade do topo; e tipos de vegetação de caatinga arbustiva aberta à arbórea, e matas secas, estas mais características com a outra metade do topo com vertente ocidental. Os declives acentuados das áreas montanhosas com presença de afloramentos rochosos de granito, grande tipologia de vegetação proporcionada pelo mosaico de solos e umidade alta e a formação de uma barreira geográfica para umidade são características do Planalto da Borborema, cuja exceção é a porção noroeste do brejo paraibano, com altitudes mais baixas, solos rasos e pedregosos em um clima mais seco.
Depressão Sertaneja Meridional (MG, BA, SE e AL)	373.900	Caatinga arbórea nas áreas de afloramentos de calcário bambuí; mata cipó no Planalto de Vitória da Conquista; campo rupestre com espécies de caatinga em altitudes e pluviosidades mais elevadas na porção sudeste. A caatinga arbustiva e arbórea possuem porte mais altos do que na Depressão Sertaneja Setentrional; além maior regularidade da estação chuvosa, presença de solos mais profundos (latossolos), rios permanentes e temporários, atribuídos à grande variedade de espécies de fauna e flora. Ecorregião sobre grande influência da Chapada Diamantina e do Rio São Francisco.

Dunas do São Francisco (BA)	36.170	Caatinga predominantemente arbustiva, agrupada em moitas densas, com arvoredos e macambira; ou mais esparsas em áreas de tabuleiro. As dunas são formadas por depósitos eólicos dos sedimentos arenosos, com temperatura elevada sem grande oscilação entre o dia e a noite. Nas partes baixas das dunas, o relevo plano com inundações periódicas é uma característica importante da ecorregião.
Complexo da Chapada Diamantina (BA)	50.610	Mosaico de caatinga, cerrado, campos rupestres e diversos tipos de mata. Afloramentos rochosos acima de 1.000m de altitude com predominância de campos rupestres; cerrado nos solos arenosos, nas encostas, matas ligadas a granitos e gnaiss, com aumento de umidade nas altitudes mais altas. Caatinga representada pela floresta estacional caducifólia. Ecorregião inclui pontos mais altos do Nordeste brasileiro, com temperaturas mais baixas e maior índice pluviométrico do semiárido, fauna e flora sob forte influência do Serra do Espinhaço.
Raso Catarina (BA e PE)	30.800	Caatinga de areia, predominantemente arbustiva e menos espinhosa que de solos cristalinos. Solos muito arenosos e profundos com pouca disponibilidade de água de superfície, maior precipitação na porção sul e, ainda que não tenha temperaturas muito altas, há grande variação entre o dia e a noite.

Fonte: Velloso, Sampaio e Pareyn. (2002).

Figura 2.1 - Distribuição das ecorregiões da Caatinga.

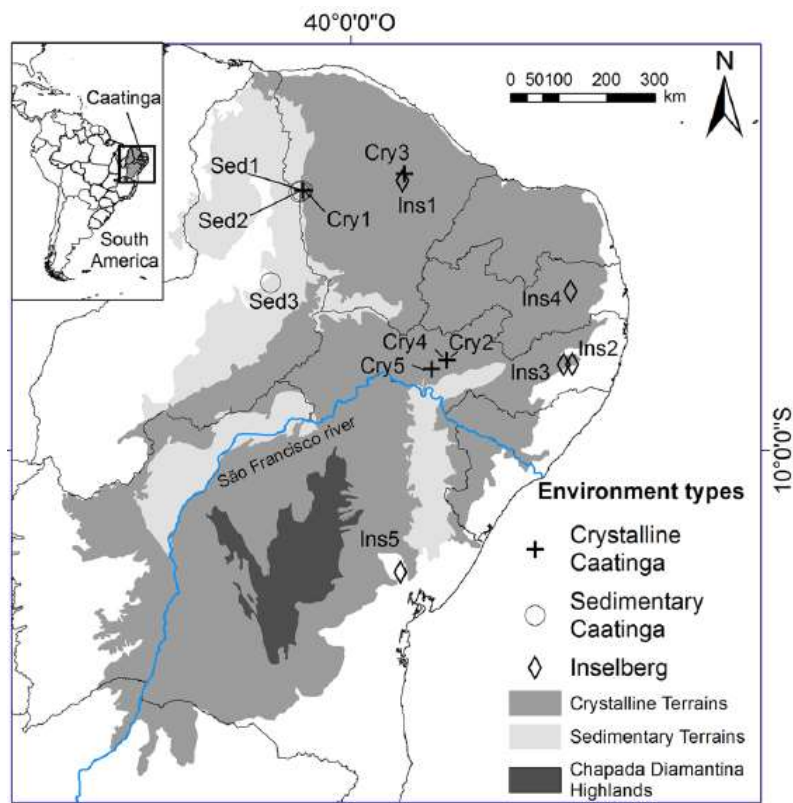


Fonte: Velloso, Sampaio e Pareyn. (2002).

De acordo com Moro *et al.* (2015), as estratégias ecológicas evolutivas desenvolvidas pelas plantas da Caatinga para suportar o estresse hídrico da semiaridez resultaram em um agrupamento filogenético que revela alta biodiversidade florística associada aos ambientes edáficos. Os autores então caracterizaram as caatingas de acordo com o clima semiárido e três ambientes edáficos – sedimentar, cristalino e *inselberg*.

Os terrenos cristalinos de planície, predominantes na Caatinga, são caracterizados por solos bem ricos em nutrientes, mas rasos e pedregosos capazes de reter pouca água. Já as características edáficas dos terrenos sedimentares se diferem por apresentar solos pobres em nutrientes, porém mais profundos, o que aumenta a capacidade de retenção de água. Por fim, os *inselbergs* são afloramentos rochosos com significativo escoamento superficial e, quando apresentam solos, são muito rasos. A vegetação é então apresentada em uma estreita relação entre as condições edáficas e a heterogeneidade ambiental, espacial e temporal. A Figura 2 ilustra a proposta de classificação dos autores para o Domínio Fitogeográfico da Caatinga.

Figura 2.2 – Domínio Fitogeográfico conforme condições ambientais e estudos florísticos da Caatinga.

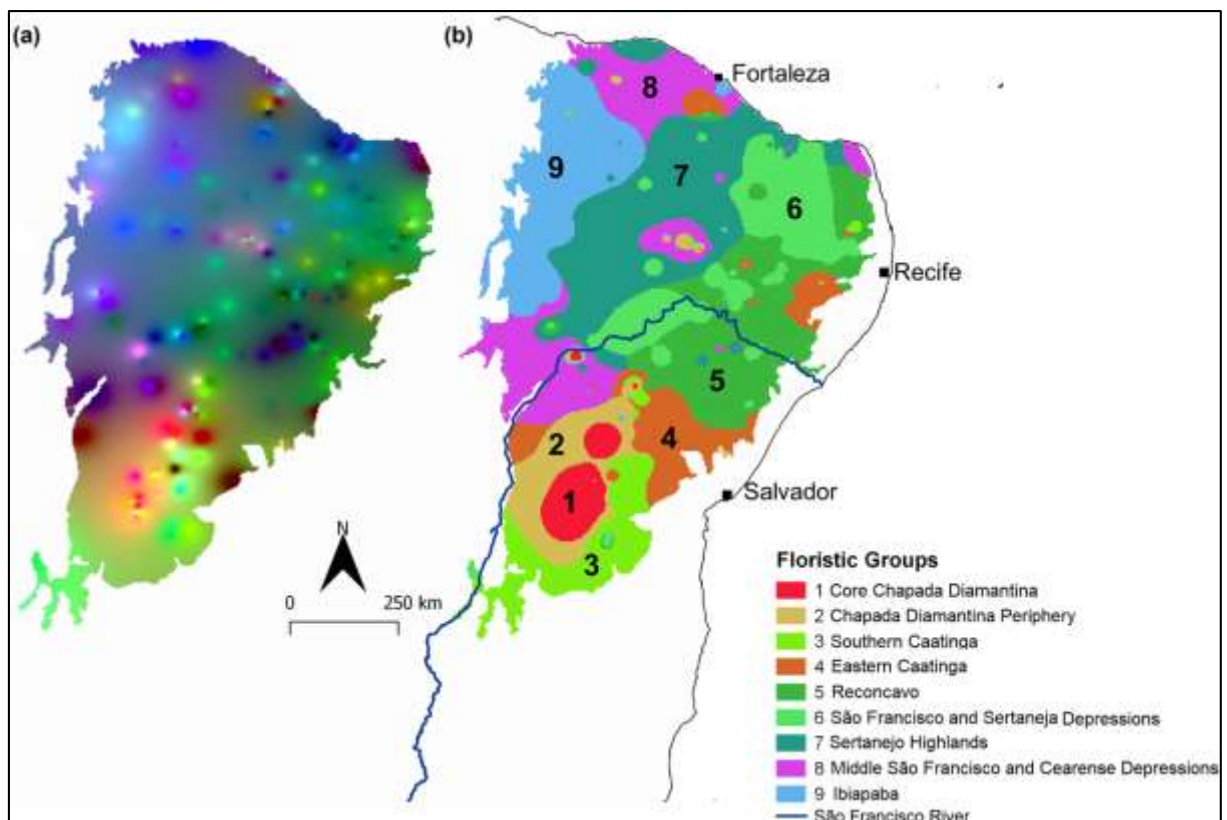


Fonte: Moro *et al.* (2015).

A classificação proposta por Moro *et al.* (2018) é considerada por Silva e Souza (2018) como a única que apresenta uma análise quantitativa dos agrupamentos florísticos – até então realizada de modo qualitativo. No entanto, o trabalho buscou relacionar as fisionomias vegetais com fatores ambientais, sem delimitar as regiões biogeográficas.

Silva e Souza (2018) propuseram uma regionalização quantitativa da diversidade beta² de plantas lenhosas em nove sub-regiões biogeográficas florísticas: (1) Núcleo da Chapada Diamantina, (2) Periferia da Chapada Diamantina, (3) Caatinga Meridional, (4) Caatinga Oriental, (5) Recôncavo, (6) São Francisco e Depressão Sertaneja, (7) Planalto Sertanejo, (8) Médio São Francisco e Depressão Cearense, e (9) Ibiapaba; visualizadas na Figura 3.

Figura 2.3 -Sub-regiões biogeográficas florísticas da Caatinga.



Fonte: Silva e Souza (2018).

Essa classificação se diferencia das demais por enfatizar as espécies vegetais separadamente dos aspectos geomorfológicos e da fauna. Ao comparar com as outras tentativas de subdivisão, os autores destacam que: (1) cadeias montanhosas não formam unidades florísticas distintas, com exceção da Chapada Diamantina; (2) as depressões sertanejas são

² Refere-se à de mudança de espécies ao longo de um gradiente ambiental e pode ser definida como a razão entre a diversidade gama (regional) e a diversidade alfa (local).

muito mais complexas e subdivididas floristicamente; (3) as áreas de transição com a Mata Atlântica não são tão extensas e contínuas; e (4) não se pode confirmar a distinção entre a flora e terrenos sedimentares ou cristalinos (SILVA; SOUZA, 2018).

Ademais, Lima *et al.* (2018) destacam outro cenário desafiador para as pesquisas na Caatinga: a compreensão e definição da dinâmica histórica deste ambiente. Conforme os autores, os padrões de diversificação desta rica e elevada biodiversidade Neotropical não pode ser atribuída a eventos pontuais na escala temporal. Eles então sintetizam a origem da vegetação e sua conexão histórica com outras formações vegetais em duas hipóteses: uma embasada na flora alóctone derivada do Chaco e Mata Atlântica em uma conexão pretérita; outra no direcionamento ocorrido por eventos tectônicos com a reorganização paleogeográfica mantida pelas alterações climáticas durante o Pleistoceno (1,58-0,00117Ma).

Mas para Silva e Souza (2018), assim como ocorre na classificação da Caatinga, há várias hipóteses não exclusivas para explicar a atual distribuição de espécies e biotas. Os autores consideram que a semiaridez atual promove seca sazonal, alteração de temperaturas durante o ano e alta variação da precipitação de cada ano, o que impõe restrições ao crescimento das plantas e ao acúmulo de biomassa. Andrade-Lima (1981) ressalta que a análise histórica dessa flutuação climática, associada com a presença de encostas em afloramentos rochosos, pode indicar a contribuição para a dispersão de algumas espécies mesófilas de florestas tropicais do passado.

Ao estudarem os cenários geomorfológicos das áreas interioranas do nordeste setentrional, Maia e Nascimento (2018) corroboram com o autor supracitado. Segundo eles, os *inselbergs* e outros afloramentos rochosos existentes na região do Planalto da Borborema constituem formas fósseis de um paleoambiente epigênico, que pode estar relacionado a sistemas meteóricos decorridos de climas tropicais mais úmidos. Tais elementos fósseis do relevo têm sido preservados pela semiaridez atual, mas sua origem está vinculada a processos erosivos desencadeados pela mudança climática promovida por ciclos de umidade e secura.

De acordo com Moro *et al.* (2015), os terrenos baixos cristalinos da região Nordeste do Brasil, onde predomina a Caatinga, são resultantes de diversos eventos de denudação em uma pediplanação generalizada durante o Paleoceno³, formando-se então as bacias sedimentares que permaneceram como locais distintos em meio às paisagens cristalinas. Desta forma, embasados na Teoria Ecológica, os autores acreditam que a flora endêmica original da Caatinga tenha sido mantida nos terrenos sedimentares, enquanto grande parte da flora nos terrenos cristalinos tenha

³ Período geológico equivalente a 60 Ma, conforme atualização do Comitê Internacional de Estratigrafia (Tabela Internacional de Cronoestratigrafia 2020/01).

sido resultado da migração de táxons de outras formações tropicais sazonalmente secas do continente.

A Teoria Ecológica sugere que o agrupamento ou a super-dispersão filogenética são promovidos pelas condições contrastantes entre a filtragem ambiental e as interações de competição. Isso indica, por exemplo, que os *inselbergs* são ilhas potencialmente sujeitas a níveis mais altos de migração com maior rotatividade do que em ambientes cristalinos. Tais efeitos podem estar subjacentes aos padrões de diversidade na Caatinga e, apesar de um forte filtro ambiental compartilhado pelas florestas tropicais sazonalmente secas, são potencialmente heterogêneas na estrutura filogenética (MORO *et al.*, 2015).

Desta forma, a especiação e a rica biodiversidade existente decorreram de forças tectônicas e geográficas ocorridas desde o Paleoceno* (*ver nota de rodapé 3), seguidas por extensas e frequentes mudanças climáticas com períodos e intensidades de chuvas e secas alternadas desde o Pleistoceno, que proporcionaram a expansão e retração das florestas tropicais. Estas flutuações climáticas desencadearam sinais genéticos para que espécies das formações florestais abertas e secas se expandissem pelos corredores dos refúgios xéricos pleistocênicos e, assim, resultaram nas recentes divergências de linhagens das plantas xerófitas locais (SILVA; SOUZA, 2018).

As implicações paleoclimáticas também embasam a compreensão da evolução de uma importante estrutura geológica do nordeste brasileiro na qual a Caatinga se manifesta: a Província Borborema. Conforme Correa *et al.* (2010) e Maia, Bezerra e Sales (2010), os modelos clássicos utilizados para explicar o desenvolvimento morfoestrutural da Província Borborema enfatizam os aspectos climáticos-erosionais e, de certa forma, negligenciam os agentes endógenos. Nesses modelos, a morfogênese é apresentada como resultado de processos epirogênicos pós-cretáceos e sucessivos ciclos de aplainamento, o que não condiz com o conjunto de paisagens geomorfológicas observadas (CORREA *et al.*, 2010; MAIA; BEZERRA; SALES, 2010).

Dentre as paisagens existentes, Maia e Nascimento (2018) citam o cenário geomorfológico caracterizado pela presença de *inselbergs*, lajedos e *plutons*. Conforme os autores, tais feições encontradas em áreas graníticas têm relevo associado à meteorização e exumação decorrentes da orogenia brasiliana, ciclo geodinâmico marcado pelo desenvolvimento de zonas de cisalhamento direcionais associadas a um extenso magmatismo edicariano (LAGES *et al.*, 2016). Para Correa *et al.* (2010), as estruturas geológicas herdadas e a dinâmica morfotectônica regional condiciona os diversos componentes do sistema geomorfológico.

De acordo com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2001)⁴, a Província Borborema é composta por terrenos ou faixas de dobramentos associados às orogêneses do Meso e Neoproterozoico e granitogêneses correlatas, incluindo fragmentos antigos do Arqueano/Paleoproterozoico, bacias sedimentares tafrogênicas mesozoicas e coberturas superficiais recentes. A compartimentação geotectônica pode ser dividida em domínios e terrenos tectonoestratigráficos, que apresentam falhas longitudinais com diferenciação geológica a partir da justaposição e colagem orogênica durante os eventos Cariris Velhos e Basiliano/Pan-Africano. Por outro lado, o importante sistema anastomosado composto por lineamentos e zonas de cisalhamento transcorrentes paralelos à extensão da faixa demonstra um padrão característico de orógenos desmantelados por expressiva dispersão pós-colisional (CPRM, 2001).

Correa *et al.* (2010) ressaltam que a influência das estruturas herdadas, da litologia sobre os modelados de erosão diferencial e a ocorrência de um bombeamento regional a partir do Cretáceo são premissas morfoestruturais do Planalto da Borborema e embasam as pesquisas sobre a morfogênese desta principal unidade de relevo. Conforme Meiado *et al.* (2020), o Planalto da Borborema é composto por estruturas elevadas ou dobradas em aspecto tubular, com as partes superiores entre as feições mais altas da região e revelam uma paisagem dinâmica.

Nas paisagens em processo de pediplanação, as superfícies elevadas se destacam e desenvolvem um importante papel de controlar a distribuição de umidade. O controle orográfico ocorre quando há retenção da precipitação no topo e encostas de barlavento dos ventos originários do Atlântico e promovem a redução significativa da umidade nas encostas de sotavento (MEIADO *et al.*, 2020). Conforme Sena, Moraes Neto e Lucena (2017), a irregularidade espacial e temporal da precipitação existente no nordeste brasileiro resulta em ciclos de fortes estiagens, secas e enchentes, que afeta diretamente as condições de vida da população no semiárido; sendo esta variabilidade da precipitação modulada por fenômenos decorrentes de interações atmosfera-oceano.

De acordo com Maia e Nascimento (2018), a zona de convergência intertropical, os vórtices ciclônicos de ar superior e as ondas de leste influenciam o sistema de chuvas, caracterizado pelo curto período úmido entre fevereiro e maio; com predomínio de um longo período seco com altas temperaturas nos outros meses. Os valores da umidade relativa do ar

⁴ A Província Borborema ainda é alvo de pesquisas atuais para auxiliar a compreensão sobre a evolução geotectônica. Em 2020 foram lançados mapas geofísicos que trazem implicações sobre limites externos e compartimentos internos, não abordados aqui pela complexidade das discussões fora do escopo desta tese.

acompanham a curva de precipitação, cuja média anual corresponde a 70% e 700 mm, respectivamente.

Para Meiado *et al.* (2020), o conjunto de mecanismos atmosféricos que determinam a condição semiárida do Nordeste ainda não é totalmente conhecido. Além dos fenômenos extremos de secas severas ou inundações ligadas à Oscilação Sul do El Niño e La Niña e ao Dipolo do Atlântico, a região ainda está sob influência da Zona de Convergência Intertropical Atlântica, Complexos Convectivos de Mesoescala, Vórtice Ciclônico de Alto Nível e linhas de instabilidade costeira norte-nordeste.

Os compartimentos e feições do relevo também organizam um importante sistema de drenagem. Nas bacias de dissolução (cavidades na superfície exposta de rochas graníticas), diversas reentrâncias erosionais confinam drenagens efêmeras, isoladas ou interconectadas por exutórios. Já as caneluras (sulcos verticais de erosão química na superfície de *inselbergs* e blocos graníticos) originam focos de drenagem radial com eventual acúmulo de sedimentos e matéria orgânica em seu interior, que permite o acesso da vegetação nesses ambientes (MAIA; NASCIMENTO, 2018).

Por sua vez, os rios na região são predominantemente sazonais e tendem a secar rapidamente após os eventos de chuva, o que os tornam mais susceptíveis a outras forças erosivas (MEIADO *et al.*, 2020). Conforme os autores, os corpos d'água influenciam a organização espacial da população e o adensamento das áreas urbanas, o que aumenta a pressão sobre este recurso natural.

Ainda que não se tenha um consenso de qual hipótese é mais adequada para explicar a dinâmica histórica da Caatinga e da Província Borborema, atualmente a modificação das paisagens naturais tem sido potencializada pelo ser humano e ameaça o equilíbrio ecológico deste ecossistema. Dentre os processos de degradação ambiental existentes destaca-se o processo de desertificação, que ocorre em aproximadamente 4 bilhões de hectares e afeta 250 milhões de pessoas em 100 países em regiões de clima árido, semiárido e subúmido (SANTOS *et al.*, 2011; VENDRUSCOLO *et al.*, 2021; VIEIRA *et al.*, 2020).

No Brasil, a área suscetível à desertificação atinge parcialmente os nove estados do Nordeste e equivale a 1.340.863km² do semiárido brasileiro, habitado por cerca de 30 milhões de pessoas. Diferentemente de outras áreas onde a desertificação é ocasionada por eventos climáticos, no semiárido brasileiro já se encontra instalada na Caatinga e está principalmente vinculada ao uso e ocupação do solo. O processo inicia-se com a supressão da vegetação nativa, extração mineral, sobrepastoreio ou implantação insustentável de sistemas agrícolas com projetos de irrigação desenvolvidos para uso comercial e de subsistência. Como consequência,

a desertificação altera as propriedades biológicas, químicas, físicas e econômicas do solo e aumenta a suscetibilidade à erosão e salinização, sendo a recuperação destas áreas afetadas um dos maiores desafios da atualidade (MEIADO *et al.*, 2020; SOUZA; ARTIGAS; LIMA, 2015; VENDRUSCOLO *et al.*, 2021; VIEIRA *et al.*, 2021).

A exposição do solo associada com a perda de biomassa agrícola produzida é outro fator apresentado por Vendruscolo *et al.* (2021), que dificulta ainda mais a resiliência da vegetação nativa. Os autores destacam a importância de um efetivo monitoramento destas áreas, que utiliza as características do solo, da água e da cobertura vegetal como indicadores ambientais.

Porém, a excepcionalidade da Caatinga também está relacionada com o monitoramento do uso e cobertura do solo por sensoriamento remoto. As especificidades da dinâmica ambiental, como baixos índices no sinal da vegetação, elevada reflectância do solo, presença de biocroscas, alta heterogeneidade espacial em escala regional e comportamento imprevisível da vegetação mediante a irregularidade temporal e espacial das chuvas são fatores que dificultam o mapeamento de qualidade (SILVEIRA *et al.*, 2018; SMITH *et al.*, 2019).

Para Beuchle *et al.* (2015), Lessa *et al.* (2019), Lopes *et al.* (2020) e Silveira *et al.* (2018), as dificuldades práticas no mapeamento de habitats semiáridos tornam o trabalho extremamente desafiador, mesmo com o avanço do Sistema de Informação Geográfica (SIG) nas últimas décadas. Conforme os autores, o uso geotecnologias capazes de minimizar esta complexidade ainda são relativamente recentes, a exemplo das imagens de satélite de média e alta resolução.

2.2 Ecologia de Paisagens: uma ciência em maturação

A paisagem é objeto de estudo com diferentes visões epistemológicas, abordagens e aplicações. Na Geografia, os conceitos de paisagem têm sido discutidos desde o século XIX, iniciados por Humboldt. Porém, houve um ‘*vácuo científico*’ sobre o uso do termo, quando estudos do território passaram a ser o principal foco das pesquisas geográficas (SIQUEIRA; CASTRO; FARIA, 2013). Conforme as autoras, esta lacuna resultou na falta de consenso sobre a concepção científica da paisagem entre a geografia e as diversas áreas que trabalham com o tema, como a ecologia, as ciências da terra e a arquitetura.

Ainda de acordo com Siqueira, Castro e Faria (2013), um dos conceitos-chave considerado integrador na geografia é “*a paisagem enquanto produto fisionômico dinâmico das relações sociais e naturais em um determinado espaço*”. De acordo com Pivello e Metzger (2007), a forte influência da geografia humana, biogeografia, fitossociologia e outras disciplinas com interesse comum no estudo da paisagem relacionado ao planejamento regional

fez emergir, no final da década de 1930, uma nova área do conhecimento: a Ecologia de Paisagens.

O termo “Ecologia de Paisagens” (*Landschaftsökologie*) foi utilizado pela primeira vez pelo biogeógrafo alemão Carl Troll, em 1939, embasado nas tradições europeias da geografia regional – considerada a primeira modificação conceitual de paisagem desde Humboldt. Ao observar uma fotografia aérea, Troll buscou entender as interações recíprocas entre a heterogeneidade espacial e os processos ecológicos em uma nova perspectiva de análise, na tentativa de unificar conceitos de paisagem e de meio ambiente natural, bem como estreitar os campos de atuação entre a geografia e a ecologia (METZGER, 2001; PIVELLO; METZGER, 2007; RITTER; MORO, 2012; RODRIGUES; SILVA; FIGUEIRÓ, 2019; SALOMÃO; SILVA; MACHADO, 2019; SIQUEIRA; CASTRO; FARIA, 2013; TURNER, 2005).

Metzger (2001) ressalta que o termo foi empregado em um período muito próximo ao conceito de ecossistema introduzido por Tansley, em 1935. Embora o ponto de partida entre ecossistema e Ecologia de Paisagens seja semelhante, embasado na “*observação das inter-relações da biota (incluindo o homem) com o seu ambiente, formando um todo*” (METZGER, 2001, p. 2), o autor destaca que a definição muito se difere. Enquanto a primeira refere-se a um sistema onde há mecanismos de autorregulação e ciclagem de matéria com interdependência entre seus componentes; a segunda se embasa na espacialidade, ou seja, na heterogeneidade do espaço onde o ser humano habita.

De acordo com Ritter e Moro (2012) e Rodrigues, Silva e Figueiró (2019), em 1966 a nova disciplina científica passou a ser denominada por Troll como Geoecologia e, ao longo do tempo, ampliou concepções e incorporou a percepção cultural à Ecologia de Paisagens. Para Salomão, Silva e Machado (2019), as paisagens culturais são aquelas que tiveram o conjunto de padrões, espécies e processos influenciados após longo período de tempo de intervenção antrópica; enquanto as paisagens naturais apresentam baixo nível de interferência. Sob a ótica geográfica, a Geoecologia está embasada em uma visão geossistêmica proposta por Sotchava, nos preceitos da Teoria Geral dos Sistemas, para interpretar aspectos estruturais, funcionais, dinâmico-evolutivos e histórico-anthropogênicos da paisagem (RODRIGUES; SILVA; FIGUEIRÓ, 2019; VIDAL; MARCARENHAS, 2020).

Já a Ecologia de Paisagens seguiu duas abordagens: a geográfica e, posteriormente, a ecológica. De acordo com Metzger *et al.* (2007) e Turner (2005) na primeira o foco é considerado antropocêntrico, onde a paisagem é vista como conjunto de ecossistemas ou unidades de uso e cobertura da terra definidas conforme utilidade humana. Na segunda, os

trabalhos seguiram um viés mais ecológico, onde a escala espacial da paisagem é definida por organismos de uma espécie ou um processo ecológico de interesse.

Metzger (2001), Metzger *et al.* (2007), Ritter e Moro (2012) e Turner (2005), ressaltam que a escolha da abordagem e dos autores variam em função dos objetivos. No entanto, mesmo sem a unificação de conceitos ou referenciais teóricos comuns, sempre prevalece a noção de espaço, de inter-relação com a vida humana e de aplicações práticas para solução de problemas ambientais.

Considera-se aqui o conceito integrador de paisagem definido por Metzger (2001, p. 4) como um “*mosaico heterogêneo formado por unidades interativas, sendo esta heterogeneidade existente para pelo menos um fator, segundo um observador e numa determinada escala de observação*”. Dessa forma, a paisagem não se refere a um nível hierárquico – como utilizado na Ecologia, onde estaria acima de ecossistema; nem a uma escala, pois permite uma análise condicionada à percepção do observador, representado desde pequenos organismos até o ser humano, em unidades interativas que podem ser o hábitat da espécie/comunidade ou o uso e ocupação de um território (METZGER, 2001).

Segundo Turner (2005), concomitantemente ao desenvolvimento dos conceitos e métodos de análise utilizados pela Ecologia de Paisagens, a década de 1980 marcou o avanço no entendimento da heterogeneidade espacial, suas inúmeras causas abióticas e bióticas com respectivas consequências ecológicas. A importância dessa década é corroborada por Pivello e Metzger (2007), marcada também pela criação da IALE – *International Association for Landscape Ecology* em 1981, com a realização de congressos sobre o tema; e da revista científica *Landscape Ecology*, em 1987.

Ademais, Wu (2013) destaca o workshop de Allerton Park, em 1984, como o início de um novo paradigma na Ecologia de Paisagens inerentemente interdisciplinar. A visão americana reconhece as raízes europeias e resulta na fusão entre a perspectiva humanística e holística com os desenvolvimentos teóricos e tecnológicos da ecologia. Para França *et al.* (2019) e Ritter e Moro (2012), ela baseia-se na ecologia de ecossistemas, na modelagem e na análise espacial, favorecidas pelo avanço das geotecnologias. Com grande ênfase nas paisagens naturais, a abordagem inclui variáveis temporais e espaciais em diversas escalas, com objetivo de conservar a biodiversidade e promover o manejo dos recursos naturais.

Com o rápido desenvolvimento e o progresso alcançado pela Ecologia de Paisagens, em 2001 foram identificados problemas e prioridades de pesquisa para o século XXI durante um simpósio nos Estados Unidos. Em síntese ao que foi debatido durante o evento, Wu e Hobbs

(2002) apresentam a possível ameaça na ‘identidade’ dessa ciência como o principal problema, causado pela divergência entre perspectivas e abordagens adotadas.

Já os principais tópicos de pesquisa definidos foram: fluxos ecológicos em mosaicos da paisagem; causas, processos e consequências da mudança do uso e cobertura do solo; dinâmica não linear e complexidade da paisagem; escala; desenvolvimento metodológico; métricas da paisagem relacionadas a processos ecológicos; integração do ser humano e suas atividades na Ecologia de Paisagens; otimização do padrão da paisagem; paisagens sustentáveis; aquisição de dados e avaliação da acurácia (WU; HOBBS, 2002). Conforme os autores, esses temas refletem a visão da coletividade sobre os caminhos da Ecologia de Paisagens embasados em seis questões-chave relacionadas entre si, a saber:

(1) Interdisciplinaridade/Transdisciplinaridade: a essência multidisciplinar dessa ciência se faz necessária para que os ecologistas da paisagem lidem com muitos problemas, onde devem trabalhar diretamente com paisagistas, gestores, cientistas sociais e outros profissionais.

(2) Integração entre pesquisa e aplicações básicas: considerada longe do satisfatório, foi apresentada a necessidade de desenvolver projetos de pesquisa que visam lidar com problemas do mundo real; garantir a comunicação entre ecologistas da paisagem com demais profissionais; integrar a teoria e a prática no ensino universitário; e, com urgência, desenvolver a Ecologia de Paisagens enquanto uma ciência ambiental voltada para aplicação na gestão de recursos, no planejamento do uso da terra, no design urbano e na conservação da biodiversidade.

(3) Desenvolvimento conceitual e teórico: há uma carência de base conceitual e teórica adequada para explicar teorias, princípios e métodos recentes. Algumas teorias, como a Teoria Geral dos Sistemas e a Teoria Ecológica, não lidam explicitamente com a heterogeneidade espacial e, por isso, são consideradas insuficientes para embasar a Ecologia de Paisagens.

(4) Educação e treinamento: além da necessidade de integrar as pesquisas científicas com as aplicações de diferentes interesses e origens, ressalta-se que a Ecologia de Paisagens seja incluída nos currículos universitários e em programas de treinamento, de modo a enfatizar sua interdisciplinaridade e sua natureza holística.

(5) Comunicação e colaborações acadêmicas internacionais: assim como a estrutura, o funcionamento e a dinâmica das paisagens são influenciados por uma série de forças físicas, bióticas, socioeconômicas, culturais e políticas, os ecologistas da paisagem também refletem suas tradições científicas e culturais. Por isso, a comunicação e a colaboração entre

os pesquisadores se tornam necessárias para desenvolver um núcleo coerente e abrangente, que não considere apenas a expansão espacial ou uma versão espacializada das ecologias existentes.

(6) Divulgação e comunicação com o público e tomadores de decisão: a comunicação passa a ser vista também como a responsável pelo aumento da interdisciplinaridade da Ecologia de Paisagens, se afastando da maneira tradicional de se fazer ciência por incluir um público heterogêneo.

Três décadas após o surgimento da visão americana, considerada o berço da Ecologia de Paisagens modera, Wu (2013) apresenta uma análise sobre a identidade e as abordagens adotadas desde então. O autor constatou o avanço produtivo de estudos que abrangem não apenas tópicos relacionados à quantificação de padrões espaciais e escala inerente à heterogeneidade espacial, como também abordam questões relevantes para a sociedade, que corroboram com o avanço desta ciência multidisciplinar. No entanto, França *et al.* (2019), ressaltam que a análise de Wu (2013) reflete apenas trabalhos desenvolvidos por pesquisadores estrangeiros.

No Brasil, Pivello e Metzger (2007) fizeram uma análise sistemática de estudos acadêmicos entre os anos de 2000 e 2005, classificados conforme: temática; abordagem metodológica; técnicas de análise; tendências futuras e instituições cadastradas na linha de pesquisa em Ecologia de Paisagens no CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. As principais abordagens nos trabalhos brasileiros referem-se à análise dos padrões espaciais, a relação entre padrões e processos ecológicos, o planejamento ambiental, a dinâmica de uso e ocupação da terra, metodologia, escala e percepção ambiental.

Quanto ao aspecto metodológico, os autores identificaram que a abordagem descritiva-observacional foi amplamente utilizada nas pesquisas, com predominância de técnicas qualitativas. Nesses casos, a metodologia dos trabalhos descritivos se baseia apenas na observação, sem hipótese prévia, sem manipulação de parâmetros, sem simulação de cenários ou uso de modelos, e sem apresentação ou discussão de conceitos ou de métodos. Já a técnica de análise mais comum não aborda nenhuma quantificação, nem por métricas da paisagem, nem por outras análises estatísticas que permitam quantificar, medir ou comparar áreas.

Como tendência futura, Pivello e Metzger (2007) apontam a necessidade de desenvolver trabalhos com hipóteses claras a serem testadas de forma quantitativa para que haja o progresso das investigações científicas brasileiras. Na época, as dissertações e teses sobre Ecologia de Paisagens levantadas foram geradas em 46 universidades e instituições, embora apenas 11 delas tivessem grupos de estudo cadastrados na plataforma Lattes/CNPq.

Também identificaram um número pouco expressivo na produção científica mundial, com 26 artigos publicados em revistas internacionais levantados na *Web of Science* entre 1995 a 2005 (equivalente a 1%), dominado por publicações de pesquisadores dos Estados Unidos, com 47,8% (PIVELLO; METZGER, 2007). França *et al.* (2019) atualizaram a análise deste cenário e identificaram a contribuição das publicações brasileiras entre 2000 e 2019: dos 1.834 artigos levantados na *Web of Science* que, direta ou indiretamente, utilizam termos ou métodos embasados na Ecologia de Paisagens, 130 foram produzidos no país, equivalente a 7%.

Apesar das publicações ainda escassas, sobretudo em revistas internacionais, França *et al.* (2019) e Ritter e Moro (2012) destacam que a Ecologia de Paisagens no Brasil, mesmo muito recente, está se difundindo no âmbito da pesquisa, em projetos aplicados no ordenamento territorial e em estudos de impacto ambiental. Por envolver diversas áreas do conhecimento com epistemologias distintas, às vezes com paradigmas conflitantes, os autores consideram que a partir dos anos 2000 iniciou-se um lento processo de mudança nas atividades de pesquisa e na docência, substituindo o enfoque meramente descritivo para o experimental.

Ademais, Cheung, Brierley e O'Sullivan (2016), Lausch *et al.* (2015) e Paese *et al.* (2012) associam a constante maturação dessa ciência com o avanço das geotecnologias e a crescente preocupação mundial com as questões ambientais. Para os autores, o uso de ferramentas de sensoriamento remoto e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite compreender os padrões da paisagem e como eles influenciam os sistemas ecológicos e socioeconômicos ou vice-versa. Assim, a Ecologia de Paisagens passa a subsidiar ações eficazes para o planejamento e gestão integrada do território, com a modelagem de alterações do uso e ocupação da terra e a delimitação espacial de áreas prioritárias para conservação, por exemplo.

2.2.1 Modelagem e métricas da paisagem

A modelagem na Ecologia de Paisagens se baseia na relação entre padrão-processo e heterogeneidade do espaço. Assim, a dinâmica dos fragmentos é representada em modelos, que com o uso de técnicas espaciais, principalmente de sensoriamento remoto orbital, associadas a levantamento de campo, que permitem quantificar e qualificar os efeitos e as consequências das mudanças da paisagem (METZGER *et al.*, 2007; SALOMÃO; SILVA; MACHADO, 2019).

Um dos primeiros modelos utilizados para quantificar os padrões da paisagem e ainda amplamente difundido é o ‘mancha-corredor-matriz’. Neste modelo a estrutura da paisagem é reduzida a três elementos principais com linguagem espacial de fácil comunicação entre

diversas disciplinas, que permite avaliar a configuração (arranjo espacial) e a composição (diversidade constituinte) das unidades da paisagem a partir de índices estatísticos espaciais denominados métricas da paisagem (CHEUNG; BRIERLEY; O’SULLIVAN, 2016; FORMAN, 1995; LAUSCH *et al.*, 2015; METZGER *et al.*, 2007).

Conforme Forman (1995), Lang e Blaschke (2009), Lausch *et al.* (2015), McGarrial (2012) e Metzger *et al.* (2007), as manchas – ou fragmentos – são os menores elementos observáveis da paisagem, compostas por áreas homogêneas de um determinado tipo de uso e cobertura da terra com características próprias que se diferem do entorno. Elas podem ser grandes ou pequenas, alongadas ou arredondadas, sinuosas ou suaves. Os corredores conectam dois ou mais fragmentos e podem ser largos ou estreitos, tortuosos ou lineares, com alta ou baixa conectividade. Já a matriz é a unidade dominante da paisagem onde os fragmentos e os corredores estão inseridos, podendo ser extensa ou limitada, muito ou pouco permeável. Dependendo da escala de observação, a matriz pode ser considerada uma mancha e vice-versa.

Ademais, McGarrial (2013) apresenta a diferença entre métricas estruturais, que estimam a configuração e a composição da paisagem sem se referenciar a um processo ecológico específico; e as métricas funcionais, que mensuram a função da paisagem sob a perspectiva do organismo ou processo ecológico que está em observação. O autor exemplifica a diferença a partir do cálculo da distância média do vizinho mais próximo: nas estruturais, a distância é estabelecida entre amostras vizinhas de mesma classe, em um modelo de conexão binária onde o restante da paisagem é ignorado. Já as funcionais consideram os coeficientes de permeabilidade atribuídos para cada tipo de fragmento conforme o movimento da espécie ou do processo em estudo.

Pela representação simplificada do modelo, há uma vasta quantidade de métricas aplicadas em nível de mancha para descrever características dos fragmentos; de classe ou cobertura da terra, que envolvem uma visão de conjunto específico de manchas; e de paisagem, para caracterizar a matriz em toda sua extensão (LANG; BLASCHKE, 2009; LAUSCH *et al.*, 2015). De acordo com Cheung, Brierley e O’Sullivan (2016), muitas métricas existentes estão relacionadas entre si, sendo importante definir a abordagem e o objetivo da pesquisa para melhor selecioná-las.

McGarrial (2013) descrevem cinco grupos de métricas distintos, porém complementares. Conforme o autor, os grupos das métricas de área e de borda mensuram o tamanho e o perímetro dos fragmentos. Trata-se das medidas mais básicas existentes na configuração espacial e, por isso, são diretamente incorporadas pela maioria das métricas existentes. Nas métricas de área considera-se o somatório das áreas calculadas, a quantidade de fragmentos, a média, mediana e

variação do tamanho do fragmento calculado; já nas métricas de borda considera-se o comprimento total calculado em uma relação perímetro/área ou perímetro/número de fragmentos.

O grupo das métricas de forma caracteriza a complexidade da geometria dos fragmentos, sendo um atributo espacial baseado na quantidade relativa de perímetro por unidade de área (razão perímetro/área) ou na dimensão fractal padronizada em uma forma euclidiana simples (geralmente círculos). O grupo das métricas de área núcleo corresponde à área no interior do fragmento após eliminar um *buffer* que representa um possível efeito de borda. Esse conjunto de métricas integram informações básicas das métricas de área, de forma e de borda, já que fragmentos menores ou com maior complexidade de forma tendem a apresentar área núcleo menor. Por fim, o grupo das métricas de subdivisão refere-se ao grau em que a paisagem é dividida em fragmentos disjuntos, medido pelo número ou pela densidade de fragmentos (McGARIAL, 2013).

Mesmo com a variedade de métricas existentes em cada grupo, Lausch *et al.* (2015) apontam algumas limitações da modelagem conforme as características do processo ecológico ou antropogênico e respectivo efeito na paisagem. Como a contínua interação dos processos naturais e antropogênicos determinam padrões da vegetação e estrutura da paisagem ao longo do tempo, os autores consideram que o modelo mancha-corredor-matriz reflete melhor como nós, seres humanos, vemos e percebemos a paisagem, composta por manchas homogêneas de uso e cobertura da terra bem delimitadas. Já a representação de ecótonos e processos agropastoris dispostos de modo difuso na paisagem requerem uma abordagem hierárquica e pluralista por toda a extensão da escala espacial (PENG *et al.*, 2016).

Para o avanço da Ecologia de Paisagens, Pomianowski e Solon (2020) e Ziolkowska *et al.* (2014) consideram importante ressaltar possíveis incertezas na modelagem e no planejamento ambiental e suas consequências. Dentre elas, os autores apontam a modesta representação das manchas de hábitat, já que a maioria das análises se baseia no modelo mancha-corredor-matriz, sem o detalhamento na representação de ecótonos e demais áreas de transição; e que os corredores podem, ao mesmo tempo, facilitar ou impedir o movimento de espécimes entre as manchas.

Peng *et al.* (2016) ainda consideram que alguns fatores podem restringir o uso apropriado das métricas, pois os efeitos da escala e da resolução espacial de diferentes satélites determinam não apenas o tamanho do pixel da imagem por sensoriamento remoto, mas também a extensão espacial da unidade de análise. No entanto, conforme Cheung, Brierley e O'Sullivan (2016), além da maior acessibilidade de dados em resoluções espaciais e temporais cada vez

mais finas, que viabilizam adotar escalas que antes não era possível, a topologia espacial tem influenciado a análise da paisagem. Os autores destacam a Teoria dos Grafos como uma importante ferramenta utilizada para analisar as propriedades estruturais ou funcionais da paisagem.

Segundo Heckmann *et al.* (2015), a Teoria dos Grafos foi inicialmente desenvolvida como um ramo da matemática em uma forma intuitiva de modelar um sistema em rede, formada pelos elementos do sistema (nós ou vértices) e as arestas que representam as conexões entre eles. Na Ecologia de Paisagens, a Teoria dos Grafos está embasada na Teoria de Metapopulações⁵, aplicada como uma medida de conectividade capaz de identificar e priorizar áreas para a manutenção da biodiversidade ou para a restauração ambiental (PAESE *et al.*, 2012).

Assim, de acordo com Heckmann *et al.* (2015), Minor e Urban (2007), Paese *et al.* (2012), Saura e Pascual-Hortal (2007) e Saura e Rubio (2010), um grafo é o conjunto de nós conectados por arestas, onde os nós podem representar a localização espacial de uma unidade da paisagem de interesse; e a sequência de arestas representa o caminho para conectar dois ou mais nós. Para Pomianowski e Solon (2020), a Teoria dos Grafos é a abordagem mais promissora e mais difundida nos dias atuais, onde manchas de hábitat (nós) são distinguidas da matriz e as conexões (arestas) representam a distância entre as manchas.

A análise da paisagem por padrões topológicos baseados em grafos permite combinar as estatísticas espaciais em cada um dos nós, que são codificados conforme a localização geográfica e informações geométricas auxiliares – como área, tamanho, relação e interação entre os fragmentos (CHEUNG; BRIERLEY; O’SULLIVAN, 2016). Conforme Paese *et al.* (2012), o Índice Integral de Conectividade é uma importante métrica para relacionar o valor da área e da localização do fragmento com a quantidade de conexões existentes.

Peng *et al.* (2016) destacam ainda que as métricas da paisagem são influenciadas e moldadas por determinantes topográficos em uma relação recíproca entre padrões físicos da paisagem e processos socioeconômicos. Adicionalmente, a geografia física e a Ecologia de Paisagens têm evidenciado a importância em compreender a relação entre os efeitos do terreno na formação do padrão da paisagem para otimizar a diferenciação espacial (ZHANG *et al.*, 2018). Conforme Mayor *et al.* (2008), no caso de ambientes semiáridos, dinâmicos em função

⁵ Metapopulação pode ser definida como um conjunto de subpopulações espacialmente isoladas em áreas de hábitat, mas unidas funcionalmente por fluxos biológicos, que podem ser áreas de pequenas dimensões com grande relevância para conservação por conectar migrações.

do funcionamento hidrológico, são raros os estudos que os associam os gradientes topográficos com as métricas de paisagem.

Apesar das dificuldades existentes nos procedimentos para a aplicação de um sistema de conexão da paisagem, Herrmann (2012) destaca os corredores ecológicos como um instrumento eficaz de planejamento regional capaz de incorporar o mosaico de diferentes usos da terra e garantir a resiliência de paisagens modificadas. Seja qual for o modelo adotado nos estudos em Ecologia de Paisagens, Kremen e Merenlender (2018) consideram que o principal desafio da atual ‘Era Antropocêntrica’ está na efetividade do planejamento e gestão para uma paisagem integradora entre pessoas e biodiversidade.

2.3 Planejamento Regional de Paisagens Modificadas

Os diversos usos antropogênicos da terra têm transformado a paisagem natural em fragmentos de hábitat cada vez menores e mais isolados entre si, com áreas núcleo mais próximas da borda, em uma matriz de cobertura antrópica com permeabilidade variável, às vezes, inóspita para sustentar algumas espécies (ARROYO-RODRÍGUES *et al.*, 2020; HADDAD *et al.*, 2015). Conforme Haddad *et al.* (2015), os novos conjuntos de dados de satélite revelam o alto contraste dos tipos de cobertura antropogênica e florestal, a última com fragmentação globalizada predominante nas regiões de clima temperado e com significativo aumento nas zonas tropicais desde a última metade do século passado.

De acordo com Haddad *et al.* (2015) e Paese *et al.* (2012), os efeitos da fragmentação são simultâneos e complexos em uma escala temporal potencialmente longa. Entre a modificação e a estabilidade estrutural da paisagem existe um período de latência que pode resultar em débito ecológico com posterior eliminação de espécies sensíveis e prejuízos na funcionalidade do ecossistema. Para a sobrevivência das espécies em longo prazo, a conectividade é uma característica essencial da paisagem e, quando quantificada de forma adequada, torna-se crucial para as decisões de conservação (ZIOLKOWSKA *et al.*, 2014).

Conforme Arroyo-Rodrigues *et al.* (2020), no contexto de paisagens modificadas pelo ser humano há uma miríade de conceitos sobre as estratégias de conservação e manejo adequado. Dentre as propostas existentes, os autores apresentam a incorporação de terras produtivas em ecossistemas; a criação de corredores ecológicos entre fragmentos; a manutenção de grande número de pequenos fragmentos florestais; e a melhoria da qualidade da matriz antropogênica com redução da expansão agrícola, de pesticidas e da caça.

Neste sentido, Herrmann (2011) estima que cerca de 80% da superfície global estão diretamente influenciados por alguma atividade humana. A autora então apresenta o termo corredor ecológico enquanto unidade de planejamento regional capaz de conectar o mosaico de paisagens em larga escala com a inclusão dos aspectos biológicos, sociais e econômicos. Estes corredores podem ser lineares, que ligam ininterruptamente dois ou mais fragmentos de hábitat; ou não lineares, conhecidos como trampolins ecológicos ou *stepping stones*, onde manchas de hábitat dispersas na paisagem viabilizam a conectividade em meio à matriz heterogênea.

Segundo Herrmann (2011), Pereira e Cestaro (2016), Pomianowski e Solon (2020) e Ziolkowska *et al.* (2014), a conectividade depende de dois grupos de variáveis diferenciados em funcional e estrutural. As medidas de conectividade funcional estão relacionadas com as respostas ecológicas em função da permeabilidade da paisagem, ou seja, estão fundamentadas no deslocamento de indivíduos ou populações para garantir a dispersão de espécies, a permuta genética e o efeito resgate⁶. Já as medidas de conectividade estrutural não possuem ligação direta com o comportamento das espécies, mas se baseiam na ocorrência, distribuição espacial e relações de limites das manchas associadas com outros aspectos abióticos, como topografia e hidrografia, que podem facilitar ou dificultar a ligação entre fragmentos.

Conforme Ward *et al.* (2020), em cenários projetados pelas mudanças climáticas antropogênicas, onde espécimes precisarão se deslocar mais longe e mais rapidamente, a conectividade estrutural pode ainda ser vista como facilitadora no acesso a microclimas preferidos de muitas espécies. Além dos benefícios específicos às espécies, os autores consideram que paisagens estruturalmente conectadas proporcionam o aumento da resiliência do ecossistema a partir da manutenção de variáveis abióticas importantes, como a ciclagem de nutrientes, umidade e regime hídrico.

Dentre as abordagens existentes de planejamento, Pomianowski *et al.* (2020) destacam a conectividade de ‘hábitats focais’, representados por áreas específicas de proteção da natureza ou por fragmentos de ecossistemas adequados para uma determinada espécie. Segundo Arroyo-Rodríguez *et al.* (2020) e Ward *et al.* (2020), as áreas protegidas são ferramentas estratégicas de conservação da biodiversidade utilizadas pela maioria dos países, com aumento da representatividade de 7,7% em 1990 para 16,3% em 2015; sendo necessária uma efetiva gestão destes ambientes para melhorar a qualidade da matriz antrópica circundante. Porém, apenas 4,9% das FTSS do mundo foram convertidas em áreas protegidas, sendo ainda mais incipiente nas Américas Central e do Sul, com menos de 1% (SANTOS *et al.*, 2011).

⁶ Redução da extinção de uma população pela imigração de propágulos vindos de manchas adjacentes, viabilizando a colonização local.

No Brasil, o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) foi instituído pela Lei nº 9.985/2000 e regulamenta a preservação de áreas protegidas a partir da criação de Unidades de Conservação (UCs). Trata-se da delimitação de um espaço territorial conforme características naturais relevantes a serem conservadas mediante garantias adequadas de proteção. As UCs podem ser divididas em dois grupos: de Proteção Integral, que permite apenas o uso indireto dos recursos naturais; e de Uso Sustentável, que compatibiliza a conservação com o uso parcial e sustentável dos recursos existentes.

Discussões e pesquisas sobre políticas de conservação, representatividade de espécies, manejo sustentável e nível de ameaça nas Unidades de Conservação embasam o Plano Estratégico para Biodiversidade, acordo internacional que prevê a expansão da rede mundial de áreas protegidas para 17% em ambientes terrestres e 10% em ambientes marinhos até 2020. No entanto, foi evidenciada uma carência de informações sobre o quão conectado está o patrimônio internacional das áreas protegidas em expansão, motivo pelo qual o Quadro Global para a Biodiversidade Pós-2020 avalia como crucial o aumento da conectividade no aspecto mais amplo da paisagem (WARD *et al.*, 2020).

Kremen e Merenlender (2018) consideram que paisagens com matriz antrópica podem apresentar capacidade suporte para biodiversidade superior ao que anteriormente era reconhecido, desde que se favoreça a conectividade funcional e a manutenção das condições abióticas. Dessa forma, ao invés de apenas delimitar uma área para proteção, é possível manter os serviços ecossistêmicos e a resiliência no entorno das consideradas ‘paisagens trabalháveis’. Segundo os autores, as paisagens trabalháveis compreendem fragmentos naturais e seminaturais que, apesar de incluir espécies nativas e exóticas, tornam-se multifuncionais em um cenário de produção socioecológica moldado ao longo do tempo pelo ser humano e pela natureza para o bem-estar mútuo.

No semiárido brasileiro, um dos principais problemas que afetam os sistemas socioecológicos está relacionado às áreas susceptíveis a desertificação. A agricultura de corte e queima, o uso da vegetação nativa para lenha e para alimentação animal na pecuária extensiva são práticas recorrentes, que pela vulnerabilidade econômica associada a intensa sazonalidade da precipitação e escassez de políticas públicas, pressiona-se ainda mais os recursos físico-biológicos desta região e limita a capacidade de prever cenários futuros para conservação da paisagem (MEIADO *et al.*, 2020).

Ademais, Santos *et al.* (2011) enfatizam que os esforços de pesquisas científicas para conservação da Caatinga são bem inferiores se comparados com as florestas tropicais úmidas. Esta negligência veio à tona publicamente na década de 1990, quando informações científicas

subsidiaram investimentos e políticas públicas voltadas para promover o desenvolvimento sustentável e selecionar áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade. Como consequência, Lessa *et al.* (2019), Meiado *et al.* (2020), Moro *et al.* (2015), Santos *et al.* (2011) e Velloso *et al.* (2002) apontam a Caatinga como o bioma menos conhecido e com menor índice de áreas protegidas no país, representadas por apenas 9% deste ecossistema, dos quais 73% encontram-se como Áreas de Proteção Ambiental (APAs), um dos grupos de UCs de Uso Sustentável; e apenas 2,4% referem-se à Proteção Integral.

Anda que as UCs cumpram seus objetivos de forma satisfatória, ainda há vários remanescentes com excelente grau de conservação que abrigam espécies raras, endêmicas ou ainda desconhecidas, sem o devido respaldo legal para garantir a proteção do alto índice de endemismo existente na Caatinga (MEIADO *et al.*, 2020). Dentre a biodiversidade conhecida, Santos *et al.* (2011) apontam mais de 1.000 espécies de plantas vasculares, 516 de aves, 240 de peixes, 187 de abelhas, 167 de répteis e 148 de mamíferos, em níveis de endemismo que variam entre 9% na avifauna a 56% na ictiofauna. Para Lessa *et al.* (2019), ainda há um déficit na representação dos principais táxons que compõem a biota da Caatinga, reflexo de um baixo esforço para levantamento de campo em virtude das difíceis condições de trabalho e limitação na produção do conhecimento, já que até o início do século XXI a maioria das universidades brasileiras concentravam as pesquisas na região sul e sudeste.

Ademais, a degradação ambiental que ameaça a biodiversidade da Caatinga também está associada a investimentos inadequados, em especial, a implementação de uma política pública que incentivou o plantio da espécie exótica *Prosopis juliflora* (algaroba). Santos e Diodato (2017) apontam que a introdução da espécie teve início na década de 1940 em Pernambuco e Rio Grande do Norte, com objetivo de aumentar a disponibilidade de recursos naturais utilizados para alimentação de animais e para reflorestamento de áreas desmatadas da Caatinga.

Entre as décadas de 1940 a 1960 houve um grande investimento governamental para produção, distribuição e plantio de espécies do gênero *Prosopis*, consideradas como a “salvação do Nordeste” por diversos atores sociais envolvidos, que destacavam o rápido desenvolvimento e produção de vagens mesmo no período de estiagem e a grande resistência à salinidade (SANTOS; DIODATO, 2017). Conforme Castro (1986), esta política de reflorestamento proporcionava uma linha de desenvolvimento agrícola para o Nordeste brasileiro embasada no Código Florestal da época (Lei nº 4.771/1965) e elaborada pelo então Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, atual Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Dentre os principais impactos na perspectiva socioeconômica, destaca-se a capitalização fundiária, cuja relação entre o valor médio do financiamento da área florestada e o preço médio da terra chegou a 10:1; e excluía os pequenos agricultores que não detinham a área mínima de 100 hectares exigida pelo Estado. O incentivo governamental se destacou na região do Cariri Paraibano e o plantio de algaroba totalizou 13.080 hectares restritos a grandes propriedades de produção pecuária (CASTRO, 1986).

Atualmente, sabe-se que a invasão de espécies introduzidas é uma das principais causas da perda da biodiversidade que, no caso da algaroba, ocorre no Nordeste brasileiro em aproximadamente um milhão de hectares (ANDRADE *et al.*, 2010). Conforme os autores, a dispersão das sementes é realizada principalmente pelos animais de pastoreio; e a espécie, bem adaptada ao semiárido e às condições de antropismo, interfere na resiliência dos ecossistemas, afeta a diversidade autóctone da Caatinga (tanto nos estratos adultos quanto nos regenerantes), promove o empobrecimento e a extinção local nas áreas invadidas.

Ainda que as políticas e instituições governamentais tenham contribuído para a degradação ambiental no passado, Faggin e Behagel (2018) analisam criticamente as estratégias atuais utilizadas na implementação de um manejo florestal sustentável dentro de um contexto socioecológico da Caatinga. Conforme os autores, as interações entre instituições formais e estatais com um conjunto pré-existente de instituições locais deveriam representar diferentes tipos de uso de recursos e o próprio sistema de recursos que moldam as práticas florestais.

Contudo, as instituições são representadas pelo governo federal e organizações internacionais, que buscam reduzir o desmatamento e a degradação florestal; e os atores locais são representados pelas indústrias e negócios locais, que visam garantir sua fonte de biomassa para o fornecimento energético. Para Faggin e Behagel (2018), a falta de participação dos diferentes grupos de atores locais para o desenvolvimento do manejo florestal sustentável é reflexo dos muitos obstáculos burocráticos, do uso predominante da biomassa para o fornecimento energético e da deficiência na integração entre legislação e valores culturais. Esta realidade promove a rejeição dos processos de bricolagem⁷ e ameaça os objetivos ambientais, sociais e econômicos da sustentabilidade.

De acordo com Lessa *et al.* (2019), para melhorar os incentivos políticos e demais medidas de conservação é preciso entender as fragilidades no conhecimento científico e ampliar

⁷ A bricolagem é adotada por praticantes florestais que reformulam e integram novas políticas institucionais ao contexto socioecológico específico e visa melhorar a realidade local.

a representatividade das pesquisas na Caatinga. Trabalhos acadêmicos, ainda que iniciais, desencadeiam estudos complementares essenciais para planejamento conservacionista; e a própria presença de pesquisadores em uma área pode ter efeito de salvaguarda, promover o desenvolvimento de incentivos políticos ou ampliar novas pesquisas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

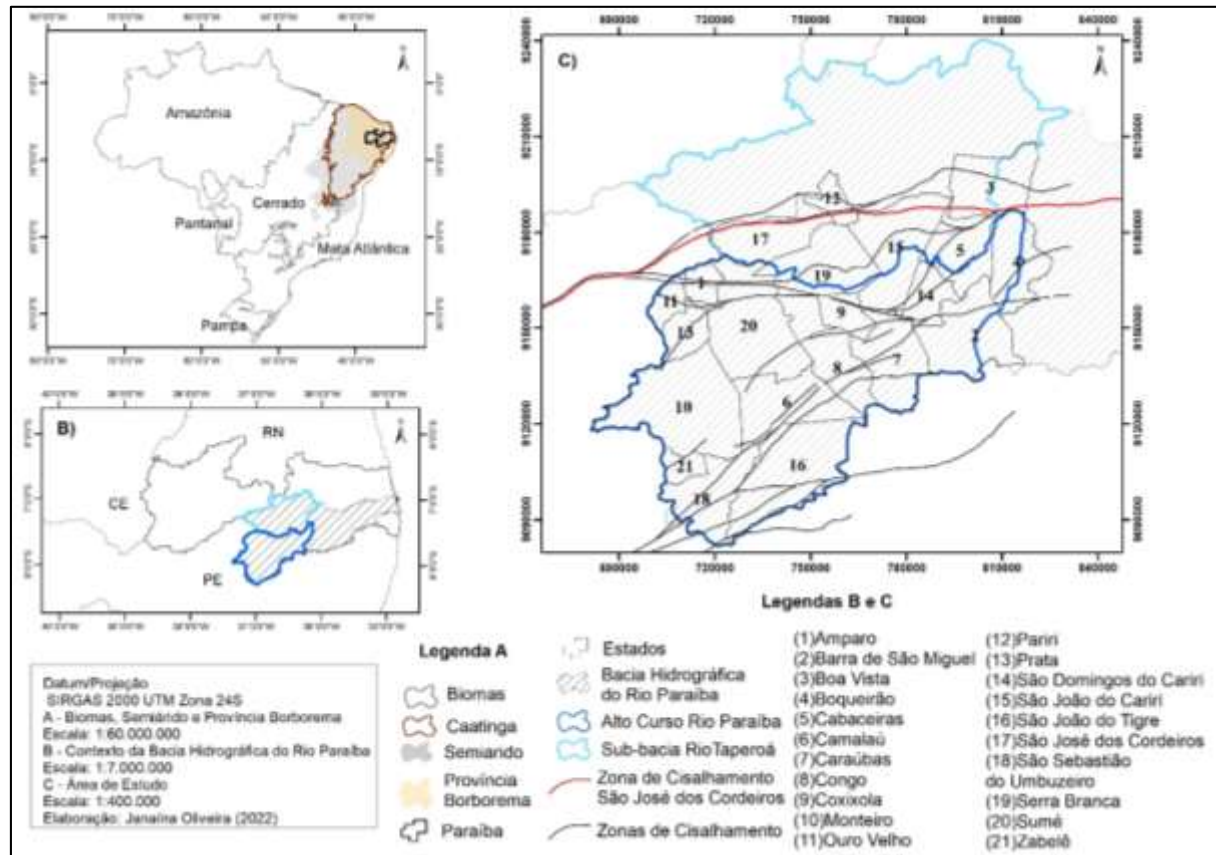
Esta seção caracteriza a área de estudo nos aspectos abióticos, da cobertura vegetal e da organização do espaço geográfico. Em seguida, apresenta os principais procedimentos metodológicos utilizados para a elaboração e validação do mapa de uso e cobertura da terra; para análise na perspectiva geográfica da Ecologia da Paisagens, com uso das métricas aplicadas no modelo mancha-corredor-matriz; e para a elaboração das demais bases temáticas utilizadas para elucidar as perguntas norteadoras e verificar as hipóteses formuladas na presente pesquisa.

3.1 Caracterização da Área de Estudo

A Província Borborema abrange totalmente o Estado da Paraíba e está inserida em dois principais biomas: a Caatinga, predominante; e a Mata Atlântica, nos enclaves florestais interioranos, que formam os Brejos de Altitude. Neste território, a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba é considerada uma das mais importantes do semiárido brasileiro pela significativa densidade demográfica e importância no abastecimento público. Com 20.071,83km², esta extensa bacia inicia na região do Cariri e termina no litoral do Estado, sendo composta pela sub-bacia do Rio Taperoá e pelas regiões denominadas de Alto, Médio e Baixo Curso do Rio Paraíba; responsáveis por drenar, total ou parcialmente, 85 municípios que abrigam mais da metade da população paraibana (AESAs, 2022; LIMA *et al.*, 2019).

Para incluir importantes maciços residuais e corpos plutônicos da região, como lajedos da Salambaia, Bravo e Pai Matheus, a delimitação da área de estudo considerou processos geodinâmicos e o sistema anastomosado de lineamentos regionais existentes no Alto Curso do Rio Paraíba e parte da sub-bacia do Rio Taperoá. Assim, a Zona de Cisalhamento São José dos Cordeiros (direção E-W) se destaca ao sul da sub-bacia do Rio Taperoá, sendo este “recorte” adequado à divisão política-administrativa dos municípios de Boa Vista, São João do Cariri, Pariri e São José dos Cordeiros. Como forma de padronizar a extensão territorial, optou-se por “expandir” os limites do Alto Curso do Rio Paraíba para incluir a totalidade dos municípios de Boqueirão e Barra de São Miguel. A Figura 3.1 contextualiza a área de estudo adotada nesta pesquisa, que totaliza 21 municípios na região do Cariri Paraibano.

Figura 3.1 - Área de Estudo contextualizada conforme biomas brasileiros, limite do semiárido, da Província Borborema, Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba e divisão política.



Fonte: AESA, SUDENE, TerraBrasilis e CPRM, modificado.

Como já exposto, as estruturas geológicas regionais condicionam os componentes do sistema geomorfológico, sendo o Planalto da Borborema considerado por Correa et al (2010) a principal unidade de relevo do setor oriental do Nordeste Brasileiro. Das oito morfoestruturas mapeadas e classificadas pelos autores, a área de estudo está inserida na Depressão Intraplanáltica Paraibana, porção central da Borborema Paraibana, delimitada a leste e a oeste pelos compartimentos de encostas; e ao sul pelos Maciços Remobilizados do Domínio da Zona Transversal. Nesta morfoestrutura, as feições bastante planas foram desenvolvidas pela ausência de perturbação tectônica intensa e, devido à condição climática, os gnaisses e migmatitos estão expostos diretamente à superfície, sem o desenvolvimento de regolitos; enquanto os maciços são correspondem às intrusões graníticas com relevos elevados (CORREA et al., 2010).

Rodrigues e Lima (2020) mapearam os diferentes tipos de unidades de relevo no Alto Curso do Rio Paraíba, conforme taxonomia dos fatos geomorfológicos. Assim, além do Planalto

da Borborema (1º táxon), os maciços remobilizados da Zona Transversal e a Depressão Intraplanáltica Paraibana (2º táxon), os autores também representaram como 3º táxon os maciços elevados e menos elevados, a superfície aplainada e as planícies fluviais; e o 4º táxon, constituído pelas planícies fluviais da bacia do alto curso do rio Paraíba, superfície aplainada dos Cariris Velhos, maciços elevados com topos ondulados formando brejos de altitude, maciços elevados com topos ondulados, maciços menos elevados com topos suavemente ondulados, *inselbergs*, cristas simétricas e assimétricas.

A barreira orográfica formada pelo Planalto da Borborema influencia fortemente o clima da área de estudo, do tipo semiárido quente BSh pela classificação de Köppen, que apresenta os menores índices de precipitação do Brasil, com média pluviométrica entre 400 a 800mm. Os municípios de Boa Vista, Cabaceiras, Barra de São Miguel, Caraúbas, São Domingos do Cariri e São João do Cariri situam-se na região mais seca; e, na porção com maiores índices de precipitações registradas, encontram-se os municípios de Sumé, Prata, Ouro Velho e São José dos Cordeiros (AESAs, 2019). Apesar de Cabaceiras ter o menor índice pluviométrico de todo o Nordeste, Ab'Sáber (2011) destaca que sua localização, inserida em áreas de sertões rebaixados do Planalto da Borborema, permite receber chuvas no inverno e no verão, vindas do leste e oeste-noroeste, respectivamente.

Porém, a média das precipitações anuais de qualquer localidade desta região serve apenas como referência de dados climáticos, já que a sequência de chuvas é altamente irregular ao longo dos anos (AB'SÁBER, 2011). De acordo com Almeida e Medeiros (2017), a variabilidade interanual de chuvas no semiárido nordestino é decorrente de vários fatores climáticos. Dentre eles, os autores destacam os fenômenos oceânicos e atmosféricos do El Niño e La Niña, que nos anos de intensidades consideradas fortes, revelam tendência de chuva abaixo e acima do esperado (embora os extremos possam acontecer independentemente da presença dos mesmos).

Além da distribuição irregular no tempo e no espaço, Sena et al. (2012) apontam outras dificuldades existentes nos estudos pluviométricos regionais. Dentre elas, os autores destacam o custo elevado para instalação, manutenção e obtenção de dados das estações meteorológicas; a necessidade de se registrar dados ininterruptos de pelo menos 30 anos para que sejam considerados representativos; e o uso de média aritmética dos valores obtidos em estações vizinhas para preencher falhas na obtenção de dados.

A variabilidade pluvial e compartimentos geomorfológicos influenciam o sistema de drenagem, caracterizado por vários corpos d'água efêmeros e principais rios e afluentes em regime intermitente. Para Ab'Sáber (2011), uma das maiores originalidades dos sistemas

hidrográficos e hidrológicos nesse ambiente é que, diferentemente de outras regiões semiáridas, todos os rios do Nordeste chegam ao Oceano Atlântico em algum tempo do ano, pelas mais diversas trajetórias. Em termos de gestão de recursos hídricos, Seabra et al. (2014) destacam o Rio Paraíba como o mais importante do Estado devido sua posição estratégica. Suas águas, juntamente com o Rio Taperoá, principal afluente, contribuem para o Açude Epitácio Pessoa⁸, uma relevante fonte de abastecimento de aproximadamente 700.000 habitantes da região de Campina Grande.

Mas, em consequência de uma longa estiagem entre os anos de 2010 a 2018, houve um colapso no sistema de abastecimento público desta segunda região mais populosa do Estado. A crise por falta de água vivenciada pela população foi amenizada após a integração das águas advindas do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional – polêmica obra de transposição que pode ser vista tanto como alternativa de oferta e segurança hídrica a partir da regularização dos volumes dos açudes; quanto uma ameaça à conservação da Caatinga, com possível consolidação do agrohidronegócio (LIMA et al., 2019).

Ainda conforme Lima et al. (2019), o controle estrutural e/ou a influência da drenagem podem ser pensados como importantes fatores de conexão entre áreas de vegetação no Alto Curso Paraíba e no Taperoá, mesmo com o elevado nível de perturbação antrópica da região. De acordo com Souza et al. (2015), a Caatinga é o terceiro bioma mais degradado do Brasil e grandes extensões em processo de desertificação estão localizadas no Cariri Paraibano. Os autores lembram que com a desertificação há significativa perda da cobertura vegetal e aumento dos processos erosivos do solo, que passam a ter as propriedades físicas, químicas, biológicas e econômicas fortemente alteradas.

Mesmo com o SNUC estabelecido em 2000 como tentativa de ordenar a exploração sustentável e preservar ambientes com características naturais relevantes, poucas Unidades de Conservação foram criadas na região de estudo desde então. Há apenas duas Áreas de Proteção Ambiental (APA das Onças e APA do Cariri) e duas Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN Fazenda Almas e RPPN Fazenda Santa Clara), todas pertencentes ao grupo de Uso Sustentável, que totalizam 60.159 hectares (6,53% da área de estudo).

As APAs são geralmente extensas, compostas por terrenos públicos e privados, cujo objetivo é disciplinar o processo de ocupação humana, assegurar o uso sustentável dos recursos

⁸ Popularmente conhecido como Açude Boqueirão, por estar localizado em município homônimo. O açude, criado pelo Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOCS) na década de 1950 para consumo humano, irrigação, dessedentação de animais e lazer da população do entorno, possui capacidade de armazenamento superior a 450.000.000m³ (AESAs, 2022).

naturais e proporcionar qualidade de vida e bem-estar das populações (BRASIL, 2000). A APA das Onças é a maior UC na região de estudo, localizada no município de São João do Tigre; já a APA do Cariri abrange parcialmente os municípios de São João do Cariri, Boa Vista e Cabaceiras, região com atrativos turísticos pelos lajedos e importante economicamente pela exploração mineral de bentonita.

As RPPNs são áreas privadas, gravadas com perpetuidade, para conservar a diversidade biológica. A RPPN Fazenda Almas foi instituída pela Portaria IBAMA nº 1.343/90 e situa-se no município de São José dos Cordeiros, limítrofe à Sumé. Também criada na década de 1990, a RPPN Fazenda Santa Clara é menor UC encontrada na área de estudo, mas se destaca pela ausência do plano de manejo ou de estudos científicos em seu território. Por não apresentar um limite oficial, sua área foi mensurada pelo Instituto Chico Mendes da Biodiversidade (ICMBio) através das coordenadas inseridas no Sistema Informatizado de Monitoria de RPPN.

Cabe destacar que o SNUC não engloba todas as áreas protegidas pela legislação brasileira. O Código Florestal, instituído pela Lei nº 12.651/2012, prevê a proteção legal de outros ambientes, como as Reservas Legais (RLs) e as Áreas de Preservação Permanentes (APPs). Na Caatinga, as Reservas Legais equivalem a 20% de propriedades ou posses rurais, que devem estar isentos de desmatamento e destinados à conservação da biodiversidade, ao uso sustentável dos recursos naturais ou reabilitação de processos ecológicos. Os imóveis rurais são registrados e compõe um banco de dados para controle, monitoramento e planejamento ambiental e econômico, com todas as informações disponíveis no Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SiCAR)⁹. A área de estudo possui 11.042 Reservas Legais, das quais: 33 são averbadas, três vinculadas à compensação de outro imóvel e 11 são aprovadas e não averbadas; e 11.090 propostas, que equivalem a 99% das Reservas Legais.

As APPs podem estar localizadas em áreas urbanas ou rurais, cobertas ou não por vegetação nativa, mas com a *“função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas”*. A delimitação das APPs ocorre por critérios específicos, a exemplo dos topos de montes, morros, montanhas e serras com altura superior a 100m e inclinação média maior que 25°; e faixas marginais com larguras mínimas

⁹ De acordo com a Câmara Legislativa, o prazo para os proprietários de imóveis rurais fazerem o Cadastro Ambiental Rural foi ampliado para dezembro de 2024, após alteração e aprovação do texto do Projeto de Lei nº 36/2021, que segue em tramitação para análise das comissões de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, de Constituição e Justiça e de Cidadania. Vale destacar que o CAR proporciona benefícios do Programa de Regularização Ambiental (PRA), que concede diversos benefícios aos proprietários que desenvolvem ações de regularização, recuperação ou compensação de APPs, reserva legal e de uso restrito dentro da propriedade.

variáveis conforme a borda da calha do leito regular de cursos d'água perenes ou intermitentes. Na área de estudo, as drenagens efêmeras são predominantes e, por isso, as margens não são protegidas pela legislação. Desta forma, considerou-se apenas os rios Taperoá e Paraíba, com largura média de 50m, para delimitar a APP conforme o Código Florestal.

Embora a APP considere aspectos abióticos para a preservação, Dias e Ferreira (2018) destacam que a geoconservação no Brasil ainda é tratada de forma secundária. Conforme os autores, a geodiversidade é constituída por processos ativos geradores de paisagens, como rochas, fósseis e minerais, cujos registros auxiliam o entendimento da história evolutiva da Terra. O SNUC é então considerado a principal ferramenta legal de proteção, uma vez que UCs geralmente incluem, direta ou indiretamente, a preservação do patrimônio geológico.

Neste sentido, ainda que não tenha caráter legal, destaca-se a existência de Geoparques, reconhecidos pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) como extensas áreas destinadas à geoconservação, educação e ensino, desenvolvimento sustentável, geração de novas fontes de renda para população local e atração de capital privado. No Brasil, a CPRM é responsável por identificar geossítios e sítios da diversidade. Os Geossítios são determinados conforme representatividade, integridade, raridade e conhecimento científico de relevância nacional e internacional; enquanto os Sítios da Geodiversidade, mesmo sem apresentar significativo valor científico, possuem potencial uso educativo e turístico.

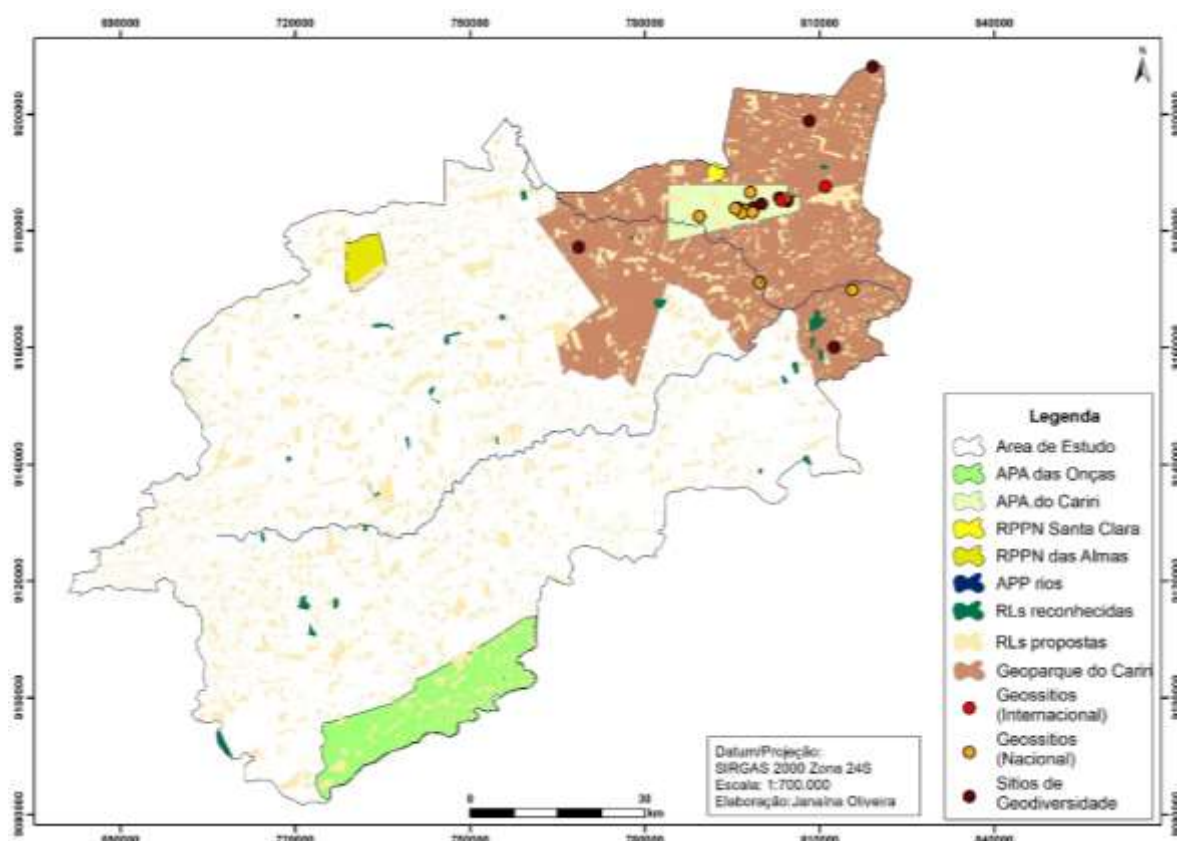
Conforme Projeto de Criação do Geoparque do Cariri Paraibano elaborada pela CPRM¹⁰ (2018), que tem 200.200ha (21% da região de estudo), há nove Sítios da Geodiversidade (Zona de Cisalhamento do Meio do Mundo, Mármore Santa Rosa, Mistura de Magmas, Lajedo do Marinho, Lajedo Salambaia, Pedra Oca, Lajedo Manoel de Souza, Pedra do Cálice, Dique granítico Sítio Picoito); nove Geossítios de relevância nacional (Lagoa da Cunha, Lajedo do Bravo, Metanortosito de Boqueirão, Pedra do Letreiro, Tanques com Enclaves de Diorito, Brecha Magmática, Sacas de Lã, Lajedo do Pai Mateus, Cânion do Rio Soledade); e dois Geossítios de relevância internacional (Lavas Almofadadas da Bacia de Boa Vista e Muralha do Cariri).

A Figura 3.2 apresenta as protegidas por legislação específica, como o caso das APAs, RPPNs, APPs e Reservas Legais aprovadas, sendo também identificadas de forma diferenciada as reservas propostas, pois entende-se que devido à ausência da aprovação e/ou reconhecimento governamental, são passíveis de alterações ou mesmo extinção. Também foram representadas

¹⁰ Documento disponível pelo link <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/20244>, compartilhado por Rogério Valença Ferreira (CPRM) após contato via e-mail realizado em 25 de março de 2020.

as áreas relevantes para a geoconservação, com delimitação do Geoparque proposto, sítios da geodiversidade e geossítios diferenciadas conforme nível de interesse (internacional, nacional e regional/local).

Figura 3.2 – Áreas protegidas na região de estudo.



Fonte: SUDEMA, ICMBio, SiCAR, RPPN Almas¹¹ e CPRM.

Mesmo com proteção legal ou reconhecimento pela relevância ímpar, os ambientes naturais permanecem ameaçados pela crescente pressão antrópica e fragilidades na gestão e planejamento integrados. Bállen, Souza e Lima (2016) apontam que sem o devido ordenamento, a APA do Cariri – UC que também se destaca pela geodiversidade – torna-se vulnerável perante os impactos oriundos das atividades antrópicas existentes no local.

Sob outra perspectiva, cabe lembrar que a população no semiárido já é fortemente afetada pelos longos períodos de estiagens, secas e enchentes (SENA; MORAES NETO; LUCENA, 2017). Assim, se de um lado as UCs são impactadas pelas atividades humanas, de outro elas podem gerar conflitos territoriais com a população local, que passa a identificar novas restrições de uso nestes ambientes.

¹¹ Os limites da RPPN foram disponibilizados pelo gestor da UC para a UFPB.

De acordo com Graboys, Marques e Silva (1991), a organização do espaço no Cariri é marcada pelo uso da Caatinga, cuja paisagem é caracterizada por vales e interflúvios. Os interflúvios, geralmente recobertos por vegetação, são vistos pela população como grandes espaços vazios e, por isso, passam a ser utilizados para pastoreio, retirada de lenha, carvão e madeira. Já os vales, mais úmidos e com solos propícios para o desenvolvimento de atividades agrícolas, são as áreas com maior concentração da população.

Em uma perspectiva história, Lima e Artigas (2013) apresentam o processo de ocupação na Bacia do Rio Paraíba desde o século XVII. De forma resumida, o início da ocupação colonial foi motivado pela exploração de terras para pecuária bovina, que resultou no extermínio dos povos indígenas durante a consolidação de fazendas para uso extensivo. No entanto, a forte queda da pecuária na segunda metade do século XVIII motivou o início da produção de algodão, cujo auge de exportação foi estimulado pela indústria têxtil inglesa.

O fim do ciclo do algodão ocorreu apenas na década de 1980, motivado também pela intensa escassez hídrica e pelo bicudo-do-algodoeiro, considerado “praga-chave” do cultivo na região. As secas vivenciadas no século XX trouxeram, então, uma nova organização territorial da bacia do Alto Paraíba, que passou a se concentrar na pecuária caprina e em outros tipos de uso intensivo da terra (LIMA; ARTIGAS, 2013).

Conforme Castro (1986), a retirada da cobertura vegetal para o pastoreio passou a representar uma ameaça para a renda e lucro de grandes propriedades no Cariri. Neste sentido, o plantio de *Prosopis juliflora* (Sw) D.C.) – popularmente conhecida como algaroba – pode ser considerada uma ação bem-sucedida de introdução de espécie na região semiárida brasileira; ainda que haja vários aspectos negativos relacionados a ela (SANTOS; DIODATO, 2017).

Os autores apresentam disseminação da algaroba no Nordeste em três fases. A primeira teve início na década 1940, quando houve um forte investimento governamental para plantio da espécie, pela fácil adaptação ao semiárido e alta capacidade forrageira durante às secas. A segunda fase, entre 1961 a 1965, foi marcada pela criação de um significativo programa governamental promovido pelo Ministério da Agricultura. No entanto, a ausência de continuidade das ações praticamente extinguiu o programa no Nordeste, exceto na Paraíba, que permaneceu com as atividades intensificadas no Cariri.

A terceira e última fase ocorreu após 1966, iniciada com investimentos de pesquisas para melhoramento e implantação massiva da algaroba (*Prosopis juliflora*), com diversos programas para crédito e assistência técnica aos produtores rurais, impulsionados pela intensa seca na década de 1970. Na década de 1980, a Superintendência do Desenvolvimento Econômico do Nordeste (SUDENE) e o então Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal

– hoje IBAMA – implementaram uma política de incentivos financeiros para o reflorestamento da algaroba por todo o Nordeste (CASTRO, 1986; SANTOS; DIODATO, 2017).

Na época, Castro (1986) analisou a política adotada em um contexto socioeconômico, que demonstrava a capitalização fundiária e exclusão dos pequenos agricultores. Ambientalmente, a principal consequência deste estímulo governamental foi a invasão da espécie exótica por todo o Nordeste. De acordo com Andrade, Fabricante e Oliveira (2010), estima-se que a área invadida pela algaroba atinja um milhão de hectares devido à alta capacidade de dispersão das sementes, também realizadas por animais de pastoreio. Para os autores, pouco se conhece sobre a resiliência dos ecossistemas atingidos e o controle da espécie, que geralmente utiliza métodos onerosos e nem sempre eficientes.

Assim, o uso da terra e a redução da cobertura vegetal da Caatinga no Cariri contribuem para o aumento do processo de desertificação. Conforme Souza, Artigas e Lima (2015), devido à ausência ou rarefação da cobertura vegetal por períodos prolongados, o Cariri Paraibano apresenta altos níveis de desertificação; ainda que em contraposição à potencialidade do Estado em representar a riqueza florística das caatingas pela predominância do clima semiárido e de terrenos do complexo cristalino.

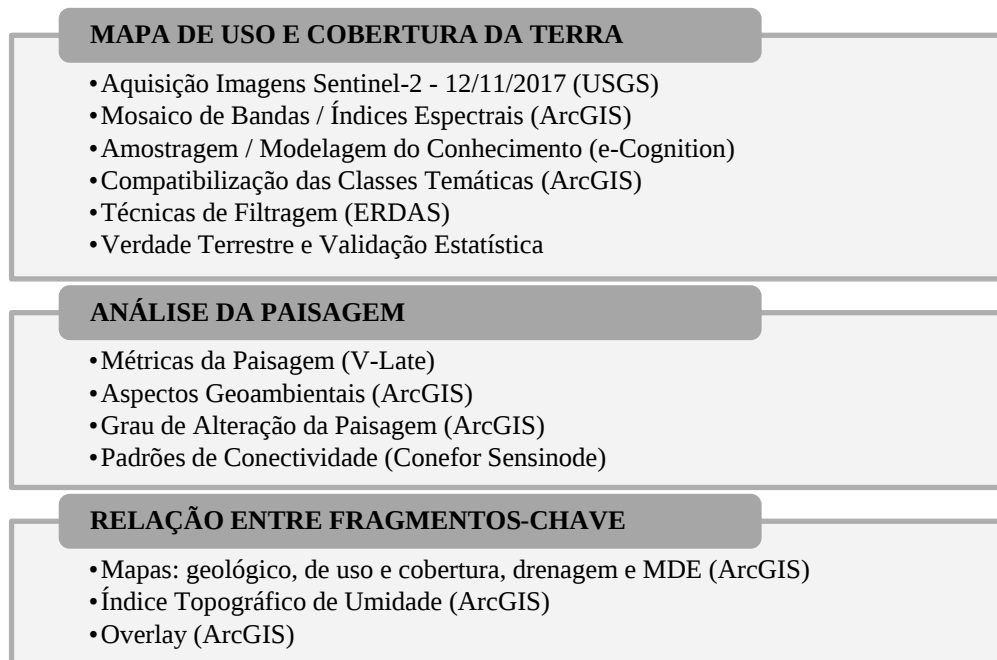
3.2 Procedimentos Metodológicos

A pesquisa foi estruturada em três etapas distintas, porém complementares. A primeira refere-se à elaboração do mapa temático de uso e cobertura da terra na região do Cariri Paraibano a partir da análise de imagens baseada em objetos geográficos (*Geographic Object-Based Image Analysis* – GEOBIA) e visitas de campo. Após validação estatística do mapa gerado, a análise da paisagem se baseou na forma de ocupação do território, com ênfase na existência de remanescentes de vegetação, para aplicação de métricas da paisagem. Dessa forma, as classes temáticas do mapa foram mensuradas, possibilitando subsidiar os modelos de conectividade estrutural da Caatinga na área de estudo, sob a ótica geográfica da Ecologia de Paisagens. Por fim, a modelagem foi analisada e relacionada com aspectos geoambientais, como diretrizes estruturais para formação de corredores ecológicos na região do Cariri Paraibano.

Os procedimentos metodológicos adotados foram embasados nos preceitos da Ecologia de Paisagens, como descritos por Pivello e Metzger (2007): a partir do mapa temático, houve a análise dos padrões espaciais sem considerar a variação temporal para descrever a paisagem. Para embasar a tese foram adotadas duas abordagens metodológicas: a observacional-

experimental, delineada por uma hipótese prévia sem a manipulação de parâmetros; e de modelagem, com uso de métricas da paisagem e análises estatísticas. A Figura 3.3 apresenta os principais procedimentos metodológicos e técnicas previstos para a execução do trabalho.

Figura 3.3 - Principais procedimentos metodológicos e técnicas utilizados.



Fonte: elaboração própria (2022).

3.2.1 *Mapa de Uso e Cobertura da Terra*

O mapa de uso e cobertura da terra pode ser considerado o alicerce do trabalho, pois ele fornece as bases necessárias para a análise da paisagem. Para elaborá-lo, foi realizada revisão bibliográfica sobre a classificação mais adequada para os ambientes dinâmicos das Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS); e foram realizados trabalhos de campo, tanto para reconhecimento regional quanto para comparar a exatidão do mapa com a verdade terrestre. O mapeamento foi realizado em parceria com o Laboratório de Dinâmicas Ambientais e Geoprocessamento da Faculdade de Formação de Professores da Universidade do Estado do Rio de Janeiro e o Laboratório Espaço de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio de Janeiro, sendo utilizados os *softwares* ArcGIS®, Definiens e-Cognition® e ERDAS Imagine®.

A complexidade em mapear a cobertura da terra de FTSS por técnicas de sensoriamento remoto orbital é destacada por Silva e Cruz (2018). De acordo com os autores, a sazonalidade

da disponibilidade hídrica e a rápida variação da resposta espectral da vegetação podem subestimar ou superestimar a Caatinga. Isso porque, no período seco, a ausência de folhas pode ser confundida com a resposta espectral de solo exposto ou de afloramentos rochosos. Já no período úmido, Francisco *et al.* (2015) ressaltam que o manto graminiforme e herbáceo, composto por espécies colonizadoras mais jovens, podem atingir valores espectrais tão altos quanto os encontrados em áreas de vegetação densa com espécimes de porte arbóreo.

Mesmo com o avanço do processamento digital de imagens orbitais nas últimas décadas, as especificidades da Caatinga proporcionam dificuldades técnicas de classificação. A metodologia orientada em objetos geográficos (GEOBIA) permite sistematizar e reproduzir o conhecimento do especialista através de critérios booleanos e/ou de modelagem matemática *fuzzy*. Com maior grau de intervenção do intérprete, essa classificação supervisionada utiliza parâmetros caracterizadores de objetos como descritores capazes de integrar dados de múltiplas fontes, escalas e variáveis, como cor, textura, localização, contexto e relação semântica entre classes ou objetos. Assim, o GEOBIA torna-se um facilitador na distinção de alvos espectralmente difíceis de serem individualizados (SANTOS *et al.*, 2018; SILVA; CRUZ, 2018; LIMA *et al.*, 2019).

Ao definir a metodologia de classificação, a etapa seguinte foi a escolha do ano a ser trabalhado, sendo adotado como critério o comportamento temporal da precipitação pluviométrica, considerando os fenômenos El Niño e La Niña. A ocorrência do El Niño Oscilação Sul é registrada pela diferença entre a temperatura observada das águas superficiais do Pacífico e a temperatura média da série: se a desigualdade for maior que 0,5°C considera-se que houve a interferência do El Niño; se for menor que -0,5°C, da La Niña; e entre esses valores, prevalece a neutralidade (ALMEIDA; MEDEIROS, 2017). Tais informações estão disponíveis no *website Climate Prediction Center* (CPC, 2019), adotados em estudos na região do Cariri Paraibano por Sena *et al.* (2012) e Sena, Moraes Neto e Lucena (2017).

A partir da análise dos dados brutos do CPC, considerou-se 2017 como o ano neutro mais próximo da atualidade, após uma série de registros intensos de El Niño em 2015 e 2016, anos que integraram um longo período de estiagem vivenciada e relatada pela população na região de estudo. Para complementar a escolha, os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018) indicaram a neutralidade pluviométrica de 2017, com precipitação média anual de 607mm amostrada na Estação Meteorológica Convencional de Monteiro.

Como forma de complementar a avaliação da precipitação máxima em toda a área de estudo para o ano em questão, utilizou-se também os dados registrados pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA, 2019), a saber: Ouro Velho (653,20mm),

Amparo (619,80mm), Monteiro (585,80mm), Prata (510,40mm), Zabelê (475mm) Sumé (359,20mm), São Sebastião do Umbuzeiro (273,90mm), Congo (273,30mm), Camalaú (189,80mm), Barra de São Miguel (183,40mm), Coxixola (181,80mm), Boqueirão (175,70mm), São José dos Cordeiros (163,10mm), São Domingos do Cariri (153,70mm), Caraúbas (153,10mm), Boa Vista (150,60mm), Serra Branca (121,60mm), Cabaceiras (104,70mm), São João do Cariri (88,60mm), Pariri (73,90mm) e São João do Tigre (6mm¹²).

A etapa seguinte foi escolher o satélite e as respectivas imagens para a elaboração do mapa temático de uso e cobertura da terra. Silveira et al. (2018) destacam que a maioria dos estudos que envolvem o mapeamento da Caatinga se concentra em dados obtidos pela série histórica do satélite Landsat. Contudo, as recentes imagens do sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) do Sentinel-2 disponibilizam melhor resolução espacial e espectral, que pela combinação de quatro bandas da borda do vermelho (*Red Edge*), potencializam seu uso na identificação e monitoramento da vegetação e possíveis associações com o solo (LIMA et al., 2019; SILVEIRA et al., 2018).

De acordo com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* – USGS, 2019), o satélite Sentinel-2 fornece imagens compostas por 13 bandas descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resolução Radiométrica e Espacial do Sentinel-2.

BANDA	COMPRIMENTO DE ONDA CENTRAL (nm)	LARGURA DE BANDA (nm)	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m)
B1 (aerossóis)	443	20	60
B2 (azul)	490	65	10
B3 (verde)	560	35	10
B4 (vermelho)	665	30	10
B5 (Red-Edge)	705	15	20
B6 (Red-Edge)	740	15	20
B7 (Red-Edge)	783	20	20
B8 (NIR)	842	115	10
B8a (Red-Edge)	865	20	20
B9 (vapor d'água)	945	20	60
B10 (cirros)	1375	30	60
B11 (SWIR)	1610	90	20
B12 (SWIR)	2190	180	20
TCI*	RGB	Composite	10

Fonte: USGS (2019).

¹² Sem registro oficial, de acordo com AESA.

As bandas B2 (azul), B3 (verde), B4 (vermelho) e B8 (infravermelho próximo) possuem resolução espacial de 10m. Com resolução de 20m, as bandas B5, B6, B7 e B8a (borda do vermelho) são estreitas, usadas para caracterização da vegetação, e as bandas B11 e B12 (SWIR) são aplicadas para detecção de neve, gelo, nuvem ou avaliação do estresse de umidade na vegetação. Por fim, as bandas B1 (aerossóis), B9 (vapor d'água) e B10 (detecção de cirros), com resolução de 60m, são utilizadas principalmente para triagem de nuvens e correções atmosféricas (USGS, 2019).

Para abranger a região de estudo foram selecionadas nove cenas das imagens Sentinel-2, disponíveis gratuitamente no site do USGS: T24MXT, T24MYT, T24MZT, T24MXS, T24MYS, T24MZS, T24LXR, T24LYR e T24LZR. A seleção se baseou nos critérios de melhor visibilidade da área pela ausência de nuvens e geração das imagens na mesma data de coleta, nesse caso, em 12/11/2017.

Ainda que novembro represente o período seco na Caatinga, foram utilizados dados pluviométricos mensais dos 21 municípios que compõem a área de estudo para identificar possível irregularidade de eventos significativos de chuva. De acordo com a AESA (2019), em novembro de 2017 apenas os municípios Monteiro e São Sebastião do Umbuzeiro registraram precipitação observada, com 8,9 mm e 5,9 mm, respectivamente.

As imagens disponibilizadas pela USGS já possuem correção atmosférica, dispensando essa etapa de pré-processamento. Assim, com o uso do ArcGIS, houve a construção dos mosaicos das cenas por cada banda separadamente, sendo desconsideradas as bandas B1 e B9; e aplicados oito índices espectrais de vegetação e de água (Tabela 3.2). Os resultados gerados foram salvos como imagens na extensão ‘tif’ para serem trabalhados na classificação GEOBIA.

Tabela 3.2 – Índices Espectrais de Vegetação e Água.

Índice	Fórmula		Referências
NDVI	$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$	Onde: NIR = B8; Red = B4	Rouse <i>et al.</i> (1973)
RE-NDVI	$\frac{(NIR - Red\ Edge)}{(NIR + Red\ Edge)}$	Onde: NIR = B8; Red Edge = B6	Gitelson e Merzlyak, (1994)
GNDVI	$\frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$	Onde: NIR = B8; Green = B3	Gitelson <i>et al.</i> (1996)
SAVI	$\left(\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} + L \right) * (1 + L)$	Onde: NIR = B8; Red = B4; L = 0,5	Huete (1988)
SAVI2		Onde: NIR = B8; Red = B4; L = 0,3	Huete (1988)
NDWI	$\frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$	Onde: NIR = B8; SWIR = B11	Gao (1996)

NDWI2	$\frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)}$	Onde: Green = B3; NIR = B8	McFeeters (1996)
MNDWI	$\frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)}$	Onde: Green = B3; SWIR = B11	Xu (2005)

Fonte: elaboração própria (2019).

De acordo com Silveira et al. (2018), a reflectância das bandas MSI e os índices de vegetação favorecem o mapeamento da Caatinga, já que os intervalos espectrais das bandas do vermelho, *Red-Edge* e *SWIR* são sensíveis às variações de clorofila e vegetação não fotossintética. No mapeamento da Caatinga, os índices NDVI e SAVI podem ser considerados triviais, conforme descritos nos trabalhos de Ballén, Souza e Lima (2015); Francisco et al. (2015); Silveira et al. (2018) e Lima et al. (2019).

De acordo com as referências da Tabela 3.2, o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) estima a atividade fotossintética, como produtividade da vegetação ou biomassa, por medições das quantidades relativas de radiação eletromagnética. Similar ao NDVI, o Índice de Vegetação da Diferença de Verde Normalizado (*Green Normalized Difference Vegetation Index* – GNDVI) torna-se mais sensível à concentração de clorofila, pois substitui o espectro vermelho pelo verde. O Reajuste Normalizado da Diferença de Vegetação (*Readjustment Normalized Difference Vegetation Index* – RE-NDVI) identifica diferentes respostas da vegetação a alterações de pigmentos causadas por fatores ambientais como, por exemplo, as condições climáticas e tolerância à seca.

Também como um ajuste ao NDVI, o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI) considera os efeitos de brilho do solo expostos na imagem analisada a partir de uma constante L, fator utilizado para agrupar maior ou menor densidade de vegetação, que varia entre 0,1 e 1,0. De acordo com Huete (1988), aplica-se L=0,5 para vegetação com densidade intermediária e, na tentativa de identificar uma vegetação mais densa da Caatinga, também foi adotado o valor de L=0,3

Os Índices de Água de Diferença Normalizada 1 e 2 (*Normalized Difference Water Index* – NDWI e NDWI2) respondem, respectivamente, à presença de umidade na vegetação (sobretudo dosséis) e na superfície (feições hídricas do terreno). Por fim, o Índice de Água de Diferença Normalizada Modificada (*Modified Normalized Difference Water Index* – MNDWI) delimita com mais precisão as informações espectrais da água, removendo os ruídos causados pelo acúmulo da terra, solo e vegetação.

Com os mosaicos das bandas e os índices espectrais acima, iniciou-se o processamento digital das imagens a partir do *software* Definiens e-Cognition. Há diversos métodos e técnicas de classificação, que de acordo com o grau de interação do intérprete durante o processo, é caracterizada como supervisionada ou não supervisionada. A classificação GEOBIA tem apresentado melhores resultados de desempenho em mapeamentos temáticos de uso e cobertura da terra, pois permite sistematizar e reproduzir o conhecimento do especialista através de critérios booleanos e/ou modelagem matemática *fuzzy*. Esses critérios auxiliam a minimizar as dificuldades técnicas de ambientes dinâmicos como as FTSS e a identificar seus alvos espectralmente difíceis de serem individualizados (SANTOS; COSTA; LOURENÇO, 2018; SILVA; CRUZ, 2018; LIMA et al., 2019).

Tais características apresentadas justificam a escolha desse método no presente trabalho. Assim, o mosaico das bandas e os índices espectrais foram gerados no ArcGIS e salvos na extensão '.tif'. Já no Definiens e-Cognition, delimitou-se um quadrante maior que a área de estudo (coordenadas mínimas e máximas de x= 673778 e 832860; e y= 9076585 e 9216154) para reduzir o tamanho das imagens. Em seguida, foi realizada a segmentação da imagem, que utilizou o algoritmo de multirresolução, parâmetro de similaridade 100, forma 0,1 e compacidade 0,5, considerando as médias e desvios padrões das imagens utilizadas com pesos equivalentes a 1.

Com as imagens segmentadas, os grupos de pixels são transformados em objetos, amostrados conforme classes temáticas pré-determinadas, que podem ser inseridas em níveis hierárquicos distintos. As sete classes temáticas, descritas a seguir, foram definidas após trabalhos de campo de reconhecimento regional para atender os objetivos da pesquisa.

- Corpo Hídrico: definido pelo acúmulo significativo de água na superfície, natural ou artificial, representado principalmente por açudes. Os rios e demais cursos d'água não são representados, por serem efêmeros ou intermitentes.

Figura 3.4 – Açude Epitácio Pessoa, popularmente conhecido como Açude Boqueirão (à esquerda); açude no município de Caraúbas (à direita).



Foto: Janaína Oliveira (2019).

- Afloramento Rochoso: exposição de rocha na superfície, geralmente encontrada na forma de lajedos e *inselbergs*.

Figura 3.5 – Afloramentos rochosos no município de Prata (à esquerda); e lajedo do Pai Mateus, no município de Cabaceiras (à direita).



Foto: Janaína Oliveira (2019).

- Ambiente Antrópico: representado pela ocupação urbana ou semiurbana e áreas com movimentação do solo causado por atividades antrópicas, sobretudo para extração mineral.

Figura 3.6 - Zona urbana do município de Boqueirão (à esquerda); extração de bentonita no município de Boa Vista (à direita).



Foto: Janaína Oliveira (2019).

- Mata Exótica: vegetação composta predominantemente por algaroba (*Prosopis juliflora*), embora eventualmente também possam estar incluídas espécies nativas.

Figura 3.7 - Algarobas formando “mata ciliar exótica” em trechos dos Rios Paraíba, município de São Domingos do Cariri (à esquerda) e Taperoá, município de Cabaceiras (à direita).



Foto: Janaína Oliveira (2018 e 2019).

- Caatinga Antropizada: definida pelo alto nível de degradação da Caatinga por extrativismo vegetal, áreas de cultivo e/ou pastoreio. Predomina a vegetação herbácea em meio a solo exposto, podendo ocorrer nanismo de espécies.

Figura 3.8 - Extrativismo vegetal em Boa Vista (à esquerda) e área de pastagem no município de Prata (à direita).



Foto: Janaína Oliveira (2019).

- Caatinga Rarefeita: caracterizada pela vegetação herbácea, arbustiva e/ou arbórea aberta, de modo a recobrir mais significativamente a superfície do solo do que observado na classe de Caatinga Antropizada.

Figura 3.9 - Vegetação com presença de bromeliáceas, cactáceas e representantes arbustivos e arbóreos de pequeno porte no município de São Sebastião do Umbuzeiro (à esquerda) e vegetação marcada pela caducifolia no município de Sumé (à direita).



Foto: Janaína Oliveira (2018 e 2019).

- Caatinga Densa: com superfície do solo totalmente recoberto e predominância da vegetação arbóreo-arbustiva mais adensada.

Figura 3.10 - Vegetação de caatinga densa caducifólia na APA das Onças, município de São João do Tigre (à esquerda) e espécimes arbóreos margeando o afloramento rochoso Pluton Bravo, no município de Cabaceiras (à direita).



Foto: Janaína Oliveira (2019).

A amostragem se baseou na interpretação das imagens compostas (RGB) pelas bandas 4-3-2 e 11-8-4, visualizadas simultaneamente na mesma tela (recurso *Slit Vertically Side by Side* do e-Cognition). Os elementos interpretativos utilizados nessa etapa são descritos por Florenzano (2002), sendo cor e tonalidade diferenciadas a partir da absorção ou reflectância de energia dos objetos; textura, que se refere aos aspectos lisos ou rugosos dos objetos; forma, identificada conforme regularidade dos objetos naturais ou antrópicos; e contexto, baseado na observação do entorno.

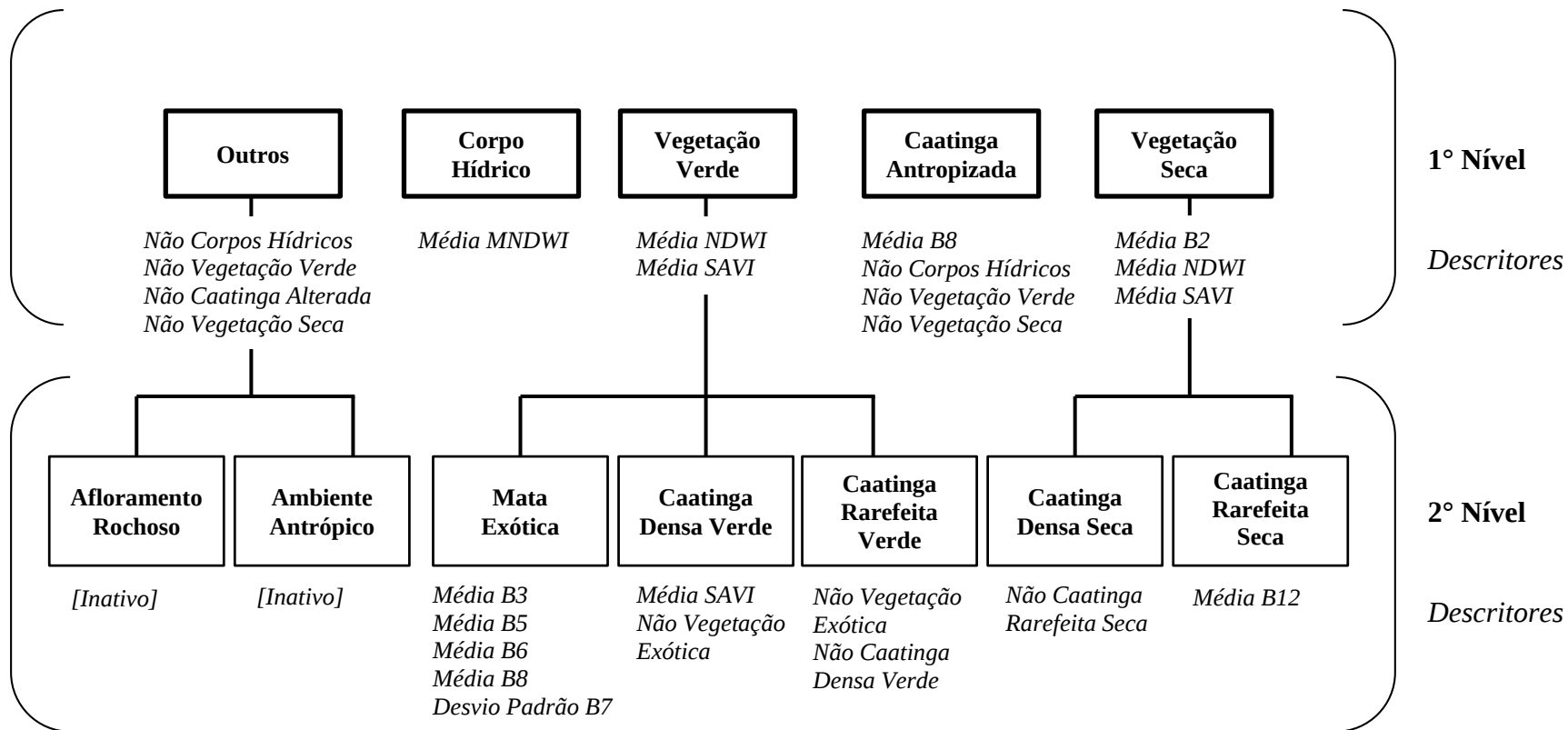
Os trabalhos de campo foram essenciais para o mapeamento. O reconhecimento da área de estudo ocorreu em campanhas realizadas em abril, maio, junho e outubro de 2018 e janeiro de 2019, em parceria com a equipe do Laboratório de Estudos do Semiárido (LAESA-UFPB); e em outubro de 2019 para verificação do mapa por verdade terrestre. A construção dos níveis hierárquicos *top-down* foi estabelecida para auxiliar o processo de amostragem e modelagem do conhecimento. As classes ‘afloramento rochoso’ e ‘ambiente antrópico’ foram agrupadas em um primeiro nível definido como ‘outros’. No segundo nível, ambas as classes ficaram inativas para serem editadas na etapa subsequente.

Já as classes ‘caatinga densa’ e ‘caatinga rarefeita’ foram subdivididas em ‘caatinga densa seca’, ‘caatinga densa verde’, ‘caatinga rarefeita seca’ e ‘caatinga rarefeita verde’. Tais subdivisões compuseram, respectivamente, o primeiro nível hierárquico de ‘vegetação seca’ e de ‘vegetação verde’, essa última também enquadrando a classe temática ‘vegetação exótica’. Por fim, as classes ‘corpos hídricos’ e ‘caatinga antropizada’ se mantiveram inalteradas, classificadas em primeiro nível.

Na Figura 3.11 é possível verificar a árvore de decisão utilizada no processo de classificação *top-down*, seguido dos respectivos descritores selecionados para cada classe, de forma mais detalhada, à medida que muda de nível. Percebe-se que foi necessário utilizar modelos inversos, que utilizam a terminologia NÃO para classificar um objeto que ainda não foi classificado em um mesmo nível hierárquico. Essa técnica também foi utilizada por Lima *et al.* (2019) na classificação GEOBIA das bacias dos Rios Taperoá e Alto Paraíba. Na árvore de decisão visualizada na Figura 4.13, por exemplo, o objeto ‘Outros’ passa a ser classificado quando ele NÃO é ‘Corpos Hídricos’, NÃO é ‘Vegetação Verde’, NÃO é ‘Caatinga Alterada’ e NÃO é ‘Vegetação Seca’.

Em seguida houve a edição manual das classes ‘afloramento rochoso’ e ‘ambiente antrópico’ e o tratamento da classificação, para então serem exportados no formato vetorial como polígonos na extensão *shapefile*. No ArcGIS foi realizada a compatibilização das classes de ‘caatinga densa’ e ‘caatinga rarefeita’, de modo a agregar o mesmo valor de legenda dos respectivos polígonos de caatinga verde e caatinga seca. Com o uso da ferramenta *dissolve*, todos os polígonos de cada classe foram reunidos. Por último, no ERDAS Imagine, foi realizado o pós-processamento para a melhoria da classificação, com uso do filtro de moda *eliminate* em uma vizinhança de 5x5 pixels.

Figura 3.11 - Hierarquia e descritores utilizados no processo de classificação GEOBIA top-down.



Fonte: Elaboração própria (2019).

A confiabilidade da classificação foi validada estatisticamente pela matriz de confusão (CONGALTON, 1991), com uso de coeficientes de concordância de exatidão global (equação 1) e índice *Kappa* (equação 2). Essa matriz quadrada apresenta uma distribuição binominal entre a relação das amostras de referência e os resultados obtidos. Para calcular a exatidão global, considera-se o valor do acerto geral de cada ponto amostral na diagonal da matriz com o número total de pontos de referência para cada classe, onde os resultados são expressos em porcentagem; já o índice *Kappa* considera todos os pontos amostrais da matriz, em que $-1 \leq K \leq +1$ (Tabela 3.3).

$$EG = \frac{A}{N} * 100 \quad (1)$$

Onde:

EG = exatidão global

A = acerto geral de cada ponto amostral da diagonal

N = número total de pontos amostrais em cada classe

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad (2)$$

Onde:

K = coeficiente *Kappa*

x_{ii} = soma da diagonal da matriz de erros

n = número total de pontos amostrais

x_{i+} = soma da linha i da matriz de confusão

(pixels de referência)

c = número total de classes

x_{+i} = soma da coluna i da matriz de confusão

Tabela 3.3 – Divisão das classes de qualidade resultantes do índice Kappa.

KAPPA (K)	QUALIDADE DO MAPA
< 0,00	Péssima
0,00 – 0,20	Ruim
0,21 – 0,40	Razoável
0,41 – 0,60	Boa
0,61 – 0,80	Muito Boa
0,81 – 1,00	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977).

Ao todo, 490 pontos foram criados aleatoriamente pela ferramenta *Create Random Points* do ArcGIS para avaliar a verdade terrestre. Trata-se da última etapa do mapeamento temático, que permite verificar a coerência da classificação a partir da verificação visual em campo e pelo *Google Earth*. Os materiais utilizados para os trabalhos de campo foram: um GPS Garmin eTrex 30x; um tablet Galaxy Samsung Tab S3 para visualização de mapas *off-line* pelo aplicativo gratuito Avenza Maps; celular Samsung J2 para registro fotográfico e caderneta de campo.

3.2.2 *Análise da Paisagem*

Após concluir o mapeamento por sensoriamento remoto, iniciou-se a análise da paisagem na região do Cariri Paraibano a partir do padrão de ocupação. As características de uso foram identificadas e relacionadas com informações do último Censo Agropecuário, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), processos minerários disponibilizados no *website* da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2022) e outras pesquisas institucionais e acadêmicas.

Sob a ótica geográfica da Ecologia de Paisagens, adotou-se o modelo mancha-corredor-matriz, considerado o mais adequado para a pesquisa, tendo como referência as considerações apresentadas por Lausch *et al.* (2015), Metzger (2001) e Peng *et al.* (2016). A modelagem aplicada na escala antrópica permitiu quantificar a configuração e a composição da paisagem, sendo as manchas representadas pelas unidades interativas de uso e cobertura da terra, ou seja, as sete classes temáticas previamente definidas na etapa anterior: Corpo Hídrico, Afloramento Rochoso, Ambiente Antrópico, Mata Exótica, Caatinga Antropizada, Caatinga Rarefeita e Caatinga Densa.

A estrutura da paisagem no modelo mancha-corredor-matriz foi mensurada a partir de métricas específicas, que permitiram quantificar as manchas que formam o mosaico da paisagem e relacioná-las conforme arranjo espacial, forma, área núcleo, posição e distância dos fragmentos análogos. De acordo com McGarrial (2012), os cinco grupos de métricas existentes se destacam pelos seguintes princípios:

- Área e tamanho: o tamanho e o perímetro dos fragmentos são as medidas mais básicas na configuração espacial e, por isso, são diretamente incorporados pela maioria das métricas existentes. Para as métricas de área, considera-se o somatório das áreas calculadas, a quantidade de fragmentos e a média, mediana e variação do tamanho do fragmento calculado.

- Forma e borda: a complexidade da forma refere-se à geometria dos fragmentos. Devido à infinidade de formas existentes, é um atributo espacial baseado na quantidade relativa de perímetro por unidade de área (razão perímetro/área) ou na dimensão fractal padronizada em uma forma euclidiana simples (geralmente círculos). As métricas de borda consideram o comprimento total calculado, em uma relação perímetro/área ou perímetro/número de fragmentos.
- Área Núcleo: corresponde à área no interior do fragmento após correlacionar um *buffer* de borda especificado pelo usuário. Por eliminar a distância passível de um efeito de borda, são integradas informações das métricas de área, forma e borda (por si só, fragmentos menores com maior complexidade de forma possuem área núcleo menor).
- Subdivisão: refere-se ao grau em que a paisagem é dividida em fragmentos disjuntos, medido pelo número ou pela densidade de fragmentos; não apenas a divisão de fragmentos conforme quantidade, forma, localização relativa ou arranjo espacial.

A análise da paisagem por métricas específicas ocorreu a partir de dados vetoriais na forma de polígonos, sendo utilizada a extensão *Vector-based Landscape Analysis Tools Extension 2.0 beta* (V-Late). Essa atividade foi desenvolvida com apoio do Laboratório de Estudos do Semiárido (LAESA) e Laboratório de Ensino, Pesquisa e Projetos em Análise Espacial (LEPPAN) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). A Tabela 3.4 detalha as métricas utilizadas na presente pesquisa.

Tabela 3.4 - Métricas utilizadas na extensão V-Late.

Grupos	Nome	Sigla	Descrição (McGARIGAL, 2012)
Área	Área de Classe	CA	Somatório das áreas de todos os fragmentos
	Número de Fragmentos	NumP	Número total de fragmentos
	Tamanho Médio dos Fragmentos	MPS	Somatório do tamanho dos fragmentos dividido pelo número de fragmentos
	Desvio Padrão do Tamanho Médio dos Fragmentos	PSSD	Razão da variação do tamanho dos fragmentos
Forma e Borda	Índice Médio da Forma	MSI	Somatório do perímetro de cada fragmento dividido pela raiz quadrada da área do fragmento ou do número de fragmentos da paisagem (valor mínimo igual a 1)
	Dimensão Fractal Mediana	MFRACT	Difere da MSI, por indicar a complexidade do perímetro do fragmento. Será igual a 1 quando apresentar forma simples (circunferências) e chegará a 2 quando a forma for mais complexa)
	Densidade de Borda	ED	Relação entre o perímetro e área total (expresso em m/ha)
Área Núcleo	Área Núcleo Total da Classe	TCCA	O tamanho total de áreas núcleo dentro da paisagem ou dentro de cada fragmento ao nível de classe

	Número de Áreas Núcleo	NCA	Número total de áreas núcleo dentro da paisagem ou dentro de cada mancha ao nível de classe
	Índice de Área Núcleo	CAI	Porcentagem do total de áreas núcleo
	Índice de Divisão da Paisagem	DIVISION	Distribuição acumulativa das áreas dos fragmentos (quanto maior o resultado, maior o grau de fragmentação)
Subdivisão	Tamanho Efeito da Malha (<i>Effective Mesh Size</i>)	MESH	Tamanho total de fragmentos obtidos quando se divide a área da paisagem em tamanhos iguais
	Índice de Fragmentação (<i>Splitting Index</i>)	SPLIT	Número de fragmentos obtidos quando se divide a área total da paisagem em tamanhos iguais

Fonte: ESRI (2020) e McGARIGAL (2012).

As métricas foram aplicadas em nível de paisagem para caracterizar a matriz; em nível de classe para integrar características de um conjunto específico de fragmentos; e em nível de fragmento (LANG; BLASCHKE, 2009; LAUSCH et al., 2015). Para melhor avaliar a composição e a configuração espacial dos fragmentos de Caatinga, cada classe de vegetação (Caatinga Antropizada, Mata Exótica, Caatinga Densa e Caatinga Rarefeita) foi agrupada por tamanho: menor que 1ha, entre 1 e 5ha, entre 5 e 10ha, entre 10 e 15ha, entre 15 e 20ha, entre 20 e 25ha, entre 25 e 30ha, entre 30 e 35ha, entre 35 e 40ha, entre 40 e 45ha, entre 45 e 50ha, entre 50 e 60ha, entre 60 e 70ha, entre 70 e 80ha, entre 80 e 90ha, entre 90 e 100ha, entre 100 e 200ha, entre 200 e 300ha, entre 300 e 400ha, entre 400 e 500ha e maiores que 1.000ha.

Os agrupamentos tiveram intervalos diferenciados devido ao contexto de paisagem fragmentada que em se inserem. Os fragmentos muito pequenos a pequenos foram agrupados em intervalos menores, ao considerar que mesmo as menores manchas podem exercer importante função na conectividade de ambientes naturais. Os intervalos foram aumentando conforme o tamanho dos fragmentos também aumentavam, já que áreas maiores tendem a abrigar maior quantidade de espécies e suprir o hábitat mínimo para sobrevivência de espécies, inclusive as especialistas.

Para o uso das métricas de área núcleo foram consideradas apenas as classes Caatinga Densa e Mata Exótica, já que o objetivo é identificar as áreas no interior dos fragmentos após eliminar uma zona tampão de efeito de borda. Assim, foram definidos *buffer de 50m* e *100m*, delimitados conforme o perímetro de cada mancha. De acordo com Dantas (2016), alguns estudos em FTSS evidenciam certa estabilidade microclimática a partir dos 50m de borda, mas dependendo do nível de perturbação, a influência das bordas tende a ser minimizada após os 100m. Antongiovanni, Venticinque e Fonseca (2018) consideram relevante estruturar uma distância de borda para compreender o padrão de fragmentação e o grau de ameaça dos remanescentes de vegetação, mas complementam que quando induzidos pela ação antrópica, os efeitos de borda tendem a percolar para o interior dos fragmentos.

Após a avaliação da composição e configuração espacial da paisagem pelo modelo mancha-corredor-matriz, os fragmentos de Caatinga foram qualificados conforme importância para a conectividade estrutural. Essa modelagem é embasada na Teoria dos Grafos, sendo utilizada a extensão gratuita *Conefor Sensinode 2.6* no ArcGIS. Para Minor e Urban (2007), Paese et al. (2012) e Saura e Rubio (2010), essa ferramenta oferece algoritmos que destacam os fragmentos-chave para conectividade em regiões fragmentadas, onde o grafo representa a matriz, os nós são as unidades de paisagem de interesse, e as arestas desses nós são as distâncias previamente definidas.

De acordo com Saura e Rubio (2010), a técnica permite avaliar a importância de cada elemento da matriz conforme a complexidade da paisagem. Para avaliações em larga escala, geralmente utiliza-se o modelo binário de conectividade baseado na hipótese simplista, onde a paisagem é diferenciada em áreas de hábitat e de não hábitat em uma matriz mais permeável para o deslocamento das espécies (ZIOLKOWSKA et al., 2014).

No presente trabalho, os nós representam os fragmentos de Caatinga; e as arestas que ligam os nós foram definidas conforme distâncias variadas entre as bordas dos fragmentos. Para calcular a conectividade funcional da Caatinga, Antongiovanni, Venticinque e Fonseca (2018) utilizaram como distância máxima de deslocamento o equivalente a 1,5km, considerando que todo fragmento é potencialmente disponível para uso de espécies capazes de se movimentar pela matriz.

Como o objetivo aqui foi mensurar a conectividade estrutural da paisagem, optou-se em adotar duas distâncias de referência: uma de 1,5km, como indicativo de conectividade funcional; e outra, mais abrangente, com valor máximo de 7,5km. O Índice Integral de Conectividade (IIC) foi utilizado para calcular as distâncias de dispersão entre os fragmentos de Caatinga em uma matriz permeável. Esse algoritmo se baseia em um sistema simplificado de conexão binária, onde o fragmento, por si só, é considerado uma área de hábitat, que pode ou não estar conectado entre duas ou mais manchas (SAURA; RUBIO, 2010). Quanto maior o número de conexões de cada mancha, maior o IIC.

3.2.3 Relação dos Componentes Geoambientais entre Fragmentos da Paisagem

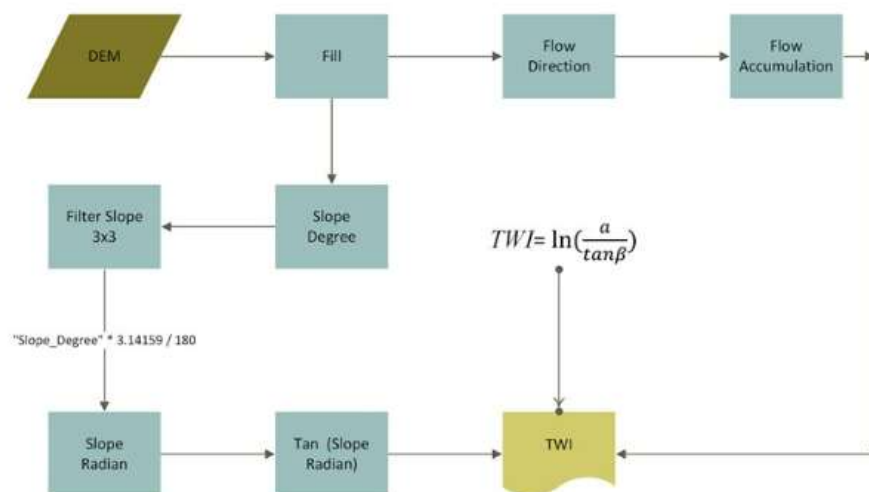
A última etapa do trabalho refere-se à verificação da hipótese de que componentes geológicos, topográficos e hidropedológicos são elementos facilitadores para a manutenção e a conectividade estrutural dos fragmentos de Caatinga Densa. A relação dos aspectos abióticos foi analisada em áreas estratégicas, representadas pelas Unidades de Conservação e pelos

fragmentos destacados pelo Índice Integral de Conectividade. Para subsidiar a análise, foram utilizados mapas de pedologia e geomorfologia disponíveis no banco de dados de informações ambientais do IBGE; as cartas geológicas obtidas no Serviço Geológico Brasileiro – CPRM; e imagens da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) adquiridas no USGS.

O banco de dados do IBGE disponibiliza bases temáticas compatíveis com a escala de 1:250.000, que permite conhecer as características ambientais do Brasil. Já as cartas geológicas da CPRM estão na escala 1:100.000, utilizadas para identificar as estruturas geológicas e as unidades litoestratigráficas da área de estudo. Das oito¹³ cartas que contemplam a área de estudo, cinco estavam disponíveis apenas em formato pdf, sendo realizada a vetorização manual dos arquivos, em parceria com o Prof. Dr. Rafael Xavier. Para a construção do mosaico das folhas foi necessária uma reinterpretação geológica, com adequação de polígonos incompletos, atividade realizada pelo geólogo Luciano Oliveira¹⁴, através de imagens de satélite do *Google Earth* e visitas de campo realizadas em 2019.

Por fim, as imagens SRTM com resolução de 30m foram pré-processadas no ArcGIS para a criação do Modelo Digital de Elevação, do mapa de declividade e aplicação do Índice Topográfico de Umidade (TWI). Para o cálculo do TWI utilizou-se a ferramenta *raster calculator*, seguindo o fluxo e fórmula apresentados na Figura 3.12.

Figura 3.12 - Fluxo e fórmula para o cálculo do TWI.



Onde: “A” é a área de contribuição e “β” a declividade

¹³ As folhas Juazeirinho, Monteiro, Patos, Santa Cruz do Capibaribe e Sumé estavam pdf; e as folhas Boqueirão, Pesqueira e Sertânia possuíam o formato em *shapefile*.

¹⁴ Luciano Bruno Elpidio da Rocha Oliveira é Geólogo mestre em Geologia Regional pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados em subseções sequenciais, conforme exposto nos procedimentos metodológicos. A primeira parte refere-se à avaliação do mapa temático de uso e cobertura da terra. Em seguida, a paisagem na região do Cariri Paraibano foi analisada a partir do mapa de uso e cobertura da terra e dos resultados de cada métrica aplicada. Esta etapa reflete as interações das classes de uso e ocupação com os aspectos estruturais dos fragmentos de Caatinga, com enfoque nas potencialidades e fragilidades de proteção destes ambientes. A última etapa apresenta a análise dos componentes geoambientais das Unidades de Conservação e dos principais fragmentos destacados pelo Índice Integral de Conectividade, tendo como resultado principal sugestão de áreas para formação de corredores ecológicos.

4.1 Validação Estatística do Mapa Temático

O mapa de cobertura e uso da terra foi elaborado a partir da classificação GEOBIA de imagens geradas em 12/11/2017 pelo satélite Sentinel-2. As sete classes temáticas (Corpo Hídrico, Afloramento Rochoso, Ambiente Antrópico, Mata Exótica, Caatinga Antropizada, Caatinga Rarefeita e Caatinga Densa) foram classificadas utilizando a média das bandas B2, B3, B5, B8, B12; o desvio padrão da banda B7; e a média dos índices espectrais MNDWI, NDWI e SAVI (rever Figura 3.12). O mapa foi validado estatisticamente através da matriz de confusão, que permitiu calcular no programa Excel, a exatidão global e o índice *Kappa*.

A matriz de confusão (Tabela 4.1) e a precisão da classificação (Tabela 4.2) mostram que o ambiente antrópico apresentou melhores resultados (acurácia de 95,71%); e, contrariamente, o afloramento rochoso obteve maior grau de confusão (precisão de 77,14%). Embora essas classes tenham sido editadas manualmente, elas são difíceis de serem separadas espectralmente e podem ter sido agrupadas no processo de segmentação e/ou confundidas na identificação dos elementos interpretativos.

Tabela 4.1 – Matriz de confusão do mapeamento temático.

Amostras de Referência									
Verdade Terrestre	Classes	corpo hídrico	afloramento rochoso	ambiente antrópico	mata exótica	caatinga antropizada	caatinga rarefeita	caatinga densa	Soma_linha
	Corpo Hídrico	62	0	0	0	0	0	0	62
	Afloramento Rochoso	0	54	0	0	0	0	0	54
	Ambiente Antrópico	6	7	67	0	0	1	0	81
	Mata Exótica	0	0	0	57	0	1	2	60
	Caatinga Antropizada	0	7	3	8	61	2	0	81
	Caatinga Rarefeira	2	2	0	0	7	61	4	76
	Caatinga Densa	0	0	0	5	2	5	64	76
	Soma_Coluna	70	70	70	70	70	70	70	490

Fonte: elaboração própria (2020).

Tabela 4.2 – Precisão da classificação GEOBIA (em porcentagem).

Precisão (%)							
Classes	corpo hídrico	afloramento rochoso	ambiente antrópico	mata exótica	caatinga antropizada	caatinga rarefeita	caatinga densa
Corpo Hídrico	88,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Afloramento Rochoso	0,00	77,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ambiente Antrópico	8,57	10,00	95,71	0,00	0,00	1,43	0,00
Mata Exótica	0,00	0,00	0,00	81,43	0,00	1,43	2,86
Caatinga Antropizada	0,00	10,00	4,29	11,43	87,14	2,86	0,00
Caatinga Rarefeira	2,86	2,86	0,00	0,00	10,00	87,14	5,71
Caatinga Densa	0,00	0,00	0,00	7,14	2,86	7,14	91,43

Fonte: elaboração própria (2020).

A classe Afloramento Rochoso também foi confundida com a Caatinga Alterada, que representa maior exposição do solo dentre as vegetações. Lima e Almeida (2017) destacam que nos períodos de latência da caatinga predomina-se a tonalidade clara, sendo facilmente confundida com outros alvos da superfície em imagens de satélite. Neste sentido, é muito comum estudos de uso e cobertura da terra unificarem áreas de pastagem, agricultura, área urbana e afloramentos rochosos, como realizado por Coelho *et al.* (2014), Ballén, Souza e Lima (2015); Francisco *et al.* (2015); Lima e Almeida (2017).

A Caatinga Antropizada e Caatinga Rarefeita tiveram resultados semelhantes, perfazendo acerto de 87,14%. Na primeira, a classificação foi gerada no primeiro nível, sendo utilizado como descritores a banda B8 (infravermelho próximo) e a técnica do ‘Não’ para os demais níveis hierárquicos – com exceção do grupo ‘Outros’, o que explica o confundimento supracitado.

Para conseguir diferenciar Mata Exótica das Caatingas Densa e Rarefeita, os índices espectrais SAVI e NDWI foram essenciais, pois identificaram a umidade na vegetação e presença de biomassa ajustada para o solo. Lima *et al.* (2019) também conseguiram distinguir caatinga e não caatinga com os mesmos índices, embora tenham utilizados outros descritores, como amplitude do relevo – já que algaborda tende a acompanhar porções mais baixas associadas com as drenagens. O estresse da umidade na vegetação seca da caatinga rarefeita também foi determinado pela média da banda B12, diferenciando a caatinga verde da mata exótica pela média do índice SAVI.

Por fim, o índice MNDWI utilizado para classificar o Corpo Hídrico conseguiu delimitar informações espectrais da água também em subsuperfície rasa. Especificamente nesse caso, encontrado no município de Boa Vista, acredita-se que a característica argilosa do solo (possivelmente vertissolo) seja o motivo da identificação do corpo hídrico mesmo sem acúmulo de água na superfície. Durante a verdade terrestre, parte desta classe foi identificada como ambiente antropizado e de caatinga rarefeita com recentes alterações na paisagem.

A Figura 4.1 mostra as proximidades dos pontos 351, 355, 360, 366, 396 e 410, em áreas que sofreram intervenção das atividades minerárias, apresentando trechos de recuperação de áreas degradadas, abertura de trincheiras sobre basalto, presença de cascalhos e de umidade no solo.

Figura 4.1 - Áreas inseridas em poligonais de mineração no município de Boa Vista, que pela característica do solo e sensibilidade do índice MNDWI, resultou na classe corpo hídrico.



Fotos: Luciano Oliveira e Janaína Oliveira (2019).

Os resultados expressos pela exatidão global e índice *Kappa* corroboram com a excelente qualidade do mapa gerado pela classificação GEOBIA, atingindo valores de 86,94% e 0,85, respectivamente (CONGALTON, 1991; FOODY, 2002; LANDIS e KOCK, 1977). Eficiência similar de qualidade, variando entre muito boa e excelente foram encontradas em estudos que envolveram a classificação de mapas temáticos de uso e cobertura do semiárido brasileiro realizados por Coelho *et al.* (2014); Lima *et al.* (2019); Silva *et al.* (2018); Silva, Souza e Bacani (2019).

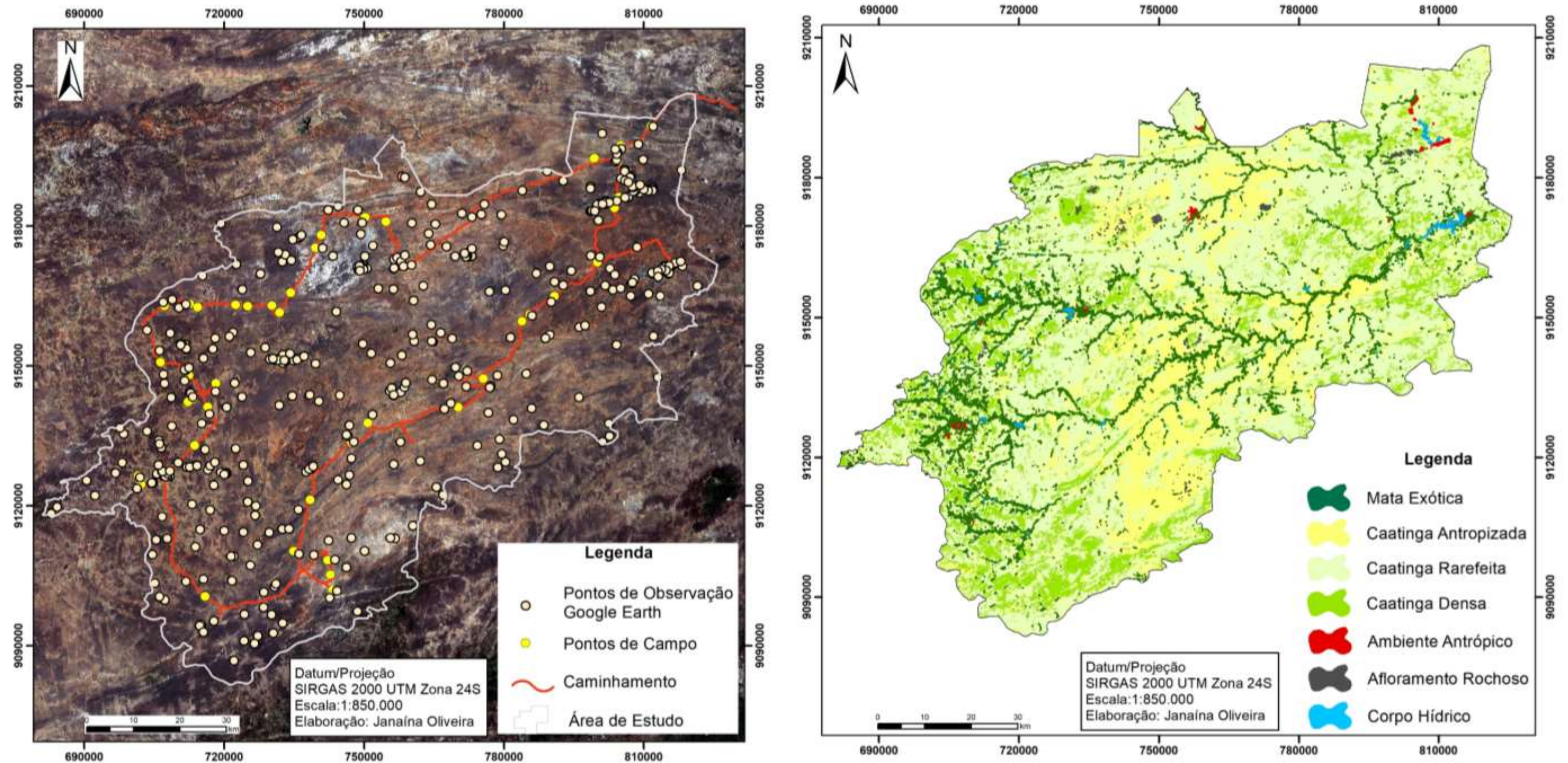
A Figura 4.2 mostra a imagem Sentinel-2 em composição RGB 4-3-2, os pontos observados por verdade terrestre, o caminhamento realizado em campo e o resultado da classificação, com área de cada classe apresentada na Tabela 4.3

Tabela 4.3 - Área de cada classe temática obtida no mapa de cobertura e uso da terra.

Classes Temáticas	Área	
	ha	%
Afloramentos Rochosos	784	0,09
Caatinga Antropizada	204.699	22,23
Mata Exótica	26.669	2,90
Caatinga Densa	145.765	15,83
Caatinga Rarefeita	539.822	58,63
Corpo Hídrico	1.431	0,16
Ambiente Antrópico	1.601	0,17
Total	920.771	100

Fonte: elaboração própria (2020).

Figura 4.2 - Mapa de composição RGB 4-3-2 com pontos verificados por verdade terrestre e caminhada realizado em campo (à esquerda) e mapa de cobertura e uso da terra da área de estudo (à direita).



Fonte: Imagens Sentinel-2 de 12/11/2017 (USGS).

Um resultado diferenciado obtido no mapa de cobertura e uso da terra passível de destaque é a distinção da mata exótica, composta predominantemente pela espécie invasora *P. juliflora* (algaroba). Como já exposto, a complexidade em se mapear a Caatinga faz com que muitos estudos unifiquem classes temáticas difíceis de serem identificadas por suas respostas espectrais análogas, sobretudo quando se trabalha em escala regional.

Cita-se como exemplo o mapa de tipologias da vegetação de caatinga na bacia do Rio Taperoá realizado por Francisco *et al.* (2015). Conforme os autores, a semelhança das respostas espectrais da algaroba, das áreas de cultivo e de pastagem não permitiu a devida diferenciação da vegetação de porte arbóreo ou subarbustivo. Mesmo quando o mapa permite um maior detalhe, como o realizado por Ballén, Souza e Lima (2014) para a vegetação da APA do Cariri, a diferenciação entre áreas de caatinga mais densa e áreas dominadas pela algaroba só puderam ser evidenciadas em campo.

Pereira *et al.* (2013) conseguiram diferenciar áreas de algaroba no mapa de uso e cobertura do solo do município de São João do Cariri. Para tanto, os autores utilizaram alvos como relevo e drenagem para subsidiar a interpretação visual de imagens Landsat/TM e CBRS/CCD, e adotaram procedimentos técnicos embasados nas composições multiespectrais ajustadas, no índice de vegetação (NDVI), na segmentação por similaridade e na classificação não supervisionada conforme o classificador Bhattacharya.

Informações sobre relevo também foram utilizadas para identificar a algaroba no mapeamento de uso e ocupação do solo e da cobertura vegetal nas bacias dos Rios Taperoá e Alto Paraíba realizados por Lima *et al.* (2019). Os autores, que adotaram a classificação GEOBIA de imagens Sentinel/MSI, utilizaram como descritores a amplitude do relevo; a média das bandas B11, B12, B5, B7, B2; o índice NDWI; e a terminologia ‘NÃO’ dos modelos inversos e verificaram a ocorrência da espécie em áreas mais rebaixadas, próximas aos açudes e canais de drenagem. No entanto, os autores optaram por incluir algaroba e pequenos cultivos em uma única classe denominada Caatinga Tropicófila Subúmida.

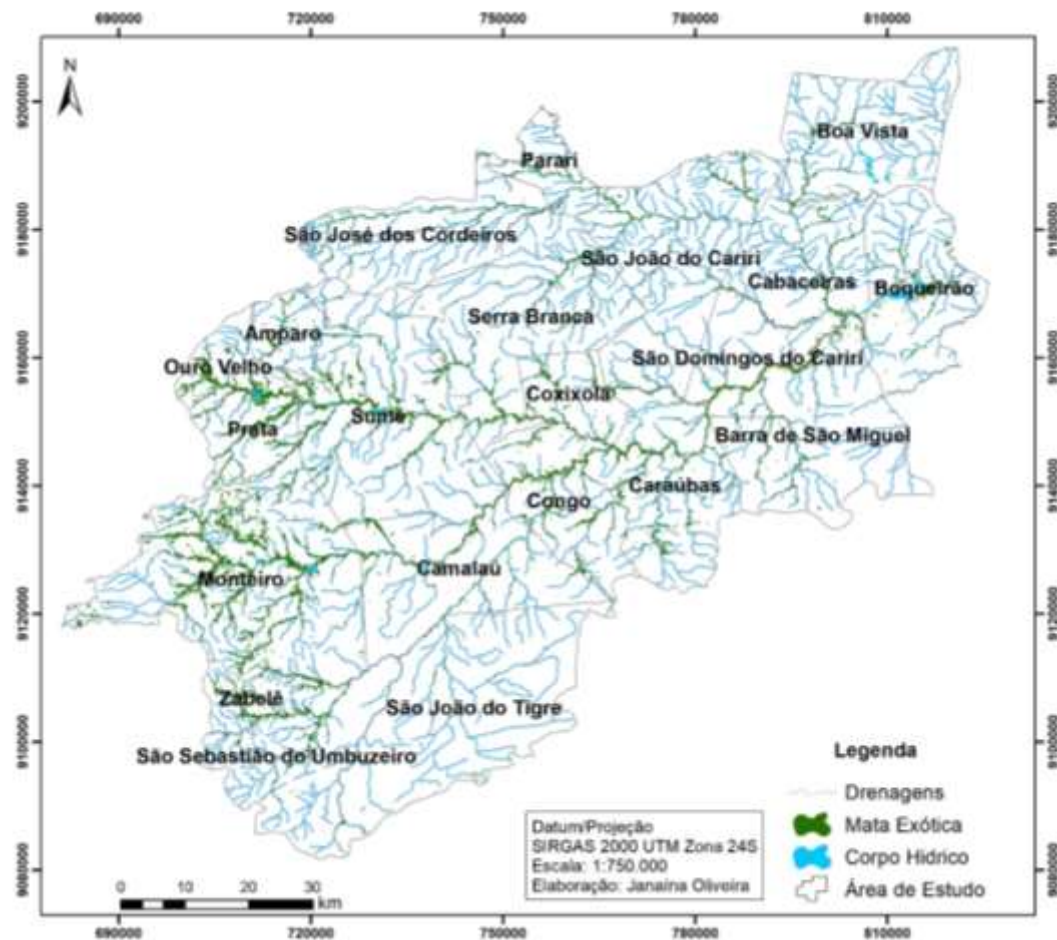
4.2 Análise da Paisagem

A análise da paisagem na região do Cariri Paraibano teve início a partir do uso e cobertura da terra mapeados na fase anterior. Estudos sobre padrões de paisagens são uma importante ferramenta para identificar problemas contemporâneos de antropização, amplamente utilizados como estratégias conservacionistas em unidades territoriais (FRANÇA *et al.*, 2019; SALOMÃO; SILVA; MACHADO, 2019). Como já apresentado, os principais

problemas vinculados ao uso e cobertura da terra na região de estudo estão relacionados com a invasão da algaroba, representada pela classe Mata Exótica; o pastoreio e extrativismo vegetal, atividades que podem contribuir com o processo de desertificação classificadas como Caatinga Antropizada pelo alto nível de degradação ambiental.

Assim, os resultados obtidos na diferenciação das áreas com predomínio da algaroba foram espacializados e quantificados, de modo a permitir uma análise regional distinta e inédita da paisagem. Ao todo, a classe Mata Exótica corresponde a 2,90% da área de estudo (26.669ha – rever Tabela 4.3), resultado similar ao apresentado por Lima *et al.* (2019) na Caatinga Tropófila Subúmida, que inclui algaroba e pequenos cultivos, com 2,19% (26.496ha) em todo Alto Curso Paraíba e Taperoá. Na Figura 4.3 percebe-se que a algaroba forma uma “mata ciliar predominantemente exótica”, com destaque para afluentes do Rio Paraíba nos municípios de Monteiro, Congo e Caraúbas; afluentes do Rio Sucuru, em Ouro Velho, Prata e Sumé; riachos em Zabelê e na divisa com São João do Tigre.

Figura 4.3 - Classe Mata Exótica, composta predominantemente por algaroba.



Fonte: elaboração própria (2022).

Conforme Lima et al. (2019), esta espécie é abundante em áreas mais rebaixadas, às margens de rios e próximas dos açudes e canais existentes. A dispersão encontrada assemelha-se ao padrão apresentado em terras potiguaras. De acordo com Santos e Diodato (2017), estudos ecológicos de populações de algarobas no Rio Grande do Norte indicam a propagação da espécie em áreas de aluvião ou como colonizadoras em áreas desmatadas. Na Paraíba, Pereira et al. (2013) identificaram a ocupação e expansão evidente às margens de drenagens no município de São João do Cariri a partir do mapeamento de uso e cobertura da terra por imagens de satélites nos anos de 1987, 1996 e 2006; e verificadas em trabalho de campo pelos autores.

Complementarmente, a Tabela 4.4 apresenta a distribuição da classe Mata Exótica em cada município. Os elevados valores encontrados em Monteiro e Sumé, com respectivamente 23,15% e 11%, pode ser resultado dos incentivos de produção, distribuição e plantio ocorridos no passado. Conforme Santos e Diodato (2017), as associações rurais destes e de outros municípios do Cariri motivaram tais atividades nas décadas de 1960 e 1970 em virtude das características da algaroba, que se mantinha verde e produtiva mesmo durante intensas restrições hídricas. Segundo os autores, a dispersão descontrolada da espécie é consequência das condições ambientais favoráveis e, provavelmente, da omissão dos órgãos pertinentes após o declínio dos incentivos governamentais e das informações sobre manejo adequado.

Tabela 4.4 – Distribuição da Mata Exótica (hectare e porcentagem) por município.

Município	Mata Exótica		Município	Mata Exótica	
	Área (ha)	%		Área (ha)	%
Amparo	391,62	1,47	Pariri	430,41	1,61
Barra de São Miguel	1.041,48	3,91	Prata	1.680,29	6,3
Boa Vista	383,18	1,44	São Domingos do Cariri	804,27	3,02
Boqueirão	780,59	2,93	São João do Cariri	1.031,39	3,87
Cabaceiras	941,74	3,53	São João do Tigre	236,18	0,89
Caraúbas	1.859,95	6,97	São José dos Cordeiros	599,07	2,25
Camalaú	1.144,96	4,29	São Sebastião do Umbuzeiro	920,7	3,45
Coxixola	661,95	2,48	Serra Branca	1.242,29	4,66
Congo	1.522,82	5,71	Sumé	2.934,04	11
Monteiro	6.173,80	23,15	Zabelê	909,06	3,41
Ouro Velho	978,77	3,67	Total	26.668,56	100

Além da adaptação da espécie invasora à região semiárida, a elevada capacidade de dispersão da algaroba é facilitada pelos animais de pastejo, que quebram a dormência das sementes ao se alimentarem dos frutos e viabilizam o acesso em variados locais propícios à sua propagação (ANDRADE; FABRICANTE; OLIVEIRA, 2010; SANTOS; DIODATO, 2017).

Embora Santos e Diodato (2017) apresentem outras alternativas de uso deste recurso, por exemplo o processamento das vagens para produção de polissacarídeos ou de biocombustível e o beneficiamento da madeira; os impactos adversos da invasão da algaroba estão relacionados com a perda do patrimônio genético da Caatinga, as doenças em bovinos, caprinos e ovinos, e a uma polêmica discussão sobre a necessidade hídrica da espécie, que compromete a quantidade de água no solo.

Ainda que não haja interferência da algaroba na quantidade de água no solo, deve-se considerar que ela apresenta um padrão de distribuição similar ao das matas ciliares, mas sem exercer a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a biodiversidade e de facilitar o fluxo gênico previstos em APPs. Neste sentido, identifica-se uma fragilidade da legislação ambiental diante uma das singularidades da Caatinga: a predominância de rios efêmeros, cuja proteção das margens é excluída pelo Código Florestal. Para Meiado et al. (2020), ao considerar o histórico de desenvolvimento econômico e maior concentração da população, o conhecimento científico das características únicas da Caatinga pode subsidiar adequações necessárias nas leis para garantir novas políticas públicas regionais de conservação dos recursos naturais e planejamento econômico.

Este sistema de drenagens efêmeras, influenciado por compartimentos e feições dos relevos residuais (MAIA; NASCIMENTO, 2018), é essencial para a manutenção dos rios Paraíba e Taperoá (SEABRA et al., 2014; LIMA et al., 2019), intermitentes na área de estudo. Com a predominância da algaroba que ameaça a flora autóctone, as margens de nascentes e cursos d'água efêmeros na Caatinga deveriam ser considerados espaços territoriais especialmente protegidos para garantir um ambiente ecologicamente equilibrado. Porém, permanecem sem devido amparo legal para efetiva gestão de recursos hídricos e fragiliza o direito constitucional previsto no artigo 225.

Sob aspecto da gestão de recursos hídricos, Lima et al. (2019) ressaltam o comprometimento do Açude Boqueirão no aporte de água nos últimos anos, agravado pelo assoreamento da bacia de captação por práticas inadequadas de manejo do solo, problemática agravada pela erosão hídrica e pela sazonalidade climática. Os autores ainda alertam sobre a possível atração de indústrias de fruticultura irrigada e de produção de grãos no Alto Curso do Rio Paraíba como consequência da transposição do rio São Francisco. Para Meiado et al. (2020), ao mesmo tempo que fazendas de irrigação e grandes produtores estimulam a mão de obra local, podem tornar-se uma ameaça potencial das paisagens naturais causada pela salinização do solo e ampliação da degradação da Caatinga.

A atual degradação ambiental da região de estudo também é ocasionada pela redução ou transformação da cobertura vegetal nativa para pastoreio e extrativismo vegetal, atividades representadas pela classe Caatinga Alterada. Conforme Graboys, Marques e Silva (1991), a pecuária caprina e ovina é um dos usos intensivos da terra mais característicos do Cariri Paraibano, consolidadas desde a década de 1980 e favorecidas pela adaptação, menor tempo de gestação e de abate desses animais.

Os dados do último Censo Agropecuário (IBGE, 2017) corroboram com o predomínio desta atividade na área de estudo, que correspondem a 235.947 cabeças de caprinos, 161.212 de ovinos e 72.141 de bovinos; números que superam a população estimada em 2019, com 125.086 pessoas. A Tabela 4.5 apresenta o levantamento realizado pelo IBGE (2017), com características do uso da terra nos 21 municípios da área de estudo. Nota-se também que as áreas de pastagens (incluindo naturais¹⁵), lavouras e sistemas agroflorestais correspondem a 218.676ha, valor aproximado ao obtido na classe Caatinga Antropizada, com 204.699ha.

¹⁵ Uma nota técnica de treinamento de técnicos emitida por Albuquerque (1979) apontava as áreas de pastagens de Caatinga como uma das principais do Brasil. Na época, o autor ressaltava a fase de regressão da Caatinga quando submetida à exploração prolongada, que resultava no gradual desaparecimento das espécies desejáveis, de modo a não mais proporcionar condições de suportar as atividades pecuárias no decorrer dos anos. A nota técnica encontra-se disponível no acervo documental que compõe as Bases de Dados da Pesquisa Agropecuária da Embrapa:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/175756/1/Pastagens-nativas-de-caatinga-2787.pdf>

Tabela 4.5 - Dados do Censo Agropecuário com os principais usos da terra nos municípios da área de estudo.

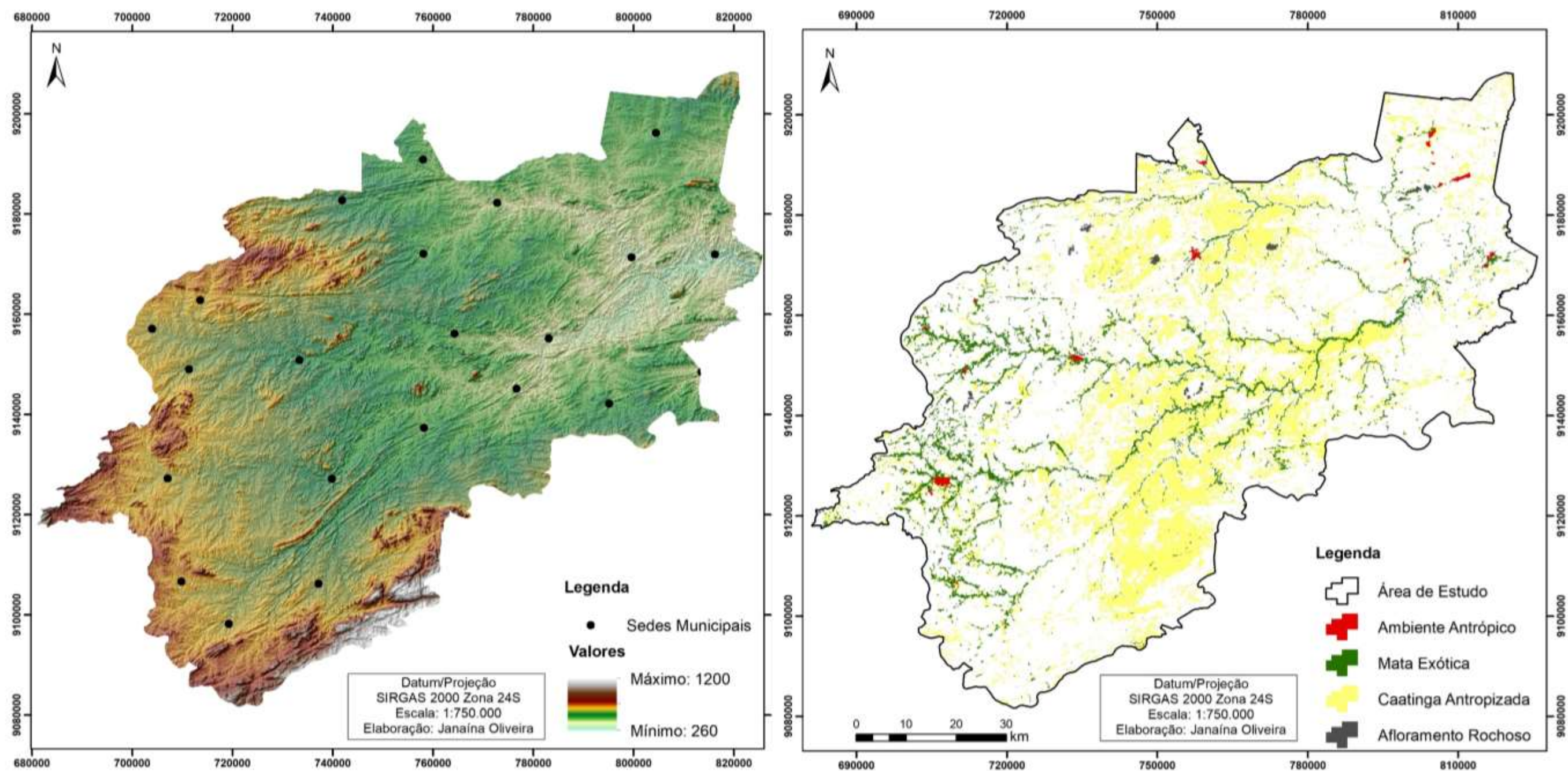
Município	População Estimada (2019)	Área dos Estabelecimentos Agropecuários (ha)	Utilização da Terra (ha)				Produto Predominante	Área Colhida (ha)	Pecuária (cabeças)		
			Lavouras	Pastagens (incluindo naturais)	Matas e Florestas	Sistemas Agroflorestais			Bovinos	Caprinos	Ovinos
Amparo	2.238	6.066	527	2.821	1.611	0	Milho	251	1.353	4.226	2.133
Miguel	6.036	33.723	872	20.091	10.752	0	Feijão Verde	41	2.582	13.381	7.680
Boa Vista	7.051	34.597	1.447	24.608	541	6.695	Palma Forrageira	235	4.210	8.524	6.535
Boqueirão	17.804	24.658	1.539	11.353	9.135	0	Palma Forrageira	64	7.466	5.747	6.897
Cabaceiras	5.611	30.941	1.115	11.983	15.484	0	Palma Forrageira	129	2.950	10.730	7.180
Camalaú	6.013	25.893	1.321	16.772	1.532	5.641	Palma Forrageira	13	2.024	13.790	8.239
Caraúbas	4.162	23.412	441	12.244	1.294	3.256	Feijão Verde	10	1.337	14.720	4.762
Congo	4.786	17.413	226	11.888	1.671	2.276	Milho	14	1.011	9.673	5.644
Coxixola	1.921	11.089	537	622	8.742	0	Milho	11	586	8.143	4.165
Monteiro	33.222	73.230	4.945	6.835	56.191	0	Palma Forrageira	1.314	17.170	27.060	23.858
Ouro Velho	3.039	9.341	737	777	6.071	0	Milho	259	2.358	2.047	1.971
Parari	1.771	15.415	1.133	2.191	2.348	8.781	Feijão Fradinho	18	1.601	6.204	6.069
Prata	4.209	16.426	1.131	1.063	11.694	0	Milho	346	2.639	4.698	4.161
Cariri	2.615	9.635	475	2.969	5.575	0	Milho	25	904	6.650	2.559
São João do Cariri	4.199	53.979	1.106	9.236	23.664	0	Palma Forrageira	11	3.602	10.595	11.072
São João do Tigre	4.422	47.854	888	4.102	40.235	0	Feijão Fradinho	99	3031	21.694	6.416
São José dos Cordeiros	3.628	23.759	1.641	1.729	13.596	4.557	Milho	145	3309	7.474	5.321
São Sebastião do Umbuzeiro	3.489	32.734	936	4.300	26.980	0	Palma Forrageira	62	3142	19.055	7.179
Serra Branca	13.699	45.351	3.154	2.402	36.904	0	Milho Forrageiro	22	3823	14.018	14.417
Sumé	16.966	48.581	2.603	12.129	28.271	0	Milho	185	5.692	20.273	21.661
Zabelê	2.240	9.608	359	222	7.832	0	Milho	34	1.351	7.245	3.293
Total	125.086	593.705	27.133	160.337	310.123	31.206	-	3.288	72.141	235.947	161.212

Fonte: IBGE (2017).

Em seguida, a Figura 4.4 apresenta o padrão de ocupação desta classe e da classe Ambiente Antrópico, representada pela área urbana e semiurbana ou áreas de extração mineral encontradas no município de Boa Vista. A organização do espaço se assemelha ao exposto por Grabois, Marques e Silva (1991): a população local e o desenvolvimento de atividades agrícolas estão concentrados nas partes mais baixas, considerados mais úmidos e com solos mais propícios; enquanto áreas recobertas com Caatinga são, gradativamente, utilizadas para pastoreio e extrativismo vegetal.

Embora a Caatinga Antropizada revele a ocupação nas partes mais baixas, Antongiovanni et al. (2019) consideram que a perturbação antropogênica na Caatinga ocorre por processos menos evidentes do que conversão de hábitat encontradas nos outros biomas. A barreira climática restringe, por exemplo, a existência de grandes extensões de monocultura; mas a degradação encontra-se difundida, com práticas de manejo da população local considerada, muitas vezes, como insustentáveis. Neste sentido, Meiado et al. (2020) complementam que a sustentabilidade dos socioecossistemas na Caatinga está na reorganização do uso do território, no estímulo de práticas produtivas sustentáveis de grande valor cultural e de bioprospecção, a partir do uso potencial da biodiversidade para obter produtos e processos com elevado valor comercial e econômico.

Figura 4.4 - Mapa de relevo (à esquerda) e padrão de distribuição das classes Caatinga Antropizada e Ambiente Antrópico.



Fonte: STRM (2021) e USGS (2018)

Além da degradação ocasionada pelos animais de pastejo e extrativismo vegetal, outra atividade antrópica recebe destaque na área de estudo: as minerações de bentonita no município de Boa Vista. Silva (2020) apontam estas jazidas como as principais no Brasil, no qual a Paraíba foi responsável por 60,8% da produção bruta do país em 2014. Estas atividades estão representadas na paisagem de forma pontual, mas estão localizadas em uma importante área para geoconservação, prevista na proposta de criação do Geoparque Cariri.

As feições geomorfológicas iniciadas durante o Cenozoico são destacadas por Lages et al. (2018), compostas por basaltos com estruturas de lavas almofadadas, brechas lapilíticas e rochas piroclásticas; basaltos maciços com disjunções colunares; registros fósseis de antigas biotas, principalmente impressões de folhas de angiospermas com aproximadamente 23Ma. e registros rupestres.

Este patrimônio geológico e geomorfológico encontra-se fortemente pressionado pela extração de bentonita. De acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2022), a região de estudo possui 29 áreas com processos minerários ativos: 20 em concessão de lavra, com 2.940,46ha; uma com requerimento de lavra, com 4,17ha; sete com autorização de pesquisa mineral, com 3.666,98ha; e uma com requerimento de pesquisa, com 69,13ha. Conforme os dados da ANM, as concessões de lavra mais antigas na região foram emitidas em 1964, mas os interesses na bentonita permanecem recentes, como a última obtenção de autorização de pesquisa obtida em 2021.

Embora os objetivos de uso dos elementos da geodiversidade entre as atividades minerárias e a geoconservação possam ser conflitantes, Dias (2015) destaca o papel fundamental das minerações na sociedade e comunidades locais, com pagamento de impostos, *royalties* e desenvolvimento socioeconômico de moradores, que pode ser potencializado com a criação de Geoparques. Para isso, as práticas de responsabilidade socioambiental das minerações devem ser incorporadas desde sua implantação até o encerramento das atividades, a partir de um plano de gestão eficiente.

Neste sentido, em uma análise mais detalhada sobre as fases dos processos minerários na área de estudo, foram identificados apenas três protocolos de Plano de Fechamento de Mina (PFM¹⁶) realizados em março de 2022, todos referentes à mesma empresa. Cabe lembrar que Resolução ANM nº 68/2021 estabelece que todos os empreendimentos em operação ou com

¹⁶ De acordo com a Resolução ANM nº 68/2021, entende-se como PFM o “conjunto de procedimentos para o descomissionamento da área da mina após a atividade de mineração, envolvendo a desmobilização das estruturas provisórias de suporte às operações de lavra e beneficiamento, a estabilização física e química das estruturas permanentes e seus monitoramentos, bem como a habilitação da área para um novo aproveitamento mineral ou outro uso futuro”.

permissão para aproveitamento do recurso mineral atualizem e apresentem o PFM, de modo a viabilizar a transparência e o caráter sustentável da atividade. Como o prazo definido pela resolução de até 12 meses a partir de sua publicação, em 30 de abril de 2021, pode-se considerar que as demais atividades estão passíveis de infração administrativa pelo descumprimento do empreendedor de suas obrigações legais.

Ademais, por ser considerada atividade modificadora do meio ambiente, a extração de minério é passível de licenciamento ambiental, conforme Resoluções CONAMA nº 001/1986 e 237/1997. Na Paraíba, a Superintendência de Administração do Meio Ambiente (SUDEMA) é o órgão estadual com competência licenciatória, regulamentada pela Lei Estadual nº 41.560/2021 e novo texto da Norma Administrativa nº 101, publicado em janeiro de 2022. Porém, das 20 áreas em concessão de lavra emitidas pela ANM, apenas sete licenças ambientais de operação estão disponíveis no site da SUDEMA, sendo cinco para extração mineral/lavra e duas para beneficiamento.

Mesmo sem acesso aos PFMs ou de informações detalhadas sobre estudos ambientais necessários para obtenção das licenças ambientais, durante os trabalhos de campo foram identificadas áreas com ações de recuperação ambiental, possivelmente como medida de mitigação da degradação resultante das atividades minerárias. A Figura 4.5 apresenta estas áreas, com plantio de macambira e fumo bravo.

Figura 4.5 - Áreas degradadas em zona de exploração de bentonita, município de Boa Vista, com plantio de mudas identificadas em campo (coordenadas UTM 9188761mS/808670mE e 9187401mS/809645mE).



Foto: Janaína Oliveira (2019) e Luciano Oliveira (2019).

Para Silva (2020), a revitalização de áreas degradadas ao longo dos anos na região mostra-se deficiente, com presença de erosão e ausência de flora e fauna da Caatinga. No entanto, o autor apresenta melhorias no estudo de caso de recuperação ambiental em duas áreas

de lavra de bentonita no município de Boa Vista, que viabilizaram o controle dos processos erosivos e retorno da vegetação nativa, com consequente aparecimento da fauna da região.

De forma sucinta, o processo envolve o fechamento, preenchimento e nivelamento das cavas a serem recuperadas; adubação com depósito oriundo da etapa de decapeamento durante a extração da bentonita – material orgânico conhecido como massapé; preparação e plantio de mudas, com o cercamento e isolamento das áreas por um determinado período de tempo, a fim de evitar o acesso de ovinos, caprinos e bovinos. As mudas de macambira (*Bromelia laciniosa*), mandacaru (*Cereus giganteus*) e xique-xique (*Pilosocereus gounellei*) foram selecionadas para contenção de erosão; enquanto coroa de frade (*Melocactus zehntneri*), palmatória (*Opuntia leucotrincha*), palma (*Opuntia leucotrincha*), facheiro (*Cereus squamosus*), pião (*Jatropha mollissima*), catingueira (*Caesalpinia bracteosa*) e umburana (*Cecropia* sp.) foram plantadas em áreas planas e suaves (SILVA, 2020).

No entanto, estas ações de recuperação ambiental são pontuais e não correspondem ao esperado em uma gestão eficiente das atividades minerárias, sobretudo frente às especificidades geológicas, geomorfológicas, arqueológicas e paleontológicas da região. A exemplo cita-se os depósitos fossilíferos existentes, considerados propriedades da Nação pelo Decreto-Lei nº 4146/42. No entanto, há forte evidência de omissão dos órgãos públicos competentes e das empresas minerárias, já que o cenário atual indica a deficiência na investigação e no salvamento deste patrimônio cultural brasileiro. Aparentemente, grande parte dos fósseis existentes é perdida durante a exploração e beneficiamento da bentonita; e alguns encontram-se expostos na entrada das usinas, às margens da estrada.

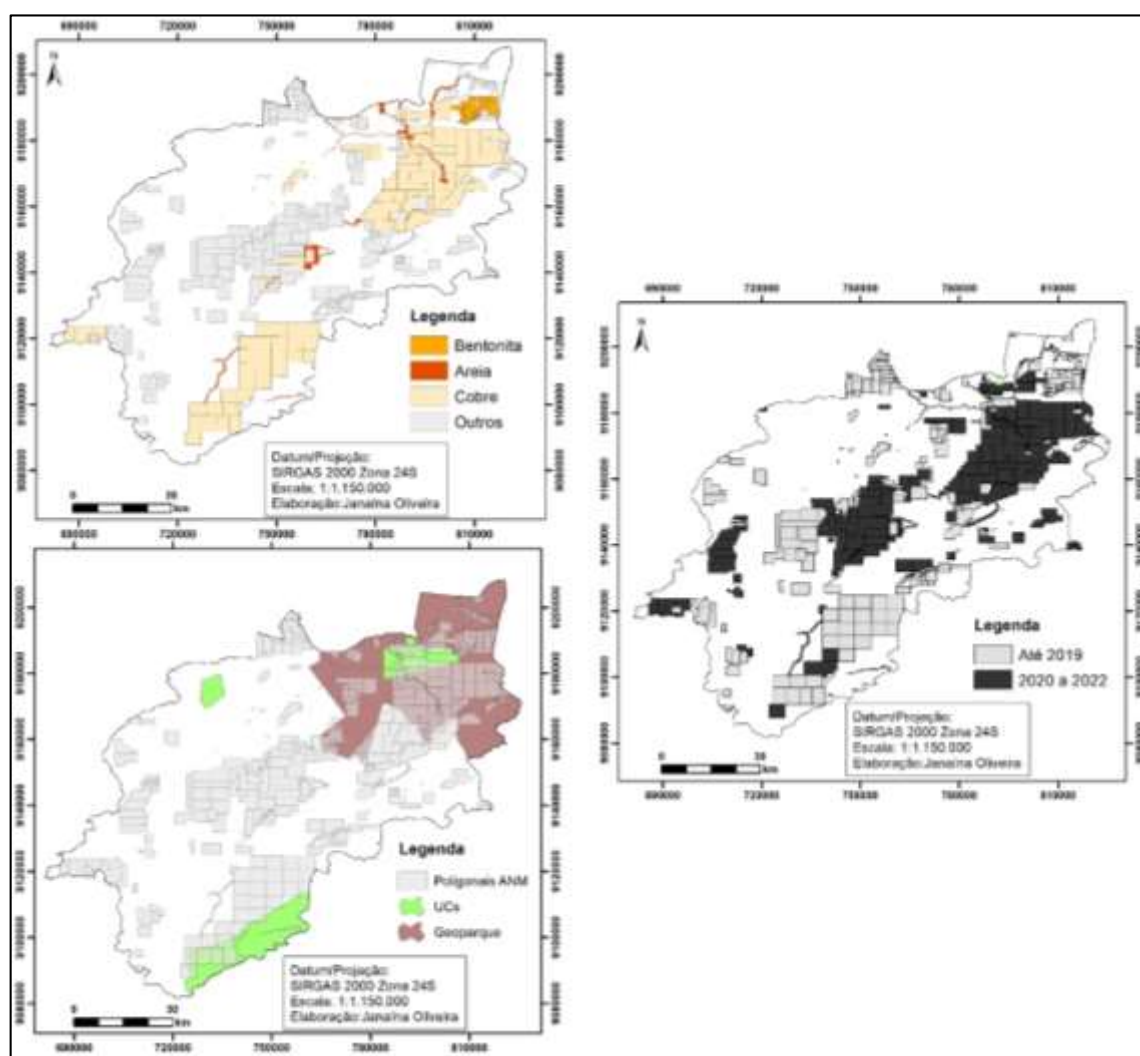
Dias (2015) apresenta uma ameaça similar existente na bacia sedimentar do Araripe. No Ceará, a perda dos elementos fósseis está associada à exploração do calcário laminado, argila e gipsita, sendo muitas vezes abandonados em contentores ou triturados na fabricação de cimento; agravada ainda pela ocorrência do comércio ilegal, prática adotada pelos moradores locais para complementar a renda familiar. No entanto, a autora ressalta a criação do Geoparque Araripe como uma iniciativa que concilia a mineração e a proteção abiótica a partir da gestão e participação dos atores locais, da educação ambiental para formação de uma identidade com o lugar e, assim, garantir efetiva proteção e conservação do patrimônio existente.

Na região do Cariri Paraibano, além da pressão da extração de bentonita no município de Boa Vista, outra informação disponível na ANM é passível de destaque: o acréscimo quantitativo nos interesses minerários por toda a área de estudo, mesmo com cenário pandêmico promovido pelo novo coronavírus (Covid-19). Até 2019, os processos existentes eram representados por 280 poligonais, que passaram para 359 em 2020, 411 em 2021 e, até junho

de 2022, correspondiam a 431 poligonais. De todas as substâncias minerais alvo, predomina-se o minério de cobre, que equivalem a 68 novas áreas – ainda que 35 delas estejam aptas para disponibilidade por renúncia da autorização de pesquisa ou desistência do requerimento de pesquisa e irão compor o Sistema de Oferta Pública e Leilão de Áreas (SOPLE¹⁷).

Em menor proporção, mas como indicadores dos interesses mercadológicos, também se destacam areia e quartzito, vinculados à construção civil e revestimento, com respectivamente 18 e oito poligonais; e calcário para corretivo de solo, com nove poligonais. A Figura 4.6 apresenta a distribuição espacial dos processos minerários em interface com as áreas de interesse para conservação na região de estudo.

Figura 4.6 - Processos minerários e áreas de interesse para conservação existentes na região de estudo.



Fonte: ANM (2022), SUDEMA (2022), ICMBio (2022), SiCAR (2020), RPPN Almas e CPRM (2018).

¹⁷ O SOPLE é uma ferramenta da ANM que libera, por rodadas, uma grande quantidade de áreas por oferta pública (quando são identificados interessados nas áreas) ou leilão eletrônico (disputa por maior valor financeiro das áreas).

Nota-se na Figura 4.6 que, em termos de planejamento estratégico, a implantação do geoparque poderá contribuir para a preservação das paisagens associada com o desenvolvimento sustentável da região nordeste da área de estudo. Conforme os princípios de criação, a valorização do patrimônio geológico deve ser incorporada pela população local com novas oportunidades de renda; pelo governo com a gestão territorial e o incentivo ao geoturismo; e pelas instituições de ensino nas diversas esferas, com a disseminação de estudos, pesquisas e informações sobre a relevância da região. Porém, as UCs mostram-se espacialmente isoladas frente às pressões antropogênicas existentes – assunto que será abordado no subitem a seguir.

4.3 Métricas da Paisagem

De acordo com Cheung, Brierley e O’Sullivan (2016), as métricas são algoritmos utilizados na Ecologia de Paisagens que permitem caracterizar quantitativa e qualitativamente a composição e a configuração da paisagem. Quando associada à teoria dos grafos, as métricas possibilitam uma maior compreensão sobre a influência da estrutura sobre a conectividade da paisagem.

Neste estudo, as métricas de área e tamanho, forma e borda, área núcleo, subdivisão e conectividade foram utilizadas para subsidiar a análise do aspecto estrutural da paisagem na perspectiva geográfica da Ecologia de Paisagens. Os resultados estão apresentados em subitens conforme agrupamento das métricas proposto por McGarrial (2012).

4.3.1 – Métricas de Área e Tamanho

Para mensurar a área e o tamanho dos fragmentos foram aplicadas as métricas de área da classe (CA), número de fragmentos (NumP), tamanho médio dos fragmentos (MPS) e desvio padrão do tamanho médio dos fragmentos (PSSD) das cinco classes mapeadas. A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos em nível de paisagem.

Tabela 4.6 – Resultados das métricas de área e tamanho em nível de paisagem.

Classe	NumP	CA (ha)	CA (%)	MPS (ha)	PSSD (ha)
Afloramento Rochoso	280	784	0,09	2,80	14,02
Caatinga Antropizada	17.038	204.699	22,23	12,01	401,03
Mata Exótica	4.534	26.669	2,90	5,88	21,90
Caatinga Densa	10.013	145.765	15,83	14,56	108,18
Caatinga Rarefeita	8.283	539.822	58,63	65,17	4.951,98
Corpo Hídrico	103	1.431	0,16	13,90	59,83
Ambiente Antrópico	44	1.601	0,17	36,39	71,81
Paisagem	40.295	920.771		-	-

Fonte: elaboração própria (2022).

Os resultados da área de classe revelam que a Caatinga Rarefeita é a unidade dominante da paisagem ($CA = 539.822ha = 58,63\%$) e, pelos valores obtidos pela métrica número de fragmentos ($NumP = 8.283$ fragmentos), indica que a classe apresenta baixa fragmentação quando comparada com as classes Caatinga Antropizada (17.038 fragmentos, que totalizam $204.699ha = 22,23\%$) e Caatinga Densa (10.013 fragmentos, que somam $145.765ha = 15,83\%$).

A matriz representada por uma classe de vegetação de Caatinga onde a interferência das ações humanas é menos evidente é um resultado positivo e requer atenção para disciplinar o uso nestes ambientes, que também apresentaram o maior tamanho médio dos fragmentos da paisagem ($MPS = 65,17ha$). No entanto, o elevado valor do desvio padrão ($PSSD = 4.951,98ha$) revela alta variação no tamanho dos fragmentos e indica alta variação no tamanho dos fragmentos, que podem ser muito maiores ou muito menores que a média.

O oposto é evidenciado na Mata Exótica. Dentre as classes de vegetação, essa apresenta os menores valores de área de classe ($CA = 4.534ha$), número de fragmentos ($NumP = 4.534$) e média do tamanho dos fragmentos ($MPS = 12,01ha$). Todavia, o baixo desvio padrão encontrado ($PSSD = 21,90ha$) indica uniformidade dos fragmentos da classe ao longo da paisagem, notoriamente identificada nas margens dos cursos d'água. Como a classe representa a predominância da algaroba, esta uniformidade na distribuição pode se tornar uma ameaça à flora autóctone, sobretudo das espécies que formam a mata ciliar, que também sofre pela pressão antrópica pela fertilidade do solo e ocupação urbana ou semiurbana.

Ainda que exerçam fundamental papel na composição e configuração da paisagem, as classes Ambiente Antrópico, Afloramento Rochoso e Corpo Hídrico tiveram baixa representatividade nos resultados de área e tamanho, que pode ser justificado por estarem encontradas pontualmente na matriz. Para auxiliar na compreensão da composição da paisagem sob aspecto da cobertura vegetal, as mesmas métricas foram aplicadas em nível de classe

conforme agrupamentos pré-estabelecidos indicados na seção anterior, apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resultados das métricas de área e tamanho em nível de classe.

Tamanho dos Fragmentos (ha)	Caatinga Antropizada			Mata Exótica			Caatinga Rarefeita			Caatinga Densa		
	NumP	TA (ha)	%	NumP	TA (ha)	%	NumP	TA (ha)	%	NumP	TA (ha)	%
< 1	8.090	3.441,81	1,68	1.829	794,59	2,98	4.300	1.604,78	0,30	3.113	1.424,71	0,98
1-5	6.049	13.751,62	6,72	1.780	4.186,14	15,70	2.759	6.208,34	1,15	4.088	9.866,99	6,77
5-10	1.353	9.478,33	4,63	441	3.094,90	11,60	559	3.900,14	0,72	1.182	8.317,41	5,71
10-15	506	6.166,49	3,01	157	1.888,85	7,08	201	2.424,17	0,45	500	6.038,99	4,14
15-20	252	4.358,33	2,13	69	1.204,34	4,52	104	1.796,91	0,33	256	4.418,71	3,03
20-25	146	3.264,85	1,59	58	1.294,41	4,85	77	1.700,81	0,32	153	3.417,86	2,34
25-30	107	2.948,99	1,44	40	1.093,95	4,10	42	1.152,12	0,21	120	3.282,25	2,25
30-35	68	2.207,97	1,08	28	905,19	3,39	36	1.155,12	0,21	80	2.603,98	1,79
35-40	61	2.293,99	1,12	23	862,29	3,23	29	1.083,03	0,20	58	2.170,27	1,49
40-45	50	2.125,26	1,04	17	716,02	2,68	22	930,61	0,17	52	2.213,81	1,52
45-50	46	2.173,53	1,06	12	567,87	2,13	15	714,04	0,13	42	1.993,59	1,37
50-60	48	2.602,07	1,27	19	1.019,95	3,82	17	943,32	0,17	59	3.248,32	2,23
60-70	32	2.066,75	1,01	10	647,07	2,43	19	1.227,14	0,23	39	2.507,84	1,72
70-80	33	2.437,61	1,19	6	458,71	1,72	9	678,27	0,13	38	2.814,96	1,93
80-90	17	1.444,77	0,71	5	429,84	1,61	8	682,32	0,13	15	1.292,28	0,89
90-100	21	1.987,60	0,97	4	371,14	1,39	8	754,14	0,14	12	1.132,96	0,78
100-200	85	11.596,89	5,67	24	3.347,00	12,55	42	5.674,73	1,05	95	13.620,72	9,34
200-300	25	6.025,76	2,94	7	1.624,30	6,09	17	4.333,95	0,80	33	8.230,09	5,65
300-400	11	3.792,72	1,85	2	632,79	2,37	4	1.457,89	0,27	19	6.530,27	4,48
400-500	4	1.878,52	0,92	2	903,20	3,39	0	0,00	0,00	17	7.787,43	5,34
500-1000	21	14.999,11	7,33	1	626,63	2,35	4	2.844,00	0,53	25	18.347,50	12,59
≥ 1000	13	103.656,14	50,64	0	0,00	0,00	11	498.556,25	92,36	17	34.503,62	23,67
Total	17.038	204.699,12	100	4.534	26.669,18	100	8.283	539.822,09	100	10.013	145.764,55	100

Fonte: elaboração própria (2022).

Conforme a Tabela 4.7, além de unidade dominante da paisagem, a Caatinga Rarefeita apresenta os maiores valores de área total da classe (TA = 498.556,25ha), onde 92,36% de toda a classe estão concentrados em apenas 11 fragmentos maiores de 1.000ha. Assim, apesar do elevado número de fragmentos menores que 1ha (NumP = 4.300), o total de área deste montante equivale apenas a 0,30%. Considera-se este resultado bastante expressivo por demonstrar baixa fragmentação da classe, além de explicar positivamente os elevados valores do desvio padrão (PSSD = 4.951,98ha, conforme Tabela 4.6).

De forma positiva, porém menos expressiva, a Caatinga Densa também apresentou elevados valores de TA nos grupos dos maiores fragmentos: 23,67% (34.503,62ha) da área total da classe concentram-se em 17 manchas maiores que 1.000ha; 12,59% (18.347,50ha) estão no grupo entre 500ha a 1.000ha composto por 25 manchas; e 9,34% (13.620,72ha) entre os 95 fragmentos de 100ha a 200ha. No entanto, os 54,40% restantes da classe encontram-se representados pelos diversos tamanhos de fragmentos, com destaque para o grupo entre 1ha a

5ha, que correspondem a 6,77% (9.866,99ha) da área distribuídos em 4.088 manchas; e do grupo entre 5ha a 10ha, com 1.182 fragmentos que equivalem a 5,71% (8.317,41ha) da classe.

Antongiovanni, Venticinque e Fonseca (2018) verificaram um padrão de fragmentação similar por toda a Caatinga. Os autores identificaram que apesar da perda de aproximadamente 50% do bioma e dos fragmentos estarem distribuídos irregularmente pela paisagem, o elevado número de manchas pequenas corresponde a um baixo percentual de área total de hábitat. Desta forma, a área remanescente é representada por fragmentos de grande porte, que indica uma conectividade potencial da paisagem.

A Caatinga Antropizada também se comportou de forma semelhante ao considerar que 50,64% (103.656,14ha) da classe está representada por 13 fragmentos acima de 1.000ha. O restante está difundido pelos demais grupos de fragmentos, com destaque para as manchas entre 500ha a 1.000ha e entre 1ha a 5ha, com representatividade semelhante em relação à área (14.999,11ha e 13.751,62ha, respectivamente), porém com quantitativo de fragmentos bem diferente (NumP = 21 e 6.049, respectivamente). Como a classe corresponde à uma caatinga visivelmente mais degradada, com exposição de solo e significativa rarefação da vegetação, estes resultados podem indicar, ainda que de modo incipiente, a expansão das atividades antrópicas e a transformação do espaço geográfico com avanço gradual do uso da Caatinga.

Para Vendruscolo et al. (2020), as áreas mais conservadas da Caatinga do semiárido paraibano podem restringir naturalmente o acesso de animais domesticados pelos espinhos da vegetação nativa; mas não o uso antrópico, que também reduz a fertilidade do solo e dificulta a restauração da vegetação lenhosa. Com baixa densidade da vegetação, o solo torna-se mais susceptível aos efeitos erosivos da precipitação pluviométrica e da incidência solar, expandindo as áreas em processo de desertificação.

Mesmo com o uso rural predominante, fatores como o crescimento populacional e variações climáticas e econômicas impulsionam o desmatamento da Caatinga para avanço das terras agrícolas e de sobrepastoreio. Desta forma, a ampla redução da fertilidade do solo resultante da forte dependência destas atividades com práticas tradicionais de manejo, muitas vezes arcaicas, é agravada pelo acesso limitado e/ou pela menor receptividade da população em adotar novas tecnologias sustentáveis (VIEIRA et al., 2020).

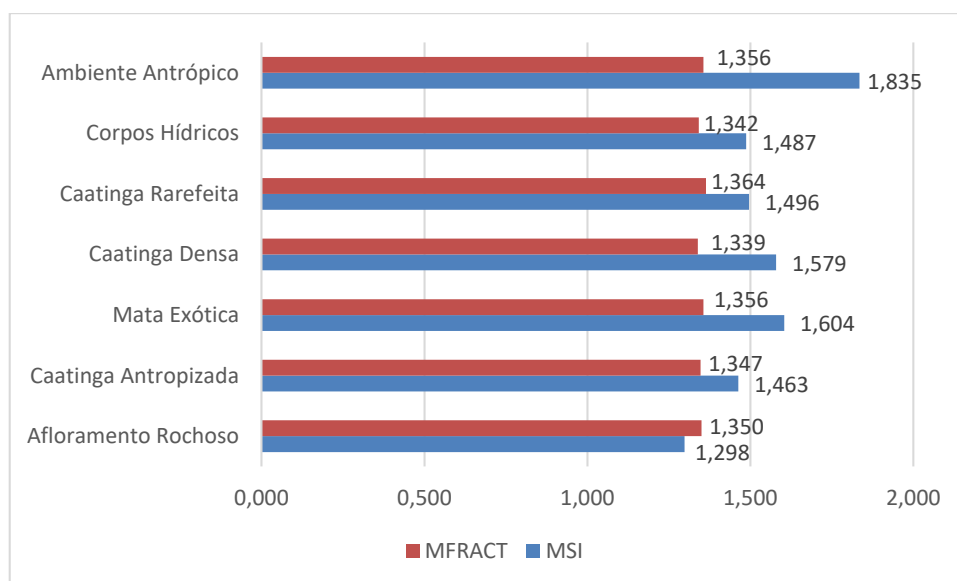
Na Mata Exótica, a uniformidade dos fragmentos é demonstrada pelas métricas em nível de paisagem. Em nível de classe, os resultados apontam uma diferença no padrão dos fragmentos observados nas classes de Caatinga. Além da Mata Exótica não possuir fragmentos maiores que 1.000ha, o grupo entre 1ha a 5ha apresentou resultados expressivos tanto em quantidade de manchas (NumP = 1.780) quanto em área da classe, com 4.186,14ha (15,70%).

Em seguida, 24 fragmentos entre 100ha a 200ha representam 12,55% (3.347ha); e 441 fragmentos entre 5ha a 10ha correspondem a 11,60% (3.094,90ha). Juntos eles totalizam 39,85% da classe; sendo os demais grupos da classe com distribuição similar, o que pode ser interpretado como um aspecto positivo para controle e manejo das manchas da espécie invasora.

4.3.2 – Métricas de Forma, Borda e Área Núcleo

As métricas de forma, borda e área núcleo foram aplicadas para identificar o grau de complexidade do formato geométrico dos fragmentos e sua relação com as bordas e áreas no interior das manchas. A métrica MSI (Índice Médio da Forma) indica o quanto o formato dos fragmentos se aproxima de uma circunferência, que terá valor mínimo equivalente a um. A métrica MFRAC (dimensão fractal mediana) indica a complexidade do perímetro do fragmento: os valores variam de um, que corresponde às formas mais simples, até dois, com formatos mais irregulares e complexos. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Gráfico das métricas de forma aplicadas em nível de paisagem.



Fonte: elaboração própria (2022).

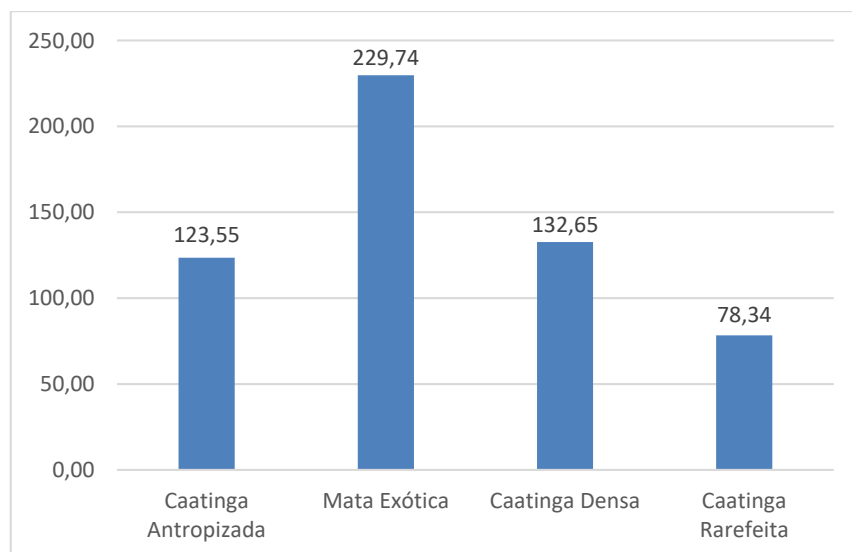
Os resultados na Figura 4.7 apontam que as manchas mais regulares, com formatos próximos a uma circunferência, estão representadas pelos afloramentos rochosos (MSI=1,298); e os formatos mais irregulares correspondem à classe ambiente antrópico (MSI=1,835). Também era esperado que a Mata Ciliar tivesse valores elevados de MSI (com 1,604) dentre as

classes de vegetação, em consequência do padrão de distribuição da algaroba nas margens de cursos d'água.

Já na Caatinga Densa, os valores obtidos pela métrica ($MSI=1,579$) revelam o formato irregular, que pode estar associado às feições geológicas e litologia, às áreas mais elevadas da paisagem e ao limite territorial das UCs existentes. Estes fatores abióticos e de proteção legal podem restringir o uso dos recursos naturais e, assim, interferir na disposição espacial de áreas com maior densidade de vegetação. Outro aspecto identificado refere-se aos resultados da dimensão fractal mediana ($MFRAC$), que não apresentou variações representativas entre as classes de uso e cobertura da terra. Desta forma, embora as manchas existentes na paisagem tenham formatos irregulares, as mesmas não apresentam grandes complexidades de forma.

Para complementar a análise, aplicou-se a métrica de densidade de borda (ED) que obtém o montante de borda, ou seja, o perímetro que representa a zona de transição entre as unidades de paisagem. A Figura 4.8 mostra os resultados da razão entre comprimento das bordas e a área das classes de vegetação na paisagem, expressos em metros por hectare.

Figura 4.8 - Métrica de densidade de borda (ED) das classes de vegetação na paisagem.



Fonte: elaboração própria (2022).

Conforme a Figura 4.8, a Caatinga Rarefeita mostra-se bastante agregada, com menor densidade de borda ($ED=78,34\text{m/ha}$), resultado associado ao fato da classe ser a unidade dominante da paisagem (rever Tabela 4.6). O oposto é identificado na Mata Exótica: o elevado índice de ED ($229,74\text{m/ha}$) indica a fragmentação generalizada da classe, neste caso, não pela perda de habitat nativo, mas pela expansão de fragmentos compostos predominantemente por vegetação exótica dispostos em toda a paisagem.

Com valores intermediários, as classes Caatinga Densa e Caatinga Antropizada tiveram comportamentos similares entre si quanto à densidade de borda, com $ED=132,65\text{m/ha}$ e $123,55\text{m/ha}$, respectivamente. Porém, quando associados com os índices de forma (rever Figura 4.7), os resultados indicam que a Caatinga Densa está mais sujeita ao efeito de borda por apresentar formatos mais complexos e irregulares.

De acordo com Antongiovanni, Venticinque e Fonseca (2018), a análise do efeito de borda permite entender o padrão de fragmentação habitats nativos e seu grau de exposição a agentes exógenos, inclusive antropogênicos. Estes efeitos tendem a ser mais intensos próximos às bordas, que percolam para o interior das manchas por uma determinada distância até ser considerada uma área potencialmente intacta.

Apesar de alterar a estrutura e a biomassa da floresta, Dantas (2016) complementa que em cada microhabitat formado haverá diferentes respostas nos padrões de riqueza e diversidade de espécies. Estudos apresentados pela autora revelam que a partir de 50m de borda ocorre a estabilidade microclimática, com redução gradual dos impactos após 100m, a depender do nível de perturbação e da composição de espécies a serem observadas.

Estas distâncias (50m e 100m de borda) foram consideradas suficientes para mensurar a perda potencial de habitat e o isolamento da vegetação na perspectiva de paisagem, utilizadas como *buffer* para aplicar a métrica de área núcleo. Como as classes Caatinga Antropizada e Caatinga Rarefeita possuem vegetação mais esparsa que, conseqüentemente, traria certa fragilidade para mensurar os efeitos de borda nestes ambientes sem investigação detalhada de campo, optou-se em analisar as métricas apenas na Mata Exótica e Caatinga Densa.

Aplicadas em nível de paisagem, os resultados relevaram que para uma borda de 50m, 2.792 fragmentos de Mata Exótica não apresentaram área núcleo (61,58% do total de fragmentos da classe); e 710 apresentaram área central disjunta, isto é, manchas formadas no interior das próprias manchas. A Caatinga Densa apresentou 4.902 fragmentos sem área núcleo (48,96% do total de fragmentos da classe) e 2.040 fragmentos com área central disjunta.

As métricas Índice da Área Núcleo (CAI) e Área Núcleo Total da Classe (TCCA) mostram a perda do montante de habitat na configuração da paisagem quando considerados os 50m de borda: na Mata Exótica equivale a 79,13% (redução de $CA=26.669,18\text{ha}$ para $TCCA=5.566,92\text{ha}$ e $CAI=20,87\%$); e na Caatinga Densa a 52,59% (de $CA=145.764,55\text{ha}$ para $TCCA=69.110,89\text{ha}$ e $CAI=47,41\%$).

As mesmas métricas foram aplicadas em nível de classe para detalhar o tamanho total de áreas núcleo em cada grupo de fragmento. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Métricas de Área Núcleo em nível de classe para borda de 50m.

Tamanho dos Fragmentos (ha)	Mata Exótica (borda de 50m)					Caatinga Densa (borda de 50m)				
	NumP	No core area	TCCA (ha)	CA (ha)	CAI (%)	NumP	No core area	TCCA (ha)	CA (ha)	CAI (%)
< 1	1.829	1.829	0,00	794,59	0,00	3.113	3.111	0,00	1.424,71	0
1-5	1.780	951	116,20	4.186,14	2,78	4.088	1.769	464,11	9.866,99	4,7
5-10	441	12	325,16	3.094,90	10,51	1.182	22	1.193,93	8.317,41	14,35
10-15	157	0	285,22	1.888,85	15,10	500	0	1.343,10	6.038,99	22,24
15-20	69	0	205,64	1.204,34	17,07	256	0	1.182,73	4.418,71	26,77
20-25	58	0	248,61	1.294,41	19,21	153	0	1.030,66	3.417,86	30,16
25-30	40	0	241,03	1.093,95	22,03	120	0	1.090,10	3.282,25	33,21
30-35	28	0	198,20	905,19	21,90	80	0	917,67	2.603,98	35,24
35-40	23	0	214,51	862,29	24,88	58	0	815,60	2.170,27	37,58
40-45	17	0	141,80	716,02	19,80	52	0	833,05	2.213,81	37,63
45-50	12	0	149,75	567,87	26,37	42	0	841,99	1.993,59	42,24
50-60	19	0	254,28	1.019,95	24,93	59	0	1.303,10	3.248,32	40,12
60-70	10	0	178,57	647,07	27,60	39	0	1.074,97	2.507,84	42,86
70-80	6	0	125,58	458,71	27,38	38	0	1.251,78	2.814,96	44,47
80-90	5	0	124,35	429,84	28,93	15	0	695,99	1.292,28	53,86
90-100	4	0	127,97	371,14	34,48	12	0	505,15	1.132,96	44,59
100-200	24	0	1.230,78	3.347,00	36,77	95	0	6.924,58	13.620,72	50,84
200-300	7	0	626,30	1.624,30	38,56	33	0	4.783,14	8.230,09	58,12
300-400	2	0	261,34	632,79	41,30	19	0	3.766,73	6.530,27	57,68
400-500	2	0	312,89	903,20	34,64	17	0	4.626,69	7.787,43	59,41
500-1000	1	0	198,72	626,63	31,71	25	0	11.368,35	18.347,50	61,96
≥ 1000	0	0	0,00	0,00	0,00	17	0	23.097,47	34.503,62	66,94
Total	4.534	2.792	5.566,92	26.669,18		10.013	4.902	69.110,89	145.764,55	

Em ambos os casos, nota-se que o grupo de fragmentos menores de 1ha foi eliminado da paisagem, com TCCA e CAI equivalentes a 0; e os grupos entre 1 a 5ha e entre 5 a 10ha apresentaram perda de área núcleo após determinar a borda de 50m. Na Mata Exótica, o grupo entre 300 a 400ha permaneceu com a menor perda de área central (CAI=41,30%) representadas em apenas dois fragmentos. A análise integrada das métricas revela que os poucos fragmentos maiores (NumP a partir de 90ha) foram responsáveis pelas maiores contribuições de área central da classe e respectivo índice de área central (TCCA e CAI), com exceção do grupo 100 e 200ha, representadas por uma quantidade de fragmentos muito maior (NumP = 24).

Ao comparar com a Caatinga Densa, os resultados mostram-se positivos para a manutenção da paisagem natural na área de estudo. Há um elevado número de fragmentos (NumP), que embora possa ser interpretado como consequência da fragmentação, quando associado às métricas TCCA e CAI indicam que a área núcleo se mantém preservada em uma borda de 50m – sobretudo nos maiores grupos de fragmentos, com representatividade máxima equivalente a 66,94%.

Em estudo que engloba todo o bioma, Antongiovanni, Venticinque e Fonseca (2018) também identificaram que os maiores fragmentos são responsáveis pela manutenção de Caatinga remanescente, apesar da histórica e significativa perda da cobertura original. No entanto, quando analisada na perspectiva de área núcleo, há redução parcial ou total destes fragmentos à medida que se aumenta a largura do efeito de borda, até que toda a Caatinga seja considerada em estado alterado.

O mesmo padrão é identificado na região do Cariri Paraibano após aplicar a borda de 100m. Em nível de paisagem, a Caatinga Densa também apresentou redução no montante de hábitat e passa a representar apenas 25,11% (TCCA=36.600,91ha) da região do Cariri Paraibano, com 8.521 fragmentos sem área núcleo e 589 com área núcleo disjunta. Estes resultados corroboram com a análise da métrica ED (rever Figura 4.8) e apontam a maior susceptibilidade das manchas ao efeito de borda.

A Tabela 4.9 apresentam os resultados obtidos pelas métricas em nível de classe. O Índice da Área Núcleo (CAI) e a Área Núcleo Total da Classe (TCCA) indicam que apesar do aumento na quantidade de fragmentos sem área núcleo (de 4.902 em borda de 50m para 8.521 em borda de 100m), a perda de hábitat da Caatinga Densa está relacionada com a eliminação de quase todo o grupo de fragmentos entre 1 a 5ha. Somado ao grupo menor que 1ha, 71,83% do total de manchas da classe deixam de existir na paisagem, mas que correspondem a apenas 7,75% da área total da classe.

Tabela 4.9 - Métricas de área núcleo aplicadas em nível de paisagem.

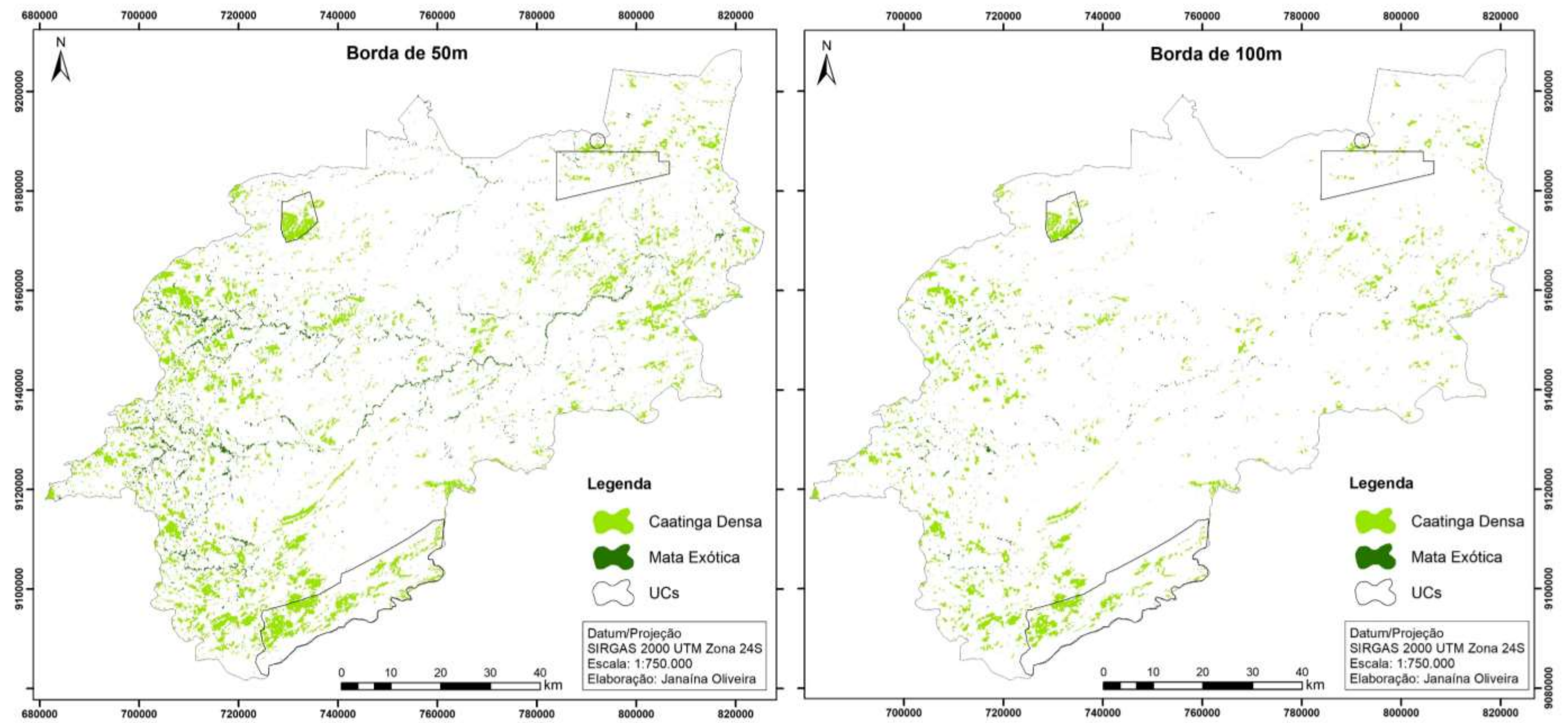
Tamanho dos Fragmentos (ha)	Mata Exótica (borda de 100m)					Caatinga Densa (borda de 100m)				
	NumP	No core area	TCCA (ha)	CA (ha)	CAI (%)	NumP	No core area	TCCA (ha)	CA (ha)	CAI (%)
< 1	1.829	1.829	0,00	794,59	0,00	3.113	3.113	0,00	1.424,71	0
1-5	1.780	1.780	0,00	4.186,14	0,00	4.088	4.079	0,03	9.866,99	0
5-10	441	402	3,39	3.094,90	0,11	1.182	980	25,75	8.317,41	0,31
10-15	157	115	10,72	1.888,85	0,57	500	242	111,06	6.038,99	1,84
15-20	69	36	11,40	1.204,34	0,95	256	69	159,97	4.418,71	3,62
20-25	58	24	17,50	1.294,41	1,35	153	23	184,31	3.417,86	5,39
25-30	40	11	27,53	1.093,95	2,52	120	8	251,47	3.282,25	7,66
30-35	28	7	22,14	905,19	2,45	80	4	231,36	2.603,98	8,88
35-40	23	2	32,38	862,29	3,76	58	1	230,65	2.170,27	10,63
40-45	17	4	12,73	716,02	1,78	52	1	234,53	2.213,81	10,59
45-50	12	1	19,27	567,87	3,39	42	1	294,04	1.993,59	14,75
50-60	19	2	29,61	1.019,95	2,90	59	0	411,23	3.248,32	12,66
60-70	10	0	28,97	647,07	4,48	39	0	390,20	2.507,84	15,56
70-80	6	0	18,84	458,71	4,11	38	0	491,18	2.814,96	17,45
80-90	5	1	25,60	429,84	5,96	15	0	343,13	1.292,28	26,55
90-100	4	0	30,73	371,14	8,28	12	0	164,41	1.132,96	14,51
100-200	24	0	308,57	3.347,00	9,22	95	0	3.239,33	13.620,72	32,78
200-300	7	0	183,96	1.624,30	11,33	33	0	2.698,27	8.230,09	32,79
300-400	2	0	87,60	632,79	13,84	19	0	2.092,87	6.530,27	32,05
400-500	2	0	64,28	903,20	7,12	17	0	2.614,35	7.787,43	33,57
500-1000	1	0	30,34	626,63	4,84	25	0	7.053,78	18.347,50	38,45
≥ 1000	0	0	0,00	0,00	0,00	17	0	15.378,99	34.503,62	44,57
Total	4.534	4.214	965,56	26.669,18		10.013	8.521	36.600,91	145.764,55	

Na Mata Exótica, o montante de hábitat em uma borda de 100m equivale a apenas 3,62% (TCCA=965,56ha), com 4.214 fragmentos sem área núcleo e 132 com área núcleo. Conforme a Tabela 4.9, houve a eliminação dos grupos menores que 5ha, que representam 79,60% do total das manchas da classe, equivalentes a 18,69% da área total. Em análise conjunta com as métricas de área e tamanho (rever Tabela 4.7) – que demonstraram uniformidade na

representatividade da classe, incluindo os menores grupos de fragmentos – o impacto (positivo) em uma borda de 100m resultou na eliminação de 92,94% da Mata Exótica. Novamente, os resultados obtidos pelas métricas podem nortear as ações de manejo e controle destas manchas de vegetação exótica.

A Figura 4.9 apresenta a distribuição das áreas núcleo após *buffer* de borda de 50m e 100m. Nota-se a eliminação de quase a totalidade das manchas de Mata Exótica, que aos 100m de borda são identificadas de forma pontual na paisagem. Já na Caatinga Densa é possível verificar que apesar da redução significativa da área de hábitat (TCCA=36.600,91ha), os fragmentos maiores viabilizaram a permanência da classe em uma borda de 100m e demonstram a relevância das Unidades de Conservação da APA das Onças e da RPPN Fazenda das Almas na manutenção destes fragmentos.

Figura 4.9 - Distribuição das áreas núcleo considerando bordas de 50m e 100m.



Fonte: os autores (2023).

4.3.3 – Métricas de Subdivisão

As métricas de subdivisão calculam o grau de fragmentação e uniformidade da paisagem conforme geometria e distribuição do tamanho das manchas remanescentes. O Índice de Divisão da Paisagem (DIVISION) indica a probabilidade de dois lugares aleatórios na matriz não corresponderem à mesma classe. Complementarmente, o tamanho efetivo da malha (MESH) estima a área de manchas intra ou interconectadas; e o índice de fragmentação (SPLIT) quantifica o total de fragmentos a partir da divisão da paisagem em tamanhos iguais (HASA; HYSA; TEQJA, 2021; JAEGER, 2000; LAWRENCEI; FRIEDRICH; BEIERKUHNLEIN, 2021).

Para Lawrencei, Friedrich e Beierkuhnlein (2021), o processo de fragmentação é um fenômeno em escala de paisagem de grande ameaça à biodiversidade, que inclui a perda de hábitat e o aumento na quantidade de manchas, com áreas cada vez menores. De acordo com Antongiovanni, Venticinque e Fonseca (2018), raramente os padrões de fragmentação em ecossistemas semiáridos são descritos e, na Caatinga, a conversão de hábitat é menos evidente do que observado nos demais biomas brasileiros. Os autores identificaram que, apesar da Caatinga apresentar razoável integridade estrutural, os remanescentes encontram-se vulneráveis a distúrbios antropogênicos com diferenças regionais na distribuição.

De forma complementar à análise quantitativa realizada pelos autores, a utilização das métricas de subdivisão traz resultados inéditos para o bioma, apresentados na Tabela 4.10. Ainda que aplicadas em uma área restrita da Caatinga, limitada ao Cariri Paraibano, Jaeger (2000) destaca que estes índices são úteis para documentar o desenvolvimento da paisagem e iniciar a concepção de fragmentação em uma análise quantitativa, de modo a subsidiar trabalhos futuros.

Tabela 4.10 - Métricas de Subdivisão aplicadas em nível de paisagem para as classes de vegetação.

Classe	DIVISION	SPLIT	MESH (ha)
Caatinga Antropizada	93,45	15,28	13.398,10
Mata Exótica	99,67	305,10	87,41
Caatinga Densa	99,44	178,11	818,40
Caatinga Rarefeita	30,29	1,43	376.331,02

De acordo com Jaeger (2000) e Lawrencei, Friedrich e Beierkuhnlein (2021), os valores mais elevados de DIVISION indicam maior fragmentação, já que manchas maiores possuem maior possibilidade de representar a classe. As métricas MESH e SPLIT são medidas relativas

da estrutura da mancha e, respectivamente, correspondem ao tamanho e à quantidade de fragmentos obtidos em um padrão de paisagem com mesmo grau de subdivisões das classes analisadas: quanto maior o valor de MESH, maior a área integrada; e o SPLIT será igual a um quando apenas uma mancha tiver presente.

A uniformidade da Caatinga Rarefeita torna-se evidente pelos menores valores de DIVISION (= 30,29) e de SPLIT (= 1,43). Ao mesmo tempo, apresentou os maiores resultados para o tamanho dos fragmentos conectados (MESH = 376.331,02ha), que correspondem a 69,71% de toda área da classe. Desta forma, mesmo quando a paisagem é analisada em um padrão de subdivisões idênticas, os poucos fragmentos existentes estão extremamente conectados entre si. O oposto foi identificado na Caatinga Densa, que demonstra elevada fragmentação (DIVISION = 99,67 e SPLIT = 178,11), com tamanho das manchas pouco expressivo (MESH = 818,40ha), equivalentes a 0,56% da área total da classe.

Na Mata Exótica, a elevada fragmentação apontada pelas métricas DIVISION (= 99,67) podem ser interpretados como resultado positivo, já que os diversos fragmentos existentes (SPLIT = 305,10 e MESH = 87,17 ha), equivalem a 0,33% da área total da classe. Embora em grande quantidade, as manchas desta vegetação exótica são pequenas na perspectiva de paisagem, o que torna um facilitador para manejo e eliminação da espécie.

Já os resultados obtidos na Caatinga Antropizada alertam para a degradação ambiental da paisagem na região do Cariri Paraibano, com valores de DIVISION = 93,45, SPLIT = 15,28 e MESH = 13.398,10ha. Por ser uma classe com notória alteração das características naturais da Caatinga, a elevada fragmentação evidenciada pelas métricas DIVISION em relativamente poucos fragmentos esparsos (6,54% da área total distribuídos em 15,28 manchas na paisagem) indicam que a perturbação antropogênica está disseminada na matriz. Este cenário é resultante tanto das áreas urbanas sobre os recursos naturais, que historicamente se consolidam próximas à corpos hídricos e impactam fortemente a qualidade de água; quanto das áreas rurais sobre os fragmentos florestais, que contribuem com o processo de desertificação (MEIADO *et al.*, 2020).

4.3.4 – Índice Integral de Conectividade

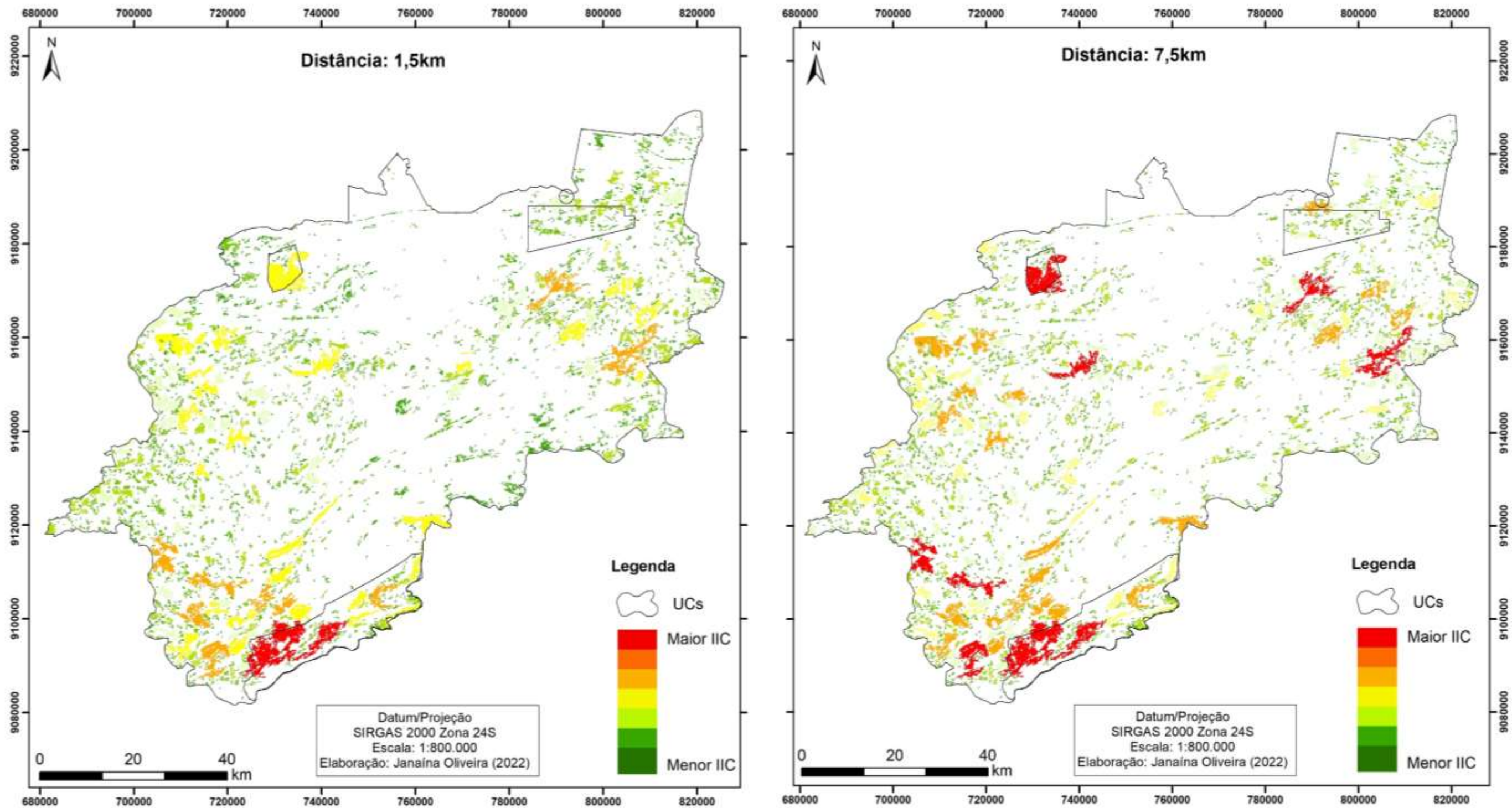
O Índice Integral de Conectividade (IIC) finaliza a análise por métricas de paisagem na região do Cariri Paraibano. Embasado na Teoria dos Grafos, este algoritmo foi utilizado para destacar os fragmentos mais relevantes em uma conexão binária baseada do padrão estrutural da paisagem. A distância para conectar os nós dos grafos, associados com o tamanho, forma,

localização espacial ou outros atributos das manchas em si, pode modificar a relevância das áreas de hábitat e os resultados da modelagem (ZIOLKOWSKA *et al.*, 2014).

Para a conectividade estrutural proposta neste trabalho, estabeleceu-se uma distância mínima de 1,5km e máxima de 7,5km em uma matriz permeável, onde os fragmentos de Caatinga Densa serão considerados mais relevante conforme área, forma, localização espacial e número de conexões. O valor mínimo foi embasado nos estudos de Antongiovanni, Venticinque e Fonseca (2018), que ao analisarem diferentes capacidades de deslocamento na matriz, identificaram fragmentos de Caatinga funcionalmente conectados em até 1,5km. Aqui, por não envolver a funcionalidade dos habitats, adotou-se também uma distância cinco vezes mais abrangente para abarcar fragmentos mais distantes e não subestimar a conectividade estrutural na escala regional.

Justifica-se a aplicação do IIC apenas fragmentos de Caatinga Densa, uma vez que a uniformidade da Caatinga Rarefeita foi evidenciada nos resultados obtidos pelas demais métricas, sobretudo de subdivisão. A representação dos valores obtidos pode ser visualizada na Figura 4.10, que demonstra a importância dos fragmentos para a conectividade em escala de cores e contextualiza as Unidades de Conservação (UCs) da área de estudo. Percebe-se que nas duas distâncias utilizadas, os fragmentos-chave destacados para conectividade, ou seja, aqueles com maiores níveis de IIC, concentram-se na porção sul da região do Cariri Paraibano; e quando a distância se torna maior, fragmentos a noroeste e a leste da área de estudo também se tornam mais relevantes.

Figura 4.10 - Resultados do IIC para distâncias de 1,5km e 7,5km.



Fonte: os autores (2022).

Contudo, observa-se na Figura 4.10 que a modelagem resultante do IIC não demonstrou uma conectividade que permeasse a matriz. Isto indica que os pequenos fragmentos, apesar de abundantes, podem ser considerados pouco efetivos na função *stepping stones*. Cabe lembrar que apesar dos grupos de fragmentos de até 20ha corresponderem a 20,63% da Caatinga Densa (rever métricas de área e tamanho), eles são eliminados da paisagem quando se estabelece o *buffer* de borda (rever métricas de área núcleo), o que corrobora com os resultados do IIC.

Já nas maiores manchas de Caatinga Densa, que representam 45,60% da classe (rever métricas de área e tamanho), os formatos complexos e irregulares indicam maior susceptibilidade ao efeito de borda (rever métricas de forma, borda e área núcleo) e elevada fragmentação (rever métricas de subdivisão). Tais fatores podem ter influenciado o comportamento da métrica, já que poucos fragmentos atingiram os maiores níveis de IIC em ambos os cenários. Estes resultados revelam um provável empecilho para a formação de corredores ecológicos e, conseqüentemente, um comprometimento da função ambiental destes habitats na matriz.

A estrutura altamente complexa dos fragmentos e a elevada exposição à diversas ameaças antropogênicas são apontadas por Antongiovanni, Venticinque e Fonseca (2018) como pontos de fragilidade para a conservação da Caatinga. Porém, para os autores, os grandes remanescentes apresentam potencial para abrigar populações de espécies sensíveis, com capacidades reduzidas de deslocamento através da matriz, o que resulta em uma razoável integridade estrutural do bioma.

Ademais, para a concepção de paisagens favoráveis à biodiversidade, a qualidade da matriz deve estar fundamentada em uma conectividade estrutural que integre áreas de proteção da natureza, seu entorno e a conservação de habitats focais em larga escala (POMIANOSWIKI; SOLON, 2020; WARD et al., 2020). Os resultados visualizados na Figura 4.10 evidenciam a vulnerabilidade dos fragmentos de Caatinga Densa e das UCs, ambos em evidente processo de isolamento na área de estudo. Ao mesmo tempo, os cenários destacam a relevância de duas UCs em especial, onde estão inseridos fragmentos com elevados níveis de IIC: a APA das Onças e a RPPN Fazenda das Almas.

Apesar de ser a UC mais afastada destas áreas protegidas, a APA das Onças demonstrou estar bem conectada em seu interior e entorno imediato. Esta maior UC da região do Cariri Paraibano, localizada no município de São João do Tigre e com cerca de 36.000ha, é responsável por abrigar os fragmentos-chave mais importantes da área de estudo na distância de 1,5km, que totalizam 7.906ha e representam 22% da APA. Por não possuir Plano de

Manejo¹⁸, estes resultados podem auxiliar na gestão da UC, principalmente na delimitação do zoneamento ambiental, pois indicam uma possível conectividade funcional que facilita o movimento de espécies nativas e o aumenta o fluxo gênico existentes.

Quando a distância de conectividade é ampliada para 7,5km, percebe-se que a RPPN Fazenda das Almas passa a proteger um dos fragmentos-chave de maior IIC. Localizada entre os limites dos municípios de São José dos Cordeiros e Sumé, a UC abrange 5.502,92ha, dos quais 2.815ha (51%) correspondem ao trecho deste fragmento de maior IIC – resultado que demonstra efetividade na gestão e conservação da RPPN.

Conforme o Plano de Manejo, 35% da UC referem-se à zona silvestre, que representa áreas com maior grau de conservação da biodiversidade e integridade dos recursos naturais; 60% correspondem à zona de proteção, que além do alto grau de conservação, circundam e protegem as zonas silvestres; e 5% estão na zona de visitação, voltada para ações de educação ambiental e visitas guiadas.

A relevância da zona silvestre para a RPPN motivou ainda quatro subdivisões conforme objetivo de proteção. Nas ZS2-A, ZS2-B e ZS2-C há maior número de espécies de flora e fauna, bem como significativas áreas de afloramentos rochosos com sua vegetação peculiar. Por estas características, o acesso se torna naturalmente mais restrito e aumenta-se a garantia de conservação. Estas áreas, bem como as zonas de proteção que as contorna, foram integralmente contempladas pelo fragmento-chave destacado no IIC.

Já a norte da RPPN encontra-se a ZS3, selecionada para conservação da beleza cênica e da mata ciliar do Riacho do Cazuzinha, um dos afluentes do Rio dos Cordeiros, tributário do Rio Taperoá. De acordo com Arroyo-Rodríguez et al. (2020), as matas ciliares podem melhorar a conectividade ecológica entre remanescentes de vegetação nativa e, por isso, devem ser prioridades para a preservação e restauração ambiental. Apesar da função estratégica, esta zona apresentou baixo valor de IIC, que pode estar relacionado ao pequeno tamanho das manchas de Caatinga Densa na escala de paisagem adotada. Mas também corrobora com a análise de uso e ocupação do solo na região do Cariri Paraibano, onde áreas de menor topografia estão mais vulneráveis às pressões antrópicas.

Apesar de abrigar importantes remanescentes de Catinga, esta RPPN demonstra estar criticamente isolada não apenas das demais UCs na região do Cariri Paraibano, como também

¹⁸ “Documento técnico mediante o qual, com fundamento nos objetivos gerais de uma unidade de conservação, se estabelece o seu zoneamento e as normas que devem presidir o uso da área e o manejo dos recursos naturais, inclusive a implantação das estruturas físicas necessárias à gestão da unidade” (BRASIL, 2000). Conforme o SNUC, o plano de manejo deve ser elaborado em até cinco anos a partir da data de criação da UC.

entre os fragmentos de Caatinga Densa situados em seu entorno. Conforme Herrmann (2011), Haddad *et al.* (2015) e Paese *et al.* (2012), o isolamento completo de remanescentes nativos é uma consequência dos efeitos da fragmentação. Durante este processo há um período de latência entre a modificação do hábitat e a estabilidade estrutural da paisagem, que pode causar um débito ecológico com posterior eliminação de espécies sensíveis, trazendo prejuízos na funcionalidade do ecossistema.

Outro cenário de atenção é observado na APA dos Cariris e na RPPN Santa Clara, que embora muito próximas entre si, não apresentaram fragmentos com elevado valor de IIC nas duas distâncias adotadas. A RPPN Fazenda Santa Clara é a menor UC encontrada na área de estudo e apresenta a maior carência de estudos científicos em seu território, onde predomina-se a Caatinga Rarefeita, com 62%. Embora tenha sido criada na década de 1990, sequer possui delimitação oficial, sendo mensurada pelo Instituto Chico Mendes da Biodiversidade (ICMBio) através das coordenadas inseridas no Sistema Informatizado de Monitoria de Reservas.

Já a APA do Cariri abrange cerca de 157km², dos quais 76% correspondem à Caatinga Rarefeita. A predominância de uma classe de vegetação nativa é um resultado positivo, ainda que não se tenha fragmentos de Caatinga Densa com significativos valores de IIC. No entanto, Silva *et al.* (2019) analisaram o grau de intervenção antrópica no interior da UC e identificaram elevados índices de transformação ambiental motivada pelas atividades agropecuárias e pela mineração de bentonita, o que evidencia a vulnerabilidade local.

Cabe lembrar que esta região, fortemente pressionada pelas ações antropogênicas – que incluem exploração de bentonita, também se destaca pelo interesse de conservação em nível internacional de patrimônio geológico e geomorfológico, onde está proposta a criação do Geoparque do Cariri. Mesmo situadas em potenciais sítios geológicos e paleontológicos, muitas das atividades minerárias não possuem efetivos planos de gestão ambiental e suas ações podem desencadear conflitos socioambientais entre o uso rural e os objetivos das UCs, que por sua vez, também não possuem Plano de Manejo.

Dentre os cenários de potencialidades e fragilidades da Caatinga, Meiado *et al.* (2020) enfatizam a importância de integrar os diversos setores da sociedade para reduzir a degradação ambiental. As políticas públicas e parcerias público-privadas são consideradas essenciais para reorganizar o uso do território e devem estimular práticas produtivas sustentáveis que gerem renda e, ao mesmo tempo, envolvam as comunidades em práticas de recuperação ambiental. Da iniciativa privada espera-se que sejam adotadas atitudes proativas para proteção ambiental e uso sustentável dos recursos naturais, preceitos necessários em diversas normas e certificações internacionais. Por fim, cabe ao setor acadêmico-científico desenvolver e ampliar pesquisas que

auxiliem a compreensão dos ecossistemas e seus benefícios fundamentais à população local e à sociedade como um todo (MEIADO *et al.*, 2020).

Sabe-se que os usos insustentáveis da terra interrompem a conectividade das paisagens em vários graus e comprometem a função e a resiliência do ecossistema, sendo possível adotar diferentes estratégias para subsidiar o planejamento do território e a gestão dos recursos naturais (ANTONGIOVANNI; VENTICINQUE; FONSECA, 2018; ARROYO-RODRIGUES *et al.*, 2020; WARD *et al.*, 2020). Neste sentido, Pomianowski *et al.* (2020) e Ziolkowska *et al.* (2014) apontam que estudos embasados nos preceitos da Ecologia de Paisagens e na teoria dos grafos têm relacionado a configuração espacial da matriz com o planejamento de ações de conservação ambiental.

Ao lidar com a conectividade de habitats, os grafos fornecem uma representação espacialmente explícita, onde os modelos podem ser adequados para representar a complexidade da área em análise. Deste modo, os elementos individuais da paisagem passam a nortear os esforços de conservação, sendo essenciais para identificar os principais corredores entre os fragmentos destacados pelo Índice Integral de Conectividade (SAURA; RUBIO, 2010; ZIOLKOWSKA *et al.*, 2014).

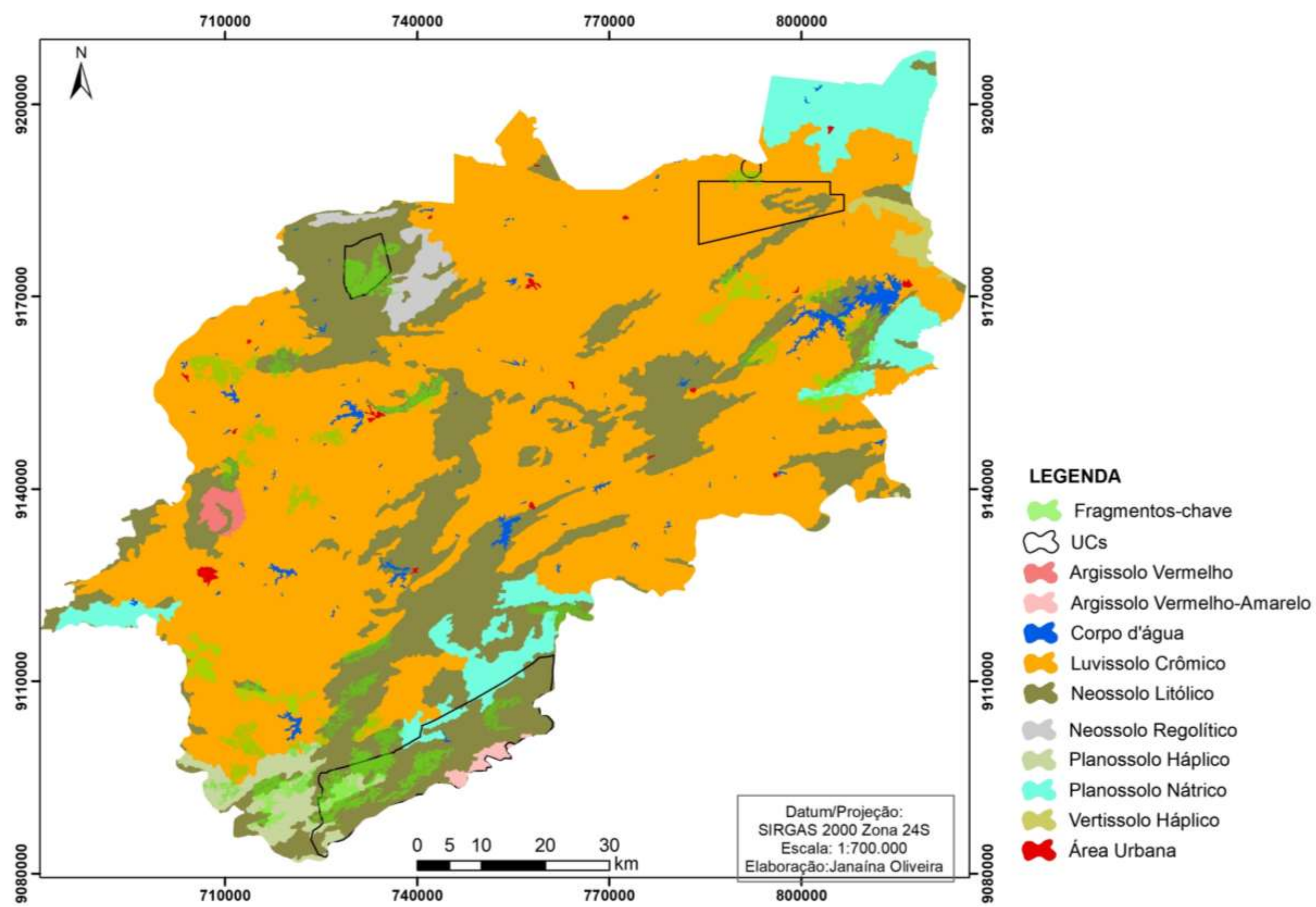
Aqui, os fragmentos-chave destacados pelo IIC e as Unidades de Conservação foram considerados ambientes prioritários para a conectividade estrutural. Como estratégia ao planejamento ambiental, os componentes geoambientais destas áreas foram analisados e relacionados, a fim de verificar a viabilidade de serem elementos facilitadores para a formação de corredores ecológicos. Trata-se de uma abordagem integradora entre a Ecologia de Paisagens e a geografia física, que associa a dinâmica de uso e cobertura da terra, métricas de paisagem e atributos abióticos.

4.4 Relação dos Componentes Geoambientais entre fragmentos de Caatinga Densa

Este item aborda a relação entre os componentes geoambientais (pedologia, geologia e aspectos do relevo) com as UCs e os fragmentos-chave destacados pelo IIC. Trata-se da última verificação da tese, que visa identificar influências e efeitos dos fatores abióticos na manutenção da Caatinga Densa diante o dinamismo e especificidades da paisagem.

Ao considerar os aspectos pedológicos, observa-se na Figura 4.11 que os fragmentos-chave seguem um padrão de distribuição associados ao Neossolo Litólico, grande parte em relevo ondulado a forte – como o caso da RPPN Fazenda das Almas e APA das Onças.

Figura 4.11 – Tipos de solos da região do Cariri Paraibano.



Fonte: IBGE (2022).

De acordo com Santos (2017), os neossolos são pouco evoluídos, rasos, pedregosos e com frequentes afloramentos de rochas. No semiárido brasileiro, ocorrem predominantemente em relevos movimentados e, por não possuírem características propícias ao cultivo intensivo, são indicados para a preservação da flora e da fauna.

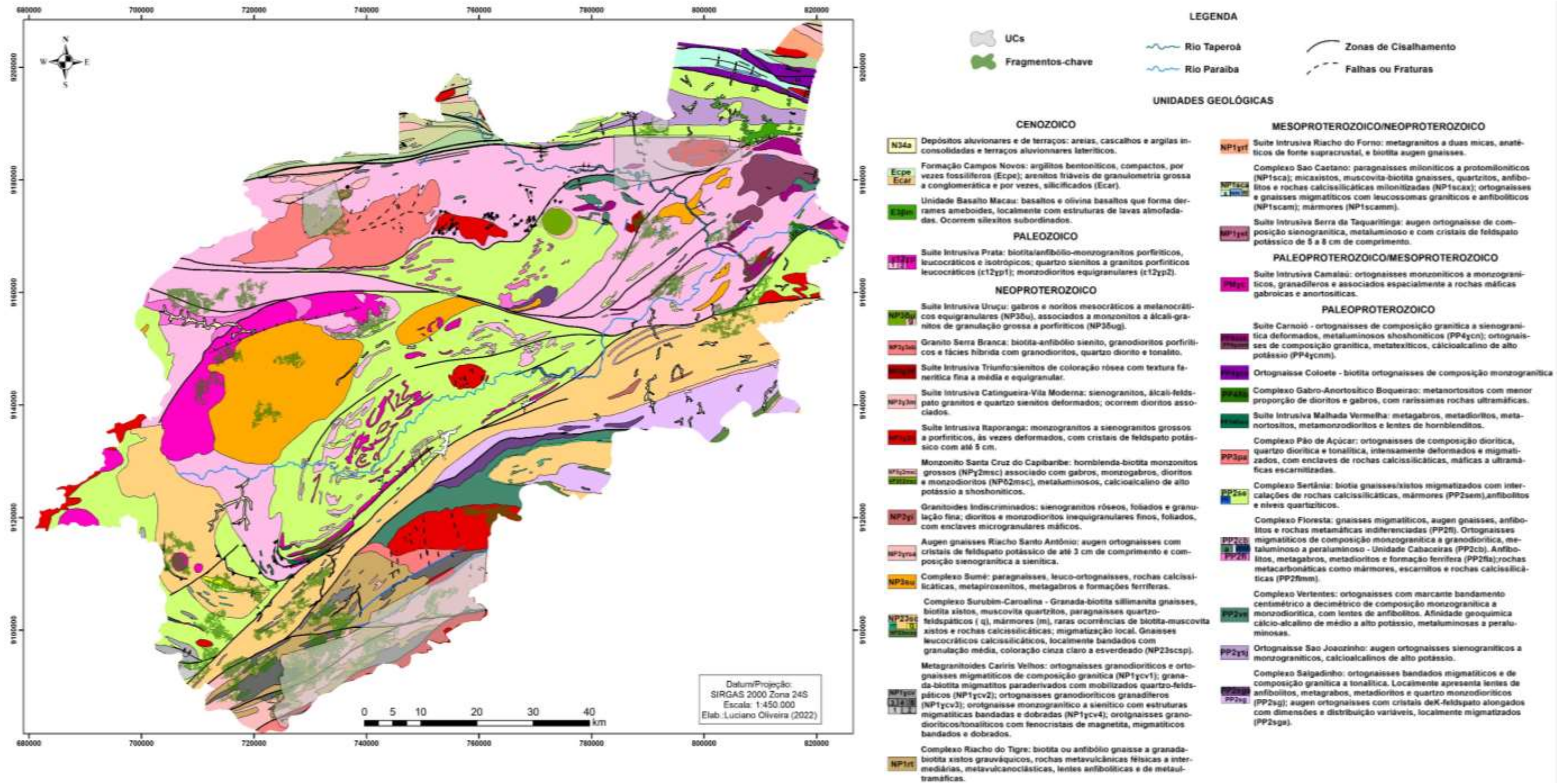
Já o Luvisso Crômico é predominante em áreas com relevo suave. Sua profundidade varia espacialmente, mas apresenta condições favoráveis para uso na agricultura, com elevada fertilidade, principalmente em áreas de ocorrência de rochas cristalinas dos tipos biotita-gnaiss e biotita-xisto, que constituem fonte de liberação de minerais primários. No entanto, o uso intensivo e a remoção da vegetação nativa têm modificado as características do solo, se tornando mais susceptível à salinização e/ou processos erosivos que variam de laminares à sulcos com formação de voçorocas (SANTOS, 2017).

A alteração das propriedades do solo pode ainda resultar na desertificação das áreas utilizadas de modo insustentável. Segundo Vieira et al. (2020), a substituição da vegetação natural por terras agrícolas e pastagens é o principal fator para a desertificação no Nordeste brasileiro. Diante os cenários de mudança de uso e cobertura da terra apresentados pelos autores, até 2040 a expansão das áreas utilizadas para agricultura e pecuária corresponderá a 32% e 10%, respectivamente. Ademais, os autores enfatizam sobre a importância de prever a influência das mudanças climáticas e alterar os caminhos da gestão do solo como formas de mitigar o processo de desertificação, considerado um dos principais problemas ambientais da atualidade, que reduz os serviços ecossistêmicos e aumenta a insegurança alimentar.

Apesar das diferentes escalas entre os dados no mapa de solos (1:250.000) e no mapa geológico (1:100.000), observou-se a correlação entre Neossolos Litólicos e rochas graníticas, sobretudo em suítes intrusivas que afloram na superfície. Esta relação indica a necessidade de realizar estudos detalhados sobre a distribuição, caracterização e classificação dos solos em níveis categóricos mais elevados para subsidiar ações de conservação da Caatinga.

A correlação entre afloramentos rochosos e fragmentos-chave também é identificado ao analisar a geologia da região, onde UCs apresentam unidades litoestratigráficas comuns. Na Figura 4.12 é possível identificar que a APA das Onças e a APA do Cariri compartilham a ocorrência de corpos plutônicos representados pela Suíte Intrusiva Itaporanga. A mesma unidade é identificada na Serra da Engabelada, afloramento rochoso no município de Congo com formato mais arredondado, onde abrigam pequenos remanescentes de Caatinga Densa não destacados pelo IIC. Na RPPN Fazenda das Almas, os fragmentos de maior IIC também estão associados ao maciço do Granito Serra Branca; e em todos os casos há ocorrência do Neossolo.

Figura 4.12 – Mapa Geológico da região do Cariri Paraibano.



Fonte: CPRM (modificado).

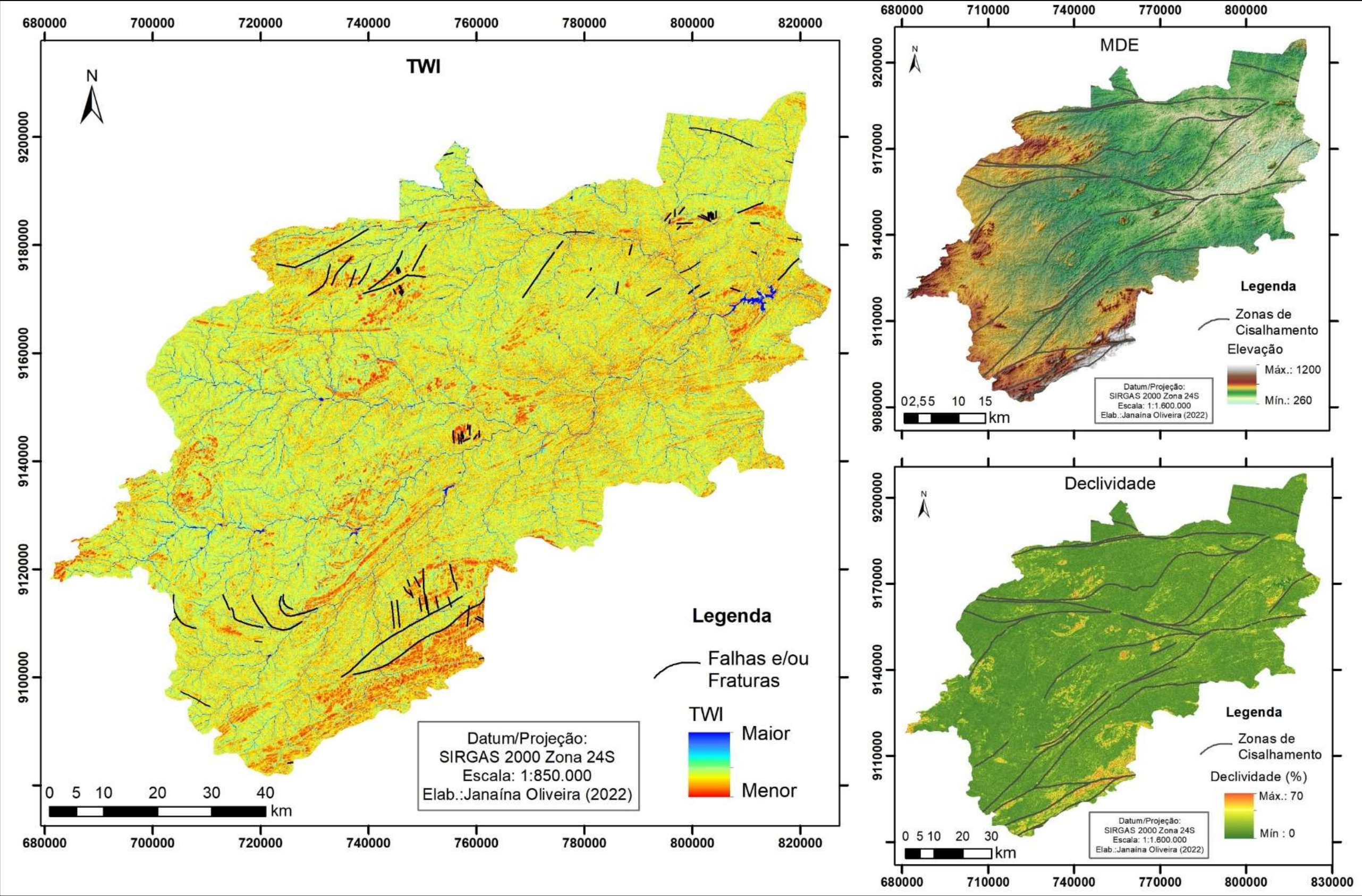
Na Figura 4.12 ainda é possível observar que em áreas de rochas metassedimentares há menor presença dos fragmentos-chave. No Complexo Sertânia, por exemplo, algumas manchas de Caatinga Densa – destacadas ou não pelo IIC – estão claramente associadas aos granitoides que se sobressaem na paisagem, com feições alongadas ou arredondadas formadas pela Suíte Intrusiva Camalaú e cristas formadas pelo Complexo Floresta Ortognaisse Cabaceiras, que acompanham zonas de cisalhamento, falhas e/ou fraturas.

De acordo com a compartimentação geomorfológica da Bacia do Alto Curso do Rio Paraíba apresentada por Rodrigues e Lima (2020), estas áreas correspondem a Maciços Remobilizados do Domínio da Zona Transversal, com cristas simétricas e inselbergues, caracterizados pela presença de Neossolos Litólicos recobertos por caatinga arbustiva e subarbustiva densa, onde há prática de pecuária extensiva. A presença de caprinos é facilmente identificada na região de estudo, inclusive em áreas de topografia mais elevada. A expressiva quantidade destes animais é apontada no Censo Agropecuário do IBGE (rever Tabela 4.5), que bem adaptados às condições locais, conseguem utilizar áreas de vegetação nativa para pastejo. Este cenário ressalta a necessidade em estabelecer boas práticas agropecuárias, inclusive de subsistência; e sempre que possível, restringir o acesso dos animais aos ambientes preservados.

Ademais, a topografia da região do Cariri foi analisada a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), mapa de declividade e Índice Topográfico de Umidade (TWI), apresentados na Figura 4.13. Observa-se que áreas com maiores elevações e declividades mais acentuadas correspondem aos menores valores de TWI, ou seja, são áreas com menor acúmulo de umidade e de sedimentos – o que é compatível com as unidades litoestratigráficas constituídas por rochas cristalinas. Nas encostas ocorre a transição dos valores de TWI, onde inicia o acúmulo de sedimentos em nítida relação com falhas e/ou fraturas geológicas; até atingir os maiores valores do índice em áreas correspondentes a aluviões em rios efêmeros/intermitentes da região.

Conforme Vasconcelos e Souza (2018), a influência topográfica e o controle orográfico determinam a distribuição de umidade da paisagem, onde as áreas mais altas são responsáveis pelo escoamento superficial e correspondem às zonas de produção de sedimentos – apesar de apresentarem enclaves subúmidos em virtude da variação de altitude e do volume de precipitação. Por sua vez, nas encostas ocorre o escoamento em subsuperfície, até que a deposição de sedimentos e umidade atinja o ápice nas margens dos rios.

Figura 4.13 - Índice Topográfico de Umidade, Modelo Digital de Elevação e mapa de declividade na região do Cariri Paraibano.



Fonte: STRM e CPRM (2022).

Ao rever as Figuras 4.12 e 4.13, nota-se claramente o paralelismo entre os lineamentos de altos topográficos e as zonas de cisalhamento, que abarcam grandes extensões associadas a rochas graníticas. Estas áreas são mais resistentes na paisagem, onde as condições edáficas, litológicas e topográficas tornam-se favoráveis para a manutenção de fragmentos de Caatinga Densa e restringem naturalmente as ações antropogênicas, concentradas nas regiões mais baixas em terrenos sedimentares, onde há maior acúmulo de sedimento e de umidade.

Estes resultados corroboram com a hipótese da tese, onde os componentes geoambientais analisados mostraram-se favoráveis à manutenção dos fragmentos de Caatinga Densa. Complementarmente, as formas dos relevos residuais associados à saprolitização e meteorização, principalmente as bacias de dissolução e caneluras – tais como apresentados por Maia e Nascimento (2018) – são aqui consideradas representações fractais das estruturas geológicas identificadas em escala regional. Assim, na perspectiva de paisagem, pode-se considerar que os lineamentos de altos topográficos e as zonas de cisalhamento são regiões potenciais para formação de corredores ecológicos na Caatinga.

O termo ‘corredor ecológico’ é definido pelo SNUC como porções de ecossistemas naturais ou seminaturais que ligam duas ou mais UCs para facilitar a dispersão de espécies, a recolonização de áreas degradadas e a manutenção de populações de espécies que precisam de extensas áreas para sua sobrevivência. Para Pereira e Cestaro (2016), os projetos pioneiros no Brasil adotaram critérios eminentemente funcionais para estabelecer redes de corredores entre as UCs existentes. No entanto, eles direcionam a seleção de áreas potenciais para conservação, sem indicar as melhores possibilidades de conexões entre remanescentes nativos – onde emergem potencialidades e conflitos diante os interesses conservacionistas e econômicos.

Em escala regional, os corredores ecológicos são unidades estratégicas de planejamento e ordenamento do território, que devem integrar as áreas utilizadas pela população humana, garantir o desenvolvimento sustentável e assegurar a conservação da natureza (HERMMANN, 2011). O envolvimento dos atores locais no território é essencial para minimizar possíveis conflitos de interesses nos usos da terra.

Neste sentido, as Reservas Legais exercem importante papel na formação de corredores, pois referem-se às áreas de uma propriedade rural destinadas para reabilitar processos ecológicos e assegurar o uso sustentável dos recursos naturais. Para propor a conectividade estrutural foram destacadas as Reservas Legais conforme posicionamento espacial estratégico em relação aos componentes geoambientais analisados. A seleção se baseou quando as RLs se situavam próximas ou sobrepostas aos lineamentos topográficos, zonas de cisalhamento e áreas

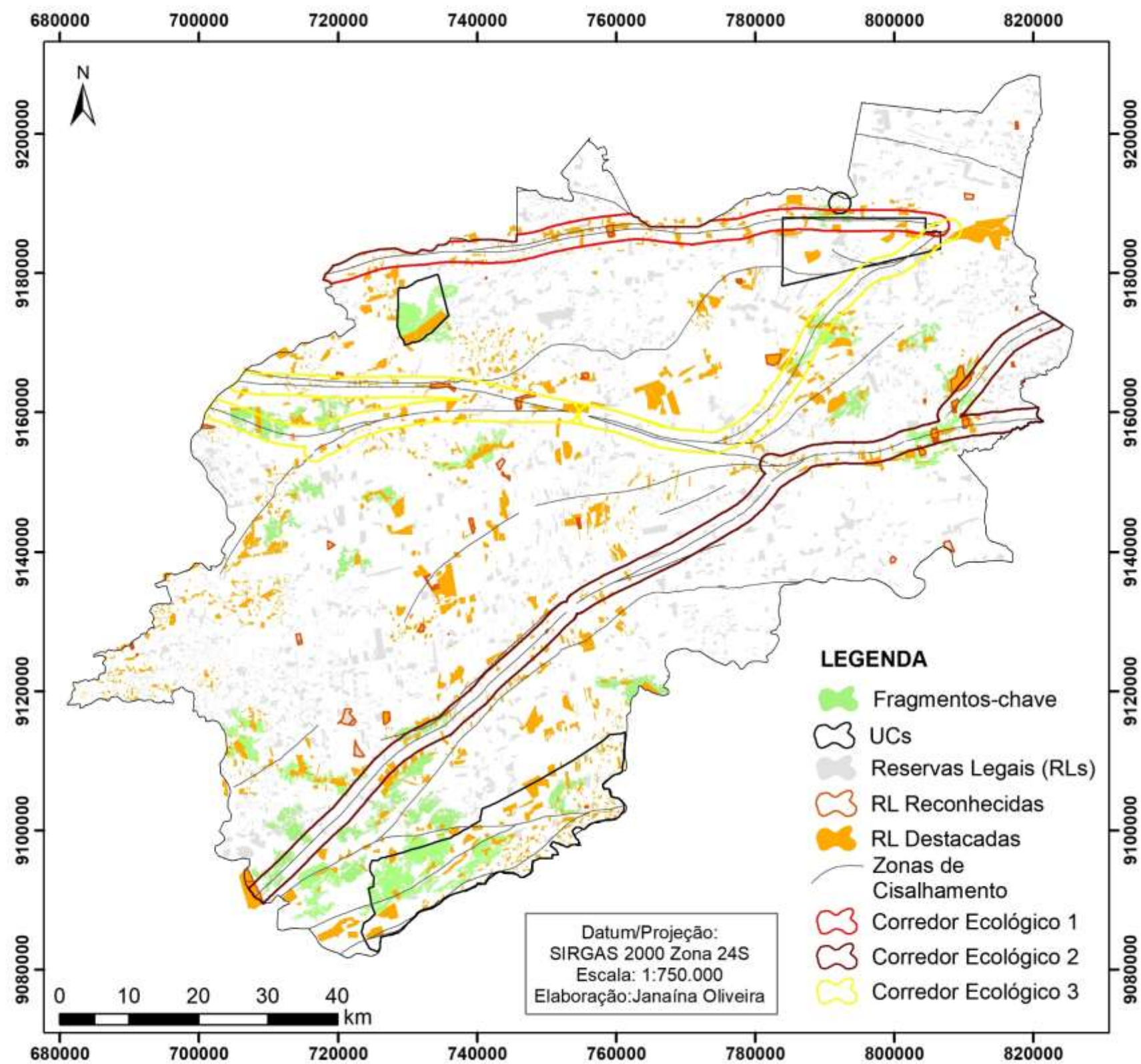
com menores valores de TWI, de modo a auxiliar a integração das Unidades de Conservação e/ou dos fragmentos com maiores valores obtidos pelo IIC de até 7,5km.

Complementarmente, definiu-se três corredores ecológicos enquanto estruturas lineares que visam permear a matriz e integrar fragmentos destacados pelo IIC nos resultados obtidos pelo IIC. Os corredores foram estabelecidos a partir de um *buffer* de 1,5km das zonas de cisalhamento selecionadas quando próximas ou sobrepostas às Reservas Legais e aos neossolos litólicos. Justifica-se o uso das zonas de cisalhamento pela linearidade bem definida dessas estruturas geológicas, onde também já havia sido identificada a relação do paralelismo entre os lineamentos topográficos. Já o *buffer* de 1,5km foi utilizado para estabelecer a distância mínima de conectividade estrutural adotada durante a modelagem apresentada no Índice Integral de Conectividade.

Desta forma, a proposta de conectividade estrutural é apresentada na Figura 4.14. Contudo, ressalta-se o cenário alarmante obtido na modelagem do IIC de até 1,5km, onde fragmentos-chave e as Unidades de Conservação da área de estudo encontram-se em notório processo de isolamento (rever Figura 4.10). Nota-se que as Áreas de Preservação Permanente dos Rios Taperoá e Paraíba não foram incluídas na conectividade estrutural, o que é justificado pela dinâmica de uso identificada no Cariri Paraibano. Como já apresentado, a população local é fortemente afetada pela limitação hídrica existente no semiárido, onde as áreas mais úmidas são essenciais para o desenvolvimento das atividades antrópicas, muitas delas de subsistência.

De acordo com o artigo 9º do Código Florestal Brasileiro, “*é permitido o acesso de pessoas e animais às Áreas de Preservação Permanente para obtenção de água e para realização de atividades de baixo impacto ambiental*”, que incluem a construção de moradia de agricultores familiares e outras populações tradicionais em áreas rurais. Apesar de não terem sido consideradas para a formação de corredores ecológicos, destaca-se que as APPs exercem importante função ambiental, sobretudo para preservar os recursos hídricos, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. Em ambientes semiáridos, elas devem receber um olhar especial, sendo aqui indicada a necessidade de incluir as margens dos cursos d’água efêmeros e associar o uso com práticas sustentáveis, a exemplo das estratégias adotadas nos sistemas agroflorestais, como premissas a uma legislação ambiental específica para a Caatinga.

Figura 4.14 - Reservas Legais e Corredores Ecológicos destacados para conectividade estrutural na região do Cariri Paraibano.



Fonte: os autores (2023).

Enquanto instrumento de planejamento capaz evitar o isolamento de Unidades de Conservação e de promover a conectividade entre fragmentos de remanescentes nativos de vegetação, as diretrizes apresentadas para formação dos corredores devem ser vistas como um subsídio para investigações mais detalhadas no âmbito das ciências da natureza, com levantamentos biológicos, geomorfológicos e pedológicos integrados aos aspectos socioculturais e econômicos. A delimitação dos corredores deve envolver processos participativos para, então, ser criada em atos normativos. Meiado et *al.* (2020) complementam ao considerarem que as características peculiares existentes na relação entre a sociedade com o meio podem influenciar diretamente na conservação da Caatinga – neste caso, auxiliar na efetividade de criação dos corredores enquanto medidas para evitar a degradação e potencializar a proteção e a recuperação ambiental.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar o padrão estrutural da paisagem para propor modelos de conectividade entre fragmentos de Caatinga Densa na região do Cariri Paraibano. A área de estudo, com 920.771ha, foi delimitada para contemplar o Alto Curso do Rio Paraíba e parte da sub-bacia do Rio Taperoá, que além da relevância hídrica, abrigam importantes maciços residuais com geodiversidade e biodiversidade peculiares.

Considerado alicerce do trabalho, o mapeamento do uso e cobertura da terra foi realizado a partir da aplicação da técnica GEOBIA, classificação supervisionada baseada em objetos geográficos. Devido a influência da resposta espectral da Caatinga à sazonalidade hídrica, foi realizada uma análise do comportamento temporal da precipitação pluviométrica para selecionar imagens do satélite Sentinel-2 em ano considerado neutro, ou seja, sem grandes interferências provocadas pelos fenômenos do El Niño e La Niña.

Com o mosaico das imagens selecionadas, foram aplicados oito índices espectrais de vegetação e de água, além da média e do desvio padrão das bandas espectrais do Sentinel-2 para identificar as sete classes temáticas previamente determinadas: Corpo Hídrico, Afloramento Rochoso, Ambiente Antrópico, Mata Exótica, Caatinga Antropizada, Caatinga Rarefeita e Caatinga Densa. O mapeamento foi validado estatisticamente pela exatidão global e Índice *Kappa*, com verificação de 490 pontos em trabalho de campo e por imagens do Google Earth.

Os resultados corroboraram com a qualidade do mapa gerado pela classificação GEOBIA, equivalentes a 86,94% para a exatidão global e 0,85 para o Índice *Kappa*. Ademais, destacaram a importância dos índices SAVI e NDVI para diferenciar as classes Mata Exótica das Caatingas Densa e Rarefeita, essenciais na identificação da umidade na vegetação e na presença de biomassa ajustada para o solo. O índice MNDWI também se destacou para classificar o Corpo Hídrico, capaz de identificar informações espectrais da água em subsuperfície rasa, como observado em solo argiloso (possivelmente vertissolo) no município de Boa Vista.

Com a distinção da classe Mata Exótica das demais classes de vegetação nativa foi possível espacializar e quantificar as áreas onde predominam a presença da algaroba – uma abordagem considerada inédita na área de estudo. Ela abrange uma área de 26.669ha, concentrada ao longo das margens dos afluentes do Rio Paraíba em Monteiro, Congo e Caraúbas; afluentes do Rio Sucuru, em Ouro Velho, Prata e Sumé; e riachos em Zabelê e na divisa com São João do Tigre. O padrão de distribuição similar ao das matas ciliares ressaltam

a necessidade de controlar a dispersão desta espécie invasora e de estabelecer legislação ambiental específica para incluir as faixas marginais de cursos d'água efêmeros como APPs.

Acredita-se que o sistema de drenagens efêmeras é fundamental para manutenção dos rios Taperoá e Paraíba, considerados intermitentes na área de estudo. Além das práticas inadequadas de manejo do solo, a transposição do Rio São Francisco pode atrair o agronegócio e, com ele, desencadear impactos negativos na Caatinga. Assim, ressaltou-se a falta de políticas públicas adequadas para evitar a degradação ambiental deste endêmico bioma.

Ademais, a pecuária foi outra atividade passível de destaque, onde há mais caprinos e ovinos do que habitantes na área de estudo. Representada pela Caatinga Antropizada, a classe corresponde a 204.699ha, que incluem áreas alteradas para a agropecuária. Já a classe Ambiente Antrópico contemplou ambientes urbanos e semiurbanos, além de áreas com extração mineral encontradas no município de Boa Vista. A ocupação humana tende a se concentrar nas áreas mais baixas, onde há acúmulo de umidade e presença de solos mais propícios para a agricultura e pecuária extensiva, que gradativamente alteram a Caatinga.

Da mesma forma, as minerações de bentonita também pressionam o patrimônio geológico, geomorfológico e cultural. A relevância econômica destas principais jazidas no Brasil não corresponde com o desenvolvimento socioambiental esperado, sobretudo quando sobrepostas à uma área de interesse para implantação do Geoparque Cariri. A fragilidade na gestão ambiental destas atividades foi identificada na deficiência de investigação e salvamento arqueológicos e paleontológicos da região; nas dificuldades no acesso aos estudos ambientais, às licenças ambientais e aos Planos de Fechamento de Mina; nas ações de recuperação ambiental e de educação ambiental, com baixa geração de renda e inclusão social.

A análise da área de estudo também foi realizada sob a perspectiva geográfica da Ecologia de Paisagens. Com o uso do modelo mancha-corredor-matriz, métricas de área e tamanho, forma e borda, área núcleo, subdivisão e conectividade foram aplicadas nas classes temáticas definidas durante o mapeamento de uso e ocupação da terra. Os resultados das métricas revelaram a Caatinga Rarefeita como unidade dominante da paisagem (58,63%), dos quais 92,36% de toda a classe estão concentrados em apenas 11 fragmentos maiores de 1.000ha. A baixa fragmentação da classe foi evidenciada com aplicadas as métricas de subdivisão, com manchas extremamente conectadas entre si.

Estes resultados justificaram a aplicação do Índice Integral de Conectividade apenas para a classe Caatinga Densa. Para a conectividade estrutural proposta neste trabalho, estabeleceu-se uma distância mínima de 1,5km e máxima de 7,5km em uma matriz permeável. Os fragmentos-chave destacados pelo IIC concentram-se na porção sul da região do Cariri

Paraibano; e quando a distância se tornou maior, incluiu fragmentos a noroeste e a leste da área de estudo.

No entanto, os resultados demonstraram um cenário alarmante para a conectividade entre as Unidades de Conservação existentes na área de estudo. Apenas a APA das Onças apresentou fragmentos com elevados valores de IIC no seu interior e entorno quando aplicado a distância de 1,5km. Ao ampliar para 7,5km, a RPPN Fazenda das Almas também contribuiu para a proteção de fragmento-chave em seu interior; já a APA do Cariri e a RPPN Fazenda Santa Clara não apresentaram nenhum fragmento com maiores valores de IIC, embora abriguem remanescentes de Caatinga Densa.

Como estratégia ao planejamento ambiental, os componentes geoambientais das UCs e dos fragmentos destacados pelo IIC foram analisados e relacionados, a fim de verificar a viabilidade de serem elementos facilitadores para a formação de corredores ecológicos. Observou-se uma nítida relação entre neossolos, rochas graníticas e topografia nestes ambientes. Complementarmente, o TWI demonstrou que as maiores elevações e declividades mais acentuadas são responsáveis pelo escoamento superficial, sendo o acúmulo de água e de sedimentos iniciado nas encostas e em áreas com presença de falhas e/ou fraturas geológicas, até serem mais representativos nas drenagens.

A relação identificada corroborara com a hipótese da tese e se tornam regiões favoráveis para a manutenção dos fragmentos de Caatinga Densa. Considerou-se o paralelismo entre os lineamentos de altos topográficos e as zonas de cisalhamento diretrizes para a formação dos corredores ecológicos da região do Cariri Paraibano, embasadas na teoria dos fractais, onde as feições geomorfológicas dos relevos residuais se repetem na escala regional, representadas pelas estruturas geológicas.

O cenário apresentado destacou áreas legalmente protegidas para serem objeto de estudos detalhados no âmbito da biologia, das geociências e das ciências sociais, de modo a garantir a efetividade dos corredores ecológicos enquanto instrumento de planejamento. Entende-se que a integração das ciências e dos saberes tradicionais deve ser vista como solução na mitigação de conflitos territoriais para uso do solo, na utilização sustentável dos recursos naturais e na proteção da biodiversidade e dos patrimônios culturais e geológicos.

Diante à interpretação do mapa de uso e ocupação da terra, das métricas da paisagem e das áreas potenciais para formação de corredores ecológicos, sugere-se a:

- ✓ Planejamento de ações de manejo das áreas invadidas pela algaroba;
- ✓ Estabelecimento de novas categorias de Unidades de Conservação, com elaboração dos respectivos planos de manejo;

- ✓ Criação de outras políticas públicas eficazes para a proteção dos remanescentes de Caatinga e das faixas marginais dos cursos d'água efêmeros;
- ✓ Averbação das Reservas Legais;
- ✓ Consolidação da proposta de criação do Geoparque do Cariri para proteger o patrimônio cultural, estimular o turismo e o desenvolvimento socioambiental do território;
- ✓ Implementação Sistemas de Gestão Ambiental e práticas sustentáveis nas atividades industriais existentes ou a serem instaladas na região;
- ✓ Aplicação de práticas agroflorestais e de pousio para manejo adequado do solo utilizado nas atividades de subsistência;
- ✓ Criação dos corredores ecológicos a partir das diretrizes propostas neste trabalho, de modo a subsidiar estudos mais detalhados da biologia, geologia, geomorfologia e pedologia, bem como dos aspectos socioculturais e econômicos da população local.

6 BIBLIOGRAFIAS

AB'SABER, A.N. Caatingas: o domínio dos sertões secos. In: AB'SABER, A.N. **Os Domínios de Natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2011. 6ª ed., 160p. p. 83-100.

AESA – **Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba**. Disponível em: <<http://geoserver.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/mapas.html>>. Acesso em 09 de agosto de 201

ALMEIDA, H. A.; MEDEIROS, E. A. Variabilidade no regime pluvial em duas mesorregiões da Paraíba e sua relação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 02, n. 03, p. 177-185, 2017.

ANDRADE, L. D. The caatingas dominium. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 4, 149-153, 1981.

ANDRADE, L. A.; FABRICANTE, J. R.; OLIVEIRA, F. X. Impactos da invasão de *Prosopis juliflora* (sw.) DC. (Fabaceae) sobre o estrato arbustivo-arbóreo em áreas de Caatinga no Estado da Paraíba, Brasil. **Maringá**, v. 32, n. 3, p. 249-255, 2010.

ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; FONSECA, C. R. Fragmentation patterns of the Caatinga drylands. **Landscape Ecology**, v. 33, p. 1353, 2018. DOI [10.1007/s10980-018-0672-6](https://doi.org/10.1007/s10980-018-0672-6)

ARROYO-RODRÍGUEZ, V.; FAHRIG, L.; TABARELLI, M.; WATLING, J.I.; TISCHENDORF, L.; BENCHIMOL, M.; CAZETTA, E.; FARIA, D.; LEAL, I.R.; MELO, F.P.L.; MORANTE-FILHO, J.C.; SANTOS, B.A.; ARASA-GISBERT, R.; ARCE-PEÑA, N.; CERVANTE-LÓPEZ, M.; CUDNEY-VALENZUELA, S.; GALÁ-ACEDO, C.; SAN-JOSÉ, M.; VIEIRA, I.C.G.; SLIK, J.W.F.; NOWAKOWSKI, A. J.; TSCHARNTKE, T. Designing optimal human-modified landscapes for forest biodiversity conservation. **Ecology Letters**, v.23, n. 9, p.1404-1420, 2020.

BALLÉN, L. A.; SOUZA, B. I.; LIMA, E. R. V. Análise espaço-temporal da cobertura vegetal na Área de Proteção Ambiental do Cariri, Paraíba, Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 36, n. 3, p. 555-571, 2016.

Beuchle, R., Grecchi, R.C., Shimabukuro, Y.E., Seliger, R., Eva, H.D., Sano, E., Achard, F., 2015. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography*. 58, 116-127.

BDGEx – **Banco de Dados Geográficos do Exército Brasileiro**. Disponível em: <<https://bdgex.eb.mil.br/mediador/>>. Acesso em 12 de abril de 2019.

BIRCH, C.P.D.; OOM, S.P.; BEECHAM, J.A. Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. **Ecological Modelling**, v. 206; p. 347-359, 2007.

BRASIL. Lei nº 9.985 de 18 de julho de 2000. Regulamenta o artigo 225, § 1º, incisos I, II, III, VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Brasília, 2000.

_____. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca/ PAN-Brasil**. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Recursos Hídricos, 2004. 214p.

_____. **Uso Sustentável e Conservação dos Recursos Florestais da Caatinga**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010. 168p.

_____. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Brasília, 2012.

CASTRO, R. P. O Estado face ao subdesenvolvimento do Cariri Paraibano: o caso da política de reflorestamento. **Ciência e Cultura**, v. 38, n. 2, p. 240-249, 1986.

CAPOANE, V.; TIECHER, T.; ALVARES, J. W. R.; PELLEGRINI, A.; SCHAEFER, G. L.; SANTOS, L. J. C.; SANTOS, D. R. Influência da Resolução do Modelo Digital de Elevação na determinação do Índice Topográfico de Umidade e na capacidade de predição dos teores carbono orgânico do solo. **Revista Geo UERJ**, n. 27, p. 144-155, 2010.

CHEUNG, A.K.L.; BRIERLEY, G.; O'SULLIVAN, D. Landscape structure and dynamics on the Qinghai-Tibetan Plateau. **Ecological Modelling**, 339, p. 7-22, 2016.

COELHO, V.H.R.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ALMEIDA, C.N.; LIMA, E.R.V.; RIBEIRO NETO, A.; MOURA, G.S.S. Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p.64-72, 2014.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991.

CORREA, A. C. B.; TAVARES, B. A. C.; MONTEIRO, K. A.; CAVALCANTI, L. C. S.; LIRA, D. R. Megageomorfologia e Morfoestrutura do Planalto da Borborema. **Revista do Instituto Geológico**, v. 3, n. 1/2, p. 35-52, 2010.

CPC – **Climate Prediction Center**. Disponível em:

<https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php>
Acesso em 09 de agosto de 2019.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil/Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>. Acesso em 12 de junho de 2022.

_____. Contexto Tectônico Regional – Aracaju NW – Folha SC.24-V – Escala 1:500.000. In: ANGELIN, L.A.A.; KOSIN, M (orgs). Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001. Disponível em

http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/plgb/aracajunw/aracajunw_contexto.pdf

DANTAS, J.O. Existe um Efeito de Borda na Caatinga? Evidências de comunidades de líquens em Poço Verde, Sergipe. Dissertação (Mestrado Acadêmico) do Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2016. 105p.

DIAS, L.C. Conflitos e possibilidades entre atividade minerária e geoconservação na área do Geoparque Costões e Lagunas – RJ. Dissertação (Mestrado) do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Rio Claro, 2015, 152p.

DIAS, L.C.; FERREIRA, G.C. A Geoconservação sob a ótica legislativa: uma análise comparativa de leis nacionais e internacionais sobre a proteção do patrimônio geológico. **Revista Geociências UNESP**, v. 37, n. 1, p. 211-223, 2018.

FRANÇA, L.C.J.; MORANDI, D.T.; MENEZES, E.S.; MUCIDA, D.P.; SILVA, M.D.; LISBOA, G.S. Ecologia de paisagens aplicada ao ordenamento territorial e gestão florestal: procedimentos metodológicos. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 5, p. 613-620, 2019.

FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. B.; CHAVES, L. H. G.; LIMA, E. R. V.; SILVA, B. B. Análise espectral e avaliação de índices de vegetação para o mapeamento da caatinga. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 3, p. 01-12, 2015.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97 p.

FOODY, G. M. Status of Land Cover Classification Accuracy Assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 185-201, 2002.

FORMAN, R. T. T. Some general principles of landscape and regional ecology. **Landscape Ecology**, v. 10, n. 3, p. 133-142, 1995.

GAO, B. NDWI: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-366, 1996.

GITELSON, A.; MERZLYAK, M.N. Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves. **Journal of Photochemical and Photobiology B: Biology** 22: 247-252. 1994.

GITELSON, A.A.; MERZLYAK, M.N.; Lichtenthaler, H.K. Detection of red edge position and Chlorophyll. **Journal Plant of Physiology** 148: 501-508. 1996.

GRABOIS, J. G.; MARQUES, M. I. M.; SILVA, M. J. A organização do espaço no baixo vale do Taperoá: uma ocupação extensiva em mudança. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 54, n. 4, p. 81-114, 1991.

HADDAD, N. M.; BRUDVIG, A.; CLOBERT, J.; DAVIES, K. F.; GONZALEZ, A.; HOLT, R. D.; LOVEJOY, T. E.; SEXTON, J. O.; AUSTIN, M. P.; COLLINS, C. D.; COOK, W. M.;

- DAMSCHEIN, E. I.; EWERS, R. M.; FOSTER, B. L.; JENKIS, A. J.; KING, A. J.; LAURANCE, W. F.; LEVEY, D. J.; MARGULES, C. R.; MEBOURNE, B. A.; NICHOLLS, A. O.; ORROCK, J. L.; SONG, D. X.; TOWNSHEND, J. R. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. **Science Advances**, v. 1, n. 2, e1500052, 2015. Disponível em <<http://advances.sciencemag.org/content/1/2/e1500052>>. Acesso em novembro de 2021.
- HASA, E., HYSA, A., TEQJA, Z. (): Quantifying landscape fragmentation via effective mesh size landscape metric: case of Albania. *Agriculture and Forestry*, v. 67, n. 1, p. 215-230, 2021. doi: 10.17707/AgricultForest.67.1.18
- HECKMANN, T. SCHWANGHART, W.; PHILLIPS, J. D. Graph theory – recent developments of its application in geomorphology. **Geomorphology**, 243, P. 130-146, 2015.
- HERRMANN, G. **Incorporando a teoria ao planejamento regional da conservação: a experiência do Corredor Ecológico da Mantiqueira**. Belo Horizonte: Valor Natural, 2011. 228p.
- HOECHSTETTER, S.; WALZ, U.; DANG, L.H.; THINH, N.X. Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure – a proposal to modify the existing set of landscape metrics. **Landscape Online**, v. 3, p. 1-14, 2008.
- IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em 19 de março de 2020.
- INMET – **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_conv_graf>. Acesso em 10 de outubro de 2018.
- JAEGGER, J. A. G. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. **Landscape Ecology**, v. 15, p.115-130, 2000.
- JUSTEAU-ALLAIRE, D.; VIEILLEDENT, G.; RINCK, N.; VISMARA, P.; LORCA, X.; BIRNBAUM, P. Constrained optimization of landscape indices in conservation planning to support ecological restoration in New Caledonia. **Journal of Applied Ecology**, n. 58, p. 744–754, 2021.
- KEDRON, P.J.; FRAZIER, A.E.; OVANDRO-MONTEJO, G.A; WANG, J. Surface metrics for landscape ecology: a comparison of landscape models across ecoregions and scales. **Landscape Ecology**, v. 33, p. 1489-1504, 2018.
- KREMEN, C.; MERENLENDER, A.M. Landscape that work for biodiversity and people. **Science**, v. 362, v. 6412, p.1-9, 2018.
- LAGES, G. A.; MARINHO, M. S.; NASCIMENTO, M. A. L.; MEDEIROS, V. C.; DANTAS, E. L. Geocronologia e aspectos estruturais e petrológicos do Pluton Bravo, Domínio Central da Província Borborema, Nordeste do Brasil: um granito transalcalino precoce no estágio pós-colisional da Orogênese Brasileira. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, n. 1, p. 41-61, 2016.

LAGES, G.A.; FERREIRA, R.V.; MENESES, L.F. NASCIMENTO, M.A.L.; FIALHO, D. **Geoparque Cariri**: proposta. CPRM, 2018. 59p. Disponível em <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/20244>

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da Paisagem com SIG**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 424p.

LAWRENCEI, A.; FRIEDRICH, F.; BEIERKUHNLEIN, C. Landscape fragmentation of the Natura 2000 network and its surrounding áreas. **PLoS ONE**, v.16, n. 10, p. 1-22, 2021: e0258615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258615>.

LAUSCH, A.; BLASCHKE, T.; HAASEC, D.; HERZOGD, F.; SYRBEE, R.U.; TISCHENDORFF, L.; WALZG, U. Understanding and quantifying landscape structure – A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics. **Ecological Modelling**, v. 295, p. 31-41, 2015.

LESSA, T.; SANTOS, J.W.; CORREIA, R.A.; LADLE, R.J.; MACHADO, A.C.M. Known unknowns: Filling the gaps in scientific knowledge production in the Caatinga. **PLoS ONE**, v.14, n. 7, p. 1-12, 2019. e0219359. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219359>

LIMA, F.S.; ALMEIDA, N.V. Dinâmica espaço-temporal da cobertura vegetal na Área de Proteção Ambiental (APA) do Cariri, Paraíba-PB, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 3, p. 699-721, 2017.

LIMA, N.E.; CARVALHO, A.A.; LIMA-RIBEIRO, M.S.; MANFRIN, M.H. Caracterização e história biogeográfica dos ecossistemas secos neotropicais. **Rodriguésia**, v. 69, n. 4, p. 2209-2222, 2018

LIMA, V. R. P.; ARTIGAS, R. C. Propuesta de Ordenación para la Conservación y Manejo de los Recursos Naturales en el Bioma de Caatinga. **Mercator**, v. 11, n. 19, p. 191-210, 2013.

LIMA, V. R. P.; SEABRA, V. S.; XAVIER, R. A.; DORNELLAS, P. C. Análise do Padrão Espacial do Uso e Cobertura do Solo e da Fragmentação e Conectividade da Vegetação no Semiárido do Nordeste Brasileiro: Bacias Dos Rios Taperoá e Alto Paraíba-PB. **Revista de Estudios Andaluces**, n. 37, p. 25-49, 2019.

MAIA, R.P; BEZERRA, F.H.R.; SALES, V.C. Geomorfologia do Nordeste: Concepções clássicas e atuais acerca das superfícies de aplainamento Nordestinas. **Revista de Geografia**, v. especial VIII SINAGEO, n. 1, p. 6-19, 2010.

MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M. A. L. Relevos Graníticos do Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n.2, p. 373-389, 2018

MARINHO, F.P.; MAZZOCHINI, G.G.; MANHÃES, A.P.; WEISSER, W.W.; GANADE, G., 2016. Effects of past and present land use on vegetation cover and regeneration in a tropical dryland forest. **Journal of Arid Environments**. 132, 22-33.

McFEETERS, S. K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, p. 1425–1432, 1996.

McGARIGAL K. Landscape pattern metrics. In: EL-SHAARAWI, A. H.; PIEGORSCH, W. (eds). **Encyclopedia of Environmetrics**. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltda, 2 ed., 2013. p. 1441-1451. Disponível em < <http://www.umass.edu/landeco/pubs/pubs.html>>. Acessado em abril de 2021.

MEIADO, M.V.; RAFAEL, L.M.; CASTRO, R.A.; RODRIGUES, R.G. Challenges and perspectives for recovering socioecological systems in the Caatinga, a Brazilian tropical dry forest. In: **Forest Landscape Restoration and Social Opportunities in the Tropical World**, 2020, p. 277, p.p. 125-158

METZGER, J. P. O que é Ecologia da Paisagem? **Biota Neotropica**, Campinas, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2001.

METZGER, J. P.; FONSECA, M. A.; OLIVEIRA FILHO, F. J. B.; MARTENSEN, A. C. O uso de modelos em ecologia de paisagens. **Megadiversidade**, v. 3, n. 1-2, p. 64-73, 2007.

MORO, M.F.; SILVA, I.A.; ARAÚJO, F.S.; LUGHADHA, E.N.; MEAGHER, T.R.; MARTINS, F.R. The Role of Edaphic Environment and Climate in Structuring Phylogenetic Pattern in Seasonally Dry Tropical Plant Communities. **PLoS ONE**, v. 10, n. 3, p.1-18, 2015.

PAESE, A.; UEZU, A.; LORINI, M. L.; CUNHA, A. (org). **Conservação da Biodiversidade com SIG**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 240 p.

PENG, Y.; MI, K.; QING, F.; XUE, D. Identification of the main factors determining landscape metrics in semi-arid agro-pastoral ecotone. **Journal of Arid Environments**, v. 124, p. 249-256, 2016.

PEREIRA, R.A.; ALCÂNTARA, C.R.; NETO, J.D.; BARBOSA, E.M. Análise Espaço-Temporal da Cobertura Vegetal e do Avanço de *Prosopis juliflora* (SW) DC numa área de Caatinga. **RA'EGA**, v. 28, p. 154-180, 2013.

PEREIRA, V.H.P.; CESTARO, L.A. Corredores ecológicos no Brasil: avaliação sobre os principais critérios utilizados para definição de áreas potenciais. **Caminhos da Geografia**, v. 17, n. 58, p. 16-33, 2016.

PIVELLO, V.R.; METZGER, J.P. Diagnóstico de pesquisa em ecologia de paisagens no Brasil. **Biota Neotropica**, v. 7, n. 3, p. 21-29, 2007.

POMIANOWSKI, W.; SOLON, J. **Modelling patch mosaic connectivity and ecological corridors with GraphScape**. Environmental Modelling and Software, v. 134, p. 1-12, 2020.

REMPEL, R.S.; KAUKINEN D.; CARR A.P. 2012. **Patch Analyst and Patch Grid**. Ontario Ministry of Natural Resources. Centre for Northern Forest Ecosystem Research, Thunder Bay, Ontario. Disponível em: <<http://www.cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/>>. Acessado em março de 2020.

RITTER, L.M.O.; MORO, R.S. As bases epistemológicas da ecologia da paisagem. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3., n. 3, p. 58-61, 2012.

RODRIGUES, J.M.D.; LIMA, E.R.V. Compartimentação Geomorfológica da Bacia do Alto Curso do Rio Paraíba-PB. **Revista Equador (UFPI)**, v. 9, n. 3, p. 100-120, 2020.

RODRIGUES, J.M.M.; SILVA, E.V.; FIGUEIRÓ, A.S. La geoecología de los paisajes como base teórico-metodológica para incorporar la dimensión tecnológica a la temática ambiental. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 51, seção especial: técnica e ambiente, p. 84-103, 2019.

ROUSE, J., HAAS, R., SCHELL, J., DEERING, D. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. **Third ERTS Symposium**, NASA, p. 309-317, 1973.

SALOMÃO, N.V.; SILVA, M. D.D.; MACHADO, E.L.M. Dynamics of vegetation structure in a fragmented landscape in Minas Gerais Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 79, n. 4, p. 678-685, 2019.

SANTOS, A.A B.; COSTA, E. C. P.; LOURENÇO, J. S. Q. Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra do Litoral Leste Fluminense. In: SEABRA, V. S.; AUGUSTO, R. C. (org). **Dinâmicas Ambientais e Geoprocessamento no Litoral Leste do Estado do Rio de Janeiro**, 2018. 137p. p. 69-98.

SANTOS, J.C.; LEAL, I.R.; ALMEIDA-CORTEZ, J.S.; FERNANDES, G.W.; TABARELLI, M. Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. **Tropical Conservation Science**, v. 4, n.3, p. 276-286, 2011.

SANTOS, J.P.S.; DIODATO, M.A. Histórico da implementação da algaroba no Rio Grande do Norte. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 201-212, 2017.

SANTOS, M.C. **Cadernos do Semiárido: riquezas & oportunidades**. Recife: EDUFRPE, 2017, v. 10, n. 10. 60p.

SAURA, S.; RUBIO, L. A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. **Ecography**, v. 33, p. 523-537, 2010.

SEABRA, V. S.; XAVIER, R. A.; DAMASCENO, J.; DORNELLAS, P. C. Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo da Bacia do Rio Taperoá: Região Semiárida do Estado da Paraíba. **Caminhos de Geografia**, v. 15, n. 50, p. 127-137, 2014.

SENA, J.P.O.; MELO, J.S.; LUCENA, D.B.; MELO, E.C.S. Comparação entre Dados de Chuva Derivados do Climate Prediction Center e Observados para a Região do Cariri Paraibano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 02, p. 412-420, 2012.

SENA, J. P. O.; MORAIS NETO, J. M.; LUCENA, D. B. Variabilidade interdecadal da precipitação na região do Cariri Paraibano e a relação com eventos sobre os oceanos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, p. 199-210, 2017.

SILVA, A.C.; SOUZA, A.F. Aridity drives plant biogeographical sub regions in the Caatinga, the largest tropical dry forest and woodland block in South America. **PLoS ONE**, v. 13, n. 4, e0196130, p.1-14, 2018.

SILVA, D. V. P.; CRUZ, C. B. M. Tipologias de Caatinga: uma revisão em apoio a mapeamentos através de sensoriamento remoto orbital e GEOBIA. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 33, p. 113-120, 2018.

SILVA, G.F. Recuperação Ambiental das Áreas de Extração de Bentonita na Região de Boa Vista/PB. **Holos Environment**, v. 20, n.1, p. 88-99, 2020.

SILVA, L.F.; SOUZA, B.I.; BACANI, V.M. Intensidade da ação antrópica na Área de Proteção Ambiental do Cariri Paraibano. **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 71, p. 364-385, 2019.

SILVA, L.F.; SOUZA, B.I. Fragilidade Ambiental na APA das Onças, Município de São João do Tigre (PB) no semiárido brasileiro. *Revista Continentes (UFRRJ)*, n.17, p. 120-140, 2020.

SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; MARANHÃO, K.U.A.; SILVA, A.M.; LIMA, V.R.P. Geospatial assessment of eco-environmental changes in desertification area of the Brazilian semi-arid region. **Earth Sciences Research Journal**, v. 22, n. 3, p. 1-22, 2018.

SILVEIRA, H. L. F.; GALVÃO, L. S.; SANCHES, I. D.; SÁ, I. B.; TAURA, T. A. Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping vegetation and studying the relationships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, n. 73, p. 179-190, 2018.

SIQUEIRA, M. N.; CASTRO, S. S.; FARIA, K. M. S. Geografia e Ecologia da Paisagem: pontos para discussão. **Sociedade & Natureza**, v. 25, n.3, p. 557-566, 2013.

SMITH, W.K., DANNENBERG, M.P., YAN, D., HERRMANN, S., BARNES, M.L., BARRON-GAFFORD, G.A., MOORE, D.J.P, NAGLER, P.L., REED, S.C., RUTHERFORD, W.A., SCOTT, R.L., WANG, X., YANG, J., 2019. Remote sensing of dryland ecosystem structure and function: Progress, challenges, and opportunities. **Remote Sensing of Environment**. 233, 111401.

SOUZA, B. I.; ARTIGAS, R. C.; LIMA, E. R. V. Caatinga e Desertificação. **Mercator**, v. 14, n. 1, p. 131-150, 2015.

USGS – **United States Geological Survey**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>. Acesso em 10 de agosto de 2019.

VASCONCELOS, J.O.; SOUZA, J.O.P. Classificação de Unidades de Paisagem em Bacia Hidrográfica Semiárida – uma abordagem do Índice Topográfico de Umidade. **Revista Contexto Geográfico**, v. 3, n. 6, p. 66-76, 2018.

VELLOSO, A. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; PAREYN, F. G. C. Ecorregiões: propostas para o Bioma Caatinga (eds). In: Resultados do Seminário de Planejamento Ecorregional da Caatinga: **The Nature Conservancy do Brasil**, 2002. 80p.

VENDRUSCOLO, J.; MARIN, A.M.P.; FELIX, E.S.; FERREIRA, K.R.; CAVALHEIRO, W.C.S.; FERNANDES, I.M. Monitoring desertification in semiarid Brasil: using the Desertification Degree Index (DDI). **Land Degradation & Development – Wiley Online Library**, n. 32, p. 684-698, 2021.

VIDAL, M.R.; MASCARENHAS, A.L.S. Estrutura e funcionamento das paisagens litorâneas cearenses à luz da Geoecologia das Paisagens. *Geosp – Espaço e Tempo (Pn-line)*, n. 24, n. 3, p. 600-615, 2020.

VIEIRA, R.M.D.S.P.; TOMASELLA, J.; BARBOSA, A.A.; MARTINS, M.A.; RODRIGUEZ, D.A.; REZENDE, F.S.D. Desertification risk assessment in Northeast Brazil: current trends and future scenarios. **Land Degradation & Development – Wiley Online Library**, n. 32, p. 224-240, 2021.

WU, J.; HOBBS, R. Key issues and research priorities in landscape ecology: an idiosyncratic synthesis. **Landscape Ecology**, v. 17, p. 355–365, 2002.

WU, J. Key concepts and research topics in landscape ecology revisited: 30 years after the Allerton Park workshop. **Landscape Ecology**, v. 28, p. 1-11, 2013.

XU, H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **Int. J. Remote Sens**, 27, 3025–3033, 2006.

ZHANG, J.; ZHU, W.; ZHAO, F.; ZHU, L.; MAOJUAN, L; ZHU, M.; ZHANG, X. Spatial variations of terrain and their impacts on landscape patterns in the transition zone from mountains to plains – A case study of Qihe River Basin in the Taihang Mountains. **Science China – Earth Sciences**, v. 61, n. 4, p. 450-461, 2018.

ZOILKOWSKA, E.; OSTAPOWICZ, K.; RADELOFF, V. C.; KUEMMERLE, T. Effects of different matrix representations and connectivity measures on habitat network assessments. **Landscape Ecology**, n. 29, p. 1551-1570, 2014.