



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E AGRIMENSURA
CURSO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E AGRIMENSURA

GUILHERME LIRA

**IDENTIFICAÇÃO DE FITOFISIONOMIAS POR ÍNDICE DE VEGETAÇÃO E
DADOS LiDAR**

Recife
2019

GUILHERME LIRA

**IDENTIFICAÇÃO DE FITOFISIONOMIAS POR ÍNDICE DE VEGETAÇÃO E
DADOS LiDAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Cartográfica e Agrimensura do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Orientadora: Profa. Dra. Lígia Albuquerque de Alcântara Ferreira.

Recife
2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

L768i Lira, Guilherme.
Identificação de fitofisionomias por índice de vegetação e dados LiDAR
/ Guilherme Lira. – 2019.
63 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Lígia Albuquerque de Alcântara Ferreira.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Cartográfica e Agrimensura, 2019.
Inclui Referências.

1. Engenharia Cartográfica. 2. Caatinga. 3. Fitofisionomias. 4. Sentinel-
2. 5. Índices de vegetação. 6. LiDAR. I. Ferreira, Lígia Albuquerque de
Alcântara. (Orientadora). II. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-280

GUILHERME LIRA

**IDENTIFICAÇÃO DE FITOFISIONOMIAS POR ÍNDICE DE VEGETAÇÃO E
DADOS LiDAR**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso da Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito básico para obtenção do grau de Engenheiro Cartógrafo.

Aprovado em: 04/07/2019.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Lígia Albuquerque de Alcântara Ferreira (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Lucilene Antunes Correia Marques de Sá (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

À minha mãe pelo amor e por me mostrar que as melhores escolhas são aquelas que nos fazem felizes.

Aos meus familiares, por sempre acreditarem em mim.

À coisinha, Camila Teixeira que me apoiou, me acompanhou, me aturou e me ajudou em todas as etapas desse trabalho.

À Prof. Dra. Lígia Albuquerque de Alcântara Ferreira, por quem tenho uma grande admiração e respeito e que, com muita paciência e sabedoria, conduziu a orientação deste Trabalho de Conclusão de Curso.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento deste Trabalho.

Ao monstro do espaguete voador e seu grande apêndice macarrônico.

Ao Google Acadêmico e outros sites que disponibilizam artigos legais gratuitamente.

A todos aqueles que de alguma forma doaram um pouco do seu tempo para que a conclusão deste trabalho se tornasse possível, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O Parque Nacional do Catimbau (PARNA Catimbau) está localizado no Estado de Pernambuco, abrangendo os municípios de Buíque, Ibimirim, Sertânia e Tupanatinga, entre o Agreste e o Sertão, e inserindo-se no bioma Caatinga, que sua vez, possui fitofisionomias variadas e de difícil mapeamento, sua vegetação natural adaptada às condições do semiárido brasileiro é influenciada por fatores naturais, como características climatológicas, botânicas e pedológicas locais, e influenciada pela exploração antrópica. O presente estudo objetivou avaliar o potencial de aplicação das observações LiDAR para o mapeamento das fitofisionomias da Caatinga, utilizando as chaves de classificação propostas por Sá (2008). Para obtenção das fitofisionomias foi aplicado um algoritmo desenvolvido na linguagem de programação Python em que inicialmente realizou-se a estratificação vertical, onde foram classificadas em cinco grupos de portes vegetativos, e em seguida foi avaliada a densidade dos espécimes, numa área de 49m². Os resultados mostraram que o algoritmo foi sensível a identificação de todas as classes propostas, identificando todas as vinte possíveis fitofisionomias no PARNA Catimbau, entre as quais, as que apresentaram maior espacialização foram as Subarbustivas semi-densa e aberta, cobrindo juntas uma área de 36,06%. Considerando a estratificação vertical, observou-se que o porte da cobertura vegetal da área de estudo varia de baixo a médio, com mais de 66% da área classificada entre gramínea lenhosa e subarbustiva. Além disso, objetivando investigar a existência de possíveis relações espaciais entre os resultados da fitofisionomia de vegetação mapeada e as modelagens de índices de vegetação, foi aplicada uma regressão linear utilizando a fitofisionomia como variável dependente e 4 índices de vegetação (NDVI, OSAVI, NDII1 e NDII2) como variáveis independentes, através do aplicativo *Curve Fitting Tool* do software Matlab, versão trial. Os resultados mostraram que há correlação positiva forte entre as fitofisionomias e os valores dos índices de vegetação na amostra selecionada.

Palavras-chave: Caatinga. Fitofisionomias. Sentinel-2. Índices de vegetação. LiDAR.

ABSTRACT

The Catimbau National Park (PARNA Catimbau) is located in the State of Pernambuco, encompassing the municipalities of Buíque, Ibimirim, Sertânia and Tupanatinga, between Agreste and Sertão, and entering the Caatinga biome, which in turn has varied phytophysiognomies and difficult to map, its natural vegetation adapted to Brazilian semi - arid conditions is influenced by natural factors, such as climatological, botanical and pedological characteristics, and influenced by anthropic exploration. The present study aimed to evaluate the potential of the application of LiDAR observations for the mapping of Caatinga phytophysiognomies using the classification keys proposed by Sá (2008). In order to obtain the phytophysiognomies, an algorithm was developed in the Python programming language, where the vertical stratification was initially performed, where they were classified into five groups of vegetative gates, and then the density of the specimens was evaluated in an area of 49m². The results showed that the algorithm was sensitive to the identification of all the proposed classes, identifying all twenty possible phytophysiognomies in the PARTI Catimbau, among which, the ones with the greatest spatialisation were the semi-dense and open sub-bushes, covering together an area of 36,06%. Considering the vertical stratification, it was observed that the vegetation cover of the study area varies from low to medium, with more than 66% of the area classified as woody and sub-shrub grass. In addition, a linear regression was applied using phytophysiognomy as a dependent variable and 4 vegetation indices (NDVI, OSAVI, NDII1 and NDII1) were used to investigate the existence of possible spatial relationships between the results of vegetation mapping vegetation and vegetation indices modeling. NDII2) as independent variables, through the Curve Fitting Tool application of the Matlab software, trial version. The results showed that there is a strong positive correlation between the phytophysiognomies and the vegetation index values in the selected sample.

Keywords: Caatinga. Phytophysiognomies. Sentinel-2. Indices of vegetation. LiDAR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Retornos LiDAR	20
Figura 2 – Divisão do território de Pernambuco em cinco lotes para cobertura do perfilamento a laser.....	21
Figura 3 – Localização da área de estudo.....	25
Figura 4 – Boxplot da Precipitação Mensal.....	26
Figura 5 – Pedologia do PARNA Catimbau.....	28
Figura 6 – Mapa da rede hidrográfica no PARNA Catimbau	28
Figura 7 – Fluxograma	31
Figura 8 – Mosaico das cartas utilizadas do PE-3D	33
Figura 9 – Estratificação vertical para fitofisionomias do PARNA Catimbau.....	37
Figura 10 – Classificação das fitofisionomias do PARNA Catimbau.....	40
Figura 11 – NDVI do PARNA Catimbau.....	42
Figura 12 – OSAVI do PARNA Catimbau	43
Figura 13 – NDII1 do PARNA Catimbau	44
Figura 14 – NDII2 do PARNA Catimbau	45
Figura 15 – Mapa de localização da amostra	46
Figura 16 – Modelo Digital de Terreno da amostra	47
Figura 17 – Modelo Digital de Elevação da amostra	48
Figura 18 – NDVI da amostra	49
Figura 19 – OSAVI da amostra	50
Figura 20 – NDII1 da amostra.....	51
Figura 21 – NDII2 da amostra.....	52
Figura 22 – Fitofisionomia 7x7 metros	53
Figura 23 – Fitofisionomia 20x20 metros	54
Figura 24 – Fitofisionomias X NDVI.....	55
Figura 25 – Fitofisionomias X OSAVI	55
Figura 26 – Fitofisionomias X NDII1	56
Figura 27 – Fitofisionomias X NDII2	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características técnicas do sistema de perfilamento a LASER.	22
Tabela 2 – Resoluções e Bandas Sentinel-2	23
Tabela 3 – Unidades e composição pedológica no PARNA Catimbau.....	27
Tabela 4 – Estratificação vertical para fitofisionomias de Caatinga	33
Tabela 5 – Estratificação horizontal para fitofisionomias de Caatinga	33
Tabela 6 – Equações do Índices de Vegetação.....	35
Tabela 7 – Classes de estratificação vertical e sua ocorrência no PARNA Catimbau	36
Tabela 8 – Média e desvio padrão das alturas da vegetação no PARNA Catimbau	36
Tabela 9 – Tipos e cobertura das fitofisionomias do PARNA Catimbau.....	38

LISTA DE SIGLAS

ALS	Airborne laser scanner
CHM	Canopy height model
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DGPS	Differential global positioning system
DU	Unidade Dobson
ESA	European space agency
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMU	Inertial measurement unit
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INS	Inertial navigation system
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
IV	Índices de Vegetação
LiDAR	Light detection and ranging
MDD	Modelo digital do dossel
MDE	Modelos Digitais de Elevação
MDS	Modelos Digitais de Superfície
MDT	Modelos Digitais de Terreno
MIN	Ministério da Integração Nacional
MSI	Multi spectral instrument
NDII1	Normalized difference infrared index 1
NDII2	Normalized difference infrared index 2
NDVI	Índice de Vegetação de Diferença Normalizada
NEB	Nordeste brasileiro
NIR	Infravermelho próximo
OMI	Ozone monitoring instrument
OSAVI	Índice de vegetação ajustado ao solo otimizado
PARNA	Parque nacional
PE3D	Pernambuco tridimensional
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SNAP	Sentinel application platform
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
SWIR	Infravermelho de ondas curtas
TLS	Terrestrial laser scanner
UC	Unidade de conservação
UICN	União Internacional para a Conservação da Natureza
USGS	Serviço Geológico do Estado Unidos
VIS	Faixas do visível

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos.....	15
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	16
2.1	UNIDADES DE CONSERVAÇÃO E O PARNA CATIMBAU	16
2.2	SENSORIAMENTO REMOTO PARA FITOFISIONOMIAS	17
2.2.1	Índices de Vegetação	17
2.2.2	Sensores e Ferramentas de Geoprocessamento	18
2.2.2.1	Light Detection And Ranging (LiDAR).....	18
2.2.2.2	Sensor MDI/Sentinel 2	22
2.2.2.3	Python.....	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	25
3.1.1	Clima.....	25
3.1.2	Geomorfologia e Pedologia	27
3.1.3	Hidrologia.....	28
3.1.4	Vegetação.....	29
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	31
3.2.1	Aquisição e Tratamento dos Dados LiDAR	32
3.2.2	Aquisição e Pré-Processamento das Imagens MSI/Sentinel-2A.....	34
3.2.3	Índices de Vegetação	35
3.2.4	Análises Estatísticas	35
4	RESULTADOS	36
4.1	IDENTIFICAÇÃO DAS FITOFISIONOMIAS	36
4.2	ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	41
4.3	ANÁLISE AMOSTRAL	46
5	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

O bioma Caatinga é exclusivo do Brasil, se estendendo por grande parte dos estados do Nordeste (Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia) além da porção nordeste de Minas Gerais, e é um dos três ecossistemas semiáridos da América do Sul (LEAL *et al.*, 2003; AB'SABER, 2005).

O semiárido brasileiro ocupa cerca de 970.000 km², correspondendo a 11,4% do território (IBGE, 2004; MIN, 2005). Possui um cenário de destaque na biodiversidade Nacional e Latina, marcado pela escassez e grande variabilidade espaço temporal da precipitação que, somada a altas temperaturas e a comum ocorrência de solos rasos e pedregosos que acumulam pouca água, gera uma condição de fortes deficiências hídricas (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000).

A vegetação da caatinga é adaptada a esta condição, manifestando características morfológicas, anatômicas e mecanismos fisiológicos apropriados para resistir ao ambiente árido. Podendo ser descrita como uma floresta de baixo porte que inclui numerosas formações e associações vegetais, com cobertura comumente descontínua, folhagem decídua na fase seca, e árvores com troncos acinzentados e de ramificação profusa, frequentemente com espinhos e acúleos ou microfilia, e propriedades xerofíticas (QUEIROZ *et al.*, 2006).

A organização da caatinga se dá em fitofisionomias com quantidade de vegetação e estrutura do dossel variadas, mas com recorrente transição gradual de seus limites. No Sertão pernambucano há predomínio da Caatinga hiperxerófila, integrada por fitofisionomias que vão de formações arbustivas com cobertura esparsa, ocorrendo nos solos rasos e pedregosos, até formações arbóreas de cobertura densa, nos solos mais bem desenvolvidos (SILVA, 2009).

Estas variações florísticas e fisionômicas acontecem devido às oscilações climáticas, de altitude, de solo e geomorfologia, além da ação antrópica, tornando complexo o mapeamento dos tipos de vegetação no semiárido, evidente pela ausência de uma chave de classificação consolidada.

Um dos pioneiros a desenvolver estudos a respeito das variedades fitofisionômicas foi Andrade-Lima (1981), que esmiuçou cerca de doze tipos de Caatinga, constituindo unidades formadas por um ou mais destes tipos, porém sua metodologia foi baseada fundamentalmente na perspectiva florística, complicando sua reprodução para mapeamentos em larga escala.

Sampaio e Rodal (2000), tentaram mapear as unidades indicadas por Andrade-Lima (1981), integrando-as com as unidades de paisagem e os geoambientes. Contudo, as dessemelhanças entre as particularidades e as escalas entre os estudos não possibilitaram o mapeamento detalhado das diversas fitofisionomias.

O sensoriamento remoto tem desempenhando um papel de destaque nas investigações das fitofisionomias da Caatinga. Seus dados permitem analisar e estimar mudanças estruturais no dossel, na constituição bioquímica e no vigor vegetativo, de acordo com as resoluções espacial e espectral. Nota-se um progressivo investimento em novos sensores, onde se destaca o *Multi Spectral Instrument* (MSI), nos satélites Sentinel-2A e B, lançados em junho de 2015 e em março de 2017, respectivamente, com treze bandas espectrais, que abrangem nas faixas do visível (VIS), do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR), e com resolução espacial variando de 10 a 20 metros para as suas principais 10 bandas, e as demais com resolução de 60 metros aplicadas para processamentos de correção atmosférica (DRUSCH *et al.*, 2012).

Apesar dos sensores ópticos multiespectrais passivos apresentarem grande potencial de indicar variações na estrutura e densidade da vegetação ou na estrutura horizontal dos dosséis, existem limitações para diferenciar a estrutura vertical da vegetação quando comparados com os sensores ativos *Light Detection And Ranging* (LiDAR).

Sensores tridimensionais baseados nas tecnologias de radar e laser têm se destacado nas metodologias de classificação e detecção de mudanças na cobertura vegetal, pois além de obter informações sobre a topografia do solo, cobertura da superfície, esses sensores têm a capacidade de penetrar verticalmente através dos espaços no dossel, permitindo a aquisição informações sobre os diferentes estratos da vegetação, e a análise dos parâmetros estruturais tridimensionais da floresta, podendo ainda quantificar as dimensões volumétricas da vegetação (GORGENS *et al.*, 2016). Os dados LiDAR permitem uma ampla aplicação em variadas áreas da engenharia em virtude de sua elevada precisão e detalhamento no imageamento dos objetos em estudo, pois produz uma nuvem tridimensional de pontos bastante densa (GIONDO *et al.*, 2010).

Neste contexto, o uso de classificadores usando linguagem de alto nível é bastante interessante, considerando a existência de observações do MSI/Sentinel-2 sobre a Caatinga e a possibilidade do uso combinado de dados LiDAR disponíveis. (RODRIGUEZ-GALIANO *et al.*, 2012; MÜLLER *et al.*, 2015; CLARK e KILHAM, 2016).

Por efeito das atividades antrópicas e também das mutabilidades climáticas, parte da vegetação do semiárido tem alta vulnerabilidade, com graves riscos à sobrevivência de espécies, de comunidades e de linhagens vegetais, além do aumento no risco de desertificação (MORO *et al.*, 2015; TEIXEIRA, 2018). Comparando-se com outros ecossistemas, a caatinga possui uma rede pobre de áreas protegidas, tendo o menor número de unidades de conservação do país e apenas 2% de sua cobertura sob alguma forma de proteção, não abrangendo toda a sua variabilidade ambiental (PEDROSA *et al.*, 2015).

Inserido no sertão de Moxotó, no centro de Pernambuco, na região do Vale do Ipanema, o Parque Nacional do Catimbau (PARNA Catimbau), criado por decreto federal (Decreto n ° 4.340 / 2002) em 13 de dezembro de 2002, constitui uma excelente área de estudo, exibindo uma vegetação bastante preservada e representativa das fitofisionomias de Caatinga da cobertura original daquela porção do Nordeste. A região é considerada de extrema importância biológica para conservação dos ambientes de Caatinga do nordeste brasileiro devido à sua riqueza e endemismo (MMA 2002). Segundo Vranckx (2010), a valoração do PARNA Catimbau pode ser destacada no aspecto geológico, arqueológico, antropológico e espeleológico.

Assim, a análise das comunidades vegetacionais do bioma Caatinga, neste caso, a classificação da vegetação em seu aspecto fisionômico, é uma prática relevante na compreensão dos padrões ecológicos, cujos resultados tornam-se condição essencial para a manutenção das condições biológicas, preservação e entendimento dos diversos sistemas que compõem o Parque Nacional do Catimbau.

1.1 OBJETIVOS

Apresentam-se aqui os objetivos desta pesquisa, divididos em objetivo geral e objetivos específicos, abaixo descritos.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é o mapeamento de fitofisionomias da vegetação do Parque Nacional do Catimbau através de dados multi-temporais do sensor MSI/Sentinel-2, juntamente com observações LiDAR.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um comparativo dos dados obtidos no mapeamento Parque Nacional do Catimbau e suas fitofisionomias através do satélite Sentinel-2A e métricas do LiDAR;
- Analisar a correlação entre a vegetação local, as métricas do LiDAR e o comportamento da vegetação local usando dez bandas espectrais e seis índices de vegetação calculados a partir dos dados do sensor MSI/Sentinel-2A

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Para subsidiar o desenvolvimento da pesquisa o presente capítulo apresenta uma caracterização da área de estudo, o Parque Nacional do Catimbau, além de uma abordagem teórica das ferramentas e dados aplicados na metodologia.

2.1 UNIDADES DE CONSERVAÇÃO E O PARNA CATIMBAU

As Unidades de Conservação estabelecidas no Brasil têm desempenhado papel estratégico de proteção da diversidade biológica, cultural, do patrimônio natural e arquitetônico e, sobretudo, além de exercer uma importante função na garantia dos direitos dos povos, populações e comunidades tradicionais (ANDRADE, 2004).

De acordo com a União Internacional para a Conservação da Natureza (UICN), as áreas protegidas são uma região geográfica claramente definida, reconhecida, destinada e gerida, por elementos legais e por outros meios, que sejam eficientes e garantam a devida conservação da natureza, suas atividades ecossistêmicas e sua relevância cultural.

O marco da constituição das áreas protegidas no mundo foi a criação do Parque Nacional de Yellowstone, nos Estados Unidos da América. Criado em 1872 às margens do rio Yellowstone, no Oeste dos Estados Unidos. Este Parque Nacional procurou responder, em parte, a um intenso processo de apropriação da terra, de dilapidação dos recursos naturais, de concentração de renda e de poder desencadeado nos Estados Unidos, particularmente após meados do século XIX (ANDRADE, 2004).

No Brasil as unidades de conservação (UCs) são um tipo especial de área protegida, ou seja, espaços territoriais (incluindo seus recursos ambientais e as águas jurisdicionais) com características naturais relevantes, legalmente instituídos pelo Poder Público, com objetivos de conservação e de limites definidos, sob regime especial de administração, às quais se aplicam garantias adequadas de proteção.

Segundo a Lei nº 9.985/2000 (SNUC), as unidades de conservação dividem-se em dois grupos com particularidades distintas, são eles: unidades de uso sustentável e unidades de proteção integral nos termos do artigo 7º.

As unidades de uso sustentável possuem por finalidade harmonizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parte dos recursos naturais existentes, conforme previsão do §2º, art. 7º, da referida Lei.

As unidades de proteção integral têm por objetivo básico a conservação e preservação da natureza, restringindo desse modo, o uso de seus recursos de forma indireta, ou seja, uso que não envolve o consumo, coleta, dano ou destruição dos recursos naturais existentes, com

exceção apenas para casos previstos no §2º, art. 7º, da referida Lei. Estas, são divididas por cinco categorias de unidades de conservação, conforme o Art 8º da Lei nº 9.985/2000:

- I - Estação Ecológica;
- II - Reserva Biológica;
- III - Parque Nacional;
- IV - Monumento Natural;
- V - Refúgio de Vida Silvestre.

Atualmente o Brasil possui 64 Parques Nacionais, os quais se tornam, em princípio, áreas destinadas à preservação ambiental de ecossistemas relevantes para o país (Vranckx 2010). O Parque Nacional do Catimbau, objeto de estudo da presente pesquisa, instituído sob o Decreto de 13 de dezembro de 2002 é um deles.

O nome Catimbau advém da serra de Catimbau, pertencente à Chapada de São José, localizada no distrito de Catimbau, em Buíque. Grande parte da área física do Parque compreende as movimentações do acidente orográfico conhecido como chapada de São José, em Buíque. Esta chapada foi formada pelo soerguido de sedimentos cretáceos, depositados sobre depressões tectônicas do escudo cristalino, do Pré-Cambriano, dentro da bacia sedimentar cretácea da série Tucano-Jatobá, na área de drenagem do rio Moxotó (JACOMINE *et al.*, 1973).

É formada por serras e morros que constituem relevos testemunhos de uma área contínua de arenitos que ligavam a chapada de São José e as serras do Quiridinho e do Parafuso, em Buíque, mais para oeste a Serra Negra e do Piriquito, no município de Inajá, e em direção do sudoeste, a Serra de Tacaratu. Estas áreas de arenitos cretáceos e pós-cretáceos medem aproximadamente 160km de extensão na direção sudoeste e cerca de 60km de largura, além de uma área isolada nas margens do rio Pajeú (MELO, 2011)

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO PARA FITOFISIONOMIAS

Neste tópico serão apresentados os índices de vegetação, as ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto.

2.2.1 Índices de Vegetação

As variações na vegetação são facilmente interpretadas a partir de imagens de satélite. Desse modo, os índices de vegetação obtidos de imagens de satélite são amplamente utilizados como indicadores, e têm se mostrado eficientes para caracterização e classificação da caatinga (FRANCISCO *et al.*, 2012).

O Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) proposto por Rouse *et al.* (1973), é a razão entre a diferença da reflectância no infravermelho próximo (NIR) e a

reflectância vermelha, pela soma das mesmas, cujo valor matemático varia entre -1 e +1. Sua escolha se deu por ser amplamente utilizado na literatura e por sua sensibilidade frente às variações do vigor vegetativo. Mesmo com limitações, tem sido empregado para análises na Caatinga com bons resultados (BARBOSA *et al.*, 2006; FRANCISCO *et al.*, 2012; PETTA *et al.*, 2013; ABADE *et al.*, 2015).

Tal qual o NDVI, mais um índice determinado por uma relação normalizada entre duas bandas é o Índice Infravermelho de Diferença Normalizada (NDII1), apresentado por Kimes *et al.* (1981) e alterado por Hardisky *et al.* (1983), foi então reapresentado como NDII2.

O NDII usa informações dos intervalos espectrais do infravermelho próximo e do de ondas curtas em seus cálculos, uma vez que essas áreas do espectro recebem influência da quantidade de água nas folhas ou em forma de umidade dispersa no dossel, o NDII possui alto potencial para caracterizar o estresse hídrico (JACON *et al.*, 2017), destacando-se em pesquisas em regiões áridas e semiáridas, com resultados satisfatórios em relação as observações de precipitação.

2.2.2 Sensores e Ferramentas de Geoprocessamento

Neste tópico serão abordadas mais especificamente os sensores de aquisição das imagens e o python, este último utilizado para geração do algoritmo de classificação da fitofisionomia.

2.2.2.1 Light Detection And Ranging (LiDAR)

A tecnologia LiDAR é um sistema de sensores ativos, que irradiam energia artificial para obter informações, sendo similares ao *Radio Detection and Ranging* (RADAR) (ZANDONÁ *et al.*, 2008). Investigações a respeito das potencialidades de aplicação de dados LiDAR para investigações florestais iniciaram na década de 70, se apresentando como uma solução rápida e precisa para mapeamento planialtimétrico de grandes áreas em alta resolução (GORGENS *et al.*, 2014).

Segundo Asner *et al.* (2012), a capacidade do LiDAR penetrar no dossel e detectar a estrutura tridimensional dos aglomerados de vegetação o coloca em destaque entre as ferramentas para análise da cobertura vegetal.

A tecnologia LiDAR pode fazer aquisições terrestres (*Terrestrial Laser Scanner* (TLS)), aéreas (*Airborne Laser Scanner* (ALS)) ou orbitais, seguindo o mesmo princípio, que se baseia na cálculo das distâncias e das coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos medidos em relação ao centro de fase do sensor, através do registro do tempo, das intensidades dos raios

refletidos pela superfície escaneada e os parâmetros de atitude do feixe, que são coordenadas polares do ponto em relação ao centro de fase do laser (TOMMASELLI, 2003; RIBEIRO JÚNIOR, 2011; SILVA, 2011).

O princípio operacional do LiDAR fundamenta-se na emissão de um pulso de feixes ópticos de alta frequência, alta repetição e na velocidade da luz. O feixe é disparado em direção aos alvos através de um espelho de varredura que recebe a porção do laser retroespalhada, no sentido transversal se a plataforma for aerotransportada ou paralela caso seja scanner de laser terrestre. O sistema registra o tempo entre a emissão e recepção do pulso, de modo que seja possível determinar a distância percorrida pelo feixe em sua trajetória. Os feixes de luz são emitidos em comprimentos de onda variáveis, indo do visível ao infravermelho próximo, a depender dos instrumentos e da finalidade do levantamento, já o sinal de retorno varia em intensidade conforme a energia inicial do pulso e as características de reflectância do alvo (JENSEN, 2009).

Para controle posicional do sensor e dos dados obtidos, são usados de sistemas de posicionamento global, como o *Differential Global Positioning System* (DGPS) para correções na velocidade, posição e altitude das plataformas onde o sensor está instalado, juntamente com o *Inertial Navigation System* (INS), também chamado de *Inertial Measurement Unit* (IMU), através do qual são registradas as oscilações em torno dos seus eixos, os movimentos da aeronave (*roll*, *pitch* e *yaw*), de modo que garanta precisão adequada na definição da posição tridimensional da nuvem pontos em fase de pós-processamento.

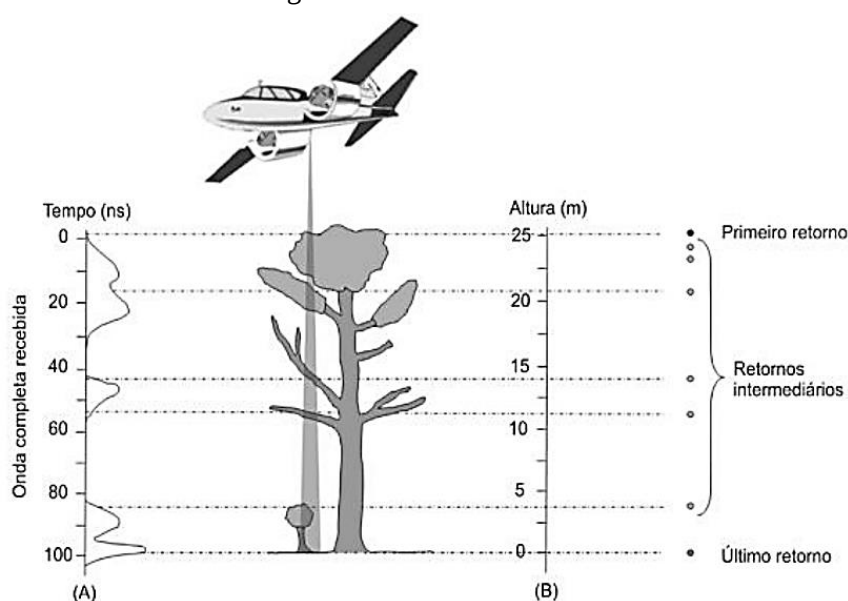
Os sistemas LiDAR podem ser categorizados em dois grupos, o de retorno discreto e o de onda contínua (*waveform*).

O sistema LiDAR de retorno discreto pode originar um retorno (quando a energia interage unicamente com um alvo e retorna para o sensor) ou múltiplos retornos (quando a energia interage com mais de um alvo antes de retornar ao sensor), com menor footprint, alta resolução espacial e em tempos distintos. O conjunto de dados oriundos de retorno discreto incluem a quantidade de pulsos, de retornos, com as respectivas coordenadas geográficas, elevação e intensidade do retorno para cada retorno LiDAR, e os metadados onde constam os parâmetros da missão do voo, tipo de equipamento e suas características, data e hora da missão (REUTEBUCH *et al.*, 2005).

O sistema *waveform* coleta a energia de retorno em onda contínua num dado intervalo de tempo, medindo a diferença de fase entre o sinal emitido e o sinal recebido, após ter passado pelo retroespalhamento na superfície, com footprint maior que o sistema de retorno discreto (SHENG, 2008; WEHR e LOHR, 1999).

Segundo Ferraz, Souza e Reis (2016) as diferentes feições que compõem o terreno irão gerar diferentes retornos em função da forma e dimensão do alvo que receberá a energia incidente, como apresentado na Figura 1. Esses retornos podem ser manipulados e separados, onde os dados referentes aos primeiros retornos serão direcionadas para a composição de Modelos Digitais de Superfície (MDS), últimos retornos para Modelos Digitais de Terreno (MDT) e de todos os retornos para Modelos Digitais de Elevação (MDE). No entanto, a aquisição de informações da superfície abaixo do dossel é condicionada à capacidade do pulso LiDAR de atravessá-lo (LIM *et al.*, 2003).

Figura 1 – Retornos LiDAR



Fonte: Ferraz, Souza e Reis (2016).

Com uso dos dados de LiDAR, o dimensionamento do modelo de altura do dossel (CHM do inglês *canopy height model*) é determinado pela diferença entre o dado de retorno categorizado como vegetação e o modelo representativo do terreno, ou seja, subtraindo-se o MDT do MDS, que representem, respectivamente, a superfície do terreno e o topo do dossel. Métodos de filtragem baseados em avaliações morfológicas ou interpolações podem ser aplicados para separação dos pontos (CHEN *et al.*, 2007).

O LiDAR se destaca como uma tecnologia empregada para a obtenção de diversos atributos estruturais da vegetação, que incluem a altura da árvore, topografia do subbosque, discriminação de copas das árvores, o número de indivíduos, cobertura, volume e diâmetro da copa (DUBAYAH *et al.*, 2000; LIM *et al.*, 2003).

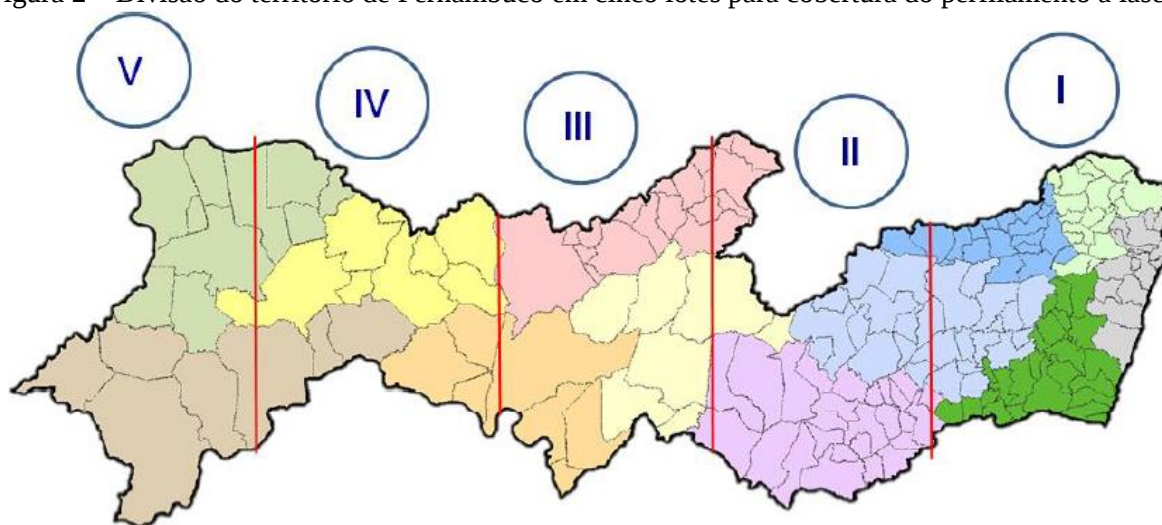
Segundo Drake *et al.* (2003) as estimativas desses atributos, medidas diretamente pelo LiDAR, apresentam correlação com os dados oriundos de medidas em campo. Assim, é uma tecnologia indicada para análises de cobertura florestal.

2.2.2.1.1 Sensor MDI/Sentinel 2

Após a destruição de cidades inteiras causadas pelas cheias ocorridas na porção sul da região litorânea entre os anos de 2010 e 2011, o governo estadual de Pernambuco encomendou o mapeamento das áreas afetadas e das calhas dos principais rios das bacias atingidas, realizada por meio da varredura a laser (SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, 2016). A tecnologia utilizada é a LiDAR, com captura de dados realizada por sensores e câmeras instalados em oito aviões, operados pelas empresas contratadas para o serviço. (CIRILO, 2014). A rapidez e o detalhamento do mapeamento, além da necessidade de se gerenciar os recursos hídricos, foram as principais características que levaram a Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE) a realizar o mapeamento de todo o estado, no programa que ficou conhecido como Pernambuco Tridimensional (PE3D) (SILVEIRA, 2018).

O trabalho foi realizado em cinco frentes simultâneas, divididas territorialmente como mostra a Figura 2, cobrindo as 12 regiões de desenvolvimento do estado de Pernambuco.

Figura 2 – Divisão do território de Pernambuco em cinco lotes para cobertura do perfilamento a laser



Fonte: Cirilo (2014)

As características técnicas dos sistemas utilizados para o perfilamento estão resumidas na Tabela 1 – Características técnicas do sistema.

Tabela 1 – Características técnicas do sistema de perfilamento a LASER.

Plataforma	Parâmetro	Especificação
Aeronave	Altura de voo (relativa ao solo):	6.000 m
	Velocidade da aeronave:	140 nós (≈ 278 km/h)
	Distância entre faixas paralelas	2.605 m
Sensor LASER	Ângulo total de varredura:	70°
	Ângulo de corte das bordas:	2,81° (para cada lado)
	Frequência de operação:	150 kHz
	Frequência de varredura:	90 Hz
	Múltiplos pulsos no ar:	Ativado

Fonte: O Autor (2019).

As ortofotos, que foram obtidas juntamente com os dados LiDAR, foram capturadas pelo sensor Câmera aérea digital de grande formato, do tipo linear (*Pushbroom*), modelo ADS 40 SH52, produzida pela LEICA, operando com três bandas espectrais, sendo uma no vermelho. (LEICA, 2011).

Ambos os produtos (LiDAR e fotografias aéreas) foram unidos e corrigidos pela empresa Esteio, com precisão planimétrica e altimétrica que atendem ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), referente à classe A, na escala 1:5.000 (SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, 2016). A validação da qualidade dos produtos foi realizada pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP), disponibilizada pelo projeto PE3D no sistema UTM (Universal Transversa de Mercator) para o SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), no fuso 24 Sul (SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, 2016).

2.2.2.2 Sensor MDI/Sentinel 2

O programa *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES), em português monitoramento global da segurança ambiental, é uma iniciativa conjunta da Comissão Europeia e da Agência Espacial Europeia, *European Space Agency* (ESA), destinada a fornecer informações de monitoramento operacional para aplicações ambientais e de segurança. O papel da ESA no GMES é desenvolver o sistema relacionado com o espaço e o solo (SOLARI, 2017).

Lançado no dia 23 de junho de 2015 e atualmente em operação, o satélite Sentinel-2 faz parte da missão GMES, sendo desenvolvido no quadro do programa da União Europeia Copernicus. Os principais objetivos da missão Sentinel-2 são prover rapidamente dados precisos e acessíveis de satélite, com intuito de melhorar o gerenciamento ambiental, entender e mitigar os efeitos das mudanças climáticas, além de garantir a segurança civil (ASCHBACHER *et al.*, 2010; HAGOLLE *et al.*, 2015; SEGL *et al.*, 2015).

A missão é constituída por 2 satélites (A e B), com órbita sol-síncrona e altitude média de 800 km e que, juntos, têm a capacidade de revisita de 5 dias no equador, e de 2 a 3 dias nas latitudes médias (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2012).

Dada complexidade dos objetivos da missão, o programa necessita de um sistema multiespectral confiável, como o *Multispectral Instrument* (MSI), sensor do Sentinel-2 que possui treze bandas espectrais que cobrem as regiões espectrais do visível (VIS), do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR), especificadas na

Tabela 2 – Resoluções e Bandas Sentinel-2 Tabela 2 – Resoluções e Bandas Sentinel-2.

As quatro bandas com resolução espacial de 10 metros (2, 3, 4 e 8), foram definidas para manter a compatibilidade com os produtos SPOT, enquanto que as bandas de 20 metros de resolução espacial, foram concebidas para observar principalmente as características da vegetação (borda vermelha da vegetação e a banda de absorção da lignina). As bandas de resolução espacial de 60 metros são destinadas à correção atmosférica (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2012).

Tabela 2 – Resoluções e Bandas Sentinel-2

Resolução	Nr da Banda	Nome da Banda	Comprimento de Onda Central (nanômetro)	Combinações de Bandas
10 m	B02	Blue (Azul)	490	Cor Verdadeira RGB: 04/03/02 Falsa Cor 1 RGB: 08/04/03 Falsa Cor 2 RGB: 04/08/03
	B03	Green (Verde)	560	
	B04	Red (Vermelho)	665	
	B08	NIR (Infravermelho Próximo)	842	
20 m	B05	Red Edge 1	705	SWIR 1 RGB 12/11/8A
	B06	Red Edge 2	740	
	B07	Red Edge 3	783	
	B08A	Red Edge 4	865	
	B11	SWIR 1	1610	
	B12	SWIR 2	2190	
60 m	B01	Aerossol	443	-
	B09	Water Vapor	940	
	B10	Cirrus	1375	

Fonte: EUROPEAN SPACE AGENCY (2012).

2.2.2.3 Python

O Python é uma linguagem Open Source, multiplataforma, de alto nível, dinâmica e interpretada.

A "filosofia" do Python enfatiza a legibilidade, a clareza e a simplicidade, enquanto maximiza o poder e a expressividade disponíveis para o programador. Por estas razões, o Python é uma excelente ‘primeira língua’ para iniciantes em programação, apesar de ainda ser uma ferramenta poderosa para análise de dados geoespaciais.

Para compilação dos códigos foi utilizado o aplicativo Jupyter Notebook, que é um aplicativo da Web, de código aberto, onde é possível criar e compartilhar documentos que contenham código ativo, equações, visualizações e texto. O Jupyter Notebook é mantido pela Project Jupyter.

O Jupyter Notebook é um projeto derivado do projeto IPython, que costumava ter um projeto do IPython Notebook em si. O nome, Jupyter, vem das principais linguagens de programação suportadas: Julia, Python e R. O Jupyter vem com o kernel IPython, que permite que você escreva seus programas em Python, mas atualmente existem mais de 100 outros kernels que você também pode usar.

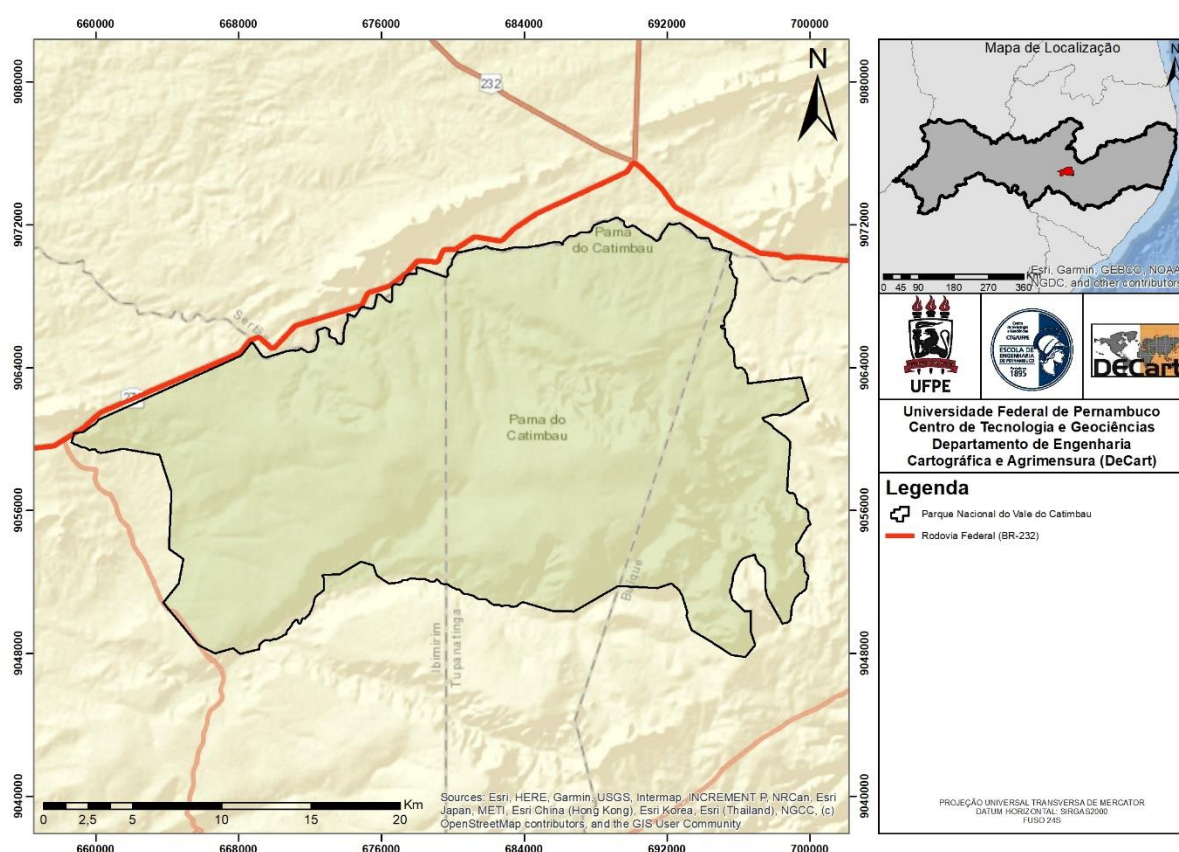
3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta o detalhamento dos procedimentos metodológicos aplicados para atingir os objetivos da pesquisa incluindo a caracterização da área de estudo.

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Vale do Catimbau se localiza no estado de Pernambuco, como exposto na Figura 3 – Localização da área de estudo.

Figura 3 – Localização da área de estudo



Fonte: O Autor (2019).

Com 62.300km², o Parque Nacional do Catimbau abrange parte dos municípios de Buíque, Ibimirim e Tupanatinga, no estado de Pernambuco, nordeste do Brasil. Está localizado a aproximadamente 300km de Recife, na região chamada Sertão do Moxotó, zona de transição entre a Caatinga e o Agreste de Pernambuco.

3.1.1 Clima

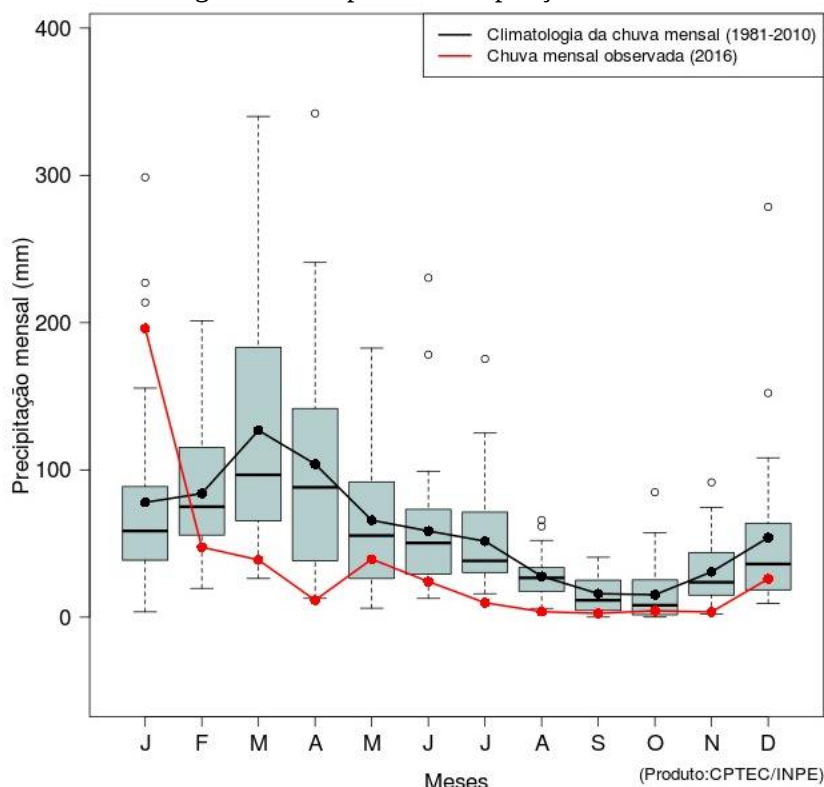
O Nordeste Brasileiro (NEB) apresenta grande irregularidade espaço temporal da precipitação, oriunda da alta evaporação, que ocasionalmente ultrapassa a das precipitações, produzida pela intensa incidência de radiação solar, somada as altas temperaturas médias anuais.

O clima predominante na área de estudo, adotando a classificação de Köppen, é tipo BShs' semiárido quente, com transição para o tropical chuvoso do tipo As'. As temperaturas médias anuais são as mais elevadas dentre os ecossistemas brasileiros, variando entorno de 26°C, com máximas registradas raramente ultrapassando 40°C. A precipitação média anual varia entre 400 mm e 700 mm, marcada por duas estações: longa estiagem, com o período mais seco durante o mês de setembro, e estação chuvosa curta, que ocorre nos meses de janeiro a abril, (GOMES *et al.*, 2016), resultando em deficiência hídrica na maior parte do ano.

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolvem um monitoramento climático brasileiro e disponibilizam os dados hidrometeorológicos divididos em 124 regiões (áreas de 2.5° x 2.5° de latitude e longitude), sendo a região 63 a que enquadra o PARNA Catimbau.

No gráfico de caixa da Figura 4 – Boxplot da Precipitação Mensal, são empregadas séries temporais de precipitação acumulada mensal para o cálculo da climatologia entre 1981 e 2010. Os valores de precipitação mensal classificados como anomalias são indicados por círculos sem preenchimento. A linha contínua preta indica a média climatológica da chuva mensal para o período de 1981 a 2010, enquanto a linha contínua vermelha, apresentada os totais mensais de precipitação no ano de 2016.

Figura 4 – Boxplot da Precipitação Mensal



3.1.2 Geomorfologia e Pedologia

O PARNA Catimbau insere-se geologicamente na Bacia sedimentar do Jatobá e na Depressão Sertaneja com formações de chapadas, pediplanos com problemas de sais e de drenagem, pediplanos arenosos/argilosos, superfícies arenosas e serras e serrotes.

Os relevos da Depressão Sertaneja são caracterizados principalmente pela degradação da superfície até a fronteira do embasamento cristalino, somado-se com fraturas e falhamentos, devido aos processos de erosão (CPRM, 2005).

A Bacia do Jatobá integra o domínio morfológico das coberturas sedimentares do nordeste oriental, onde há predomínio de relevo dos tabuleiros com a presença de grandes serras areníticas (IBAMA, 2008).

Os processos geológicos estabelecidos são principalmente do Terciário e Quaternário. Ambas as formações são compostas por arenitos de granulometria e coloração variada representados na área pelos arenitos fluviais de idade Siluro-Devoniano, compondo as chapadas. Havendo também os depósitos coluviais, eluviais e fluviais quaternários, de idade pleistocênica e holocênica (CPRM, 2005).

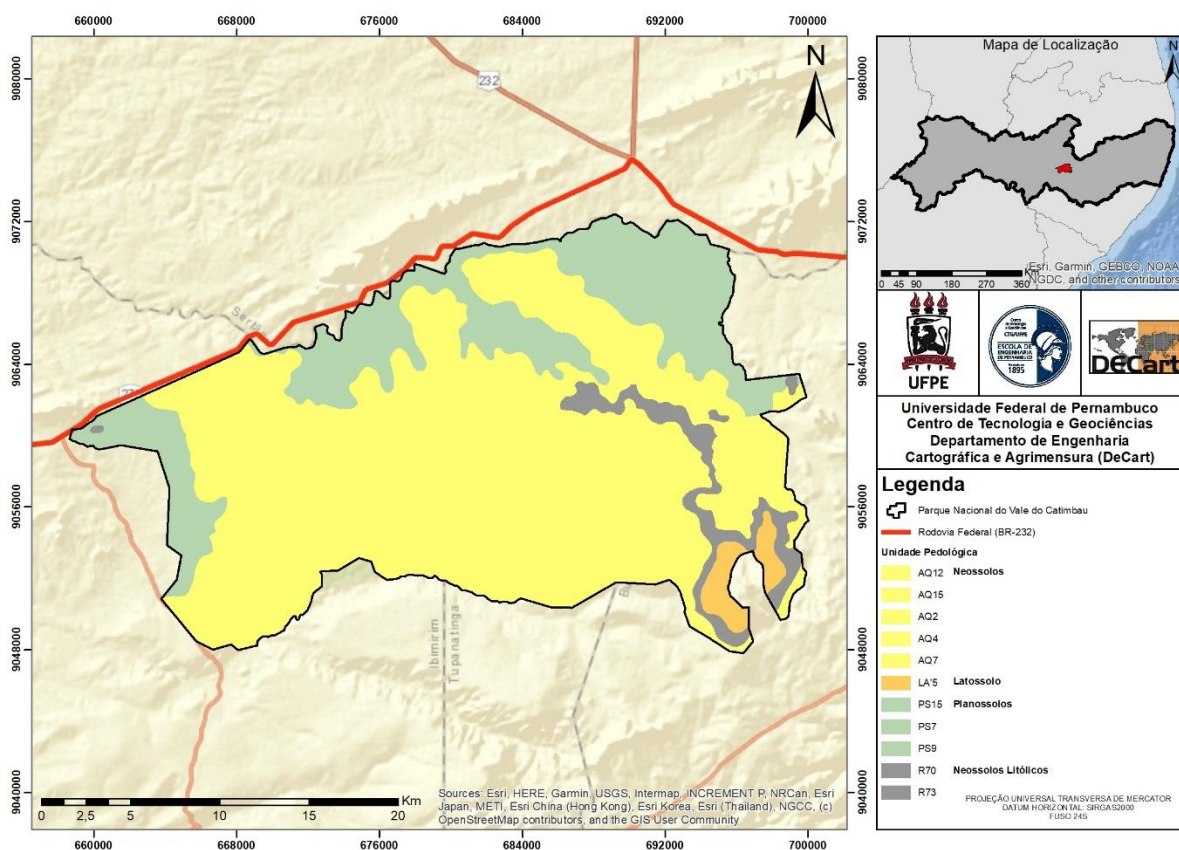
As unidades pedológicas encontradas na área de estudo estão listadas na Tabela 3, bem como sua composição, essas unidades também estão espacializadas no mapa pedológico da Figura 5 – Pedologia do PARNA Catimbau.

Tabela 3 – Unidades e composição pedológica no PARNA Catimbau

Unidade Pedológica	Composição Pedológica
AQ12	Areias Quartzosas
AQ12	Areias Quartzosas
AQ15	Areias Quartzosas e Solo Litólico
AQ2	Areia Quartzosa e Podisólico Amarelo
AQ4	Areia Quartzosa e Latossolo Amarelo
AQ7	Areia Quartzosa e Podisólico Amarelo e Vermelho/Amarelo
LA'5	Latossolo Amarelo e Vermelho/Amarelo
PS15	Planossolo e Solonetes Solodizado e Solos Litólicos
PS7	Planossolo e Solonetes Solodizados e Solos Litólicos e Brumos Não Cálcicos
PS9	Planossolo e Solonetes Solodizados e Vertissolo e Cambisol
R70	Solos Litólicos e Podisólico Vermelho/Amarelo e Afloramentos De Rocha
R70	Solos Litólicos e Podisólico Vermelho/Amarelo e Afloramentos De Rocha
R70	Solos Litólicos e Podisólico Vermelho/Amarelo e Afloramentos De Rocha
R73	Solos Litólicos e Afloramentos De Rocha e Podisólico Vermelho/Amarelo

Fonte: EMBRAPA SOLOS (2006).

Figura 5 – Pedologia do PARNA Catimbau



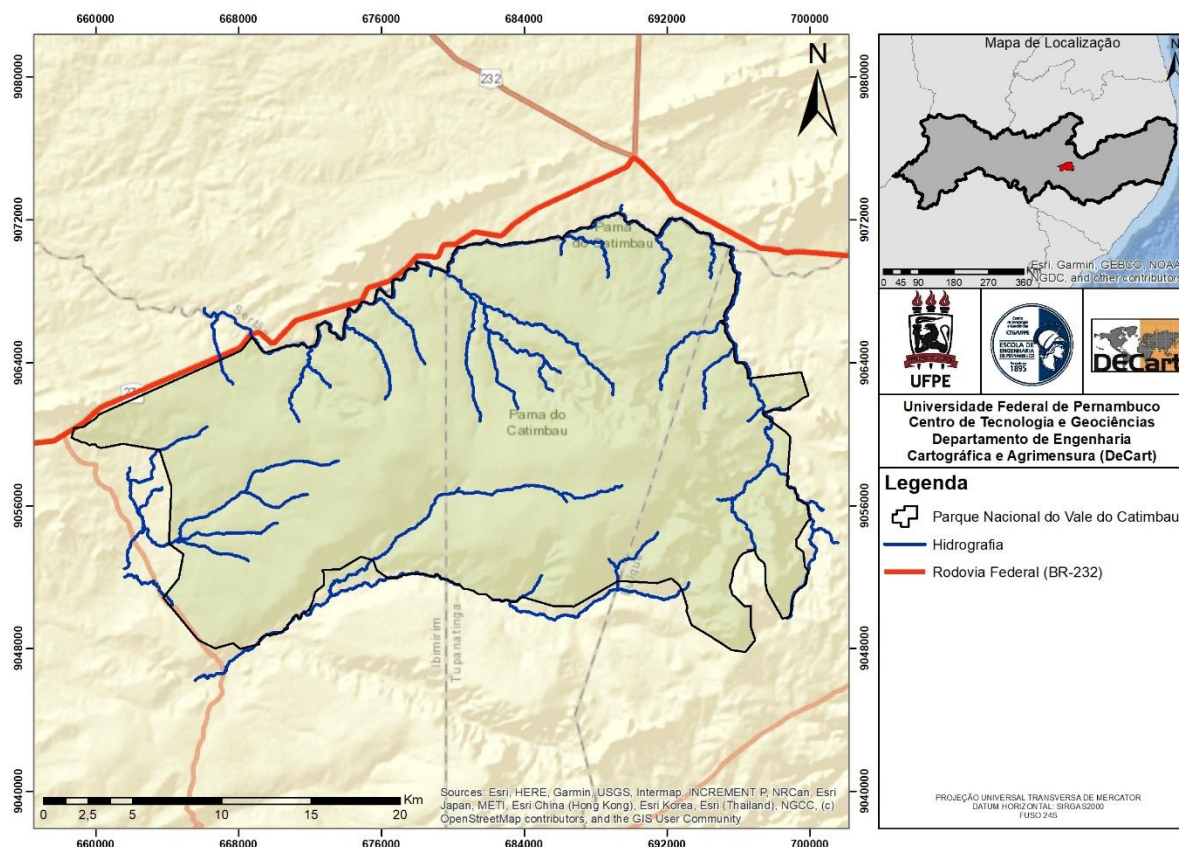
Fonte: EMBRAPA SOLOS (2006).

3.1.3 Hidrologia

O PARNA Catimbau se insere nos domínios da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema, que tem como principais tributários os rios Ipanema e Cordeiro. Os cursos d'água presentes na área de estudo, apresentados na Figura 6 – Mapa da rede hidrográfica no PARNA Catimbau, exibem regime de escoamento intermitente e padrão de drenagem dentrítico, espalhando-se como uma árvore sem evidências de orientação por canais, que se desenvolvem, geralmente, em controle estrutural formado por sedimentos horizontais ou rochas cristalinas homogêneas.

No tocante à Hidrogeologia, o PARNA Catimbau situa-se ao longo de dois domínios: O Intersticial, constituído por rochas sedimentares da Formação Tacaratu e depósitos Colúvio-eluviais; e o Domínio Fissural, constituído por rochas do embasamento cristalino que englobam o sub-domínio de rochas metamórficas constituída pelos Complexos de Vertentes, de Belém de São Francisco e Cabrobó e o sub-domínio rochas ígneas da suíte Calcialina Itaporanga e da Suíte Intrusiva Leucocrática Peraluminosa (CPRM, 2005).

Figura 6 – Mapa da rede hidrográfica no PARNA Catimbau



Fonte: O Autor (2019).

3.1.4 Vegetação

Gariglio (2010) afirmam que a estrutura da caatinga é resultante das condições naturais de disponibilidade hídrica e de nutrientes, somada às influências antrópicas e respondendo inicialmente às unidades geomorfológicas e, posteriormente, ao déficit hídrico, topografia e altitude, e o estado físico e químico do solo. Com numerosas unidades de vegetação ao longo da extensão do bioma, são observadas variações nos aspectos fisionômicos, florístico e morfofuncionais (QUEIROZ, 2009), apresentando ocorrências de Mata úmida, Mata estacional, Cerradão, Cerrado e Vegetação do Tabuleiro litorâneo (FERNANDES, 1996), em geral, na depressão há predomínio de formações caducifólias e espinhosas, enquanto as serras e chapadas foram ocupadas pelas formações florestais (GOMES *et al.*, 2006).

A vegetação do PARNA Catimbau situa-se no domínio da caatinga (espinhosa caducifólia) onde percebe-se padrões florísticos e estruturais categorizados dentre cinco tipos de fisionomias: caatinga arbustivo-arbórea, arbustiva com elementos de cerrado, arbustiva com elementos de campos rupestres, arbustiva subperenifólia e, por fim, vegetação florestal perenifólia (RODAL *et al.*, 1998; FIGUEIREDO *et al.*, 2000). Observa-se também áreas destinadas a produção agropecuária e com interferência de atividades antrópicas, como a extração seletiva, assim como, áreas com desiguais estágios de regeneração.

A vegetação do PARNA Catimbau se caracteriza como uma flora e fitofisionomia diversificada, que pode ser observada por meio da altura do dossel, onde sobressaem-se os elementos de formações de campo, vegetação de Brejo e Floresta Tropical.

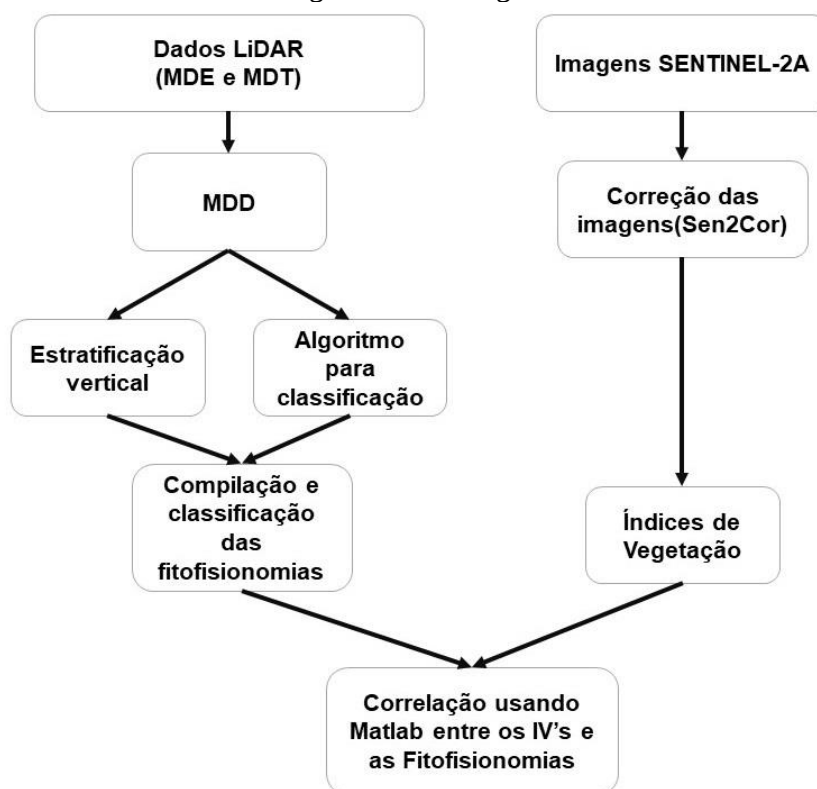
Rodal *et al.* (1998), realizaram uma pesquisa em um abrigo vegetacional situado em Buíque, nas adjacências do PARNA Catimbau, e notaram que a área conta com uma fisionomia predominantemente arbustiva, perenifólia, composta por nano e microfanerófitas e com baixa área basal, com poucos exemplares espinhosos, como cactáceas. Ainda segundo os autores, comparando-se com as ocorrências comuns de caatinga nordestina quem contém certas espécies de parte lenhosa, notou-se que elas ocupam principalmente áreas de menor densidade de vegetação.

Figueiredo *et al.* (2000) desenvolveram uma análise florística e fitossociológica de uma região com cobertura vegetal arbustiva caducifólia espinhosa no município de Buíque, onde foi observada a ocorrência de uma flora com marcante presença de espécies características de ambientes com contexto pedológico arenoso e de profundidade, com indivíduos perenifólios ou caducifólios espinhosos, alguns elementos não característicos do semiárido nordestino.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O mapeamento das fitofisionomias da vegetação do Parque Nacional do Catimbau ocorrerá como apresentado no fluxograma da será baseado na classificação proposta de Sá (2008), durante o 59º Congresso Nacional de Botânica na cidade de Natal (RN), onde foi utilizado um sistema de chaves de classificação puramente fisionômico, excluindo-se as expressões florísticas, com e sem palmeiras, geográficas, de montanha ou de galeria, ou regionais, dos Cariris ou do Seridó, diferentemente de outros esquemas de classificação fisionômica (SILVEIRA, 2018).

Figura 7 – Fluxograma



Fonte: O Autor (2019).

O mapeamento das fitofisionomias da vegetação do Parque Nacional do Catimbau será baseado na classificação proposta de Sá (2008), durante o 59º Congresso Nacional de Botânica na cidade de Natal (RN), onde foi utilizado um sistema de chaves de classificação puramente fisionômico, excluindo-se as expressões florísticas, com e sem palmeiras, geográficas, de montanha ou de galeria, ou regionais, dos Cariris ou do Seridó, diferentemente de outros esquemas de classificação fisionômica (SILVEIRA, 2018).

Sá (2008) estabeleceu duas estratificações para a classificação das fitofisionomias: uma vertical (Tabela 4 – Estratificação vertical para fitofisionomias de Caatinga), baseada na altura

dos indivíduos arbóreos, e outra horizontal (Tabela 5 – Estratificação horizontal para fitofisionomias de Caatinga), baseada na densidade de cobertura do solo pela vegetação.

A razão para escolha desse sistema de classificação fisionômico se deu por sua grande compatibilidade com as informações adquiridas de observações feitas por satélites sobre a densidade e estrutura da cobertura vegetal da Caatinga, permitindo o uso de variados produtos de sensoriamento remoto.

Primeiramente, seguindo a chave de classificação proposta por Sá (2008), foi gerado o modelo digital do dossel (MDD) obtido pela subtração do MDE pelo MDT, conforme realizado em outros trabalhos (CLARK *et al.*, 2004; OMASA *et al.*, 2007; OMASA *et al.*, 2008; BEN-ARIE *et al.*, 2009; FELICIANO *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017; ALEXANDER *et al.*, 2018).

A partir das imagens MSI/Sentinel-2A, foram gerados quadro índices de vegetação: NDVI, NDII, NDII2 e OSAVI. Os resultados dos índices de vegetação foram usados para determinar os valores associados de cada método com a classificação fitofisionômica da vegetação, extraída do MDD.

Após o processamento dos dados LiDAR e a elaboração dos IV foram realizadas análises estatísticas de correlação entre os IV e o MDD gerado a partir do algoritmo construído para classificação das fitofisionomias, com objetivo de correlacionar as fitofisionomias existentes no Parque Nacional do Catimbau.

3.2.1 Aquisição e Tratamento dos Dados LiDAR

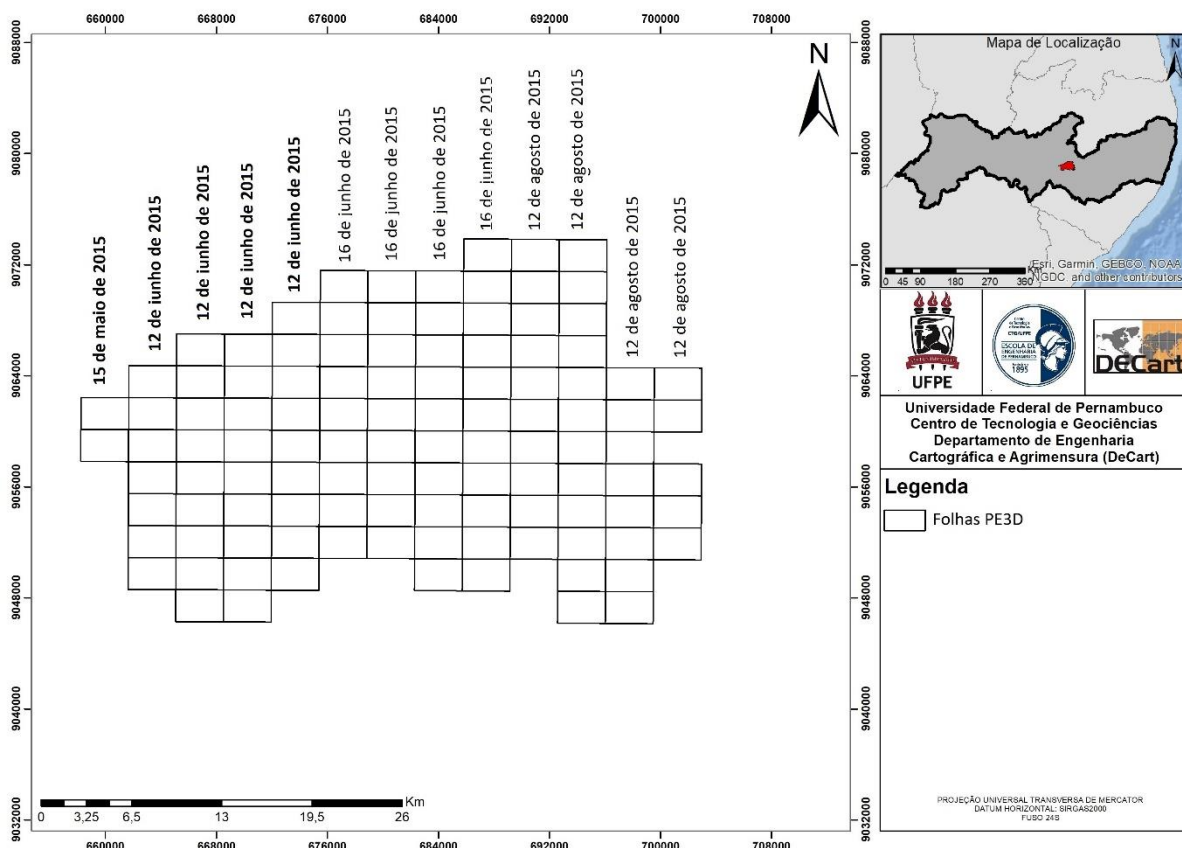
Para abarcar a área de estudo por completo foi necessário adquirir cartas de dois blocos levantados pelo PE3D. Ao todo foram utilizadas 110 cartas pertencentes aos Bloco II e Bloco III, onde o levantamento aerotransportado a laser dos dados foi realizado no período de 15/05/2015 a 12/08/2015, como apresenta a Figura 8.

Para o perfilamento a laser compreendendo a área dos Blocos II e III foram considerados os seguintes parâmetros: sensor ALS, fabricado pela Leica Geosystems, com ângulo de abertura de 34, 5°. Frequência Scanner de 36,8 Hz com frequência de repetição de 93,2 Hz e densidade de pontos MDE (média) melhor que 0,5 /m².

Como supracitado, o MDD foi gerado através da subtração do MDE pelo MDT. Para tal foi utilizada a ferramenta *Raster Calculator* do software Qgis.

O MDD foi transformado em raster, com resolução espacial de 1 metro, e as alturas foram classificadas de acordo com a chave de classificação vertical proposta por Sá (2008), no software ArcGIS 10.5, versão trial.

Figura 8 – Mosaico das cartas utilizadas do PE-3D



Fonte: O Autor (2019).

Tabela 4 – Estratificação vertical para fitofisionomias de Caatinga

Classe	Altura (m)
Arbórea	>5
Arbórea-arbustiva	3,5 a 5
Arbustiva	2 a 3,5
Subarbustiva	0,5 a 2
Gramíneo-lenhosa	0,5

Fonte: Sá (2008).

O resultado da estratificação vertical foi classificado considerando a densidade de cada uma das categorias em matrizes de 7x7 pixels, com um algoritmo desenvolvido pelo autor, em linguagem Python, no aplicativo Jupyter.

Tabela 5 – Estratificação horizontal para fitofisionomias de Caatinga

Classe	Cobertura (%)
Densa	>80
Semi-densa	50 a 80
Aberta	30 a 50
Rala	<30

Fonte: Sá (2008).

Seguindo a metodologia aplicada por (SILVEIRA, 2018), os resultados foram reamostrados para um pixel de tamanho compatível com os produtos do Sentinel-2.

A partir do MDD, além da própria altura da vegetação, também foi estimado o desvio padrão da altura, a altura máxima, a distância entre os indivíduos arbóreos e as porcentagens de indivíduos arbóreos, arbóreos-arbustivos, arbustivos, subarbustivos e gramíneos lenhosos. (SILVEIRA, 2018).

A utilização das métricas LiDAR para fins de classificação das fitofisionomias do Parque Nacional do Catimbau também se deu a partir do MDT. Segundo Rodal *et al.* (2008) e Francisco *et al.* (2012) algumas posições e/ou características do relevo, como topos e linhas de drenagem podem estar associadas a fatores de acumulação de umidade e nutrientes sendo, portanto, indicadores para melhor classificar as fitofisionomias existentes na área. Estas métricas são altitude, declividade e curvatura do terreno.

3.2.2 Aquisição e Pré-Processamento das Imagens MSI/Sentinel-2A

Para o presente estudo foi adquirida uma imagem do sensor MSI/Sentinel-2A, capturada em 29 de agosto de 2016 às 12h:53m:08s, que, mesmo no inverno, corresponde a uma época de pouca ou nenhuma precipitação na caatinga.

As imagens MSI foram obtidas junto ao *Earth Explorer* do Serviço Geológico do Estado Unidos (USGS), os produtos disponibilizados são de nível 1C, correspondente à reflectância no topo da atmosfera, assim foi necessário converter para reflectância de superfície (nível 2A) através do plugin “*Sentinel-2 Atmospheric Correction*” (Sen2Cor). O Sen2Cor V2.8 é um processador para geração e formatação de produtos Sentinel-2 Nível 2A, instalado no software *Sentinel Application Platform* (SNAP), ambos disponibilizados gratuitamente e desenvolvidos por iniciativa da *European Space Agency* (ESA).

Para execução da correção atmosférica, foram empregados os parâmetros a seguir:

- Espessura Ótica de Aerosol com modelo Rural de verão (equatorial), visto que o PARNA Catimbau se localiza na parte continental dentro da faixa equatorial;
- Conteúdo de ozônio de 331 DU, ajustado a partir das medições do total diário de ozônio feitas pelo sensor *Ozone Monitoring Instrument* (OMI) no satélite Aura (DOBBER *et al.*, 2006);

Após o processo da correção atmosférica, obteve-se as reflectâncias das bandas na superfície terrestre. As bandas 2, 4 e 8 foram reamostradas, utilizando o algoritmo de vizinho mais próximo, passando de 10 para 20 metros de resolução espacial, assim, preservou-se a

resolução espacial da maioria das bandas, especialmente das posicionadas na região da borda vermelha.

3.2.3 Índices de Vegetação

Os índices de vegetação (IV) foram obtidos a partir do processamento das reflectâncias das imagens Sentinel-2 com resolução espacial de 20 metros, no software QGIS. Os IV são apresentados na Tabela 6, junto com as equações para sua obtenção e as respectivas referências.

Tabela 6 – Equações do Índices de Vegetação

Índice	Equação	Bandas Equivalentes	Referências
NDVI	$(\rho_{842} - \rho_{665})$	$(B08-B04)$	ROUSE <i>et al.</i> (1973)
	$(\rho_{842} + \rho_{665})$	$(B08+B04)$	
NDII1	$(\rho_{842} - \rho_{1610})$	$(B08-B11)$	KIMES <i>et al.</i> (1981)
	$(\rho_{842} + \rho_{1610})$	$(B08+B11)$	
NDII2	$(\rho_{842} - \rho_{2190})$	$(B08-B12)$	KIMES <i>et al.</i> (1981)
	$(\rho_{842} + \rho_{2190})$	$(B08+B12)$	
OSAVI	$1,6(\rho_{740}-\rho_{705})$	$1,6*(B06-B05)$	WU <i>et al.</i> (2008)
	$(\rho_{740}+\rho_{705}+0,16)$	$(B06+B05+0,16)$	

Fonte: O Autor (2019).

3.2.4 Análises Estatísticas

A regressão linear foi aplicada para entendimento da relação da classificação das fitofisionomias com os índices de vegetação (NDVI, OSAVI, NDII1, e NDII2), nas amostras de cada variável estudada.

As regressões foram desenvolvidas usando o software Matlab, versão trial. Assim, foi executada a regressão linear simples usando a fitofisionomia como variável dependente, usando a equação:

$$y = a + bx$$

Em que: x é independente (NDVI, OSAVI, NDII1, e NDII2), e y é variável dependente (Fitofisionomia).

Após a realização da regressão entre cada um dos índices, foi analisado o comportamento do gráfico e os coeficientes de determinação significativos das amostras de cada variável.

4 RESULTADOS

Aqui serão apresentados os resultados obtidos.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DAS FITOFISIONOMIAS

Classificando os dados LiDAR com a chave de classificação vertical proposta por Sá (2008), foram obtidas as classes de alturas do dossel.

É importante destacar que os dados LiDAR apresentaram um erro de passagem, que pode ser observado através de faixas nos mapas gerados através destes.

Esta classificação obteve os quantitativos em porcentagem de indivíduos arbóreos, arbóreos-arbustivos, arbustivos, subarbustivos e gramíneos lenhosos, que são apresentados na Tabela 7, enquanto o mapa de classificação se encontra na Figura 9 – Estratificação vertical para fitofisionomias do PARNA Catimbau, nas quais a classe que mais se manifesta é a Subarbustiva.

Tabela 7 – Classes de estratificação vertical e sua ocorrência no PARNA Catimbau

Estratificação Vertical	Porcentagem
Arbórea (Maior que 5 metros)	3.60%
Arbórea Arbustiva (De 3,5 a 5 metros)	12.27%
Arbustiva (De 2 a 3,5 metros)	17.81%
Subarbustiva (De 0,5 a 2 metros)	37.47%
Gramínea Lenhosa (Menor ou igual a 0,5 metros)	28.85%

Fonte: O Autor (2019).

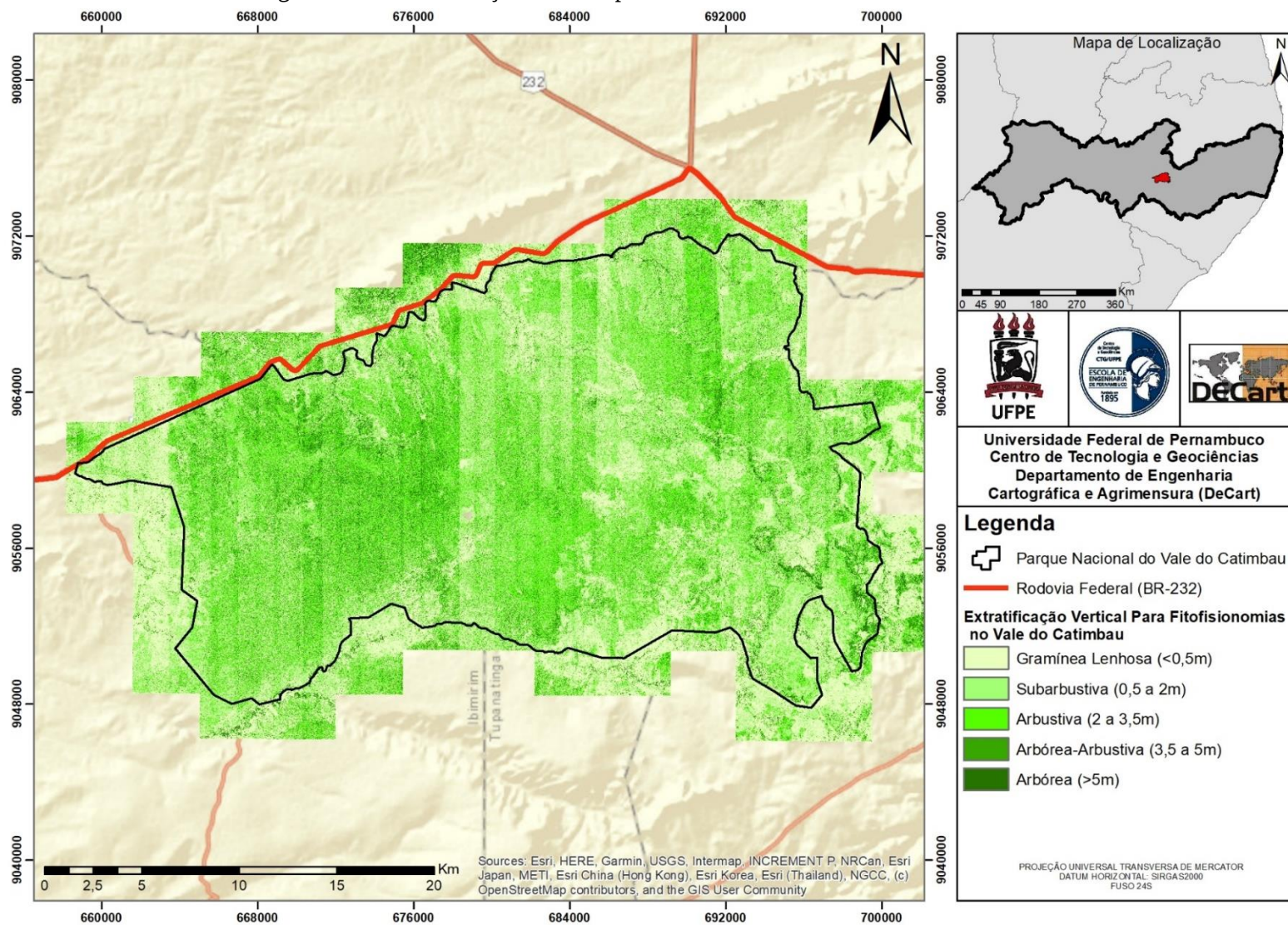
Para fins de comparação, foi elaborada a Tabela 8, a partir das métricas do LiDAR, que apresenta o desvio padrão da altura, as alturas médias e máximas.

Tabela 8 – Média e desvio padrão das alturas da vegetação no PARNA Catimbau

Estratificação Vertical	
Altura Média (m)	1.68
Desvio padrão das alturas	2.30

Fonte: O Autor (2019).

Figura 9 – Estratificação vertical para fitofisionomias do PARNA Catimbau



Fonte: O Autor (2019).

A partir da chave de classificação horizontal, que é a classificação da densidade da estratificação vertical numa área de 40m², onde foram identificadas 20 fitofisionomias na área de estudo, cujas classes e o quantitativo de cobertura são listados na Tabela 9, a seguir.

Tabela 9 – Tipos e cobertura das fitofisionomias do PARNA Catimbau

Fitofisionomia		Nº de Pixels	Área (ha)	Porcentagem
Arbórea (Maior que 5 metros)	Densa (Maior que 80%)	57399	281.25	0.45%
	Semi-Densa (50% - 80%)	177897	871.69	1.40%
	Aberta (30% - 50%)	207981	1019.11	1.64%
	Rala (Menor que 30%)	14604	71.56	0.11%
Arbórea Arbustiva (De 3,5 a 5 metros)	Densa (Maior que 80%)	26922	131.92	0.21%
	Semi-Densa (50% - 80%)	643250	3151.93	5.06%
	Aberta (30% - 50%)	857443	4201.47	6.74%
	Rala (Menor que 30%)	31933	156.47	0.25%
Arbustiva (De 2 a 3,5 metros)	Densa (Maior que 80%)	133222	652.79	1.05%
	Semi-Densa (50% - 80%)	2083960	10211.40	16.39%
	Aberta (30% - 50%)	78	0.38	0.00%
	Rala (Menor que 30%)	47483	232.66	0.37%
Subarbustiva (De 0,5 a 2 metros)	Densa (Maior que 80%)	124104	608.11	0.98%
	Semi-Densa (50% - 80%)	2371302	11619.38	18.65%
	Aberta (30% - 50%)	2206869	10813.66	17.36%
	Rala (Menor que 30%)	61158	299.67	0.48%

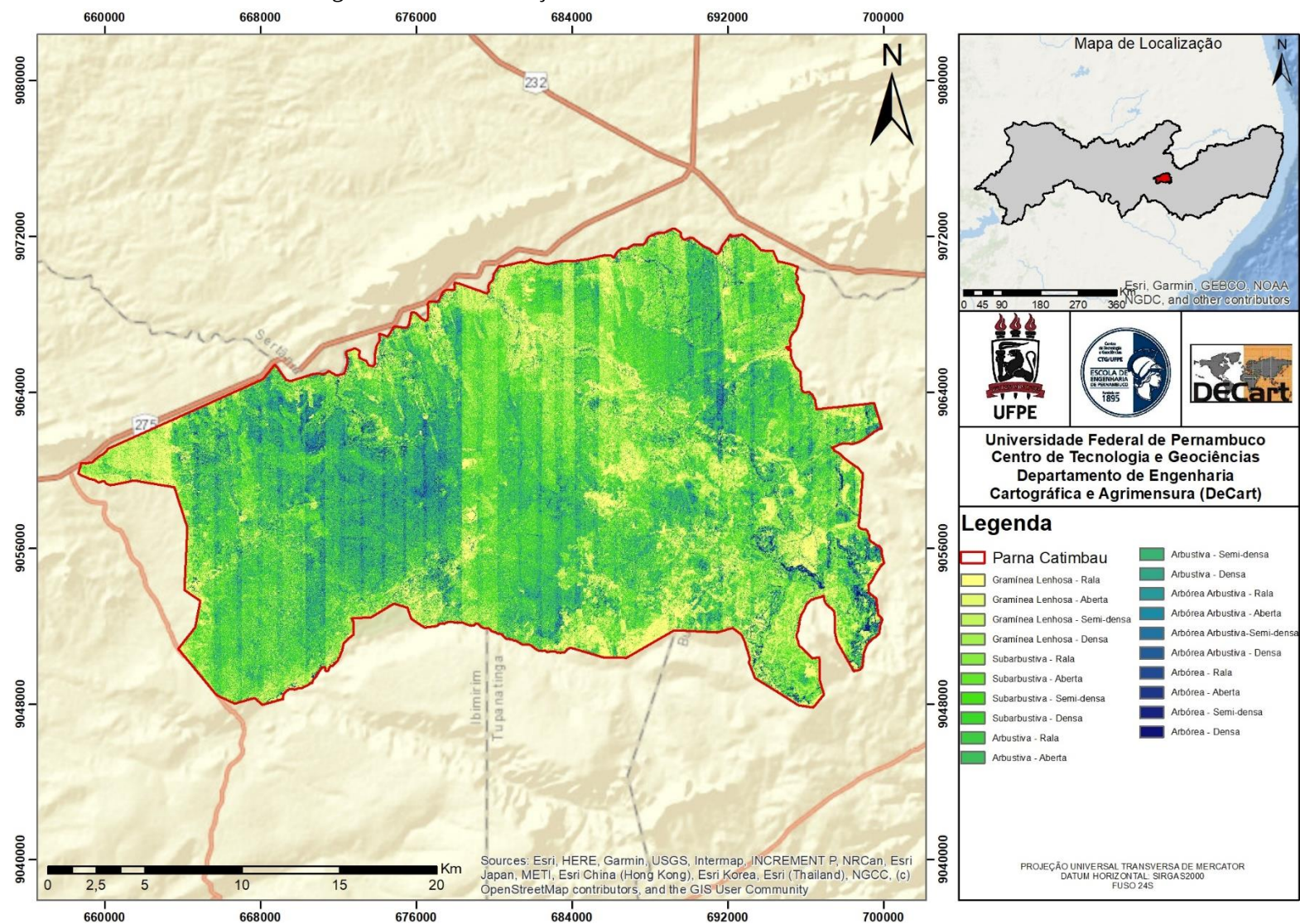
Fitofisionomia		Nº de Pixels	Área (ha)	Porcentagem
Gramínea Lenhosa (Menor ou igual a 0,5 metros)	Densa (Maior que 80%)	1103065	5405.02	8.68%
	Semi-Densa (50% - 80%)	1689578	8278.93	13.29%
	Aberta (30% - 50%)	839223	4112.19	6.60%
	Rala (Menor que 30%)	36816	180.40	0.29%

Fonte: O Autor (2019).

Analisando a Tabela 9, pode-se observar que a classe com maior ocorrência foi a Subarbustiva semi-densa, cobrindo 18,65% da área do PARNA Catimbau, sendo caracterizada por vegetação com altura variando de 0,5m a 2m, cobrindo de 50% a 80% numa área de 40m².

A espacialização das fitofisionomias é apresentada no mapa da Figura 10.

Figura 10 – Classificação das fitofisionomias do PARNA Catimbau



Fonte: O Autor (2019).

4.2 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

A partir das imagens Sentinel-2A foram obtidos os índices de vegetação demonstrados nas figuras a seguir.

O NDVI, apresentado na Figura 10, mostrou uma espacialização variando de -0,96 a 0,99 com maior ocorrência no intervalo 0,28 a 0,36. Já o OSAVI, como mostrado na Figura 11, teve uma espacialização variando de -1 a 1 com maior ocorrência no intervalo 0,13 a 0,21.

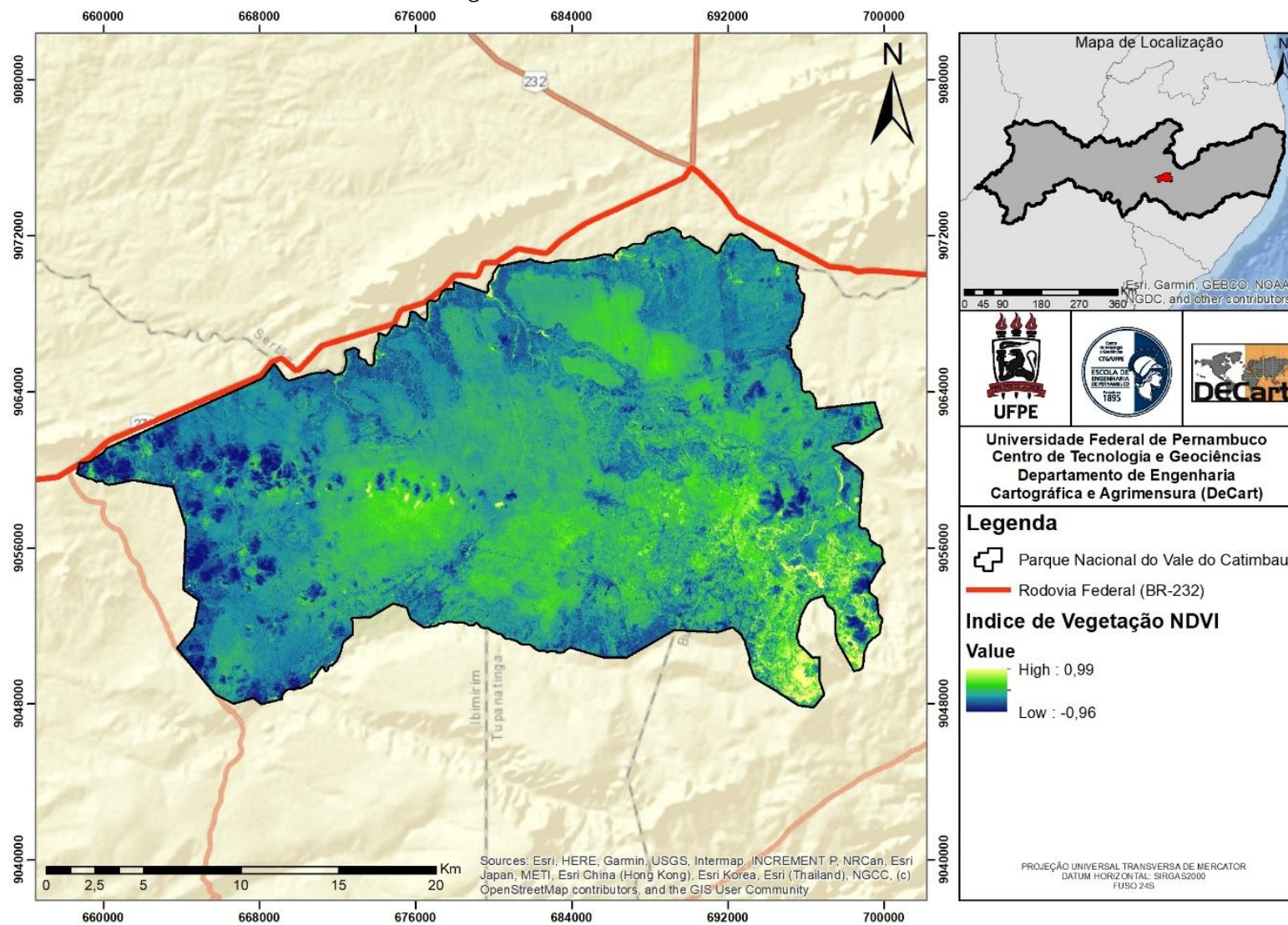
Na Figura 12 encontra-se o NDII1, que por sua vez apresentou espacialização de -0,99 a 0,51 com maior ocorrência no intervalo -0,14 a -0,22. Por último o NDII2, mostrado na Figura 13, apresentou maior ocorrência no intervalo -0,2 a 0,2 com uma espacialização variando de -0,99 a 0,72.

Os índices de vegetação apresentaram distribuição análoga, com maiores valores coincidindo com as áreas de maior declividade, que é apresentada na Figura 14. Essa situação, segundo Sales *et al.* (1998), pode ser explicada pelo acúmulo de umidade no sopé das serras, com isso ocorre uma área florestada, com a presença de alguns elementos de estrato arbóreo.

Também foi observado que nas regiões próximas aos cursos de água obteve-se maiores valores dos índices de vegetação, uma vez que há disponibilidade hídrica e há menor variação ao longo do ano, proporcionando maior vigor vegetativo.

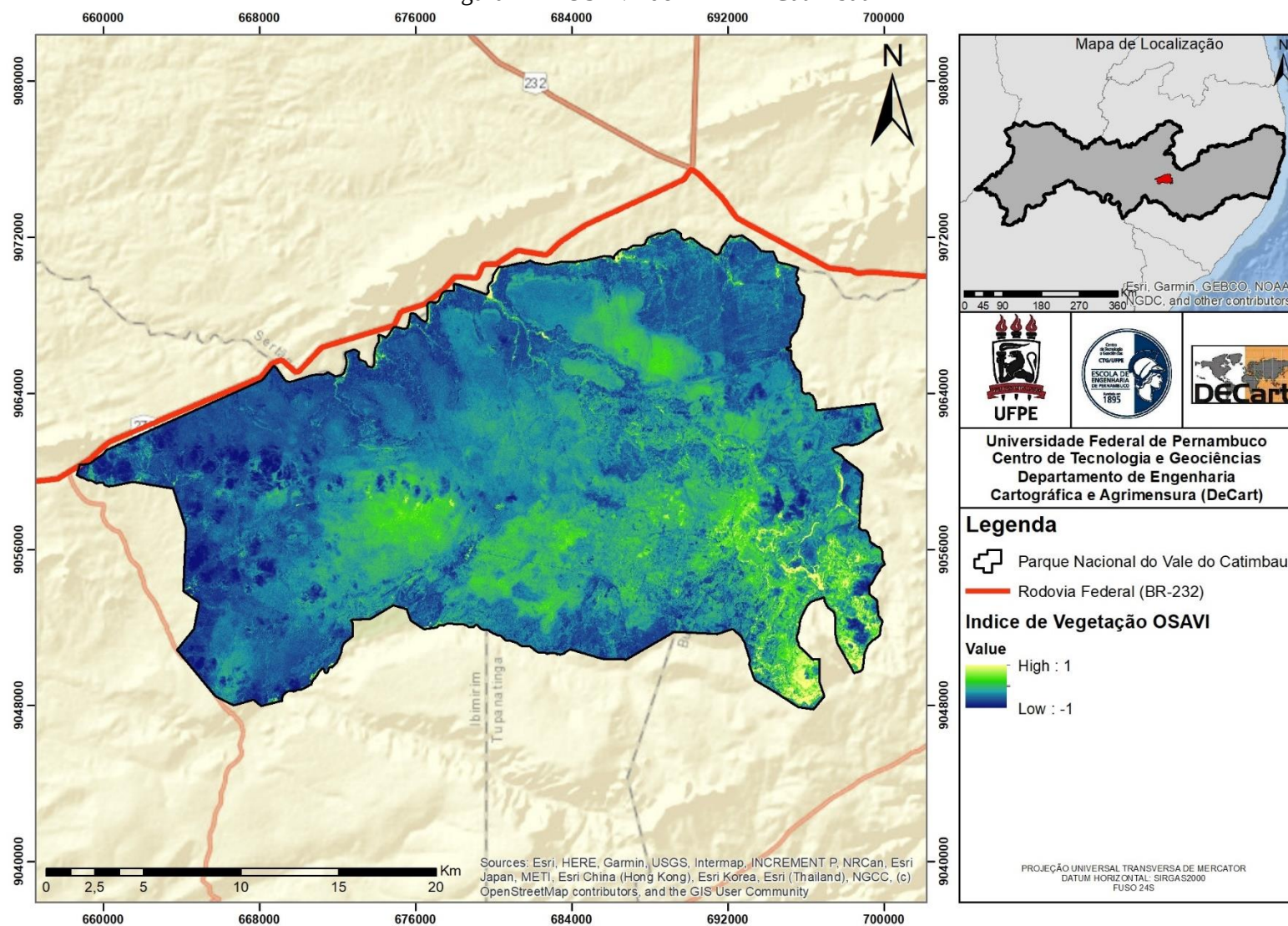
Também foram observadas áreas de desenvolvimento de agricultura irregulares, essas áreas podem ser observadas a leste do PARNA Catimbau e são evidenciadas através de polígonos de geometria regular com valores de índices de vegetação muito baixos, o que denota pouca ou nenhuma cobertura vegetal.

Figura 11 – NDVI do PARNA Catimbau



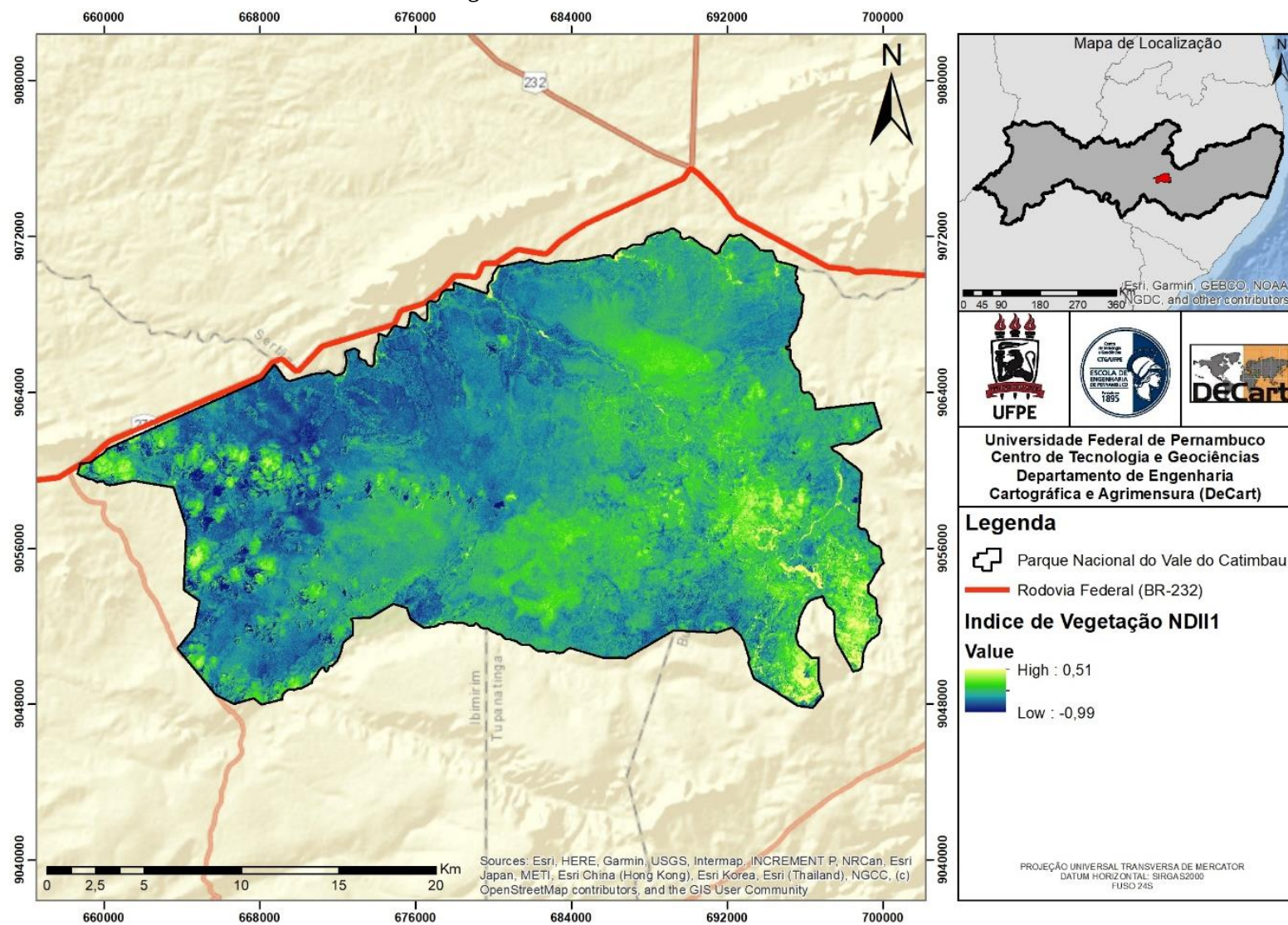
Fonte: O Autor (2019).

Figura 12 – OSAVI do PARNA Catimbau



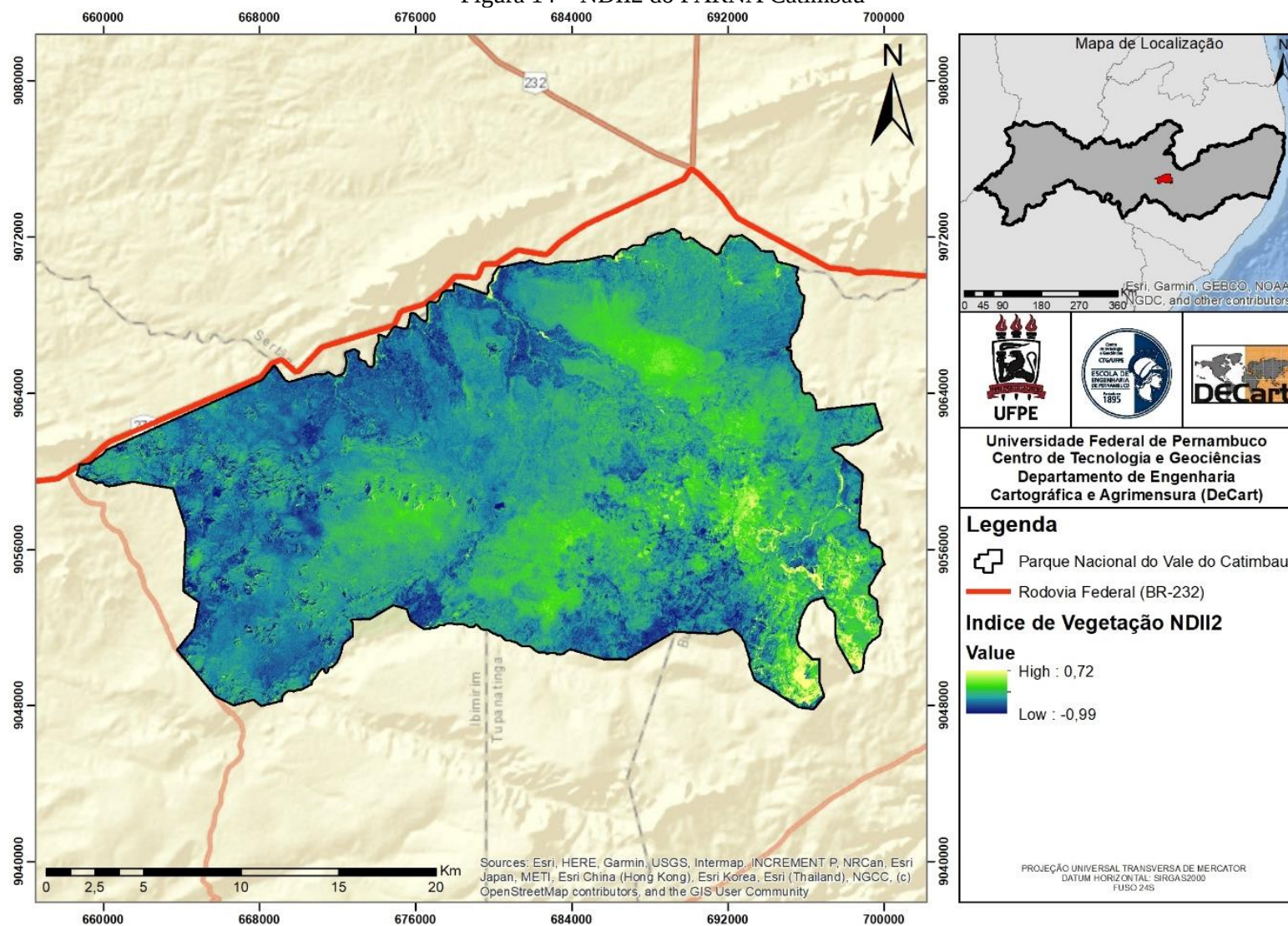
Fonte: O Autor (2019).

Figura 13 – NDII1 do PARNA Catimbau



Fonte: O Autor (2019).

Figura 14 – NDII2 do PARNA Catimbau



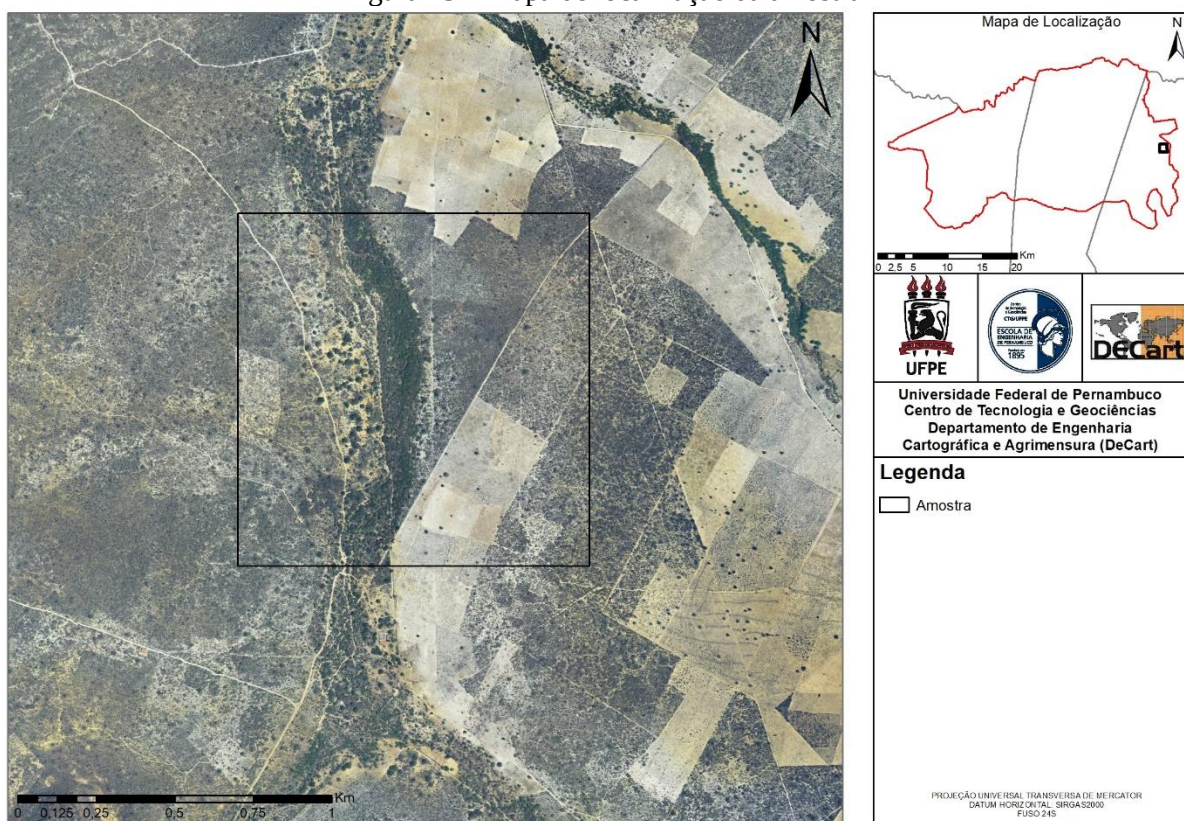
Fonte: O Autor (2019).

4.3 ANÁLISE AMOSTRAL

Considerando a dimensão da área de estudo, bem como sua heterogeneidade, foi escolhida uma amostra para realização das análises estatísticas. A área foi selecionada em virtude de sua representatividade nas variáveis de interesse, que serão apresentadas a seguir.

A localização da amostra é dada na Figura 15, onde há um curso de rio efêmero no sentido sul-norte, localizado no centro da amostra, existe também uma área de desenvolvimento de agricultura em sua porção centro-sul, algumas estradas em leito natural e vegetação nativa.

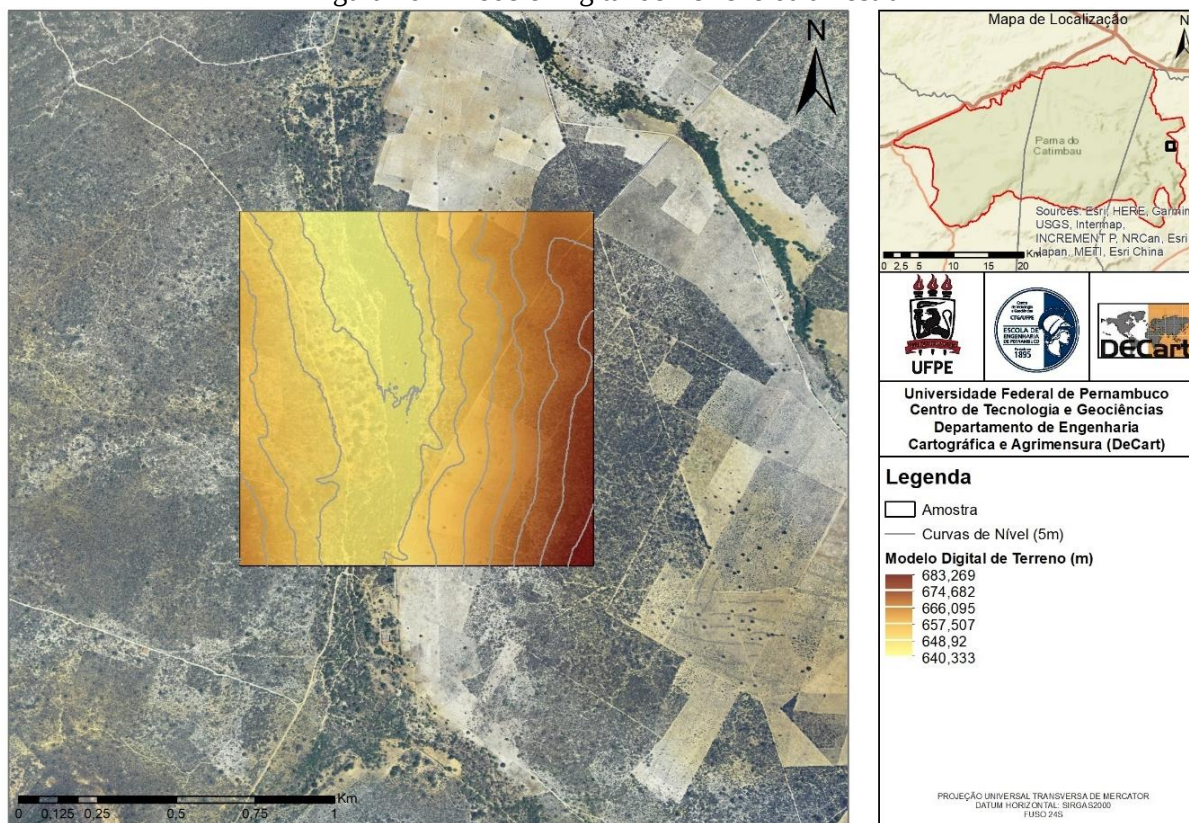
Figura 15 – Mapa de localização da amostra



Fonte: O Autor (2019).

A Figura 16 apresenta o modelo digital de terreno na amostra selecionada, onde são destacadas as curvas de nível do local com equidistância de 5 metros. Na amostra podem ser encontradas altitudes de 640 a 683 metros.

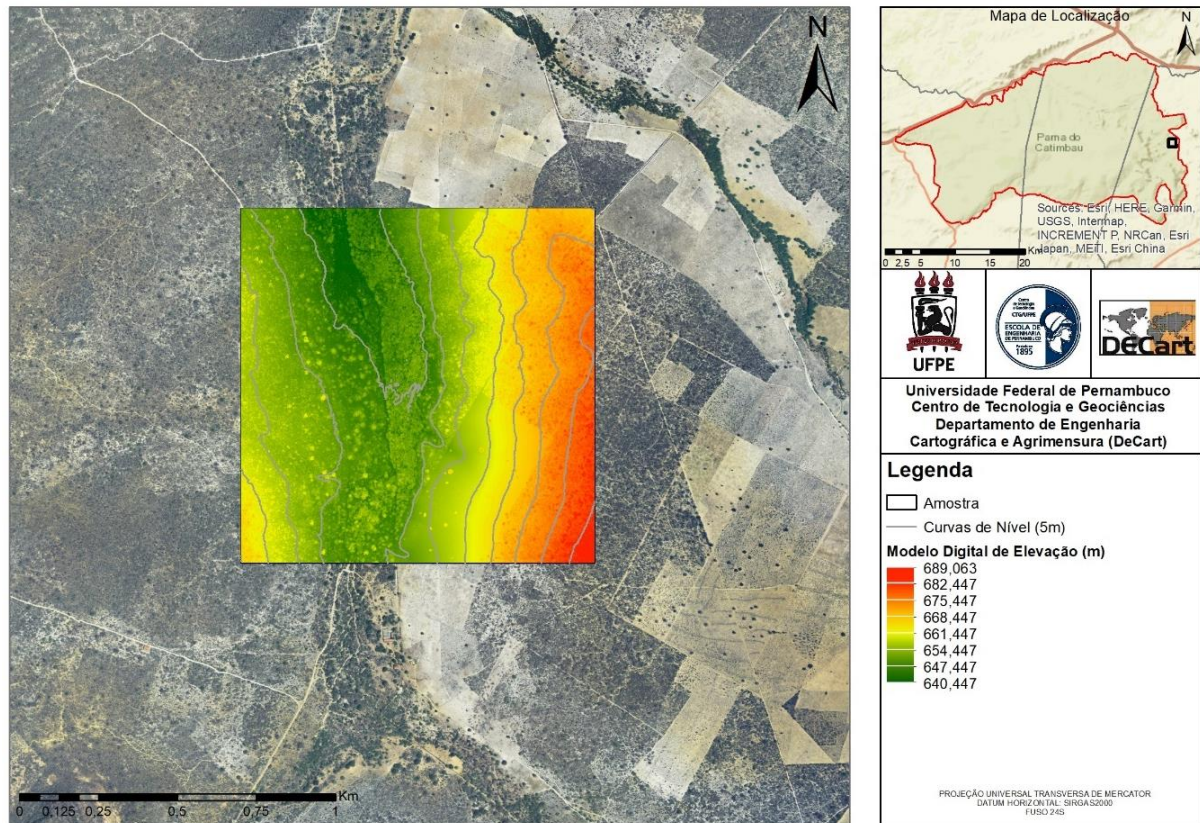
Figura 16 – Modelo Digital de Terreno da amostra



Fonte: O Autor (2019).

A Figura 17 mostra o modelo digital de elevação da amostra, nele é possível identificar a cobertura vegetal do solo no local. Nas áreas mais baixas há espécimes arbóreos de altura mediana, nas porções mais altas possuem espécimes de pequeno porte e áreas agrícolas.

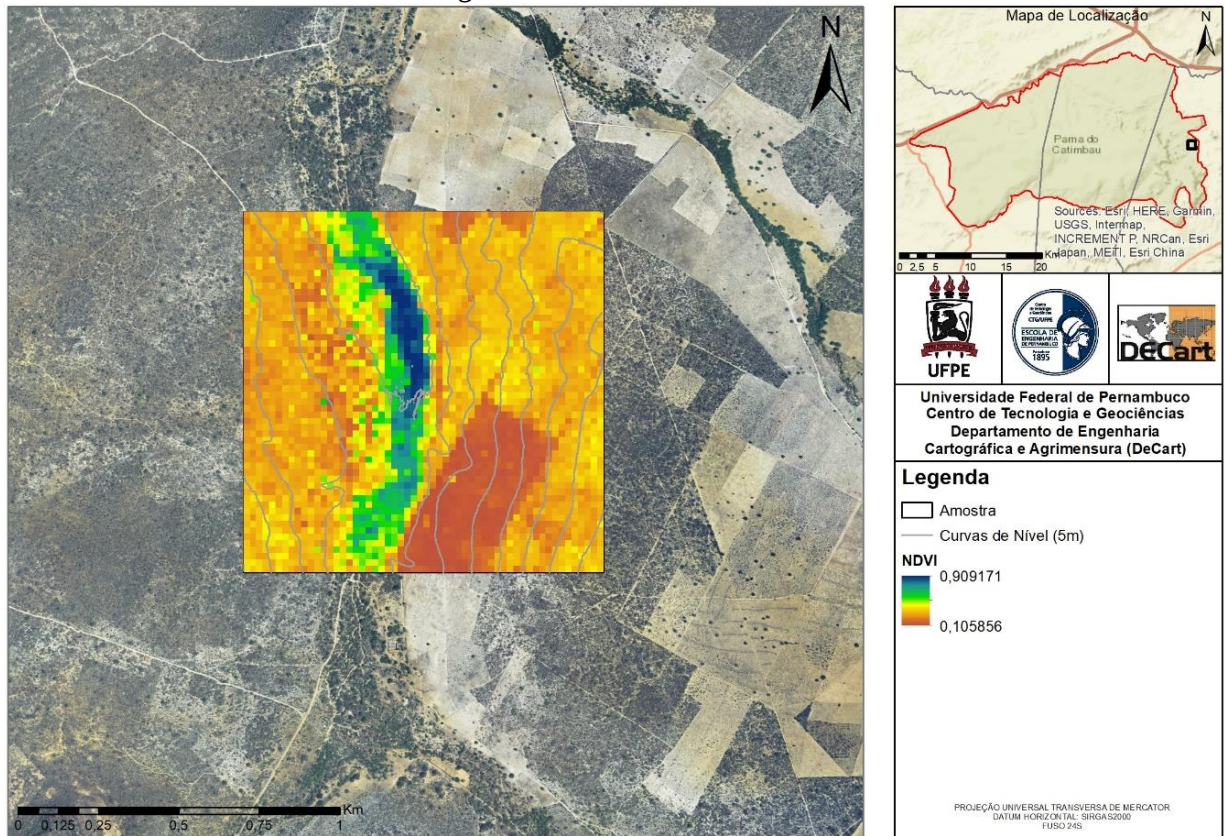
Figura 17 – Modelo Digital de Elevação da amostra



Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 18 pode ser observado o NDVI da amostra selecionada. É possível identificar valores mais baixos para as áreas agrícolas, solo exposto e caatinga arbustiva. Valores mais altos podem ser identificados onde há cobertura vegetal, principalmente próxima ao rio efêmero.

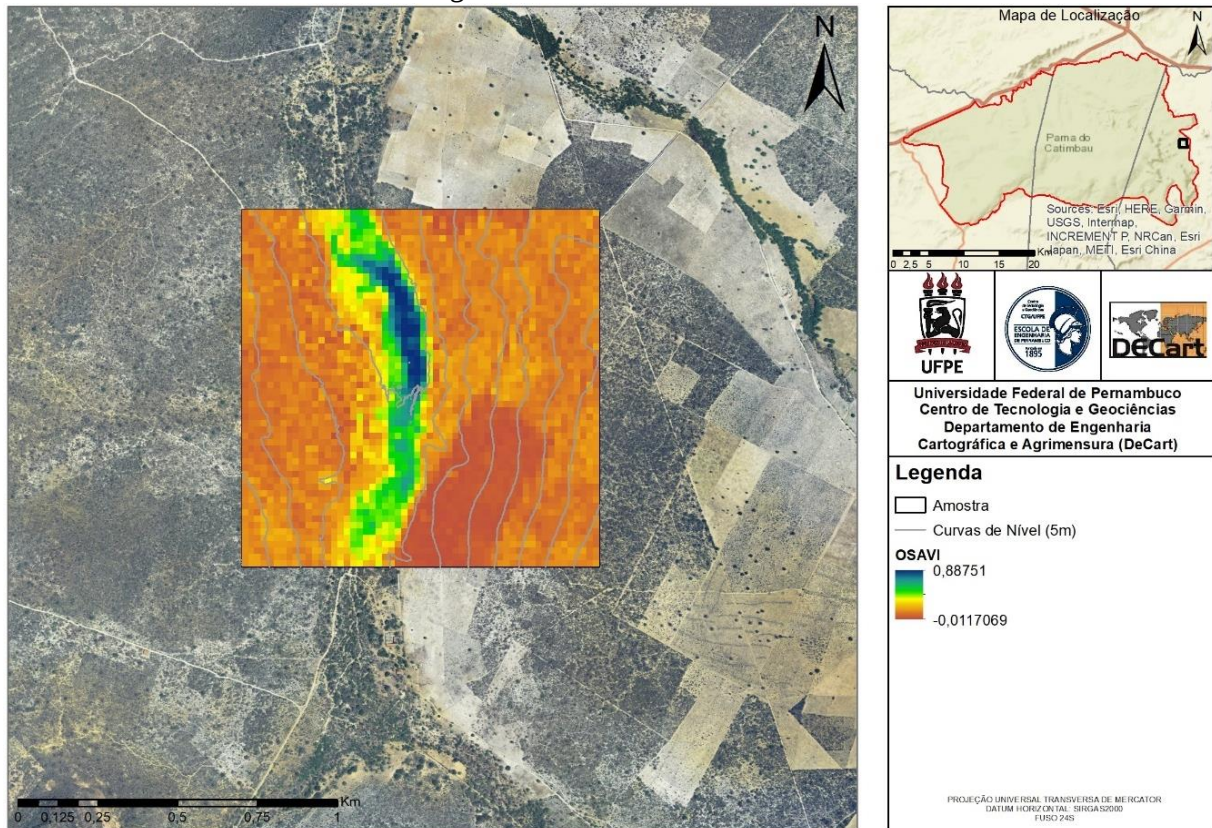
Figura 18 – NDVI da amostra



Fonte: O Autor (2019).

A Figura 19 representa o OSAVI. Assim como no NDVI é possível identificar maiores valores do índice para as áreas com maior vigor vegetativo (mais próximas do rio) e valores menores para as áreas agrícolas e caatinga arbustiva.

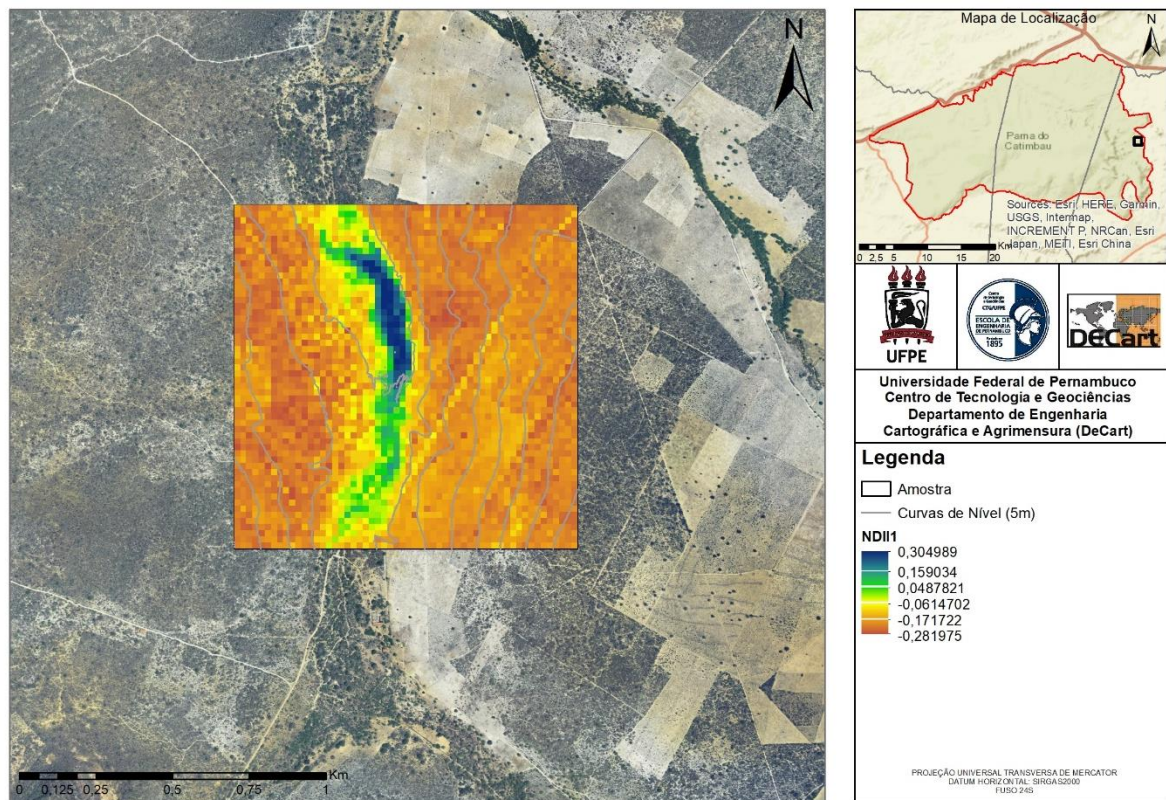
Figura 19 – OSAVI da amostra



Fonte: O Autor (2019)

A Figura 20 representa o NDII1 que dentre os índices analisados foi o que obteve comportamento mais diferenciado, apresentando pouca sensibilidade para discriminação das áreas com valores mais baixos, representadas pelas áreas com espécimes de pequeno porte e áreas agrícolas.

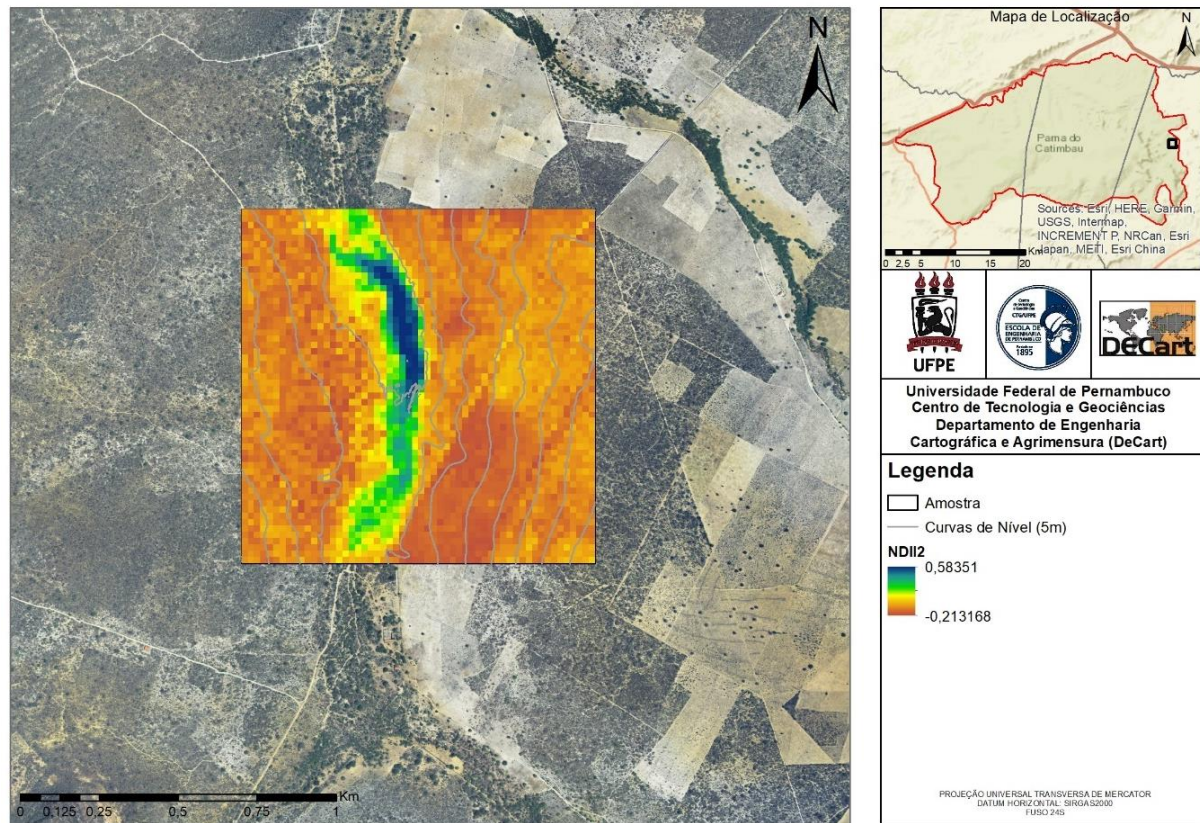
Figura 20 – NDII1 da amostra



Fonte: O Autor (2019).

A Figura 21 representa o NDII2 que apresentou comportamento análogo ao do NDVI e do OSAVI.

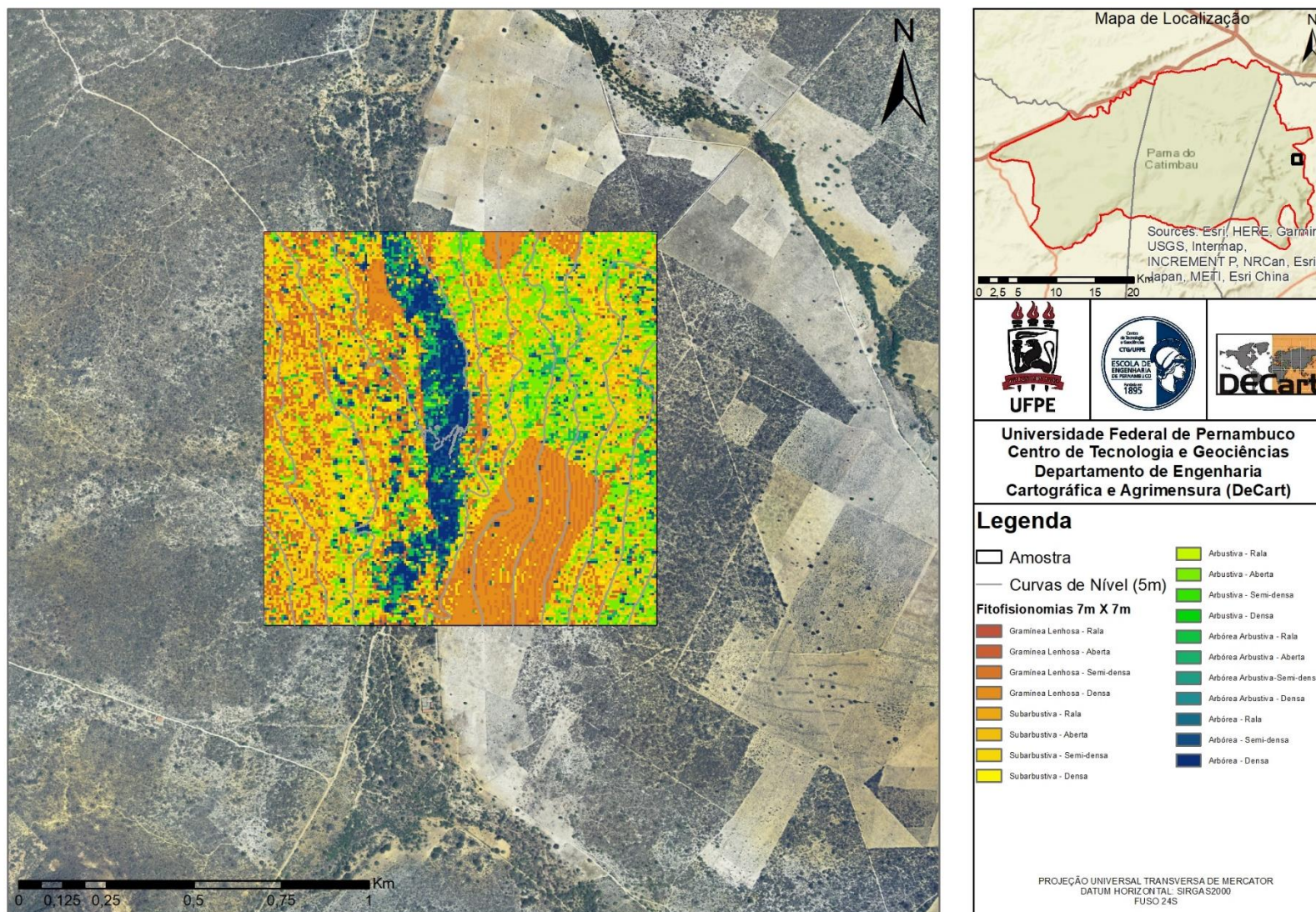
Figura 21 – NDII2 da amostra



Fonte: O Autor (2019).

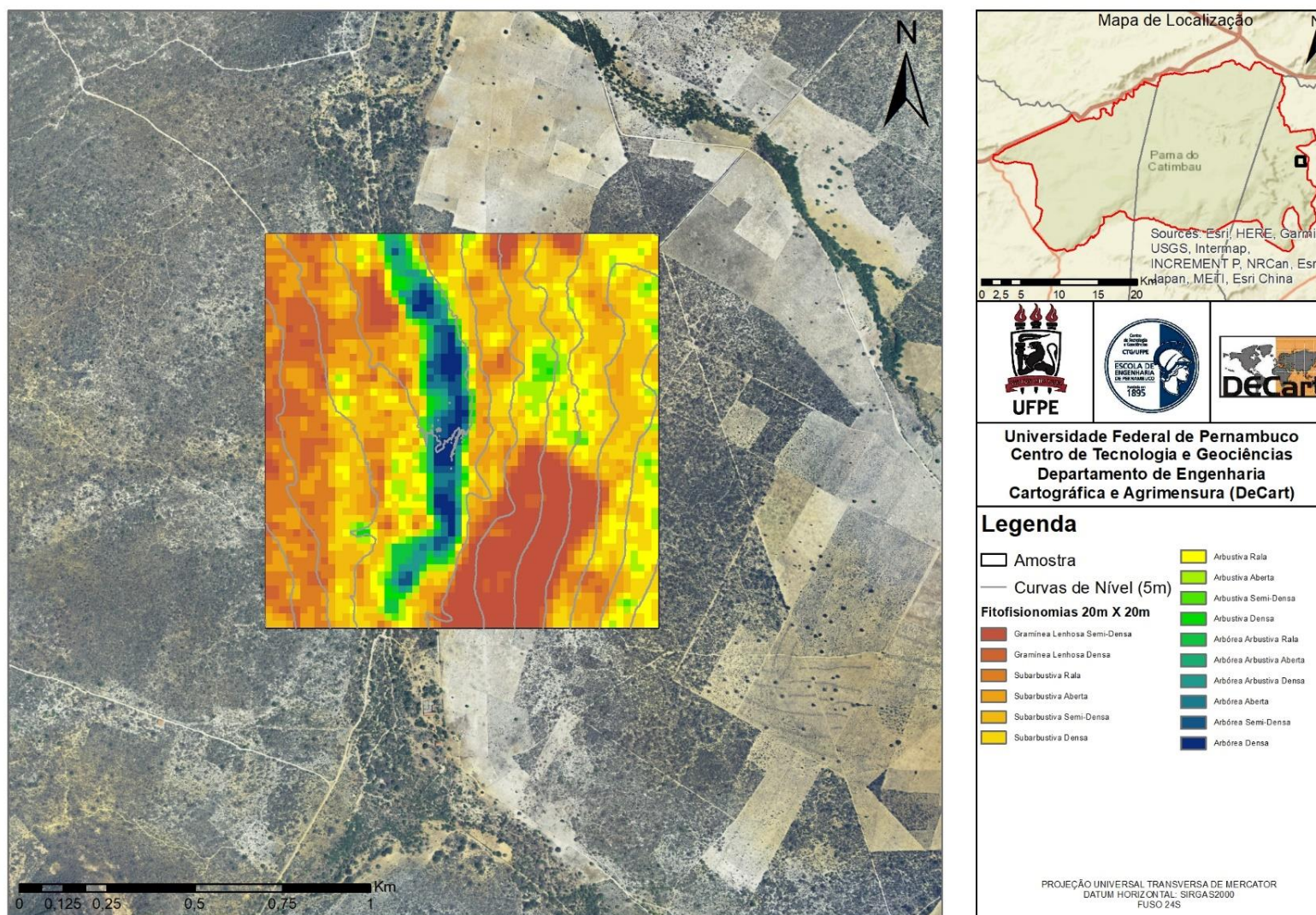
A Figura 22, com resolução espacial de 7x7 metros, e Figura 23 com resolução espacial de 20x20 metros, trazem a espacialização das fitofisionomias identificadas na amostra que, por sua vez, na área de desenvolvimento de agricultura, caracteriza-se por uma cobertura vegetal gramínea lenhosa. As áreas com vegetação nativa, foram classificadas principalmente vegetação arbustiva e subarbustiva. E próximo ao curso de rio efêmero no sentido norte-sul, predominou uma vegetação arbórea.

Figura 22 – Fitofisionomia 7x7 metros



Fonte: O Autor (2019).

Figura 23 – Fitofisionomia 20x20 metros

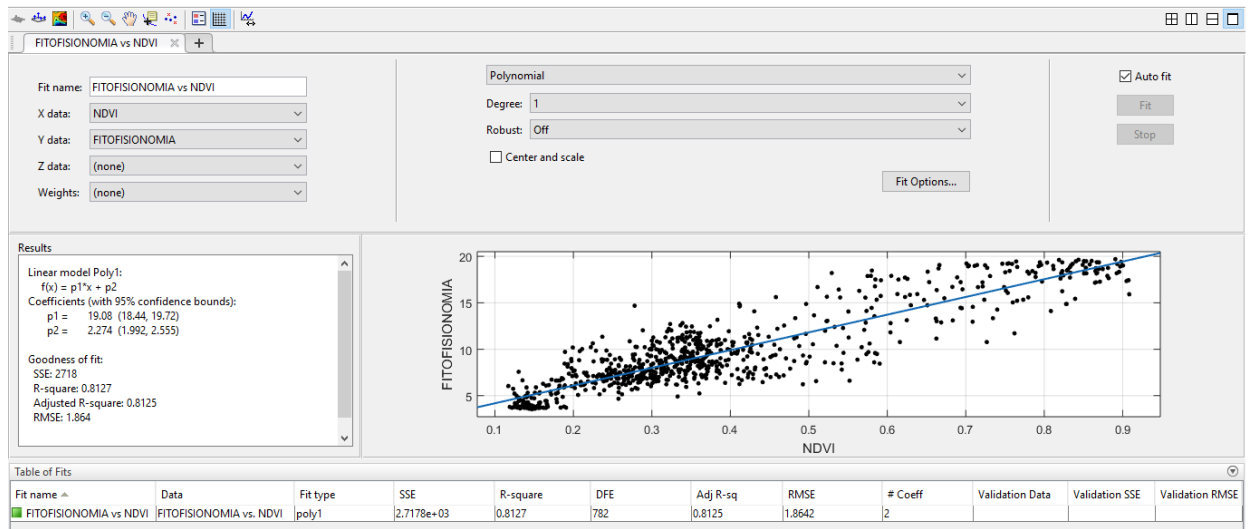


Fonte: O Autor (2019).

Foram realizados 4 processos de regressão na amostra selecionada, todos estabelecendo as fitofisionomias como variáveis dependentes e os índices de vegetação como variáveis independentes. Cada uma das regressões utilizou apenas um índice por vez, cujos gráficos serão apresentados a seguir.

Na regressão onde a fitofisionomia foi explicada através do NDVI obteve-se coeficiente de determinação igual a 81%. A regressão encontra-se representada na Figura 24.

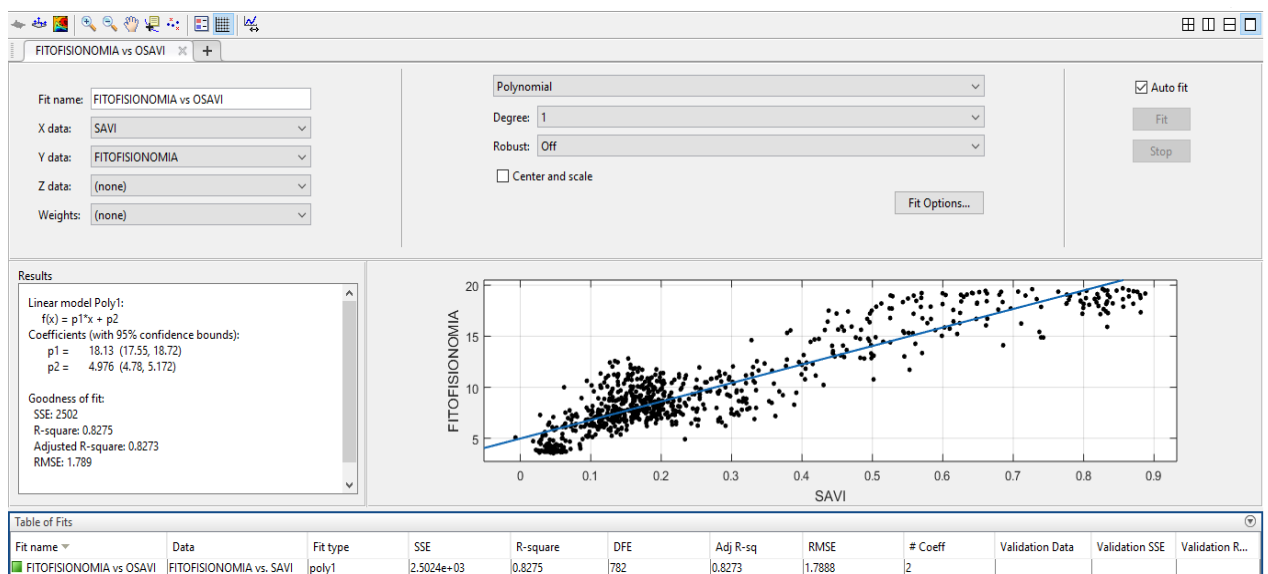
Figura 24 – Fitofisionomias X NDVI



Fonte: O Autor (2019).

Na regressão em que o OSAVI foi empregado como variável independente obteve-se coeficiente de determinação igual a 82%, que se encontra representado na Figura 25.

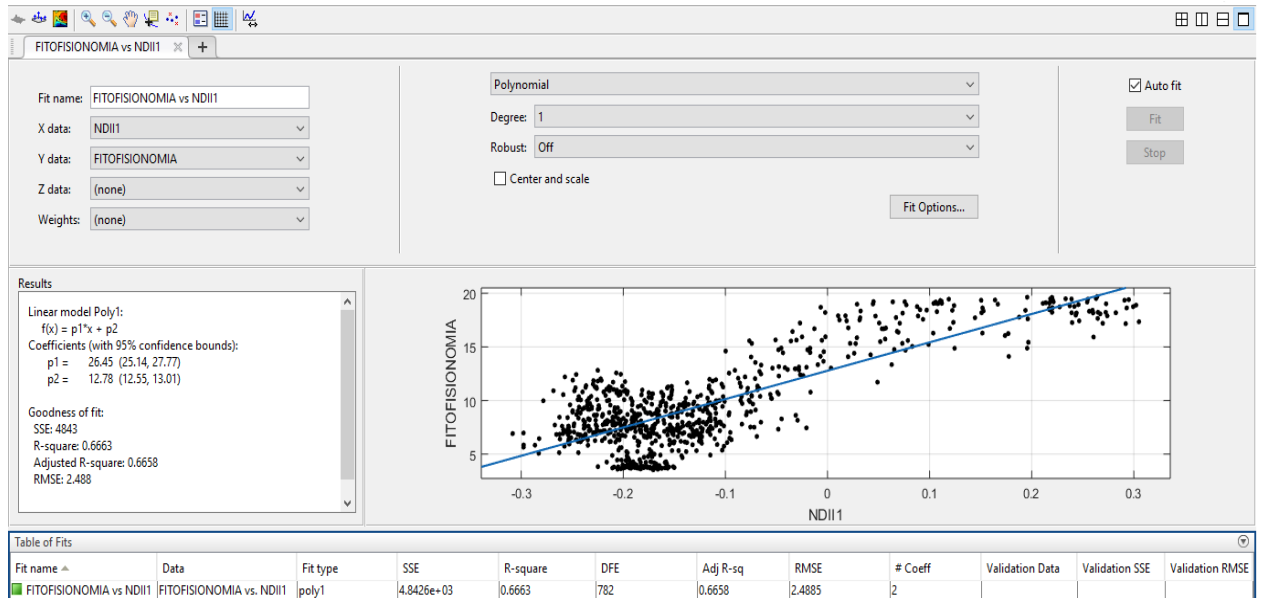
Figura 25 – Fitofisionomias X OSAVI



Fonte: O Autor (2019).

A regressão onde o NDII1 foi utilizado para explicar as fitofisionomias obteve menor coeficiente com valor igual a 67%. apresentado na Figura 26.

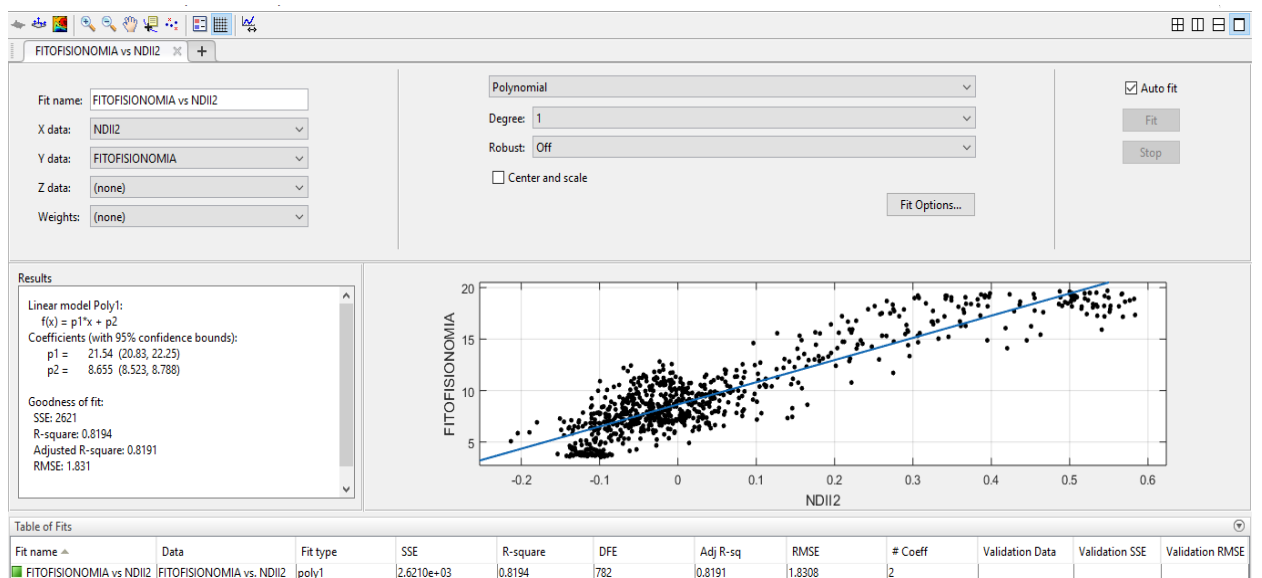
Figura 26 – Fitofisionomias X NDII1



Fonte: O Autor (2019).

O NDII2 por sua vez obteve melhor resultado que o NDII1 com coeficiente de determinação com valor igual a 82% (Figura 27).

Figura 27 – Fitofisionomias X NDII2



Fonte: O Autor (2019).

5 CONCLUSÃO

Classificar detalhadamente as fitofisionomias da Caatinga é um desafio, assim pode-se afirmar que a abordagem utilizando dados de sensoriamento remoto apresenta vantagens, considerando os baixos custos para realizar o mapeamento sistemático em larga escala.

As chaves de classificação propostas por Sá (2008) e o algoritmo desenvolvido em linguagem python para o processamento, se mostraram eficientes para a detecção das fitofisionomias do PARNA Catimbau, com sensibilidade para distinguir todas as classes integrantes utilizando essa metodologia.

De modo geral, os resultados obtidos a partir dos dados LiDAR foram afetados pelo erro de passagem do sensor. Apesar disso, a estratificação vertical mostrou variação coerente ao longo das faixas de coleta, com valores médios em torno de 1,68 metros, e desvio padrão em torno de 2,30 metros, o que significa uma cobertura vegetal majoritariamente formada por extratos de porte baixo a médio, somando 66,32% com alturas até 2 metros, e algumas ocorrências de extratos arbóreos, cobrindo pouco mais de 3% da área de estudo.

Foram identificadas 20 classes de fitofisionomias no PARNA Catimbau, das quais as que mais se destacaram foi a Subarbustiva semi-densa e a Subarbustiva aberta, cobrindo respectivamente 18,65% e 17,36% da área.

A aplicação dos índices de vegetação também se mostrou importante para fins de classificação, permitindo o mapeamento do vigor vegetativo de maneira facilitada. O uso de dados do sensor MSI/Sentinel-2, em combinação com observações LiDAR, tem grande potencial de melhora da precisão da classificação das fitofisionomias.

A classificação das fitofisionomias apresentou boa concordância com os mapas dos índices de vegetação, evidenciado pelas análises de regressão aplicadas na amostra, em que, dentre as quais, o OSAVI e NDII2 foram os índices que obtiveram melhor desempenho, com coeficiente de determinação igual a 82%.

Apesar dos fortes coeficientes de determinação obtidos, é bastante provável que outros fatores sejam determinantes na formação das fitofisionomias de algumas áreas, especialmente quando em associação com outros fatores, como a presença de cursos de água, declividade, condições climáticas e aspectos botânicos de espécies endêmicas.

Assim, recomenda-se a ampliação da do uso dessa metodologia em estudos integrados, com a modelagem de outras variáveis que possam se correlacionar ao desenvolvimento da cobertura vegetal.

REFERÊNCIAS

- ABADE, N. A.; DE CARVALHO, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; DE OLIVEIRA, S. N. Comparative analysis of MODIS time-series classification using support vector machines and methods based upon distance and similarity measures in the brazilian cerrado-Caatinga boundary. **Remote Sensing**, v. 7, n. 9, p. 12160–12191, 2015.
- AB'SABER, A.N. **Os domínios de natureza no Brasil**: Potencialidades paisagísticas. 3 ed, São Paulo, 2005.
- ALEXANDER, C.; KORSTJENS, A. H.; HILL, R. A. Influence of microtopography and crown characteristics on tree height estimations in tropical forests based on lidar canopy height models. **International journal of applied Earth observation and geoinformation**, v. 65, p. 105–113, 2018.
- ANDRADE, K.V.S.A.; RODAL, M.J.N.; LUCENA, M.F.A.; GOMES, A.P.S. 2004. Composição florística de um trecho do Parque Nacional do Catimbau, Buíque, Pernambuco - Brasil. **Hoehnea**, v. 31, p. 337-348.
- ANDRADE-LIMA, D. de. The caatingas dominium. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 4, p. 149-153, 1981.
- ANDRADE, K.V.S.A.; RODAL, M.J.N.; LUCENA, M.F.A.; GOMES, A.P.S. Composição florística de um trecho do Parque Nacional do Catimbau, Buíque, Pernambuco - Brasil. **Hoehnea**, v. 31, p. 337-348. 2004.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; BURGOS, N.; LOPES, O. F.; SILVA, F. B. R. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco. **Boletim de Pesquisa**, v. 11, p. 382, 2000.
- ASCHBACHER, J.; BEER, T.; CICOLELLA, A.; PILAR MILAGRO, M.; PALIOURAS, E. Observing Earth, for a safer planet GMES space component: status and challenges. **European Space Agency Bulletin**, v. 2010, n. 142, p. 22–31, 2010.
- ASNER, G. P.; MASCARO, J.; MULLER-LANDAU, H. C.; VIEILLEDENT, G.; VAUDRY, R.; RASAMOELINA, M.; HALL, J. S.; VAN BREUGEL, M. A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. **Oecologia**, v. 168, n. 4, p. 1147–1160, 2012.
- BARBOSA, H. A.; HUETE, A. R.; BAETHGEN, W. E. A 20-year study of NDVI variability over the northeast region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 67, n. 2, p. 288–307, 2006.
- BEN-ARIE, J. R.; HAY, G. J.; POWERS, R. P.; CASTILLA, G.; ST-ONGE, B. Development of a pit filling algorithm for LiDAR canopy height models. **Computers and Geosciences**, v. 35, n. 9, p. 1940–1949, 2009.
- CHEN, Q.; GONG, P.; BALDOCCHI, D.; XIE, G. Filtering airborne laser scanning data with morphological methods. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 2, p. 175–185, 1 fev. 2007.
- CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol 07, n.04 755-763. 2014.
- CLARK, M. L.; CLARK, D. B.; ROBERTS, D. A. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 1, p. 68–89, 2004.
- CLARK, M. L.; KILHAM, N. E. Mapping of land cover in northern California with simulated hyperspectral satellite imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 119, p. 228–245, 2016.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea - Diagnóstico do município de Buíque, Estado de Pernambuco. CPRM/PROODEM, Recife, 27 p. 2005.

CPTEC/INPE. **Informações sobre produtos de monitoramento climático mensal e sazonal das chuvas no Brasil**. Disponível em: <http://clima1.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 06 mar. 2019.

DOBBER, M. R.; DIRKSEN, R. J.; LEVELT, P. F.; VAN DEN OORD, G. H. J.; VOORS, R. H. M.; KLEIPOOL, Q.; JAROSS, G.; KOWALEWSKI, M.; HILSENATH, E.; LEPPELMEIER, G. W.; DE VRIES, J.; DIERSEN, W.; ROZEMEIJER, N. C. Ozone monitoring instrument calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 5, p. 1209–1238, 2006.

DRAKE, J. B. *et al.* Above-ground biomass estimation in closed canopy Neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships. Oxford. **Global Ecology & Biogeography**, v. 12, n. 12, p. 147-159, 2003.

DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.; MEYGRET, A.; SPOTO, F.; SY, O.; MARCHESE, F.; BARGELLINI, P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. **Remote sensing of Environment**, v. 120, n. sp-1322/2, p. 25–36, maio 2012.

DUBAYAH, R.; KNOX, R.; HOFTON, M.; BLAIR, J. B.; DRAKE, J. In: HILL, M. J.; ASPINALL, R. J. (Orgs.). Land surface characterization using lidar remote sensing. **Gordon and Breach Science**, p.25–38, 2000.

EMBRAPA SOLOS - UEP Recife, 2006. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Disponível em: (www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.html). Acesso em: 28 mar. 2019.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Global monitoring for environment and security (GMES)**, 2012. Disponível em: http://www.esa.int/About_Us/Ministerial_Council_2012/Global_Monitoring_for_Environment_and_Security_GMES. Acesso em: 25 fev. 2019.

FELICIANO, E. A.; WADOWINSKI, S.; POTTS, M. D.; LEE, S. K.; FATOYINBO, T. E. Estimating mangrove canopy height and above-ground biomass in the everglades national park with airborne lidar and tandem-x data. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, 2017.

FERNANDES, A. **Fitogeografia do semi-árido**. Trabalho apresentado na 4ª Reunião Especial da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência-SBPC. Feira de Santana-BA, Anais, 215-219, 1996

FERRAZ, R. DA S.; SOUZA S. F. DE; REIS, M. L. L. Laser Scanner Terrestre: teoria, aplicações e prática. **Revista Brasileira de Geomática**, v.4, n. 2, p.99-109, 2016.

FIGUEIREDO, L.S., RODAL, M.J.N. & MELO, A.L. Florística e fitossociologia de uma área de vegetação arbustiva caducifólia espinhosa no município de Buíque – Pernambuco. **Naturalia**, 25: 205-224. 2000.

FRANCISCO, P. R. M., CHAVES, I. de B., CHAVES, L. H. G., & LIMA, E. R. V. De. Detecção de Mudança da Vegetação de Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 5(6), 1473–1487, 2012.

GARIGLIO, M.A. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga**. Brasília. 2010.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231- 244, 2010.

GOMES, A.P.S., RODAL, M.J.N. & MELO, A.L. Florística e fitogeografia da vegetação arbustiva subcaducifólia da Chapada de São José, Buíque, PE, Brasil. **Acta botânica Brasilica**, p. 37-48. 2006.

GORGENS, E. B.; SOARES, C. P. B.; NUNES, M. H.; RODRIGUES, L. C. E. Characterization of Brazilian forest types utilizing canopy height profiles derived from airborne laser scanning. **Applied Vegetation Science**. v. 19, p. 369–552, 2016.

HAGOLLE, O.; SYLVANDER, S.; HUC, M.; CLAVERIE, M.; CLESSE, D.; DECHOZ, C.; LONJOU, V.; POULAIN, V. SPOT-4: Simulation of Sentinel-2 time series on 45 largesites. **Remote Sensing**. n 7, 12242–12264. 2015.

HARDISKY, M. A.; KLEMAS, V.; SMART, R. M. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of spartina alterniflora canopies. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 49, n. 1, p. 77–83, 1983.

HOUGHTON, R. A. **Biomass**. In: JORGENSEN, S. E.; FATH., B. D. (Org.). Encyclopedia of Ecology. Volumes 1-5. [S.l.]: Elsevier, 2008.

IBAMA, 2008. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br>. Acesso em 07 mar. 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Mapa de Biomas do Brasil**: primeira aproximação. Diretoria de Geociências. 2004.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Dados de estações Meteorológicas**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 10 mar. 2019.

JACOMINE, P.K.T.; CAVALCANTI, A.C.; BURGOS, N.; PESSOA, S.C.P.; SILVEIRA, C.O. Levantamento exploratório - **Reconhecimento de solos do estado de Pernambuco**. Boletim Técnico da SUDENE, n. 26, p. 1-175. 1973.

JACON, A. D.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R.; SANO, E. E. Seasonal characterization and discrimination of savannah physiognomies in Brazil using hyperspectral metrics from hyperion/eo-1. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 15, p. 4494–4516, 2017.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. 2ª Ed. São José dos Campos, SP: Parêntese, 672 p, 2009.

KIMES, D. S.; MARKHAM, B. L.; TUCKER, C. J.; MCMURTREY, J. E. Temporal relationships between spectral response and agronomic variables of a corn canopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 11, n. C, p. 401–411, 1981.

LEAL, I.R., TABARELLI, M. & SILVA, J.M.C. **Ecologia e conservação da caatinga**. Editora da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 804p. 2003.

LEICA. **Leica ADS80**. Heerbrugg: Leica, 2011.

LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M.; ST-ONGE, B.; FLOOD, M. LiDAR remote sensing of forest structure. **Progress in Physical Geography**, v. 27, n. 1, p. 88–106, 1 mar. 2003.

MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do riacho dos Cavalos, Crateús-CE. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 23, p. 520–533, 2011.

MIN - Ministério da Integração Nacional. **Nova delimitação do Semi-árido brasileiro**. Brasília. Secretaria de desenvolvimento Regional. Brasília. 33p. 2005.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Avaliação e ações prioritárias para a conservação da biodiversidade da caatinga**. Brasília: Universidade Federal de Pernambuco, Conservation International, Fundação Biodiversitas. 2002.

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.

MÜLLER, H.; RUFIN, P.; GRIFFITHS, P.; BARROS SIQUEIRA, A. J.; HOSTERT, P. Mining dense landsat time series for separating cropland and pasture in a heterogeneous brazilian savanna landscape. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 490–499, 2015.

OMASA, K.; HOSOI, F.; KONISHI, A. 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 4, p. 881–898, 2007.

OMASA, K.; HOSOI, F.; UENISHI, T. M.; SHIMIZU, Y.; AKIYAMA, Y. Threedimensional modeling of an urban park and trees by combined airborne and portable on-ground scanning lidar remote sensing. **Environmental Modeling and Assessment**, v. 13, n. 4, p. 473–481, 2008.

PEDROSA, I. M. M. DE C.; COSTA, T. B.; FARIA, R. G. ; FRANÇA, F. G. R.; LARANJEIRAS D. O.; OLIVEIRA, T. C. S. P. DE; PALMEIRA, C. N. S.; TORQUATO, S.; MOTT, T.; VIEIRA G. H. C.; GARDA, A. A. Herpetofauna of protected areas in the Caatinga III: The Catimbau National Park, Pernambuco, Brazil. **Biota Neotropica**. vol.14 no.4 Campinas, 2015.

- PETTA, R. A.; CARVALHO, L. V.; ERASMI, S.; JONES, C. Evaluation of desertification processes in Seridó region (NE Brazil). **International Journal of Geosciences**, v. 4, n. 5, p. 12–17, 2013.
- QUEIROZ, L.P. **Leguminosas da caatinga**. Feira de Santana, Bahia. 467p. 2009.
- QUEIROZ, L.P., CONCEIÇÃO, A.A. & GIULIETTI, A.M. **Nordeste semi-árido**: caracterização geral e lista das fanerógamas. In: Giuliatti, A.M., Conceição, A.A. & Queiroz, L.P. (Eds). *Diversidade das fanerógamas do semi-árido brasileiro*. Associação de Plantas do Nordeste, Recife, Cap.1: 15-363. 2006.
- REUTEBUCH, S. E.; ANDERSEN, H.; MCGAUGHEY, R. J.; FOREST, L. Light Detection and Ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory. **Journal of Forestry**, n. 9, p. 286–292, 2005.
- RIBEIRO JÚNIOR, S. **Determinação de volumes em atividades de mineração utilizando ferramentas do sensoriamento remoto**. 2011. 161p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- RODAL, M.J.N., ANDRADE, K.V.S.A., SALES, M. F. & GOMES, A.P.S. Fitossociologia do componente lenhoso de um refúgio vegetacional no Município de Buíque, Pernambuco. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 58, n. 3, p. 517-526. 1998.
- RODRIGUEZ-GALIANO, V. F.; GHIMIRE, B.; ROGAN, J.; CHICA-OLMO, M.; RIGOL-SANCHEZ, J. P. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 67, n. 1, p. 93–104, 2012.
- ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. In: *Earth Resources Technology Satellite (ERTS) SYMPOSIUM*, 3., 1973.
- SÁ, I. B. Mesa redonda no 34: **classificação da vegetação brasileira**. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, Natal: Sociedade Botânica do Brasil, 2008.
- SALES, M.F.; MAYO, S.J.; RODAL, M.J.N. **Florestas serranas de Pernambuco**: um checklist da flora ameaçada dos Brejos de Altitude. Recife, Imprensa Universitária da Universidade Federal Rural de Pernambuco. 1998.
- SAMPAIO, E.; RODAL, M. J. N. **Avaliação e identificação de ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade do bioma Caatinga**. Petrolina: Embrapa, 2000.
- SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Pernambuco Tridimensional**, 2006. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>.
- SEGL, K., GUANTER, L., GASCON, F., KUESTER, T., ROGASS, C., MIELKE, C. An end-to-end modeling tool for the simulation of Sentinel-2 image products. **IEEE E Trans.Geosci. Remote Sens.** v. 53, p. 5560–5571. 2015.
- SHENG, Y. Quantifying the size of a lidar footprint: a set of generalized equations. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 5, n. 3, p. 419–422, 2008.
- SILVA, A. P. N.; MOURA, G. B. D. A.; GIONGO, P. R.; SILVA, A. O. Dinâmica espaço-temporal da vegetação no semi-árido de Pernambuco. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 4, p. 195–205, 2009.
- SILVA, J. A. A. **O Código Florestal e a Ciência**: Contribuições para o diálogo. ISBN 978-85-86957-16-1, São Paulo: SBPC, 2011.
- SILVA, P. F.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, R.; SOUZA, E. S.; SILVA, J. R. I.; ALVES, E. M. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71–82, 2017.
- SOLARI, R. A. F. **Aplicação de Métodos de Classificação Supervisionada Em Imagens Do Sentinel-2, Como Suporte Ao Cadastro Ambiental Rural**. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília. Ciências Ambientais, 2017.

- TEIXEIRA, C. M. B. **Comportamento e Integração de Indicadores Espectrais da Desertificação**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Cartografia, 2018.
- TOMMASELLI A. M. G. Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamento 3D a Curta Distância. **Geodésia Online**, 2003.
- VRANCKX, E. C. de P. **A (des)territorialização do Parque Nacional do Catimbau-PE**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. CFCH, Geografia, 2010.
- WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 68–82, jul. 1999.
- WU, C.; NIU, Z.; TANG, Q.; HUANG, W. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: modeling and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 8–9, p. 1230–1241, 2008.
- ZANDONÁ, D. F. et al, Varredura a Laser aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas Airborne Laser Scanner technology for estimating dendrometric variables. **Scientia Forestalis, Piracicaba**, v. 36, n. 80, p. 295–306, 2008.