



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MURILO OLIVEIRA DA COSTA

**COMPORTAMENTO DA VEGETAÇÃO DO BIOMA CAATINGA UTILIZANDO
SÉRIES TEMPORAIS MODIS E PRODUTOS CHIRPS EM BACIA HIDROGRÁFICA
PERNAMBUCANA**

Recife

2023

MURILO OLIVEIRA DA COSTA

**COMPORTAMENTO DA VEGETAÇÃO DO BIOMA CAATINGA UTILIZANDO
SÉRIES TEMPORAIS MODIS E PRODUTOS CHIRPS EM BACIA HIDROGRÁFICA
PERNAMBUCANA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Pernambuco, como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. D. Sc. Leijdane Maria Maciel de Oliveira

Coorientador: Prof. M. Sc. Ubiratan Joaquim da Silva Junior

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Costa, Murilo Oliveira da .

Comportamento da vegetação do bioma caatinga utilizando séries temporais MODIS e produtos CHIRPS em bacia hidrográfica Pernambucana / Murilo Oliveira da Costa. - Recife, 2023.

53p : il., tab.

Orientador(a): Leidjane Maria Maciel de Oliveira

Coorientador(a): Ubiratan Joaquim da Silva Junior

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2023.

1. Análise pluviométrica. 2. Imagens orbitais. 3. Índices espectrais. I. Oliveira, Leidjane Maria Maciel de . (Orientação). II. Silva Junior, Ubiratan Joaquim da . (Coorientação). IV. Título.

990 CDD (22.ed.)

MURILO OLIVEIRA DA COSTA

**COMPORTAMENTO DA VEGETAÇÃO DO BIOMA CAATINGA UTILIZANDO
SÉRIES TEMPORAIS MODIS E PRODUTOS CHIRPS EM BACIA HIDROGRÁFICA
PERNAMBUCANA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 05/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Profa. D. Sc. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. M. Sc. Ubiratan Joaquim da Silva Junior (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. D. Sc. Sylvana Melo dos Santos (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. D. Sc. Debora Natália Oliveira de Almeida (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Senhor Deus, por Sua graça em minha vida e por me fortalecer nesta caminhada.

Aos meus pais e meu irmão, por serem base na minha vida e sempre me apoiarem.

À Anne Caroline, por estar presente em todos os momentos, me incentivando e sendo minha companheira.

À minha orientadora, Profa. D.Sc.. Leidjane Maria Maciel de Oliveira, por ser o maior exemplo de docente e que, com paciência e cuidado, me ensinou e auxiliou na minha vida acadêmica.

Ao meu coorientador, Prof. M. Sc. Ubiratan Joaquim da Silva Junior, por toda paciência, dedicação e auxílio em todo meu trabalho.

Aos amigos que a UFPE me trouxe, que tornaram os anos de estudo muito mais fáceis e leves.

Aos amigos mais próximos, em especial aos “Canalhas”, por toda a amizade e por sempre torcerem por mim.

A todos citados, meu muito obrigado.

RESUMO

O Bioma da Caatinga, presente no Semiárido brasileiro, é fortemente influenciado por mudanças no regime de chuva da região. Além disso, a identificação da alteração da cobertura terrestre impulsionada pela ação humana é um dos principais desafios quando se estuda florestas sazonalmente secas, como a Caatinga, também é difícil diferenciar áreas florestais de áreas não florestais. Sob essas circunstâncias, os métodos baseados em imagens de satélite são valorizados devido à sua capacidade de revelar alterações induzidas pelo homem devido aos efeitos climáticos na cobertura do solo. Neste contexto, este estudo objetiva examinar as flutuações sazonais na vegetação do bioma Caatinga, com o intuito de identificar potenciais transformações no cenário da paisagem na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú, localizada em Pernambuco, Brasil por meio da avaliação da sensibilidade espectral dos índices Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Enhanced Vegetation Index (EVI) e do Albedo da superfície, num intervalo temporal de 2010 - 2022. O conjunto de dados foi composto por produtos derivados do sensor (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) MODIS: MOD13A1 (NDVI e EVI) e MOD09A1 (bandas espectrais), obtidos a partir dos satélites Aqua e Terra e dados de precipitação do sensor (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station) CHIRPS. A análise do NDVI, EVI e Albedo foi conduzida por meio da elaboração de cartas temáticas durante os períodos de elevada e reduzida precipitação pluviométrica. Os resultados obtidos apontaram um comportamento inversamente proporcional entre o Albedo e os índices de vegetação, bem como para a vegetação e aos dados de precipitação em ambos os períodos climáticos analisados. O NDVI apresentou maiores valores para o período chuvoso, com destaque para o ano de 2022, com média de distribuição dos pixels de 0,7. O EVI, em contrapartida, apresentou uma melhor resposta para o período seco, com destaque para o ano de 2018, com valor médio de 0,17 e corroborando com a queda do valor médio de precipitação na região para o mês de novembro. Ambos os índices apresentaram uma correlação diretamente proporcional, com $R^2 = 0,8$. O Albedo apresentou uma relação inversamente proporcional aos índices, com valor médio de 0,12 para abril de 2018 e 0,19 para novembro. Neste cenário, a utilização de dados MODIS para a geração de produtos cartográficos em escala multitemporal revelou-se como um indicador

confiável das transformações ocorridas no uso e ocupação do solo para o tipo de bioma presente na bacia de estudo.

Palavras-chave: Análise pluviométrica; Imagens orbitais; Índices espectrais.

ABSTRACT

The Caatinga Biome, found in the Brazilian semi-arid region, is strongly influenced by changes in the region's rainfall regime. In addition, identifying land cover change driven by human action is one of the main challenges when studying seasonally dry forests, such as the Caatinga, and it is also difficult to differentiate forest areas from non-forest areas. Under these circumstances, methods based on satellite images are valued because of their ability to reveal human-induced changes due to climatic effects on land cover. In this context, this study aims to examine seasonal fluctuations in the vegetation of the Caatinga biome, in order to identify potential transformations in the landscape scenario in the Pajeú River Basin, located in Pernambuco, Brazil, by assessing the spectral sensitivity of the NDVI and EVI indices and Albedo, over a time interval of 2010 - 2022. The data set consisted of products derived from the MODIS sensor: MOD13A1 (NDVI and EVI) and MOD09A1 (spectral bands), obtained from the Aqua and Terra satellites. NDVI, EVI and Albedo were analyzed by drawing thematic maps during periods of high and low rainfall. The results showed an inversely proportional relationship between albedo and vegetation indices, as well as between vegetation and rainfall data in both climatic periods analyzed. Among the indices, NDVI showed higher values for the rainy season, especially in 2022, with an average pixel distribution of 0.7. The EVI, on the other hand, showed a better response for the dry period, especially in 2018, with an average value of 0.17, corroborating the drop in average rainfall in the region in November. Both indices showed a directly proportional correlation, with $R^2 = 0.8$. Albedo showed an inversely proportional relationship to the indices, with an average value of 0.12 for April 2018 and 0.19 for November. In this scenario, the use of MODIS data to generate cartographic products on a multi-temporal scale proved to be a reliable indicator of the transformations that have occurred in land use and occupation for the type of biome present in the study basin.

Keywords: Rainfall analysis; Orbital images; Spectral indices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– SNIR: Fluxo de Informações.	18
Figura 2 - Mapa de cobertura de solo da área de estudo obtido pelo MAPBIOMAS.	20
Figura 3 - Sequência de etapas da metodologia	22
Figura 4 - Área de Estudo: (A) – Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú inserida na Região Nordeste. (B) – Destaque da área de estudo inserida no Estado de Pernambuco.....	23
Figura 5 - Representação do bioma e recursos hídricos: (A) –Bioma Caatinga inserido no Brasil. (B) –Reservatórios da Bacia do Rio Pajeú.	24
Figura 6 – Pontos de extração de dados de precipitação CHIRPS.	26
Figura 7 - Dados de precipitação do satélite CHIRPS.....	27
Figura 8 – Classificação supervisionada.....	31
Figura 9 - Cartas temática da distribuição espacial do NDVI.....	33
Figura 10 - Cartas temática da distribuição espacial do EVI.	35
Figura 11 - Cartas temática da distribuição espacial do Albedo.	37
Figura 12 - Pontos de extração de dados dos índices.....	39
Figura 13 - Gráficos do tipo barra dos dados NDVI x EVI, nos períodos alta e baixa precipitação pluviométrica	39
Figura 14 - Gráficos do tipo barra dos dados EVI x Albedo, nos períodos alta e baixa precipitação pluviométrica.....	40
Figura 15 - Gráficos do tipo barra dos dados NDVI x Albedo, nos períodos alta e baixa precipitação pluviométrica	41
Figura 16 - Correlação entre NDVI e EVI.	42
Figura 17 – Classificação supervisionada para o período chuvoso.....	43
Figura 18 – Classificação supervisionada para o período seco.....	44
Figura 19 – Registro da vegetal local no período de baixa precipitação.....	46
Figura 20 – Registro da vegetal local no período de maior precipitação.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Datas de aquisição das imagens MODIS (MOD13A1) e MODIS(MOD09A1). 25

Tabela 2 – Áreas computadas na classificação supervisionada..... 45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 BACIA HIDROGRÁFICA	17
2.2 MÉTODOS DE OBTENÇÃO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO	17
2.3 RELAÇÃO DA VEGETAÇÃO DO BIOMA CAATINGA E OS RECURSOS HÍDRICOS NO SEMIÁRIDO	18
2.4 MÉTODOS DE MAPEAMENTO DE USO DO SOLO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO	19
3 METODOLOGIA	22
3.1 ÁREA DE ESTUDO	23
3.2 DADOS ORBITAIS	25
3.3 DADOS HIDROLÓGICOS	26
3.4 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E ALBEDO	27
3.5 MAPEAMENTO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	29
3.6 VALIDAÇÃO	31
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	32
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS	33
4.1 SENSIBILIDADE ESPECTRAL DOS ÍNDICES	33
4.1.1 Índices de vegetação	33
4.1.2 Albedo	36
4.1.3 Análise de distribuição espacial dos índices e albedo	38
4.2 VALIDAÇÃO CARTOGRÁFICA	42
4.2.1 Classificação de uso e ocupação do solo	42

4.2.2 Validação in situ	46
5 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A escassez de água é uma questão urgente que pode impor restrições significativas ao meio ambiente e a sobrevivência humana. O Nordeste brasileiro é uma localidade com alta vulnerabilidade aos fatores climáticos, sendo sua região semiárida a mais suscetível (GONÇALVES et al., 2023). Dentre os elementos que constituem o clima, a precipitação tem forte influência nas atividades agrícolas, pois, nos trópicos, o regime de chuvas tende a ser de curta duração e alta intensidade, também atuando diretamente na modificação da paisagem e do meio ambiente (MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016). A irregularidade das chuvas provoca secas periódicas, que nos últimos anos têm sido registradas com maior frequência. As mudanças climáticas podem aumentar a ocorrência de secas, prolongando sua duração e intensidade, o que pode impactar diretamente na qualidade e disponibilidade de água na região (COUTINHO et al., 2017).

O efeito das mudanças climáticas nas regiões áridas e semiáridas já mostra uma notável diminuição dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas (BERNABÉ-CRESPO; CANTOS; CANIZARES; 2023). Isso evidencia a necessidade de repensar o planejamento hidrológico devido à pressão constante sobre os recursos para diferentes usos – econômicos, ambientais, patrimoniais – devido à sua projetada tendência decrescente (MARTINEZ-VALDERRAMA et al., 2023).

A precipitação é um fator essencial nos processos hidrológicos (CRISTIANO et al., 2017). Nesse sentido, a distribuição espaço-temporal das chuvas tem grande impacto no ciclo hidrológico, na segurança hídrica, na agricultura, na gestão dos recursos hídricos e em diversas atividades econômicas e produtivas (SANTOS, 2020). Melhorar os métodos de medição de precipitação é crucial em uma ampla gama de estudos dependentes da climatologia, como monitoramento de secas, previsão de enchentes e gerenciamento de recursos hídricos (ALSILIBE et al., 2023). Além da precipitação, a vegetação é um elemento fundamental dos ecossistemas terrestres. É o elo natural entre o solo, a água e o meio ambiente e desempenha um papel essencial no balanço de carbono terrestre e na regulação do sistema climático (WEIE; WAN, 2022). Além disso, a vegetação como componente essencial dos ecossistemas terrestres é importante para regular o balanço hídrico em escala regional e global (SIDI

et al., 2020). No semiárido Nordestino, a vegetação é formada pelo bioma Caatinga, tendo seu vigor vegetativo atrelado a presença da precipitação.

A compreensão das interações entre a superfície terrestre, a precipitação e o verde da vegetação são cruciais para prever os futuros ciclos hídricos, em regiões áridas e semiáridas. Neste contexto, o Sensoriamento Remoto é uma ferramenta importante para a pesquisa hidrológica, permitindo estimar a precipitação pluviométrica por meio de imagens de satélite com boa resolução espaço-temporal, por meio de sensores como o Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) e analisar a variação do uso do solo, por meio de índices espectrais, como o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derivado de imagens geradas por sensores como o sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo dos satélites TERRA e AQUA, considerado um bom indicador para identificar áreas de vegetação e mudanças de longo prazo em sua condição (SIDI et al., 2020)

Dentre os estudos destaca-se Formigoni (2008) que mostra uma análise MultiTemporal a partir do EVI do Sensor MODIS para a vegetação da região Nordeste do Brasil, avaliando o comportamento desse índice espectral para diferentes biomas nos anos de 2000-2006. Pacheco et al. (2023) avaliaram a relação entre os índices de vegetação (NDVI e EVI) com a precipitação na região da Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú/Pernambuco a partir de séries temporais do produto MOD13A1 do sensor MODIS/TERRA. ROSEMBACK et al. (2010) que fizeram uma análise da dinâmica da cobertura vegetal na região sul do Brasil utilizando dados MODIS/TERRA. VERHOEVE et al. (2021), investigaram a resiliência da vegetação à seca em diferentes escalas de tempo no norte da Tanzânia durante 1981-2020, por meio de séries de NDVI em associação a dados hidrometeorológicos que incluíram a precipitação mensal com derivados do sensor CHIRPS. Da Silva Junior et al. (2022), fizeram uma análise espaço temporal das mudanças sazonais na vegetação do bioma Caatinga, no semiárido do Pajeú, por meio da sensibilidade espectral do NDVI e do Albedo, utilizando-se dados do sensor MODIS, em períodos de seca e chuvoso.

Além de ser a maior bacia hidrográfica do estado de Pernambuco, a bacia do rio Pajeú abrange uma área de aproximadamente 16.685,63 km² (APAC, 2023) e é formada por diversos afluentes que contribuem para o seu caudal. A bacia é caracterizada por uma hidrologia sazonal, com chuvas concentradas principalmente no período de dezembro a abril, seguidos por longos períodos de estiagem.

A região Semiárida onde a bacia está localizada apresenta desafios em relação à disponibilidade de água para a população e atividades econômicas, tornando os reservatórios da bacia do rio Pajeú importantes para a gestão dos recursos hídricos. Os 19 reservatórios, contidos em sua área, são essenciais para a regulação do fluxo do rio, o abastecimento de água potável, a irrigação de áreas agrícolas e o suporte às atividades industriais locais. Além disso, a bacia do rio Pajeú desempenha um papel fundamental no ecossistema local, fornecendo habitat para diversas espécies de flora e fauna adaptadas às condições semiáridas. A preservação e manejo sustentável dos recursos naturais na bacia são essenciais para garantir a conservação da biodiversidade e a preservação do meio ambiente.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a variação da cobertura vegetal da Bacia Hidrográfica do rio Pajeú - PE, em períodos secos (novembro) e chuvosos (abril) entre 2010 e 2022, auxiliado por dados pluviométricos derivados do sensor CHIRPS e de uso e cobertura do solo, por meio de informações observacionais e de Sensoriamento Remoto. Desta forma analisar a relação existente entre a sensibilidade espectral do NDVI, EVI e do Albedo com as mudanças sazonais pluviométricas e comparar os dados dos índices de vegetação e Albedo, com verificações a partir de fotografias obtidas em campo e o mapeamento de uso e cobertura do solo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento sazonal (períodos secos e chuvosos) da vegetação utilizando sensoriamento remoto com base em séries temporais do satélite Terra sensor MODIS e produtos CHIRPS na bacia hidrográfica do rio Pajeú – Pernambuco.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar a dinâmica temporal da vegetação na bacia hidrográfica do rio Pajeú - PE durante períodos secos e chuvosos, utilizando séries temporais dos índices espectrais Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI) e Albedo da superfície derivados do sensor MODIS;
- b) Analisar a correlação entre a variação da cobertura da vegetação, a partir dos índices espectrais NDVI, EVI e Albedo, com as mudanças de dados pluviométricos extraídos dos produtos CHIRPS;
- c) Investigar a sensibilidade espectral dos índices NDVI e EVI e do Albedo derivados do sensor MODIS, identificando alterações da cobertura vegetal e de uso do solo na bacia hidrográfica, a partir de séries temporais;
- d) Comparar os resultados obtidos pelos Índices de vegetação (IVs) através das análises de índices espectrais e classificação supervisionada de uso e cobertura do solo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BACIA HIDROGRÁFICA

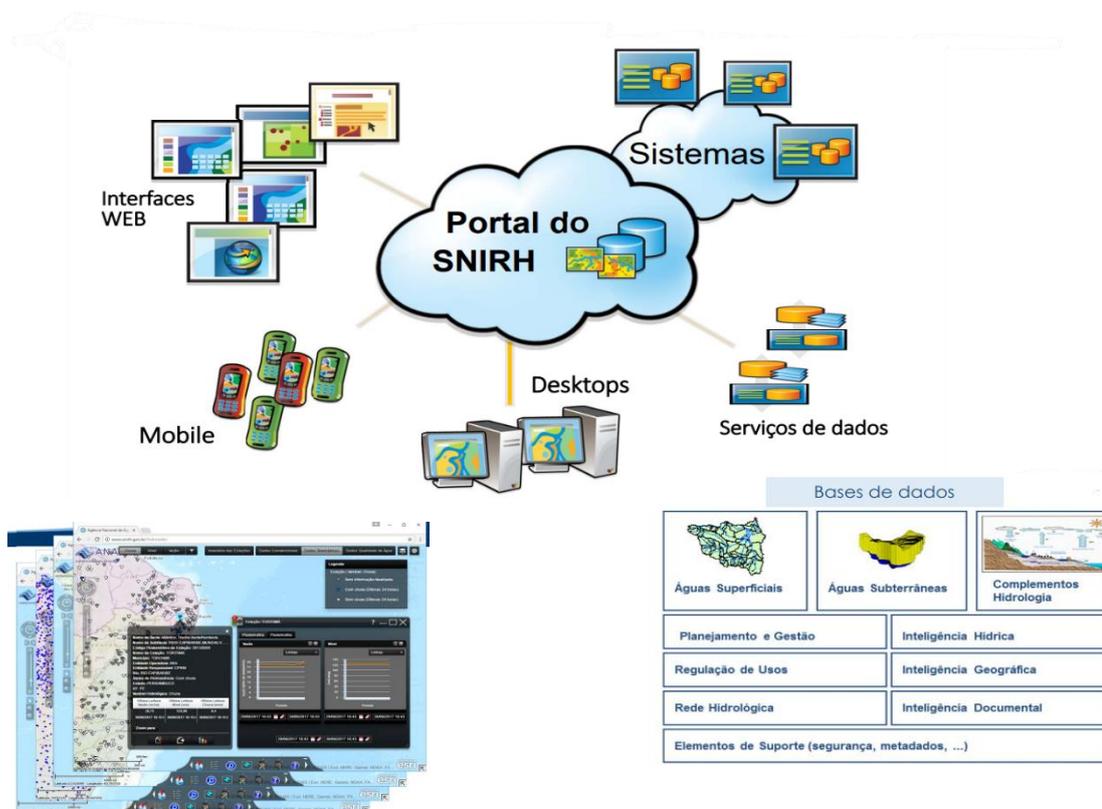
A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. (PORTO; PORTO, 2008). Segundo Barella (2001), a bacia hidrográfica é um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formada nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas das chuvas, ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático.

2.2 MÉTODOS DE OBTENÇÃO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) monitora a meteorologia do país, coletando os dados a partir de estações pluviométricas espalhadas por toda a extensão do país, esses dados são armazenados e dispostas no HidroWeb e no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), que se trata de uma plataforma de Sistema de Informações Geográficas colaborativa para fornecer suporte aos processos de planejamento da gestão de recursos hídricos (Figura 1). Fazem parte do conjunto de dados informações das águas superficiais, subterrâneas e elementos de complemento da hidrologia. Essa coleta de dados pode também ser feita por satélites, praticamente em tempo real, esses dados são alocados no Monitoramento Hidrológico e de Qualidade de Água por Satélite (HidroSat), portal de tratamento e compartilhamento das informações hidrológicas obtidas por satélites.

Os sensores utilizados para avaliar a precipitação podem ser: o Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM 3B43), Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS), WorldClim 30 arco-segundos (WorldClim), Climatologies at High resolution for the Earth's Land Surface Areas (CHELSA) (SOBREIRO; STREHER; SILVA, 2017).

Figura 1– SNIRH: Fluxo de Informações.



Fonte: ANA (2023).

2.3 RELAÇÃO DA VEGETAÇÃO DO BIOMA CAATINGA E OS RECURSOS HÍDRICOS NO SEMIÁRIDO

Segundo Feitosa (2012), a formação vegetal da bacia do rio Pajeú é a Caatinga hiperxerófila, caracterizada por possuir as áreas mais secas do Sertão, acentuada por condições climáticas. O solo em sua maioria é raso e sofre degradação devido ao desmatamento, práticas de pecuária e agricultura irrigada.

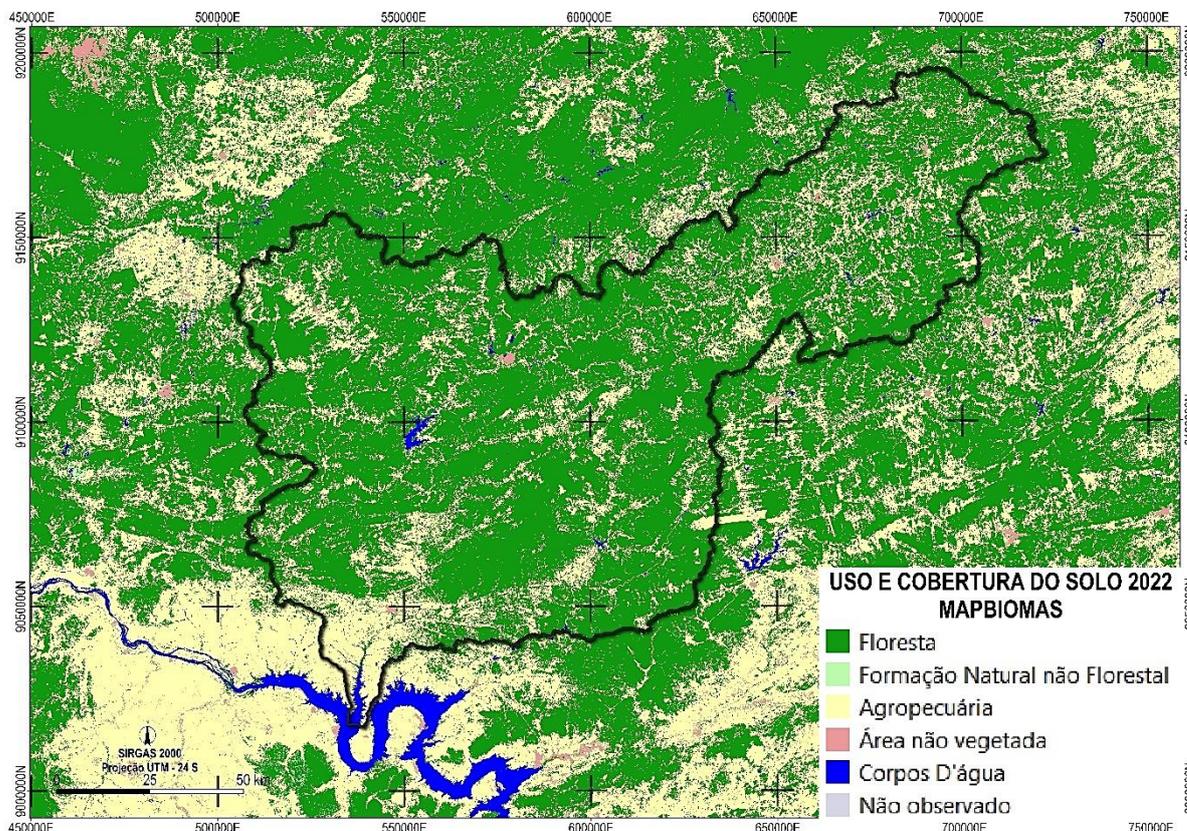
Diante da escassez de recursos hídricos, foram criados diversos reservatórios para abastecimento de água. Alguns exemplos de reservatórios na bacia do Pajeú são: Açude São José, Açude de Brotas, Açude Poço da Cruz, Açude Cachoeira 2, Açude de Ibitiranga e o Açude Manoel Viana.

2.4 MÉTODOS DE MAPEAMENTO DE USO DO SOLO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento Remoto (SR) compreende a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados e equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações (NOVO, 2008).

O MapBiomass é uma plataforma de iniciativa do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima (SEEG/OC) e é produzido por uma rede colaborativa de cocriadores formado por ONGs, universidades e empresas de tecnologia organizados por biomas e temas transversais. A Figura 2 apresenta o mapa de uso e cobertura do solo obtido através do Mapbiomas para o ano de 2022.

Figura 2 - Mapa de cobertura de solo da área de estudo obtido pelo MAPBIOMAS.



Fonte: Mapbiomas (2023).

O intuito do Projeto MapBiomas é produzir mapeamento anual da cobertura e uso da terra e fazer o monitoramento da superfície de água e cicatrizes de fogo mensalmente com dados a partir de 1985. Também validam e elaboram relatórios para cada evento de desmatamento detectado no Brasil desde janeiro de 2019, por meio do MapBiomas Alerta (MAPBIOMAS, 2023).

Além do MapBiomas, o Sensoriamento Remoto possibilita o mapeamento de uso e ocupação do solo por meio dos processos de Classificação Digital de Imagens. Que pode ser oriunda de imagens de Fotografias Aéreas ou Imagens orbitais, possibilitando o observador enquadrar as mais diversas classes de uso e cobertura do solo, por meio do processo de Fotointerpretação dos alvos. Dentre as técnicas utilizadas tem-se a classificação supervisionada e segmentação.

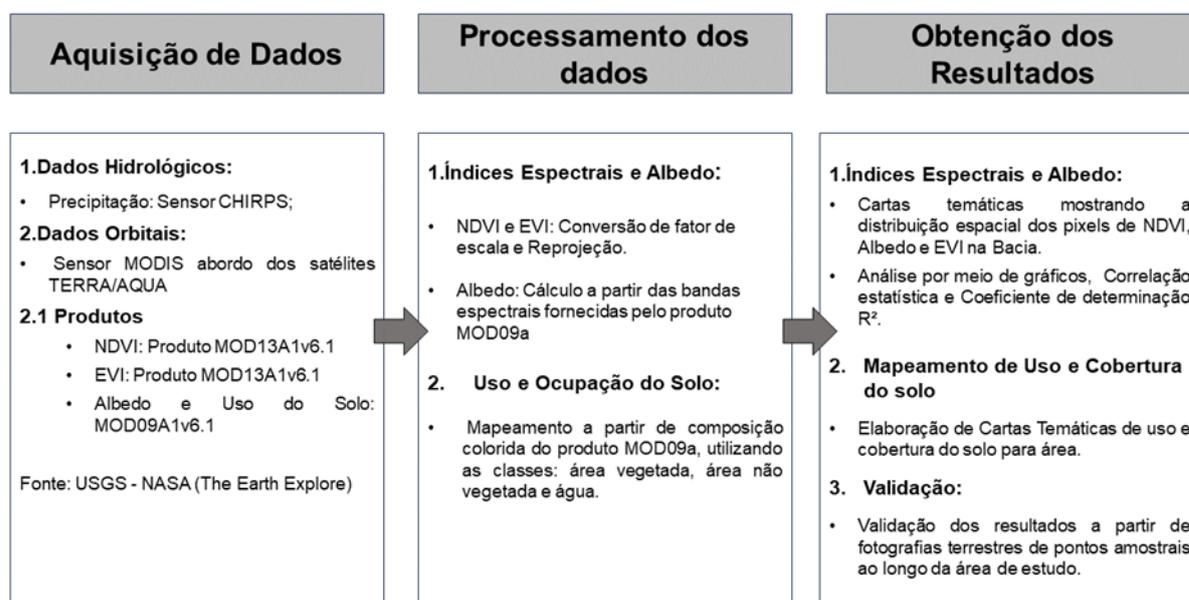
De acordo com a pesquisa de Shiba *et al.* (2005) e Cruz e Oliveira (2021), no contexto da classificação supervisionada, a abordagem envolve a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para extrair informações a partir do

conhecimento prévio do usuário. Nesse processo, são identificados elementos de interesse na imagem que desempenham um papel fundamental no treinamento do algoritmo para a detecção de objetos similares. A segmentação é o processo que permite que uma imagem seja subdividida em partes constituintes ou regiões, a partir de propriedades dos pixels, tais como nível de cinza e textura (HUSSAIN, 1991). O algoritmo de segmentação por crescimento de regiões utilizado neste trabalho permite agrupar pixels ou sub-regiões em grandes regiões (VASCONCELOS; NOVO, 2004).

3 METODOLOGIA

A metodologia esta compreendida em três etapas: aquisição de dados, processamento de dados e resultados. A Figura 3 representa o fluxograma da metodologia.

Figura 3 - Sequência de etapas da metodologia



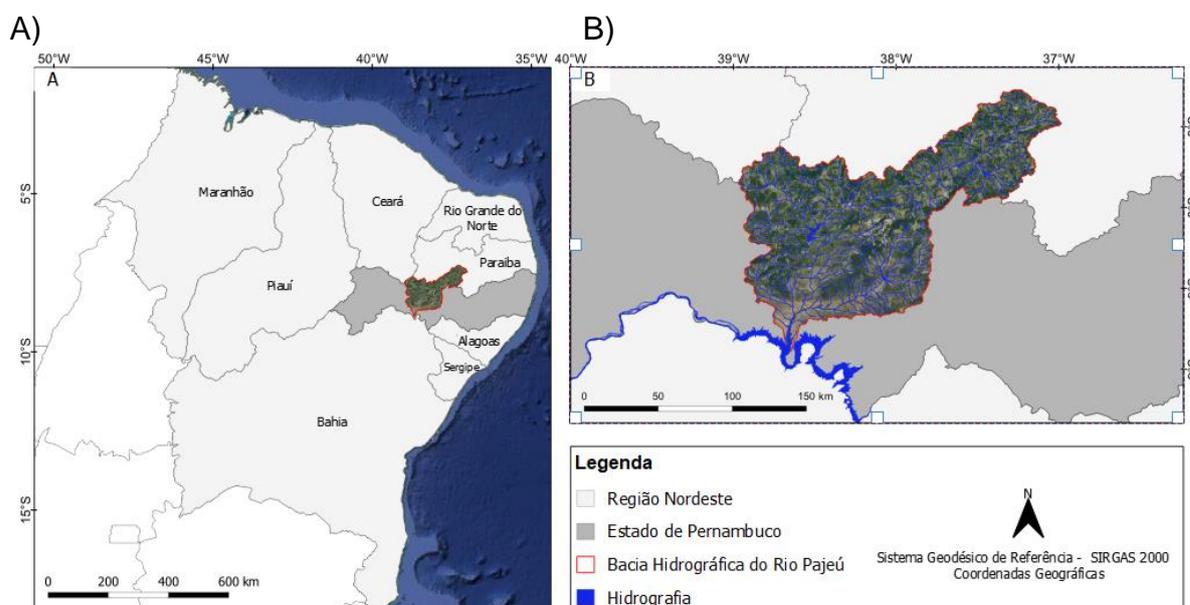
Fonte: Autor (2023)

A metodologia empregada foi realizada em três etapas: na primeira etapa foi realizada a aquisição de dados: em que foi feita a seleção das cenas, considerando fatores como ampla cobertura e ausência de nuvens e disponibilidade dos dados. A segunda etapa trata-se do processamento digital das imagens, onde foram verificadas as consistências da resposta espectral dos índices de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI), derivados do produto MOD13A1 e realizado processamento do Albedo por meio de imagens do produto MOD09A1. Como resultado são elaboradas as cartas temáticas para cada ano investigado, utilizadas para identificar alterações no cenário da Bacia ao longo dos anos. A terceira etapa refere-se à validação dos dados, feita através de uma classificação supervisionada do uso do solo e de fotografias retiradas in situ.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Pajeú (Figura 4), localizada no estado de Pernambuco, no nordeste do Brasil, abrange cerca de 16,97% da área total do estado, equivalente a 16.685,63 km². Esta bacia hidrográfica engloba vinte e sete municípios e estende-se entre as coordenadas geográficas 07° 16' 20" S e 08° 56' 01" S de latitude, e 36°59' 00" W e 38°57' 45" W de longitude (APAC, 2021). A Figura 4A apresenta a área de estudo situada no território brasileiro. Na Figura 4B tem-se uma ampliação da área de estudo inserida no Estado de Pernambuco.

Figura 4 - Área de Estudo: (A) – Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú inserida na Região Nordeste. (B) – Destaque da área de estudo inserida no Estado de Pernambuco.



Fonte: Autor (2023).

De regime fluvial intermitente e percorrendo uma extensão de 347 quilômetros no sentido Nordeste – Sudoeste desde a nascente na serra do Balanço, município de Brejinho, a uma altitude em torno de 800 metros, até o lago de Itaparica no rio São Francisco, o rio Pajeú margeia nove cidades ao longo do seu curso (RIBEIRO, 2016).

A vegetação predominante é a Caatinga, única no Brasil, sendo a maior floresta tropical sazonal seca contínua com vegetação florestal nas Américas (CUNHA et al. 2019). O bioma é constituído por florestas secas, vegetação arbustiva ou savana estépica e vegetação arbórea de pequeno porte, com enclaves de florestas úmidas e

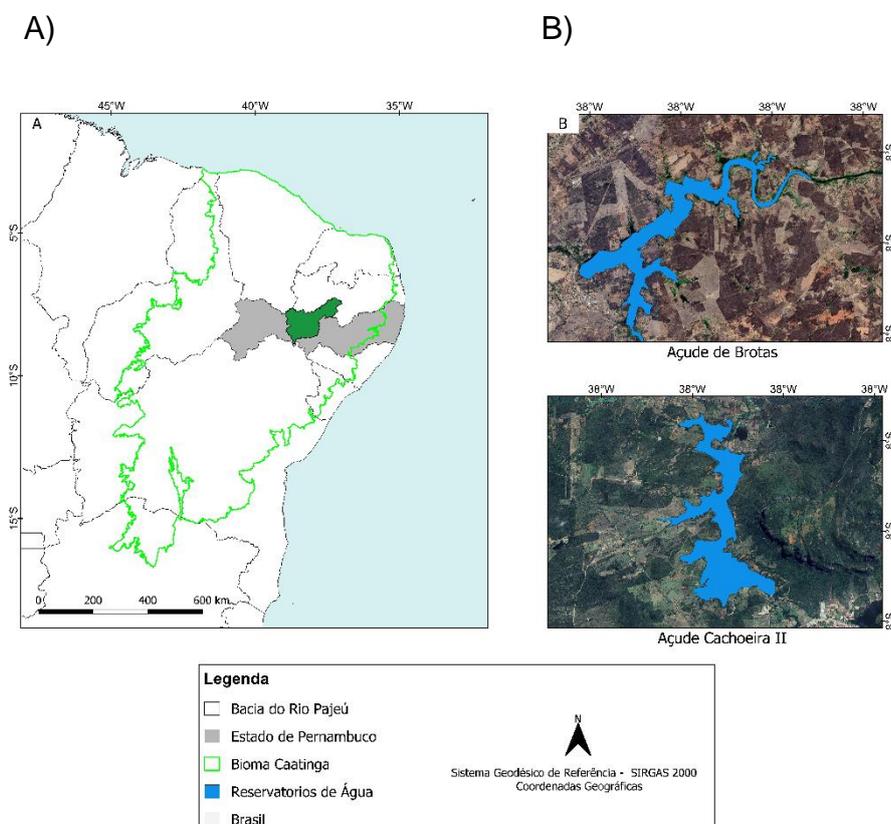
de cerrados, representando um importante centro de biodiversidade da América (HEYWOOD, 1997; RODAL; NASCIMENTO, 2002).

Na bacia do Pajeú, o clima é o semiárido, com uma média mensal de temperatura de 24°C. Além disso, a evapotranspiração potencial na área é superior a 1.200 mm por ano. (RIBEIRO, 2016).

A bacia hidrográfica do rio Pajeú, por ser uma área localizada em uma região semiárida, torna-se mais vulnerável e susceptível aos efeitos das mudanças ambientais e do processo de desertificação, com sérias implicações econômicas e socioambientais (RIBEIRO, 2016).

A figura 5A apresenta a localização do bioma caatinga no Brasil em comparativo com a bacia hidrográfica de estudo. Na figura 5B são representados exemplos de reservatórios da região do Pajeú.

Figura 5 - Representação do bioma e recursos hídricos: (A) –Bioma Caatinga inserido no Brasil. (B) –Reservatórios da Bacia do Rio Pajeú.



Fonte: Autor (2023).

3.2 DADOS ORBITAIS

Neste estudo foram utilizadas séries temporais de dois produtos do sensor MODIS: MOD13A1 e MOD09A1. O sensor MODIS está a bordo dos satélites Terra e Aqua, lançados pela NASA, e observa diariamente quase toda a superfície terrestre, permitindo a geração de imagens livres de cobertura de nuvens por meio da composição de várias imagens obtidas no período de 16 dias (RIZZI, 2004).

Com o produto MOD13A1, foram utilizadas, para análise da série temporal, imagens dos dois índices de vegetação disponibilizados, NDVI e EVI, numa resolução espacial de 500 m com sete bandas espectrais.

O produto MOD09A1, que fornece dados de Reflectância de superfície, foi utilizado para o cálculo do Abedo. Todas as imagens foram adquiridas gratuitamente através do portal eletrônico The Earth Explore da Agência Geológica dos Estados Unidos (USGS). A Tabela 1 apresenta as datas de aquisição dos produtos orbitais do sensor MODIS das imagens utilizadas:

Tabela 1- Datas de aquisição das imagens MODIS (MOD13A1) e MODIS (MOD09A1).

PRODUTO MOD13A1	DATA DE AQUISIÇÃO	PRODUTO MOD09A1	DATA DE AQUISIÇÃO
	23/04/2010		09/05/2010
CHUVOSO	23/04/2014	CHUVOSO	26/06/2014
	23/04/2018		17/05/2018
	23/04/2022		05/08/2022
	01/11/2010		09/11/2010
SECO	01/11/2014	SECO	09/11/2014
	01/11/2018		09/11/2018
	01/11/2022		17/11/2022

Fonte: Autor (2023)

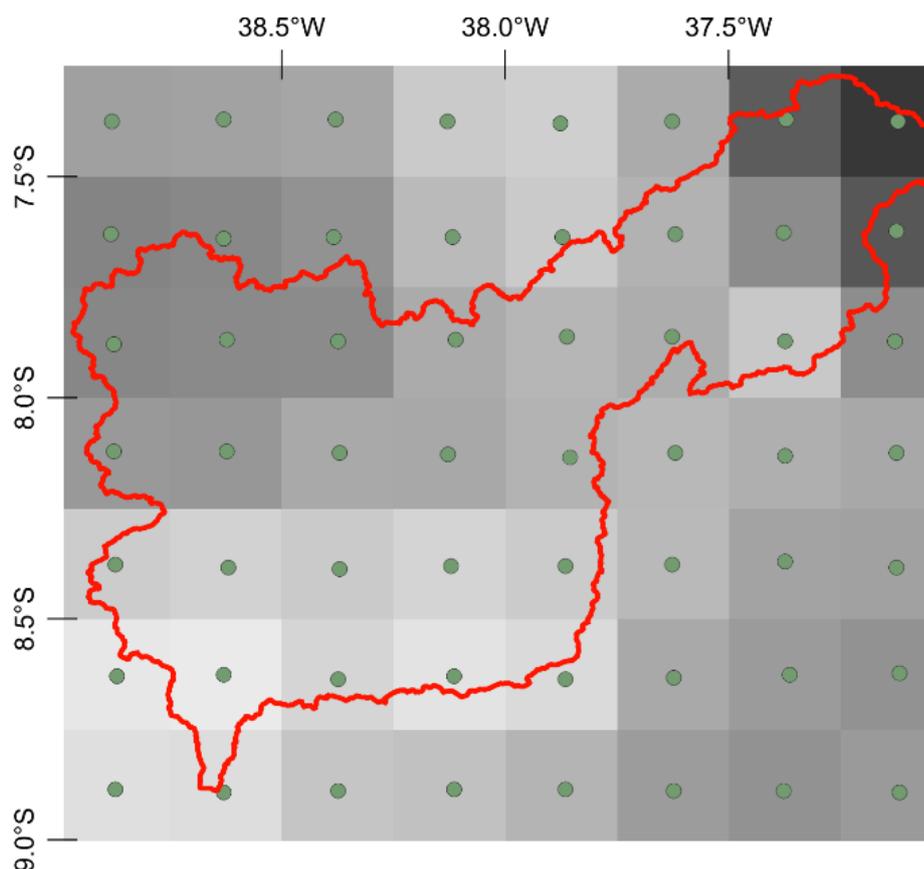
A escolha das imagens foi baseada em datas que abrangessem períodos de baixa (agosto – dezembro) e alta precipitação pluviométrica (janeiro – julho), nesse aspecto as imagens escolhidas corresponderam aos meses de abril (alta precipitação) e novembro (baixa precipitação). Além disso, durante a seleção das imagens foram considerados fatores como ampla cobertura e ausência de nuvens e disponibilidade de compartilhamento dos dados em nuvem.

3.3 DADOS HIDROLÓGICOS

Os dados pluviométricos de média mensal acumulada foram adquiridos gratuitamente através do portal CHRS Data (<https://chrsdata.eng.uci.edu>), a partir de imagens do satélite CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station*).

A extração dos dados das imagens efetivou-se dentro do *software open source* QGIS 3.16, utilizando o plugin *Point Sampling Tool*, que obtém valores de raster em pontos especificados pelo usuário. Foram utilizados 56 pontos, posicionados no centro de cada *pixel* que abrange a região da Bacia (Figura 6).

Figura 6 – Pontos de extração de dados de precipitação CHIRPS.

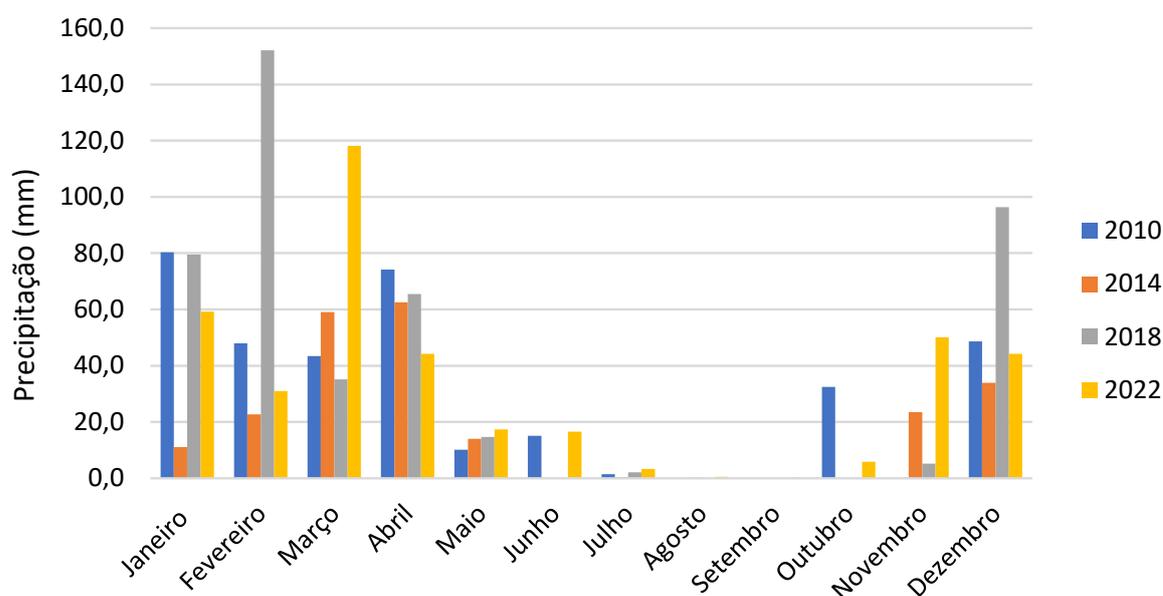


Fonte: Autor (2023)

Escolheu-se essa abordagem para coleta de dados devido à escassez de séries temporais de longo prazo obtidas por métodos mais tradicionais, como a utilização de índices de precipitação com informações provenientes de estações meteorológicas na região de estudo, como mostrado por Sousa *et al.* (2023). Além

disso, seria necessário informações de um número grande de estações para representar significativamente a precipitação da bacia do Pajeú, devido a variabilidade de precipitação em sua área, como mostrado por Salgueiro e Montenegro (2008), onde a região norte da Bacia apresenta índices pluviométricos maiores em relação a região sul próxima ao São Francisco. A Figura 7 apresenta o gráfico com a distribuição das precipitações na região.

Figura 7 - Dados de precipitação do satélite CHIRPS.



Fonte: CHRSdata (2023).

Ao longo da série, a precipitação na bacia seguiu um padrão consistente em concordância com o clima típico da região. No período chuvoso, entre os meses de março e abril de 2010 a 2022, tem-se uma precipitação acima dos 35 mm. Os meses com maiores intensidades pluviométricas média observadas, para cada ano, foram: janeiro de 2010 (80,3 mm), abril de 2014 (62,56 mm), fevereiro de 2018 (152,19 mm) e março de 2022 (118,11 mm). No período seco, os meses de maio a setembro apresentam precipitação abaixo dos 20 mm ao longo de toda a série.

3.4 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E ALBEDO

Os dados do produto MOD13A1 foram inicialmente convertidos ao formato *TIFF*, em seguida as imagens foram georreferenciadas ao Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000. O próximo passo foi aplicar o fator de escala, para

ajustamento dos números digitais de seus *pixels*, multiplicando, através da calculadora raster, os índices por 0,0001, valor esse, recomendado pela NASA. Por fim, foi realizado um recorte nas imagens para a área de estudo.

a) NDVI

O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), proposto por Rouse (1974), possibilita identificar as mudanças sazonais na vegetação, permitindo observar a densidade de área verde ao longo do tempo, bem como a mudanças na saúde dessa vegetação.

O NDVI é calculado como uma razão (diferença normalizada) entre os valores da banda do infravermelho próximo e a do vermelho, como apresentado na Equação 1.

$$NDVI = \frac{\rho_{\lambda_{NIR}} - \rho_{\lambda_{RED}}}{\rho_{\lambda_{NIR}} + \rho_{\lambda_{RED}}} \quad (1)$$

Onde, $\rho_{\lambda_{NIR}}$ representa os valores de reflectância do infravermelho-próximo e $\rho_{\lambda_{RED}}$ os valores de reflectância na região do vermelho. Os valores de NDVI apresentam variação entre -1 e +1, sendo os valores positivos mais próximos de 1 superfícies com maiores quantidades de vegetação, enquanto os negativos representam coberturas de baixa atividade fotossintética ou não vegetadas.

b) EVI

Outro índice de vegetação é o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), proposto por Huete *et al.* (1997), que tem a finalidade aperfeiçoar o sinal da vegetação verde atenuando os efeitos do solo e atmosfera. Variando entre -1 e 1, é determinado pela Equação 2.

$$EVI = G \frac{\rho_{IVP} - \rho_{Ver}}{L + \rho_{IVP} + C_1 \rho_{Ver} - C_2 \rho_{Azul}} \quad (2)$$

Em que: G = fator de ganho (2,5); ρ_{IVP} = reflectância no infravermelho próximo; ρ_{Ver} = reflectância no vermelho; ρ_{Azul} = reflectância no azul; C₁ = coeficiente de

correção dos efeitos atmosféricos para o vermelho (6); C_2 = coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o azul (7,5); L = fator de correção para a interferência do solo igual a 1 (HUETE, 1988; HUETE *et al.*, 2006).

c) ALBEDO DA SUPERFÍCIE

O Albedo de superfície consiste na razão entre o fluxo de energia refletida e o fluxo de energia incidente. Superfícies mais lisas, secas e de tonalidade clara tendem a exibir valores de Albedo mais elevados, enquanto superfícies rugosas, úmidas e de tonalidade escura costumam apresentar valores de Albedo mais baixos. O Albedo pode ser influenciado pelo comprimento de onda, pela refletância local e pela condição de iluminação (LOPES *et al.*, 2007).

A Equação 3 proposta por Tasumi *et al.* (2008) foi utilizada para a determinação do Albedo (α), aplicado na metodologia desta pesquisa.

$$\alpha_{toa} = 0,300\rho_2 + 0,276\rho_3 + 0,233\rho_4 + 0,143\rho_5 + 0,035\rho_6 + 0,012\rho_7 \quad (3)$$

Onde ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 , ρ_5 , ρ_6 e ρ_7 são as refletâncias referentes às faixas espectrais disponíveis do sensor MODIS, correspondente as bandas 2 a 7, cobrindo do visível ao infravermelho médio.

Com os dados do produto MOD09A1, o Albedo foi georreferenciado para as bandas 2 a 7 no sistema SIRGAS 2000 e aplicando a correção de fator de escala. Após estas etapas, o Albedo foi calculado por meio da calculadora raster, para os períodos de baixa e alta precipitação dos anos estudados.

É importante ressaltar que todo o desenvolvimento metodológico que compreendeu o processamento digital das imagens foi realizado dentro do software de livre acesso QGIS 3.16.

3.5 MAPEAMENTO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Como o intuito de fazer uma análise do uso ocupação do solo e verificar possíveis mudanças no cenário da região, foi elaborada uma classificação supervisionada para a área de estudo. Utilizou-se duas imagens empilhadas do

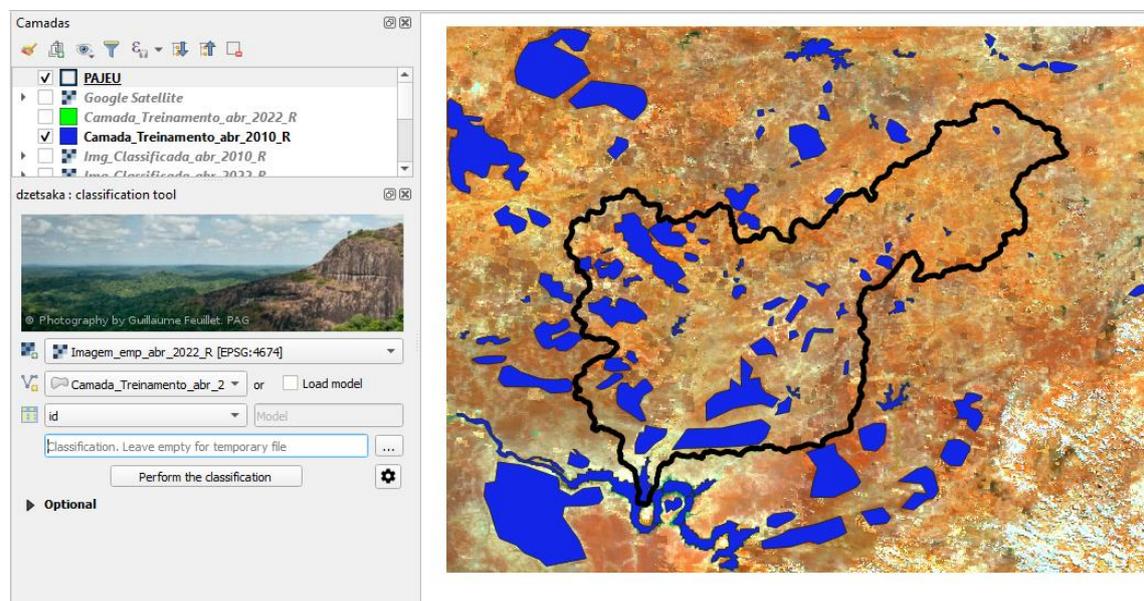
produto MOD09A1 do sensor MODIS, numa composição colorida RGB e a banda do infravermelho de ondas curtas, para o período de maior e menor precipitação pluviométrica nos anos de 2010 e 2022.

A análise quantitativa de dados de imagens de sensoriamento remoto frequentemente faz uso da classificação supervisionada como método utilizado. Lillesand e Kiefer (1994) destacam que essa abordagem envolve a aplicação de algoritmos para atribuir rótulos aos pixels em uma imagem, com o propósito de representar categorias específicas de cobertura terrestre.

Foi utilizado o *software open source* QGIS 3.16.16 para todas as etapas da classificação. Inicialmente foram empilhadas as bandas 2 a 7 de cada cena do produto MOD09A1 para criação de uma composição colorida (RGB). Essas imagens coloridas servem para identificar os alvos terrestres e classificá-los. Pelo fato do sensor MODIS ter uma resolução espacial baixa, impossibilitando identificar classes mais específicas ou com nível de detalhamento necessário maior (área urbana ou solo exposto), foram utilizadas apenas três classes: Água (1), Área vegetada (2) e Área não vegetada (3).

Utilizou-se o plugin *dzetsaka* para o processamento da classificação semiautomática. Os dados de entrada para classificação foram inseridos através de um arquivo vetorizado, em seguida, a partir da visualização das composições coloridas, foram criados polígonos de diversas áreas que representam cada um dos três tipos de classe analisados. Esses polígonos são uma forma de treinar o *software* sobre como identificar quais elementos da imagem devem ser inseridos em determinada classe (Figura 8).

Figura 8 – Classificação supervisionada.



Fonte: Autor (2023)

As amostras foram treinadas por meio de parâmetros foto interpretativos como: Cor, Forma, Textura e Granulação. Esses parâmetros foram necessários ter suas aplicações em conjunto pois a baixa resolução espacial do sensor associada a mistura de *pixels*, em especial no período de baixa precipitação poderia comprometer a integridade dos dados proporcionando o surgimento de falsos positivos, ampliando assim a agregação de erros de omissão e comissão e reduzindo a acurácia do mapeamento. Por fim, as imagens classificadas são geradas e podem ser vetorizada para quantificar quanto de área ocupada cada classe representa.

3.6 VALIDAÇÃO

Um dos aspectos mais notáveis da Caatinga é a queda das folhas na maioria das espécies durante o período de seca, seguida por sua notável regeneração durante a temporada de chuvas, como observado por Guimarães (2009). Essa ocorrência se deve à sensibilidade da vegetação da Caatinga em relação à precipitação (BARBOSA *et al.*, 2019).

Nesse contexto, foi realizada coleta de dados *in situ*, no município de Mirandiba, pertencente à bacia do Pajeú. As imagens foram capturadas em dois momentos distintos: em 24/04/2018, durante um período de elevada precipitação pluviométrica,

e em 14/10/2018, quando a precipitação pluviométrica estava em um nível mais baixo. Essa abordagem permitiu uma melhor compreensão dos resultados obtidos por meio da análise do NDVI, EVI e Albedo.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com o auxílio do plugin *Point sampling tools*, no software QGIS, foram extraídos valores de NDVI, EVI e ALBEDO, nos períodos de alta e baixa precipitação pluviométricas dos anos de 2010, 2014, 2018 e 2020. Foram utilizados cento e cinquenta pontos espalhados por toda área de estudo.

Os resultados derivados da resposta espectral do NDVI, EVI e Albedo foram comparados estatisticamente através de gráficos de barra analisando a média e por meio de gráfico de correlação com coeficiente de determinação R^2 .

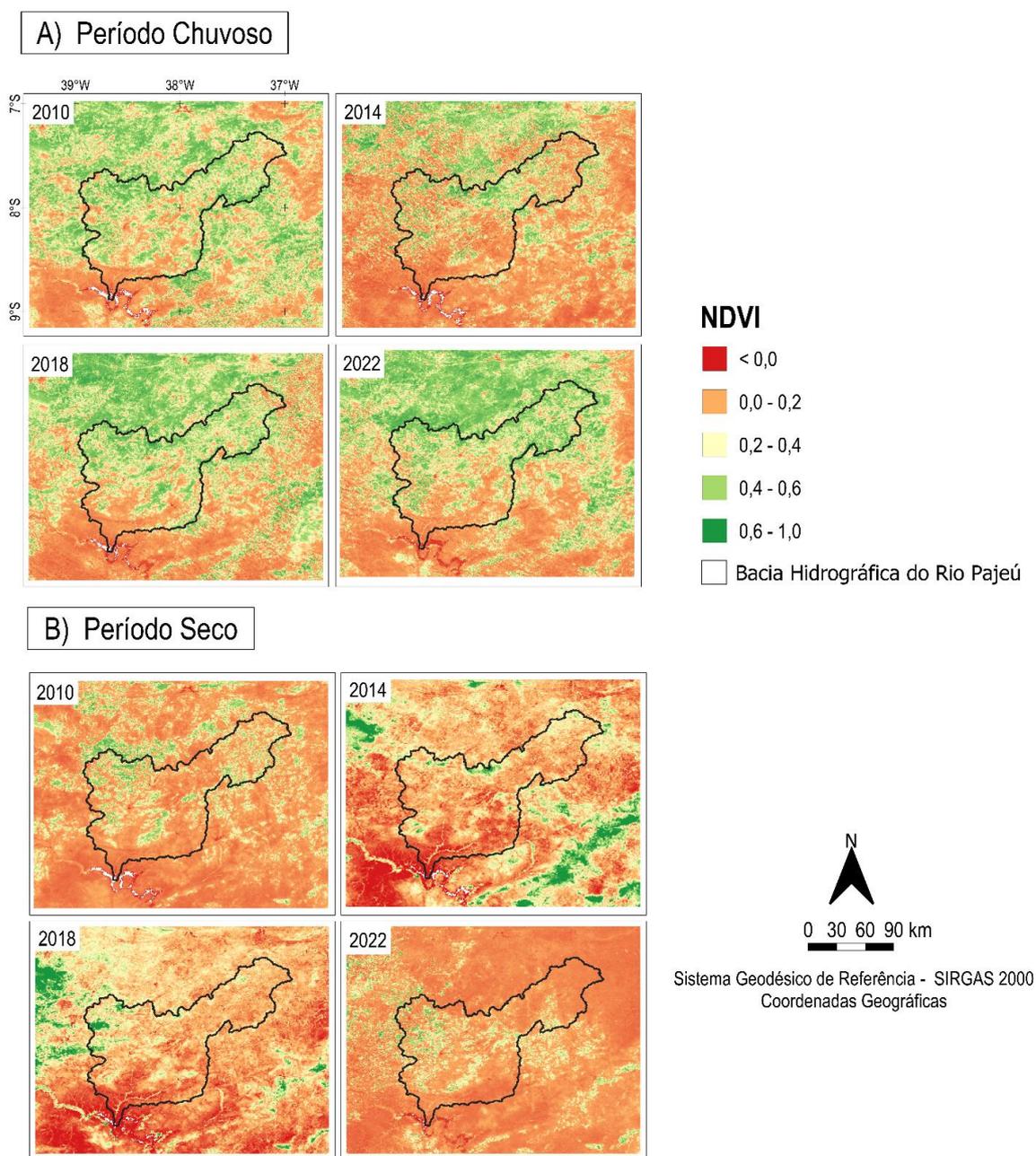
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

4.1 SENSIBILIDADE ESPECTRAL DOS ÍNDICES

4.1.1 Índices de vegetação

Por meio das imagens do MOD13A1 foi possível o mapeamento temporal da série NDVI para os anos de 2010 a 2022. A Figura 9 apresenta as cartas temáticas com a distribuição espacial da série temporal NDVI-MODIS na Bacia do Pajeú.

Figura 9 - Cartas temática da distribuição espacial do NDVI.



Fonte: Autor (2023)

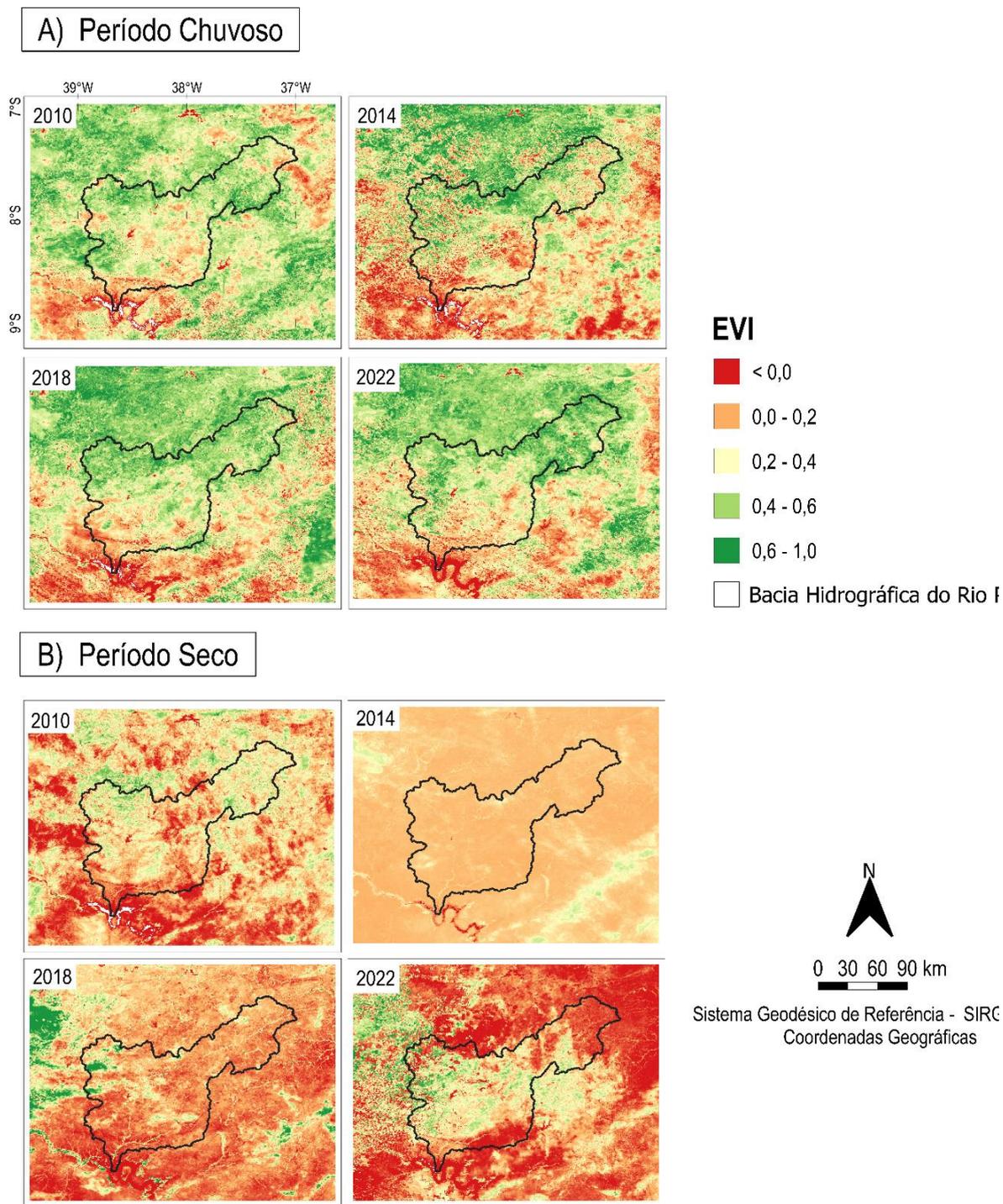
Para o período chuvoso, percebe-se que, em todos os anos, grande parte da bacia apresenta cobertura com valores de NDVI entre 0,4 - 0,6, representando uma área densamente vegetada. Esse aumento de cobertura vegetal possivelmente deve-se ao fato das médias de precipitação terem sido superior a 40 mm no mês de abril de todos os anos de estudo. O ano de 2010 apresentou maior valor médio 0,7 e 2014 o menor 0,5. Estes valores corroboram com a precipitação média mensal acumulada que em abril de 2010 foi de aproximadamente 67 mm. Segundo Guan *et al.* (2015) e Cunha *et al.* (2020), a variação do clima exerce uma influência significativa sobre o NDVI em regiões de florestas que passam por períodos sazonais de seca, o que aumenta sua capacidade de detectar mudanças na cobertura vegetal por meio de análise espectral.

No período de baixa precipitação, as cartas mostram predominância de valores de NDVI abaixo de 0,2, principalmente na parte sul da bacia. Também se verifica regiões com classe muito próxima de 0, representando áreas não vegetadas ou hidrografia (onde pode-se ver nitidamente a presença do Rio São Francisco). O ano de 2018 apresentou menor média de pixels de NDVI para o período de 0,3 e o ano de 2010 a maior (0,53). As precipitações médias na bacia para os meses de novembro foram inferiores a 24 mm, com exceção do ano de 2022 que apresentou precipitação média de 50,05 mm para o mês citado. De acordo com Salgueiro e Montenegro (2008), a variação nos índices de NDVI na parte sul da bacia durante a estação seca pode estar relacionada à precipitação na área, uma vez que os valores anuais são consistentemente inferiores a 500 mm, enquanto na região do Sertão do São Francisco, a média é de apenas 400 mm por ano. Esses resultados estão em consonância com achados anteriores na literatura.

Cunha *et al.* (2020) observaram que o NDVI variou, em média, de 0,13 a 0,73, e o EVI de 0,08 a 0,57 ao longo de uma série temporal de trinta anos. Além disso, Morais *et al.* (2011) encontraram valores de NDVI variando entre 0,208 e 0,803 em áreas de transição de Caatinga, no município de Floresta (PE). Abade *et al.* (2015) também obtiveram valores de NDVI de $0,80 \pm 0,03$ em regiões com vegetação densa. Outros estudos, como o de Barbosa *et al.* (2019), demonstraram uma significativa correlação entre o índice de vegetação e os padrões de chuvas. Chaves *et al.* (2013) enfatizaram que valores de NDVI abaixo de 0,4 durante o período seco são mais indicativos das respostas da vegetação da Caatinga Hiperxerófila.

Com relação ao índice EVI, o mesmo mapeamento para a Bacia do Rio Pajeú, utilizando os dados do MOD13A1, foi feito. A Figura 10 representa a carta temática para este índice.

Figura 10 - Cartas temática da distribuição espacial do EVI.



Fonte – Autor (2023).

Para o período de maiores índices pluviométricos, os valores de EVI apresentaram-se superiores a 0,4 na maior parte da área de estudo. Esses valores se relacionam bem com os dados de precipitação (Figura 7). O ano de 2018 apresentou maior valor médio 0,6 e 2014 o menor 0,3. No período de baixa precipitação pluviométrica, em todos os anos do estudo, a bacia apresenta valores de EVI baixos, inferiores a 0,2 na maior parte da região, com destaque para o ano de 2018 que apresentou valores médios de pixels inferiores a 0,17. Esses valores seguem o mesmo padrão da relação com as precipitações médias na bacia no período chuvoso, pois nos meses de novembro as precipitações foram inferiores a 24 mm.

Em ambos os cenários o EVI apresentou resultados com uma maior sensibilidade aos dados de precipitação que o NDVI, delimitando áreas vegetadas, áreas sem vegetação e corpos hídricos com maior destaque.

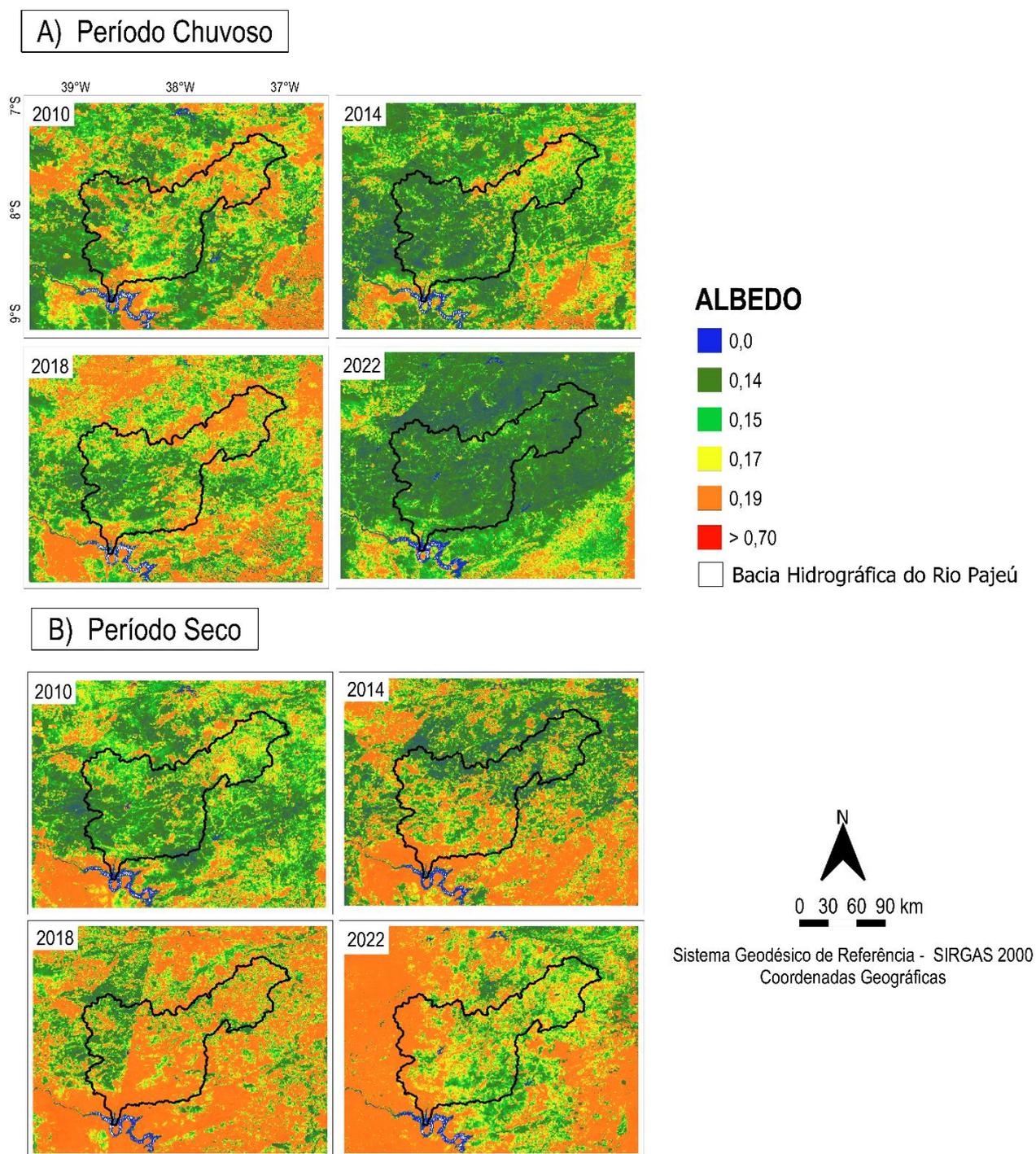
Esses resultados são corroborados por Becerra *et al.* (2007) que investigaram a conexão entre a vegetação e os níveis de precipitação no bioma cerrado no Estado do Tocantins, através da análise de NDVI e EVI, foi constatado um aumento na biomassa foliar durante a estação chuvosa, seguido por uma redução durante o período de estiagem. Além disso, os autores observaram que o EVI apresenta uma correlação mais significativa com o padrão de precipitação em comparação com o NDVI.

Crespo-Mendes *et al.* (2019) destacaram que o EVI demonstra uma maior sensibilidade às mudanças na cobertura do solo. Em consonância, Macintyre, Niekerk e Mucina (2020) salientaram que os índices vegetacionais podem ser influenciados por uma série de fatores, sendo essas variações dependentes das interferências nos dosséis vegetativos durante o período de crescimento. De acordo com Fu-min *et al.* (2007), ao analisar a vegetação através de imagens orbitais, é crucial considerar o impacto da atmosfera. Apesar de a banda azul ser mais suscetível à interferência atmosférica, a reflectância dos alvos na superfície pode ser obtida com precisão mediante o desenvolvimento de modelos específicos de correção atmosférica.

4.1.2 Albedo

Com o processamento das imagens do produto MOD09A1, obteve-se a resposta da vegetação ao Albedo. A Figura 11 apresenta a carta-temática com as distribuições espaciais de *pixels* de Albedo na área de estudo.

Figura 11 - Cartas temática da distribuição espacial do Albedo.



Fonte: Autor (2023).

Ao examinar a carta temática (Figura 11) observa-se que os resultados relativos ao Albedo da superfície durante a estação das chuvas se concentram na faixa de valores entre 0,14 e 0,17. Isso sugere a existência de vegetação com uma capacidade fotossintética saudável e áreas úmidas na região em questão, o que está em concordância com as observações do NDVI para o mesmo período. Esse cenário resulta das elevadas médias de precipitação (vistos na Figura 7) dos três meses anteriores a data das imagens, elevando a presença de vegetação e reposta do Albedo da superfície.

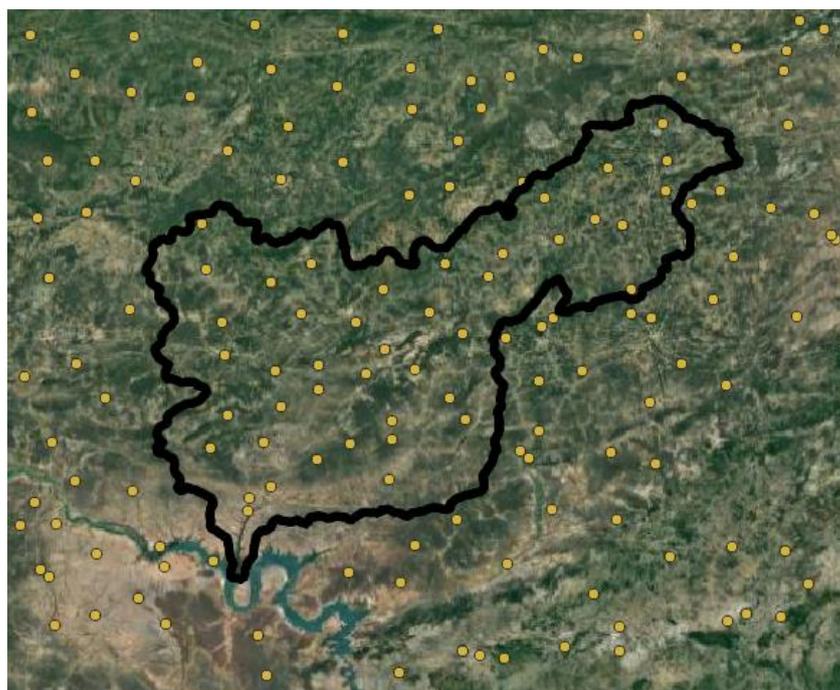
Esses resultados relacionam-se com os encontrados por Silva *et al.* (2005) em seus estudos em bacias hidrográficas no semiárido. Valores de Albedo na faixa de 0,09 a 0,12 sugerem a existência de áreas irrigadas com plantações de frutas, especificamente nas áreas adjacentes a reservatórios, rios e corpos d'água na região em estudo. Por outro lado, valores entre 0,11 e 0,16 indicam a presença de solos úmidos, os quais também são encontrados na mesma área. Para Cunha *et al.* (2020), em períodos de alto incidência pluviométrica, os resultados demonstram valores médios de Albedo da superfície entre 0,12 e 0,21.

Para o período seco, os valores médios do Albedo da superfície se situaram acima de 0,17, principalmente no ano de 2018, onde os baixos valores de precipitação média (5mm em novembro) resultando na formação de áreas com vegetação escassa e aumento da exposição do solo na bacia. Conforme apontado por Robinove *et al.* (1981), o aumento no Albedo pode estar associado ao incremento da presença de solo desprovido de vegetação em regiões desmatadas. Resultados de estudos na região semiárida da Paraíba descritos por Cunha *et al.* (2020) mostram que foram encontrados valores de Albedo na faixa de 0,24 para áreas com pouca vegetação, e valores entre 0,33 e 0,39 para solos expostos.

4.1.3 Análise de distribuição espacial dos índices e albedo

Com o intuito de analisar como os valores de NDVI, EVI e Albedo estão distribuídos espacialmente na área de estudo, foi selecionado um conjunto aleatório de 150 amostras e extraídos os dados para os meses chuvosos e seco de todos os anos de estudo. A Figura 12 apresenta a disposição desses pontos.

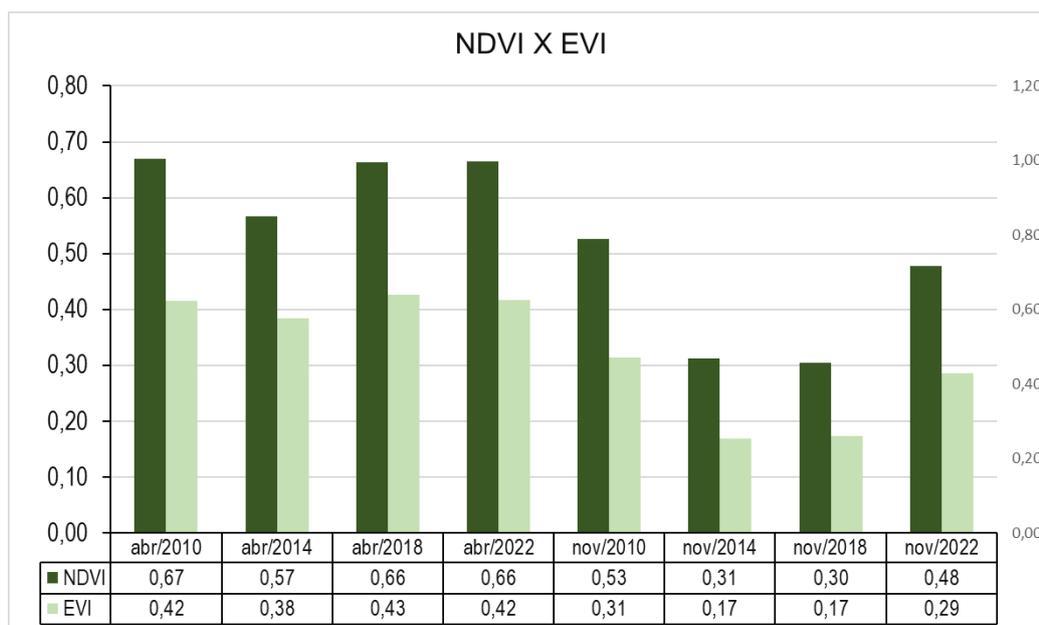
Figura 12 - Pontos de extração de dados dos índices.



Fonte: Autor (2023)

Em seguida, foram criados gráficos de barras para avaliar como as médias dos valores de NDVI, EVI e Albedo variam entre os períodos de diferença pluviométrica. A Figura 13 exibe a evolução comparativa da média do NDVI e EVI.

Figura 13 - Gráficos do tipo barra dos dados NDVI x EVI, nos períodos alta e baixa precipitação pluviométrica



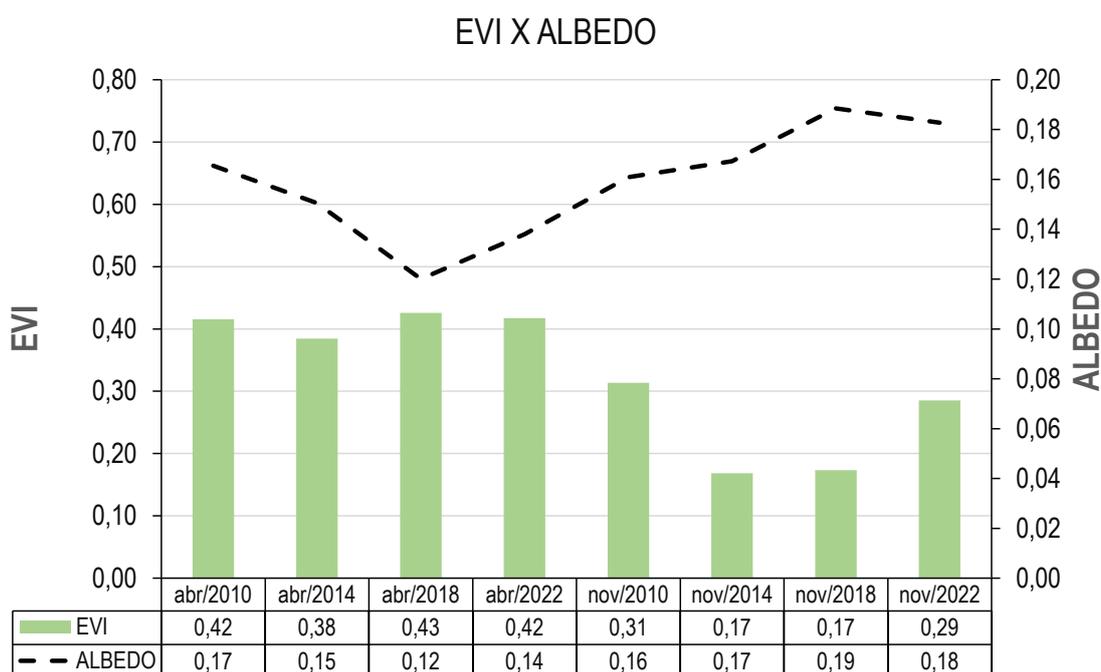
Fonte: Autor (2023)

Para o período chuvoso têm-se valores de média variando em todos os anos entre 0,57 e 0,67 para o NDVI e 0,38 - 0,43 para o EVI, indicando bom estado da vegetação nessa época do ano, com destaque para os anos de 2018 e 2022, onde o conjunto das medias de ambos os índices permaneceram constantes e com valores elevados.

No período de estiagem, as medias caem mantendo-se no intervalo de 0,3-0,53 para NDVI e 0,17-0,31 para o EVI, indicando diminuição na área vegetada e aumento de solo expostos. Destacam-se os anos de 2014 e 2018 que apresentaram as menores medias para ambos os índices.

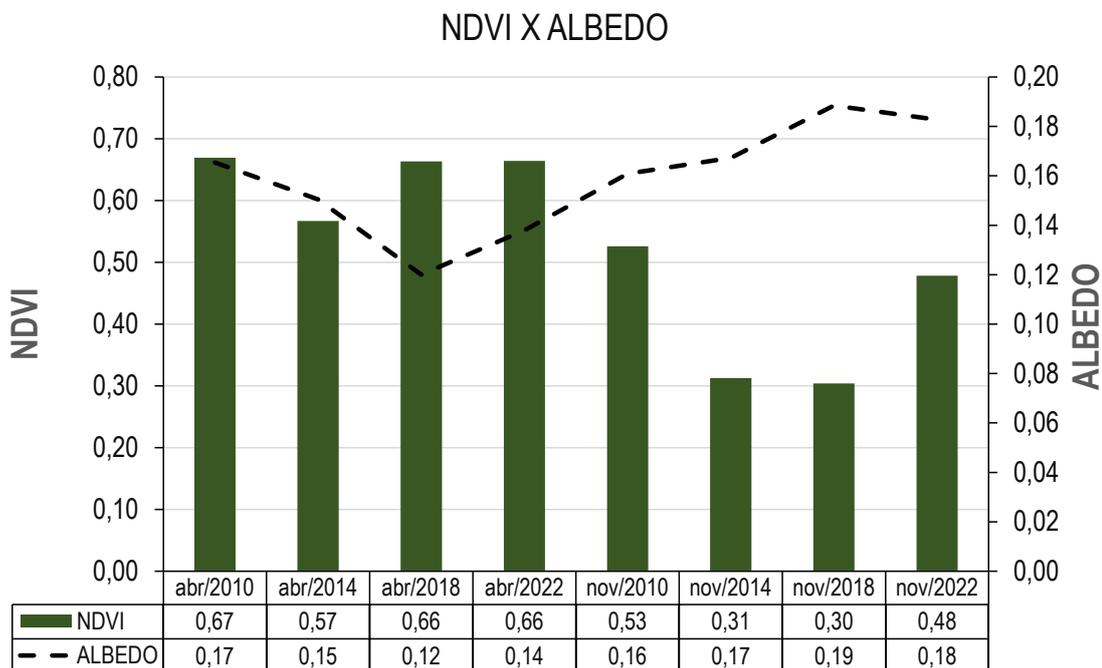
As Figuras 14 e 15 apresentam os gráficos de médias dos índices de vegetação relacionados com a média dos valores de Albedo da superfície para os períodos seco e chuvoso:

Figura 14 - Gráficos do tipo barra dos dados EVI x Albedo, nos períodos alta e baixa precipitação pluviométrica.



Fonte: Autor (2023).

Figura 15 - Gráficos do tipo barra dos dados NDVI x Albedo, nos períodos alta e baixa precipitação pluviométrica



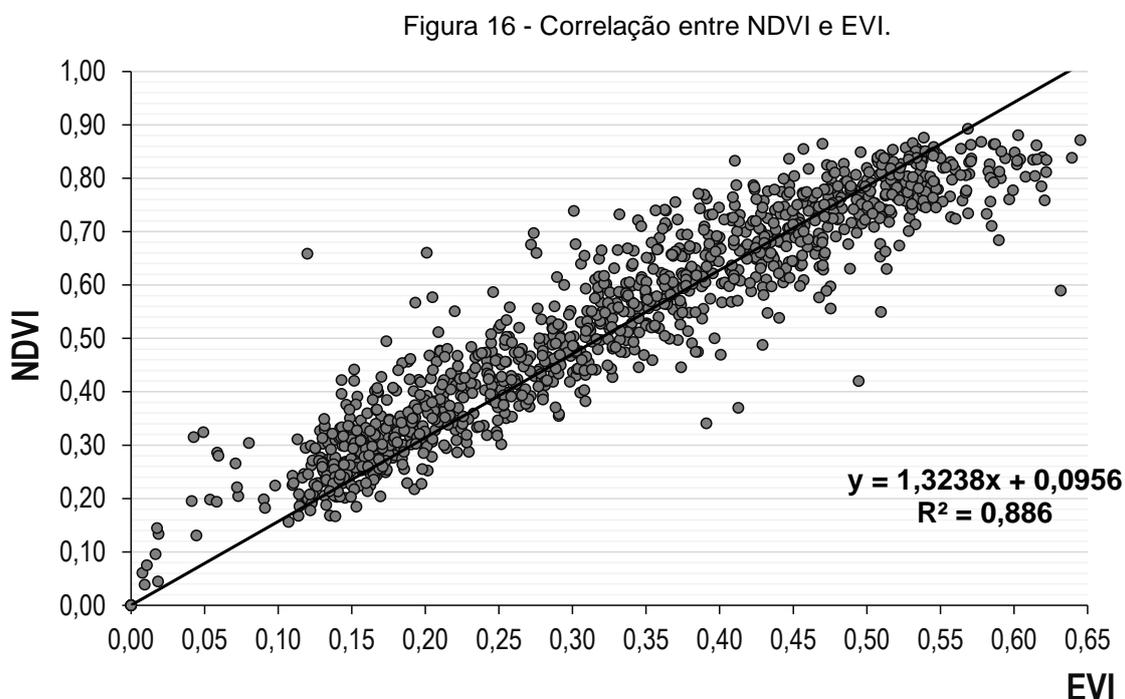
Fonte: Autor (2023).

Comparando os gráficos (Figuras 14 e 15) é perceptível uma relação inversamente proporcional entre o Albedo da superfície e os índices de vegetação, que concomitantemente relaciona-se da mesma forma com os volumes de precipitação. Essa relação é corroborada por Ideão (2009), relatando que a diminuição da cobertura vegetal pode resultar em um aumento do Albedo da superfície em circunstâncias específicas. Portanto, um aumento no Albedo da superfície indica a diminuição da precipitação na área local e/ou processos de possível degradação ambiental, bem como um aumento na utilização e ocupação do solo na região.

Nesse contexto, durante o período de estiagem, os valores mais elevados de Albedo da superfície estão associados a volumes médios de chuva mais baixos em toda a série de dados, como observado no ano de 2018, que apresentou uma precipitação média de apenas 5 mm. Em contrapartida, nesses momentos, observam-se os valores mais baixos dos índices de vegetação.

Com a finalidade de compreender o relacionamento entre os índices NDVI e EVI, foi gerada uma análise de correlação, permitindo a comparação entre os dois índices através do coeficiente de determinação (R^2), para o conjunto de dados dos

anos em análise. A Figura 16 apresenta a representação gráfica do perfil de variação do R² para o NDVI e EVI nos períodos chuvoso e seco:



Fonte: Autor (2023).

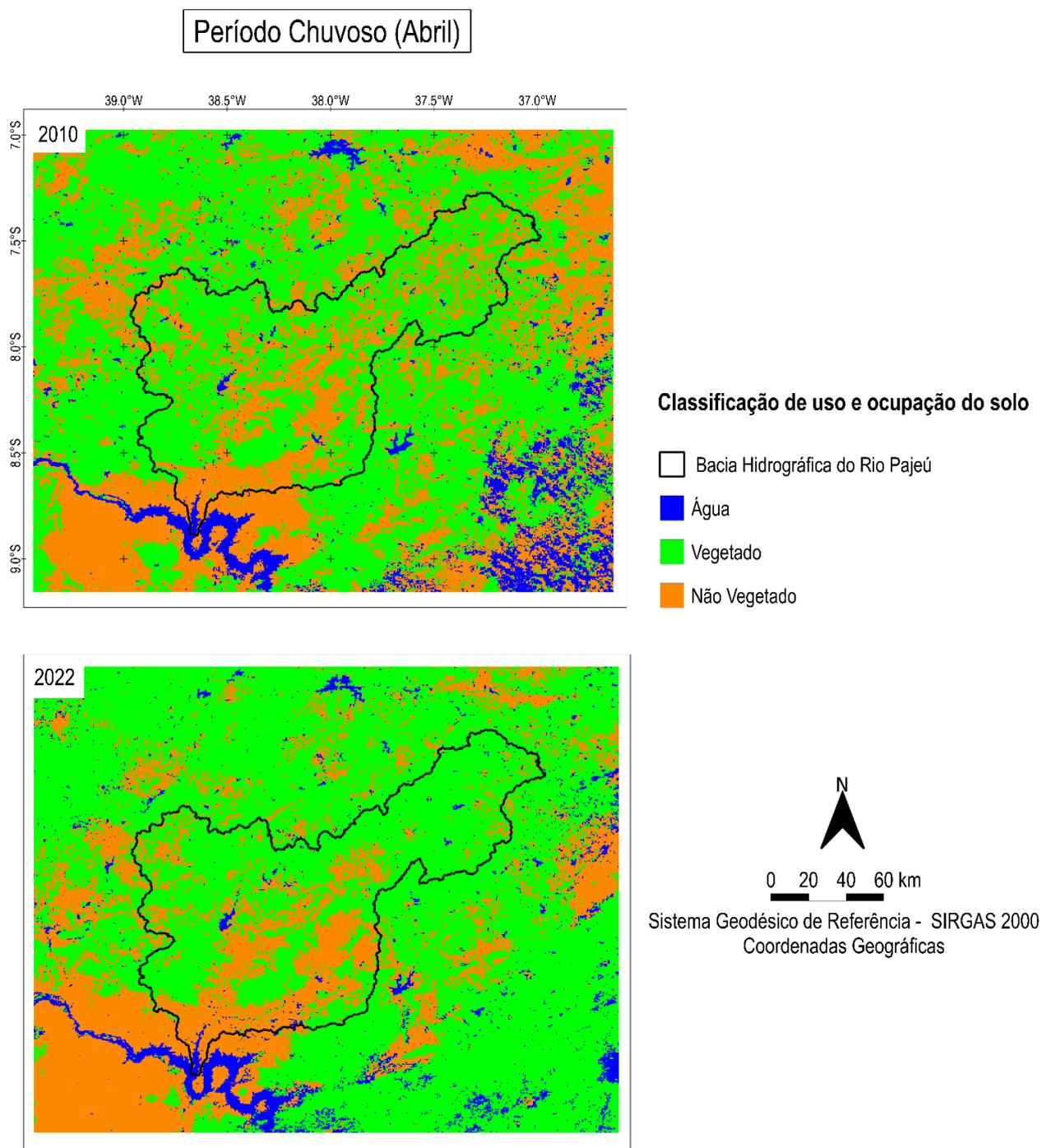
O NDVI e EVI apresentaram boa correlação, com $R^2 = 0,886$ onde estatisticamente este resultado indica um comportamento de proporcionalidade direta entre os índices de vegetação. Chaves *et al.* (2013) observaram correlações significativas entre o EVI e NDVI. Esses resultados podem estar associados ao fato de o EVI ter sido concebido para ter uma amplitude dinâmica maior, o que permite superar a limitação conhecida do NDVI, que tende a saturar em níveis elevados de biomassa, como, por exemplo, acima de 0,8 (WARDLOW; EGBERT, 2010).

4.2 VALIDAÇÃO CARTOGRÁFICA

4.2.1 Classificação de uso e ocupação do solo

As Figuras 17 e 18 representam as cartas temáticas das classificações supervisionadas da área de estudo nos períodos e alta e baixa precipitação pluviométrica para os anos de 2010 e 2022.

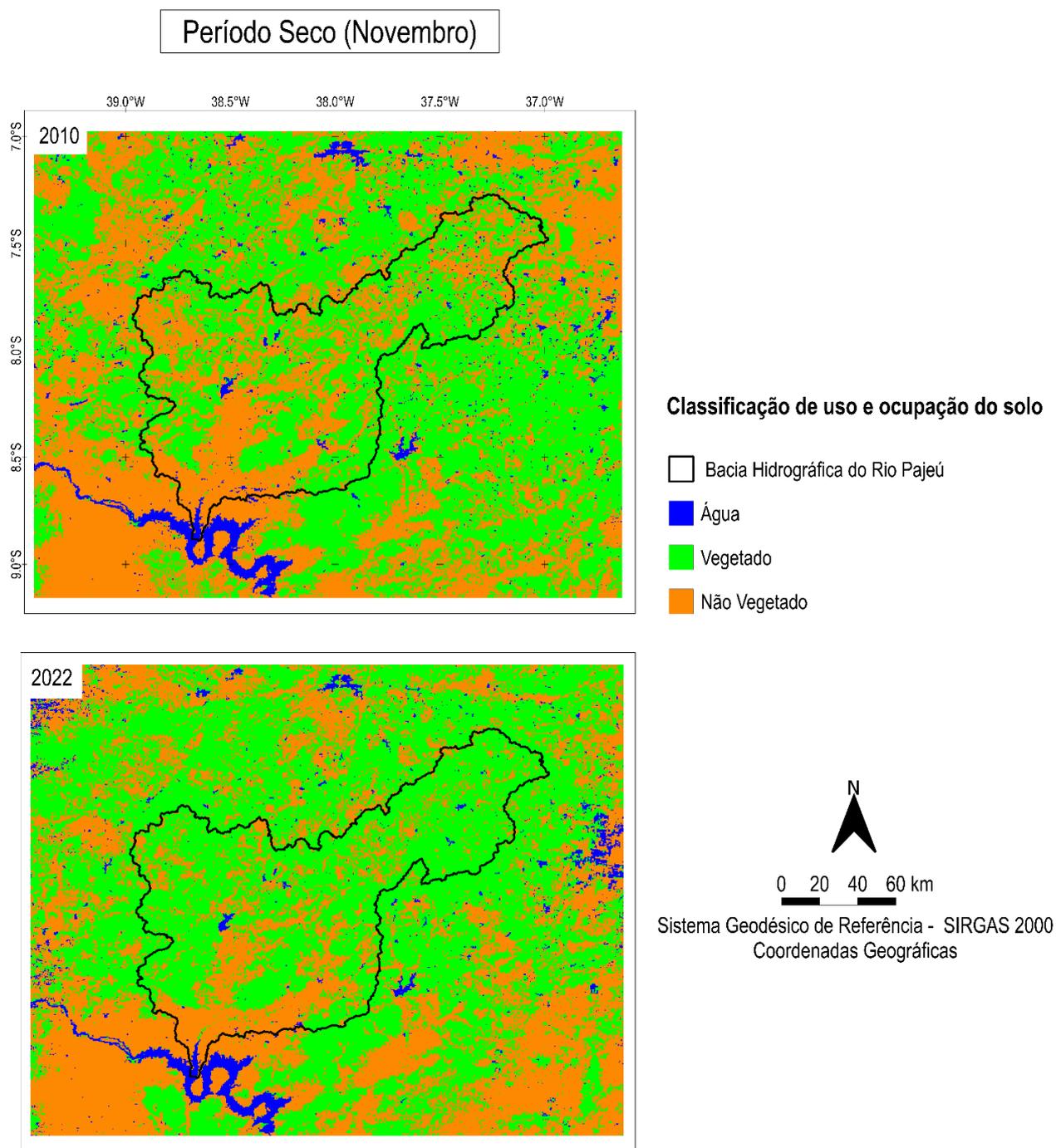
Figura 17 – Classificação supervisionada para o período chuvoso.



Fonte: Autor (2023)

As imagens da classificação do uso e ocupação do solo do período chuvoso apresentam uma grande área vegetada e diversos pontos corpos hídricos, podendo ser observados, como exemplos, o reservatório de serrinha na região central da bacia e o rio são Francisco mais ao sul.

Figura 18 – Classificação supervisionada para o período seco.



Fonte: Autor (2023)

Os resultados da classificação corroboram com os dados de reposta espectral dos índices de vegetação, NDVI e EVI com valores superiores a 0,6 e Albedo do mesmo período. Além disso, as medias de precipitação acima de 44 mm do mês de abril, de ambos os anos, reforçam os resultados da classificação.

No canto inferior direito da classificação de 2010, houve a ocorrência de um dado atípico na classificação. Provavelmente, devido à baixa resolução espacial do sensor, o algoritmo classificador, atribuiu valores de *pixels* de água, a pixels que se tratava de um conjunto de nuvens presente na imagem, proporcionando uma mistura espectral de *pixels*.

Para o período seco, como esperado, a imagem classificada apresenta informações distintas em relação ao período chuvoso. É notório o aumento de área de solo exposto enquadrado na classe “não vegetado”, somado com a diminuição dos pontos representantes de água, formados no período de alta precipitação por cursos hídricos intermitentes. Novamente, esses resultados estão de acordo com os valores do IV's, Albedo e médias de precipitação do período seco dos dois anos.

Após o processo de classificação das imagens, a vetorização proporcionou a extração os dados de área de cada uma das classes da área. A Tabela 2 apresenta esses dados dos dois anos analisados:

Tabela 2 – Áreas computadas na classificação supervisionada.

Classe	Área (km ²)			
	abr/2010	abr/2022	nov/2010	nov/2022
Água	4.563,68	3.346,06	2.143,99	2.230,37
Vegetado	42.628,97	51.513,32	37.071,70	40.988,93
Não Vegetado	27.428,48	19.761,74	35.405,43	31.401,82

Fonte: Autor (2023).

É possível perceber o mesmo padrão com valores maiores de área vegetada e corpos d'água para o período chuvoso em ambos os anos. A superfície vegetal no mês de abril de 2022 representou cerca de 70% da área total da imagem analisada.

Em contrapartida, o período seco demonstra uma redução na área de vegetação e áreas com água, e apresenta valores maiores para áreas de solo exposto ou que apresentam pouca vegetação. Houve uma perda de 7% de área vegetada entre abril e novembro de 2010 e 15% entre abril e novembro de 2022. Entre novembro de 2010 e novembro de 2022 esse valor representou 5% da área total. Com relação as áreas não vegetadas houve um aumento de 10% entre abril e novembro de 2010 e um aumento de 16% em 2022 para o mesmo período. Porém entre novembro de 2010

e 2022 houve uma redução de 5%, devido a maior frequência de precipitação em 2022, nesse período.

Com relação a classe água houve uma redução de 3% entre abril e novembro de 2010, bem como em 2022 em toda a bacia. Porém ao considerar apenas a classe, percebe-se uma redução próxima a 50% do valor total desta classe entre abril e novembro para ambos os anos.

4.2.2 Validação in situ

As Figuras 19 e 20 apresenta as imagens obtidas na região do estudo demonstrando a variação na vegetação da Caatinga entre os períodos de chuva (abril de 2022) e seca (novembro de 2022).

Figura 19 – Registro da vegetal local no período de baixa precipitação.



Fonte: Autor (2023).

Figura 20 – Registro da vegetal local no período de maior precipitação.



Fonte: Autor (2023).

Observando as duas imagens, pode-se notar que durante o período de baixa precipitação pluviométrica na Caatinga, ocorre a perda de folhagem da vegetação e ocorrências de áreas com solo exposto. Em contraste, durante o período chuvoso, a vegetação exibe um notável potencial de clorofila, o que se traduz em um aumento na coloração verde e um crescimento exuberante da folhagem. As imagens capturadas no local de estudo validam as respostas espectrais apresentadas pelos índices de vegetação (Figura 9 e Figura 10) e pelo Albedo da superfície (Figura 11), em que, houve um crescimento vegetal de NDVI e EVI entre 0,6 e 1,0 com o aumento de chuvas na área e presença de solo exposto e pouca vegetação para o período de baixa precipitação.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo foi analisado a variação da cobertura vegetal na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú, na região semiárida de Pernambuco - Brasil, por meio de séries temporais de NDVI, EVI e Albedo derivadas do sensor MODIS, para os anos de 2010, 2014, 2018 e 2020, nos períodos de alta e baixa incidência pluviométrica, com auxílio de dados pluviométricos do satélite CHIRPS. Os dados foram analisados examinando a distribuição dos pixels de NDVI, EVI e Albedo da superfície por meio de cartas temáticas e representações gráficas estatísticas.

Os produtos obtidos a partir das imagens MODIS (NDVI, EVI e Albedo da superfície) provaram ser instrumentos eficazes na análise de mudanças ao longo do tempo na cobertura vegetal nativa na Bacia do Rio Pajeú. Esses produtos refletiram de maneira apropriada as interações entre o clima e o bioma, bem como possibilitaram a detecção de anomalias.

Durante o período com alta precipitação pluviométrica, foi possível identificar áreas com vegetação densa, exibindo variação média de *pixels* de 0,6 para NDVI e acima de 0,4 para EVI. Por outro lado, durante o período de baixa precipitação, observou-se uma redução desses valores, com os pixels apresentando valores inferiores a 0,2, característicos de áreas com pouca cobertura vegetal e solo exposto, sem apresentar variações significativas. Quanto ao Albedo, durante a estação seca, foram registrados valores superiores a 0,16, indicando possíveis mudanças na vegetação natural da Caatinga para áreas de Caatinga degradada, provavelmente resultado do avanço da agricultura na região, se relacionando muito bem com os resultados dos índices de vegetação.

Neste cenário, a precipitação foi identificada como um importante fator que influencia a variação nos índices de vegetação, mantendo uma relação diretamente proporcional com os valores de NDVI e EVI. A diminuição na quantidade de chuvas resultou na presença de áreas de solo em exposição, reduzindo as áreas cobertas por vegetação. Essas observações foram confirmadas pelos registros fotográficos realizados no local, onde se nota uma diminuição na densidade de folhagem em novembro de 2018 e um aumento na atividade fotossintética em abril de 2018, quando a precipitação média mensal atingiu 65,5 mm.

Os resultados indicam que, apesar das atividades humanas, como o avanço da agricultura no semiárido, que podem alterar os padrões climáticos devido à perda de vegetação, a reação da vegetação à precipitação desempenha um papel importante na análise do uso e cobertura do solo nessas regiões.

Índices como NDVI, EVI e Albedo da superfície, obtidos por meio de sensores como o MODIS, permitem identificar essas mudanças de forma confiável e gratuita ao longo do tempo, uma vez que a coleta de dados em campo apresenta desafios significativos em grandes áreas, como a bacia do Rio Pajeú, e frequentemente requer investimentos substanciais de tempo e recursos financeiros.

REFERÊNCIAS

- APAC - AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **Bacia hidrográficas**. Disponível em <https://www.apac.pe.gov.br/169-bacias-hidrograficas-rio-pajeu/202-bacia-do-rio-pajeu>: Acesso em: 16 ago. 2023.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/informacoeshidrologicas/redehidro.aspx>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V.; PAREDES, F.; ELLIOTT, S.; AYUGA, J. G. Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008– 2016). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 148, n. January, p. 235–252, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.014>
- BARELLA, W.; PETRERE JR, M.; SMITH, W. S.; MONTAG, L.F.A. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes: In: RODRIGUES, R. R.; FILHO, H. F. L. (Org.). **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2001, p. 187–208.
- BECERRA, J. A. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ALVALÁ, R. C. S. Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região do cerrado usando índices espectrais de vegetação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3747-3754.
- CHAVES, I. DE B.; FRANCISCO, P. R. M.; LIMA, E. R. V. DE; SILVA, B. B. DA; BRANDAO, Z. N.; CHAVES, L. H. G. Índices espectrais, diagnóstico da vegetação e da degradação da Caatinga da Bacia do Rio Taperoá-PB. Embrapa Algodão. **Relatório Técnico**. 2013. Disponível em < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/977328/indices-espectrais-diagnostico-davegetacao-e-da-degradacao-da-caatinga-da-bacia-do-rio-taperoa-pb> >. Acesso em: 08 setembro 2023.
- CRESPO-MENDES, N.; LAURENT, A.; HENRIKBRUUNB, H.; HAUSCHILDA, Z. M. Relationships between plant species richness and soil pH at the level of biome and ecoregion in Brazil. **Ecological Indicators**, [s.l.], v. 98, n.0, p. 266–275, Mar 2019. DOI. 10.1016/j.ecolind.2018.11.004
- CRUZ, R. X. U.; OLIVEIRA, P. L. Comparativo entre os métodos de classificação MaxVer e Random Forest utilizando imagem Sentinel-2B. *Cadernos Do Leste*, 21(21), 2021. <https://doi.org/10.29327/248949.21.21-2>

CUNHA, J.; NÓBREGA, R. L.B.; RUFINO, I.; ERASMI, S.; GALVÃO, C.; VALENTE, F. Surface Albedo as a proxy for land-cover clearing in seasonally dry forests: evidence from the Brazilian caatinga. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 238, p. 111250-111350, mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.111250>.

FEITOSA, A. **Zoneamento de pequenas bacias hidrográficas e caracterização de várzeas na Bacia do Pajeú, Pernambuco**. Recife, 2012. 139 f. Tese (doutorado) - UFPE, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-graduação em Geografia. Recife, 2012.

GUAN, K.; PAN, M.; LI, H.; WOLF, A.; WU, J.; MEDVIGY, D.; CAYLOR, K. K.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F.; MALHI, Y. Photosynthetic seasonality of global tropical forests constrained by hydroclimate. **Nature Geoscience**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 284-289, 2015. <https://doi.org/10.1038/ngeo2382>

GUIMARÃES, A. P. Dinâmica da resposta espectral da vegetação de caatinga na bacia hidrográfica do açude Soledade, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. **Dissertação** (Mestrado).- Areia: Universidade Federal da Paraíba. 2009.

HEYWOOD, V. H. **Centers of plant diversity**. WWF/IUCN, London. 1997

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing Environment**, [s.l.], v.25, n.3, p.295- 309, Aug 1988. DOI. 10.1016/0034-4257(88)90106-X.

HUETE, A. R.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indexes over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.

HUETE, A. R.; KAMEL, D.; SHIMABUKURO, Y. E.; RATANA, P.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L. R.; YANG, W.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, [s.l.], v. 33, N. 6405, p.1-4, Mar 2006. DOI. 10.1029/2005GL025583.

HUSSAIN, Z. 1991. Digital Image Processing: practical applications of parallel processing techniques. Ellis Horwood. 406p.

LELI, I.; MARTINS, R.; BENNERT, A.; ALMEIDA, E.; ALMEIDA, R. A THE HYDROGRAPHIC BASIN AS A GEOMORPHOLOGICAL STUDY UNIT FOR THE BASIC EDUCATION OF GEOGRAPHY. **Geographia Meridionalis**. 03. 403-419. 10.15210/gm.v3i3.12437, 2017.

LEONARDO, H. R. A. L.; MAIA, F. M. A.; PAIVA, A. L. R.; OLIVEIRA, L. M. M.; SANTOS, S. M. **Análise da Variabilidade Vegetativa na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú**. XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste 15º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, 2022.

LOPES, P. M. O.; VALERIANO, D. M. Validação do Albedo da superfície terrestre obtido dos dados do sensor MODIS em regiões montanhosas. In: **Anais do XIII**

Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis, Brasil, 21-26Abril 2007, INPE, p 2805-2812.

MAPBIOMAS. **O projeto.** Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/quem-somos/>. Acesso em: 08 set. 2023.

MACINTYRE, P.; NIEKERK, V. A.; MUCINA, L; Efficacy of multi-season Sentinel-2 imagery for compositional vegetation classification. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**,Gangtok, V. 85, n.1, p. 0303-2434,Marc2020.DOI.10.1016/j.jag.2019.101980.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** São Paulo, 2008, 363p.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142008000200004>.

RIBEIRO, E. P. **Mudanças ambientais e desertificação na bacia hidrográfica do rio Pajeú.** 2016. 180 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja:** estudo de caso no Rio Grande do Sul. 2004. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/jeferson/2004/07.02.14.17>>. Acesso em: 15 ago. 2023.

ROBINOVE, C. J.; CHAVEZ, P. S.; GEHRING, D.; HOLMGREN, R.**Arid Land Monitoring Using Landsat Albedo Difference Images. Remote Sensing of Environment.** v. 11, p. 133-156. 1981.

RODAL, M. J. N.; NASCIMENTO, L. M. Levantamento florístico da floresta serrana da reserva biológica de Serra Negra, microrregião de Itaparica, Pernambuco, Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, 16: 481-500. 2002.

ROUSE, J.W, HAAS, R.H., SCHEEL, J.A., AND DEERING, D.W. 'Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS.'**Anais...** In: Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, vol. 1, p. 48-62, 1974.

SALGUEIRO, J, H, P, B; MONTENEGRO, S, M, G, L. Análise da distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Pajeú em Pernambuco segundo método geoestatístico, **Rev. Technol. Fortaleza**, v. 29, n. 2, p.1

SHIBA, M. H.; SANTOS, R. L.; QUINTANILHA, J. A.; KIM, H. Y. **Classificação de imagens de sensoriamento remoto pela aprendizagem por árvore de decisão: uma avaliação de desempenho.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. Anais...São José dos Campos:

INPE, 2005, p. 4319–4326. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.23.11.44/doc/4319.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2023

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P.V. Determinação do Albedo de áreas irrigadas com base em imagens, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 11-21, 2005.

SOBREIRO, J. F. F.; STREHER, A. S.; SILVA, T. S. F. Análise comparativa de produtos geoespaciais para monitoramento de precipitação em uma região montanhosa tropical. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, [S.L.], p. 2487-2491, 2017. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP. <http://dx.doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2406>.

SOUSA, L. B.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, M. V.; ALMEIDA, T. A. B.; CARVALHO, A. A.; SILVA, T. G. F.; LIMA, J. L. M. P. Spatiotemporal Analysis of Rainfall and Droughts in a Semiarid Basin of Brazil: land use and land cover dynamics. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 15, n. 10, p. 2550, 12 maio 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs15102550>

VASCONCELOS, H. C.; NOVO, M. L. M. E.. Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens – fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat5, na região do reservatório de Tucuruí - PA. *Acta Amazonia*. 34(3) pp. 487 – 493, 2004:

WARDLOW, B.D.; EGBERT, S.L. A comparison of MODIS 250-m EVI and NDVI data for crop mapping: A case study for southwest Kansas. **International Journal of Remote Sensing**, [s.l.], v.31, n.3, p.805– 830, Feb 2010. DOI. 10.1080/01431160902897858.