



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

REBECCA BORJA GONÇALVES GOMES DE MENEZES

**INDICADORES BIOFÍSICOS POR SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO  
MONITORAMENTO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
BRÍGIDA - PERNAMBUCO**

Recife

2024

REBECCA BORJA GONÇALVES GOMES DE MENEZES

**INDICADORES BIOFÍSICOS POR SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO  
MONITORAMENTO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
BRÍGIDA - PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira.

Recife

2024

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

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| M543e | <p>Menezes, Rebecca Borja Gonçalves Gomes de.</p> <p>Indicadores biofísicos por sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento ambiental da bacia hidrográfica do rio Brígida - Pernambuco / Rebecca Borja Gonçalves Gomes de Menezes. – 2024.</p> <p>80 f.: il., fig., tab. e siglas.</p> <p>Orientadora: Profa. Dra. Leijdane Maria Maciel de Oliveira.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.</p> <p>Inclui referências.</p> <p>1. Engenharia Civil. 2. SAVI. 3. MNDWI. 4. Albedo. 5. Análise espaço-temporal. 6. Semiárido. 7. Variabilidade climática. I. Oliveira, Leijdane Maria Maciel de (Orientadora). II. Título.</p> <p>UFPE</p> <p>624 CDD (22. ed.)</p> <p>BCTG/2024-112</p> |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

REBECCA BORJA GONÇALVES GOMES DE MENEZES

**INDICADORES BIOFÍSICOS POR SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO  
MONITORAMENTO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
BRÍGIDA - PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 29/07/2024.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Janaina Maria Oliveira de Assis (Examinadora Externa)  
Universidade Federal da Bahia

---

Prof. Dr. Diego César dos Santos Araújo (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico à minha avó Zefinha (*in memoriam*).

Dedico à minha mãe e ao meu pai, que não mediram esforços para que eu pudesse estudar, sempre me apoiam, me incentivam a ser uma pessoa melhor e me dão forças todos os dias para continuar.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida e das pessoas que eu amo, por ter me dado forças, perseverança e saúde para continuar até aqui.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, Cristianeide e Ronaldo, por estarem comigo em todos os momentos, me dando amor e apoio incondicionais, sempre segurando a minha mão e me incentivando a ser minha melhor versão. Sei que nunca estarei sozinha enquanto tiver vocês por perto.

Agradeço à minha prima/irmã, Carla, pelo companheirismo e amizade que sempre me ofereceu, me dando apoio em todos os momentos.

Agradeço aos meus amigos do GRH pela recepção, acolhimento e amizade, em especial aos amigos da Sala 13 e da Sala 15, pela companhia no dia a dia, por estarem sempre dispostos a ajudar e me dar força nos momentos mais difíceis, tornando a caminhada mais leve.

Agradeço imensamente à minha orientadora Leijdane, por ter me acolhido tão bem, por toda confiança e tempo dedicado a mim, pela atenção, cuidado, carinho e amor colocado em todos os seus ensinamentos transmitidos em mais uma etapa da minha vida.

Agradeço a todos os professores do PPGEC que colaboraram com minha formação e aos membros da banca, por participarem desta defesa, contribuindo para a melhoria deste trabalho.

Agradeço à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de estudos.

A todos vocês, toda minha gratidão.

“Ama-se mais o que se conquista com esforço.” (Disraeli, 2016)

## RESUMO

O Sensoriamento Remoto desempenha um papel crucial ao proporcionar uma interpretação mais precisa dos elementos que compõem o cenário terrestre. A utilização de suas técnicas tem sido extensivamente adotada para o monitoramento e mapeamento dos recursos naturais, possibilitando uma visão abrangente da área de interesse, tornando-se um instrumento eficaz na análise das mudanças dinâmicas na paisagem ao longo do tempo. Sendo assim, este estudo buscou investigar as dinâmicas ambientais na bacia hidrográfica do rio Brígida, em Pernambuco, no Semiárido brasileiro, aplicando técnicas de Sensoriamento Remoto realizando uma análise espaço-temporal. Através de dados hidrometeorológicos e de imagens do satélite Landsat 8, foram analisados os parâmetros biofísicos SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) e o albedo da superfície para compreender variações na vegetação e o índice MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) para análise de reservatórios presentes na bacia ao longo dos anos de 2013, 2016, 2020 e 2023, juntamente com imagens do MapBiomas para entendimento de mudanças no uso e cobertura do solo. Observou-se que o SAVI refletiu variações sazonais significativas, com picos durante os períodos chuvosos, apresentando valores médios de 0,285 (27/12/2020) e 0,319 (07/03/2023), indicando maior vigor vegetativo, especialmente em áreas de maior altitude como a Chapada do Araripe. Por outro lado, o albedo mostrou-se inversamente proporcional ao SAVI, com valores mais elevados durante o período seco, apresentando valores médios de 0,228 (05/10/2013) e 0,225 (29/10/2016), sobretudo em regiões urbanas e em áreas de mineração de gesso. A análise das correlações entre SAVI e albedo confirmou essa tendência, embora variações inesperadas em pontos com menores valores de albedo sugeriram complexidades adicionais nas interações entre vegetação, superfície terrestre e fatores climáticos. Além disso, o MNDWI permitiu uma análise detalhada de reservatórios, revelando variações no espelho d'água influenciadas por condições hidrológicas e climáticas. Esses resultados contribuem significativamente para o entendimento das dinâmicas ambientais na região e destacam a importância dessas técnicas para orientar políticas de gestão sustentável e conservação dos recursos naturais, enfatizando a necessidade de monitoramentos contínuos para avaliar mudanças climáticas e impactos ambientais de longo prazo.

Palavras-chave: SAVI; MNDWI; albedo; análise espaço-temporal; semiárido; variabilidade climática.

## ABSTRACT

Remote Sensing plays a crucial role in providing a more accurate interpretation of the elements that make up the earth's landscape. The use of its techniques has been widely adopted for monitoring and mapping natural resources, providing a comprehensive view of the area of interest, making it an effective tool for analyzing dynamic changes in the landscape over time. Therefore, this study sought to investigate the environmental dynamics of the Brígida river basin, in Pernambuco, in the Brazilian semi-arid region, by applying remote sensing techniques and carrying out a spatio-temporal analysis. Using hydrometeorological data and images from the Landsat 8 satellite, the biophysical parameters SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) and surface albedo were analyzed to understand variations in vegetation and the MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) to analyze reservoirs in the basin over the years 2013, 2016, 2020 and 2023, along with images from MapBiomas to understand changes in land use and land cover. It was observed that the SAVI reflected significant seasonal variations, with peaks during the rainy periods, showing average values of 0.285 (27/12/2020) and 0.319 (07/03/2023), indicating greater vegetative vigor, especially in higher altitude areas such as the Chapada do Araripe. On the other hand, albedo proved to be inversely proportional to SAVI, with higher values during the dry season, showing average values of 0.228 (05/10/2013) and 0.225 (29/10/2016), especially in urban regions and gypsum mining areas. Analysis of the correlations between SAVI and albedo confirmed this trend, although unexpected variations at points with lower albedo values suggest additional complexities in the interactions between vegetation, land surface and climatic factors. In addition, the MNDWI allowed a detailed analysis of reservoirs, revealing variations in the water mirror influenced by hydrological and climatic conditions.

Keywords: SAVI; MNDWI; albedo; spatio-temporal analysis; semiarid; climate variability.

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                                                                                                        |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 -  | Mapa de delimitação dos limites da região Nordeste, do Semiárido brasileiro e do bioma Caatinga, bem como os estados que englobam..... | 18 |
| Figura 2 -  | Série de satélites Landsat e suas datas de lançamento.....                                                                             | 20 |
| Figura 3 -  | Representação artística do Landsat 8 em órbita.....                                                                                    | 21 |
| Figura 4 -  | Valores de albedo para coberturas diferentes.....                                                                                      | 24 |
| Figura 5 -  | Comportamento espectral dos alvos por banda.....                                                                                       | 25 |
| Figura 6 -  | Localização da bacia hidrográfica do rio Brígida.....                                                                                  | 27 |
| Figura 7 -  | Classificação climática de Köppen-Geiger.....                                                                                          | 28 |
| Figura 8 -  | APA da Chapada do Araripe.....                                                                                                         | 30 |
| Figura 9 -  | Bacia do Rio Brígida e Principais Municípios do Polo Gesseiro do Araripe                                                               | 31 |
| Figura 10 - | Extração da gipsita em mineradora de gesso.....                                                                                        | 31 |
| Figura 11 - | Localização dos reservatórios na bacia do Brígida.....                                                                                 | 32 |
| Figura 12 - | Distribuição pluviométrica nos anos de 2013, 2016, 2020 e 2023.....                                                                    | 34 |
| Figura 13 - | Precipitação anual ao longo dos anos de 2013 a 2023.....                                                                               | 35 |
| Figura 14 - | Volume útil dos reservatórios Lagoa do Barro, Algodões e Entremontes....                                                               | 36 |
| Figura 15 - | Fluxograma das etapas metodológicas.....                                                                                               | 37 |
| Figura 16 - | Modelador Gráfico do QGIS com algoritmo utilizado.....                                                                                 | 38 |
| Figura 17 - | Representação espacial da hipsometria da bacia hidrográfica do rio Brígida.....                                                        | 44 |
| Figura 18 - | Espacialização da precipitação na bacia do rio Brígida.....                                                                            | 45 |
| Figura 19 - | Índice SAVI para a bacia do Brígida nos anos de 2013, 2016, 2020 e 2023.                                                               | 46 |
| Figura 20 - | Histograma do raster do índice de vegetação SAVI.....                                                                                  | 48 |
| Figura 21 - | Albedo para a bacia do Brígida nos anos de 2013, 2016, 2020 e 2023.....                                                                | 50 |
| Figura 22 - | Histograma do raster do albedo.....                                                                                                    | 51 |
| Figura 23 - | Recorte da imagem do albedo contendo mineradoras de gesso.....                                                                         | 53 |
| Figura 24 - | Recorte da imagem do albedo contendo o reservatório Lagoa do Barro.....                                                                | 55 |
| Figura 25 - | Perfil longitudinal do SAVI e albedo.....                                                                                              | 56 |
| Figura 26 - | Valores de $R^2$ para menores valores de albedo (azul) e maiores valores de albedo (laranja).....                                      | 58 |
| Figura 27 - | Índice MNDWI para reservatórios da bacia do Brígida nos anos de 2013, 2016, 2020 e 2023.....                                           | 60 |

|             |                                                                           |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 28 - | Histograma do raster do MNDWI.....                                        | 61 |
| Figura 29 - | Área superficial do espelho d'água do reservatório de Lagoa do Barro..... | 62 |
| Figura 30 - | Área superficial do espelho d'água do reservatório de Algodões.....       | 64 |
| Figura 31 - | Área superficial do espelho d'água do reservatório de Entremontes.....    | 66 |
| Figura 32 - | Mapas de dinâmica espaço-temporal anual de uso e cobertura do solo.....   | 68 |

## LISTA DE TABELAS

|             |                                                                                   |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 -  | Características principais das bandas multiespectrais do sensor OLI....           | 21 |
| Tabela 2 -  | Postos pluviométricos escolhidos.....                                             | 33 |
| Tabela 3 -  | Precipitação acumulada 30 dias antes da passagem do satélite.....                 | 35 |
| Tabela 4 -  | Dados estatísticos do SAVI.....                                                   | 48 |
| Tabela 5 -  | Dados estatísticos do albedo.....                                                 | 52 |
| Tabela 6 -  | Coeficiente de correlação (r) e $R^2$ entre os pares de grandezas analisados..... | 57 |
| Tabela 7 -  | Área superficial do reservatório Lagoa do Barro.....                              | 63 |
| Tabela 8 -  | Área superficial do reservatório Algodões.....                                    | 64 |
| Tabela 9 -  | Área superficial do reservatório Entremontes.....                                 | 66 |
| Tabela 10 - | Áreas das classes de uso e cobertura do solo.....                                 | 69 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                             | <b>14</b> |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS.....</b>                                              | <b>17</b> |
| 2.1      | OBJETIVO GERAL.....                                                | 17        |
| 2.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                         | 17        |
| <b>3</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>                                    | <b>18</b> |
| 3.1      | REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL.....                                    | 18        |
| 3.2      | SENSORIAMENTO REMOTO.....                                          | 19        |
| 3.2.1    | Satélite Landsat 8.....                                            | 20        |
| 3.2.2    | Uso do Sensoriamento Remoto na análise de mudanças ambientais..... | 22        |
| 3.2.2.1  | <i>Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)</i> .....                 | 23        |
| 3.2.2.2  | Albedo da superfície.....                                          | 23        |
| 3.2.2.3  | <i>Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)</i> .....    | 25        |
| <b>4</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                     | <b>27</b> |
| 4.1      | ÁREA DE ESTUDO.....                                                | 27        |
| 4.1.1    | Área de Preservação Ambiental (APA) da Chapada do Araripe.....     | 29        |
| 4.1.2    | Polo Gesseiro do Araripe.....                                      | 30        |
| 4.1.3    | Reservatórios de Lagoa do Barro, Algodões e Entremontes .....      | 32        |
| 4.2      | AQUISIÇÃO DOS DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS.....                       | 33        |
| 4.2.1    | Dados pluviométricos.....                                          | 33        |
| 4.2.2    | Dados de volume útil dos reservatórios.....                        | 36        |
| 4.3      | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....                                   | 37        |
| 4.3.1    | Processamento digital das imagens.....                             | 37        |
| 4.3.1.1  | Mapa hipsométrico.....                                             | 39        |
| 4.3.1.2  | Reflectância.....                                                  | 39        |
| 4.3.1.3  | SAVI.....                                                          | 40        |
| 4.3.1.4  | Albedo da superfície.....                                          | 40        |
| 4.3.1.5  | MNDWI.....                                                         | 41        |
| 4.3.2    | Classificação do uso e cobertura do solo.....                      | 42        |
| 4.3.3    | Análises, comparação e mapeamento.....                             | 42        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DICUSSÃO.....</b>                                  | <b>44</b> |
| 5.1      | COMPORTAMENTO HIPSOMÉTRICO DA ÁREA DE ESTUDO.....                  | 44        |

|       |                                                     |           |
|-------|-----------------------------------------------------|-----------|
| 5.2   | ESPACIALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO.....                 | 44        |
| 5.3   | SAVI.....                                           | 45        |
| 5.4   | ALBEDO DA SUPERFÍCIE.....                           | 49        |
| 5.5   | RELAÇÃO ENTRE SAVI E ALBEDO DA SUPERFÍCIE.....      | 55        |
| 5.6   | DELIMITAÇÃO DE ÁREAS HÍDRICAS ATRAVÉS DO MNDWI..... | 59        |
| 5.5.1 | <b>Reservatório Lagoa do Barro.....</b>             | <b>62</b> |
| 5.5.2 | <b>Reservatório Algodões.....</b>                   | <b>63</b> |
| 5.5.3 | <b>Reservatório Entremontes.....</b>                | <b>65</b> |
| 5.6   | ANÁLISE DO USO E COBERTURA DO SOLO.....             | 67        |
| 6     | <b>CONCLUSÕES.....</b>                              | <b>70</b> |
|       | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                             | <b>72</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O Nordeste brasileiro é marcado por variações climáticas periódicas naturais, resultantes de uma combinação de fenômenos meteorológicos e condições atmosféricas que ocorrem na interface entre a superfície-atmosfera, contribuindo para a variabilidade climática da região. Os frequentes períodos de seca têm se tornado mais graves e abrangentes, criando condições climáticas e hidrológicas extremas e dinâmicas. Como resultado, a região enfrenta preocupantes transformações ambientais, incluindo riscos de colapso hídrico e agrícola, tanto devido às condições climáticas naturais quanto à influência de atividades humanas que aceleram a degradação ambiental e a desertificação, afetando a vegetação nativa e a disponibilidade de água (Mariano *et al.*, 2018; Costa *et al.*, 2020; Silva, 2021). Estudos destacam que a década de 2011 a 2020 foi um dos períodos de seca mais intensos dos últimos anos para a maioria das regiões do Nordeste Brasileiro, com prevalência de secas severas e períodos de estiagem mais frequentes e prolongados, impactando de forma mais acentuada as áreas do Semiárido (Barbosa *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2022; Bezerra *et al.*, 2023; Sousa *et al.*, 2023).

O Índice de Segurança Hídrica (ISH) foi concebido para retratar, com simplicidade e clareza, as diferentes dimensões da segurança hídrica, incorporando o conceito de risco aos usos da água. A dimensão de resiliência expressa o potencial dos estoques de água naturais (superficiais e subterrâneos) e artificiais do Brasil e a espacialização da capacidade de renovação dos mesmos pela precipitação. O resultado dessa dimensão indica a região semiárida como a mais vulnerável (PNSH, 2024).

O Semiárido pernambucano, caracterizado por longos períodos de secas, possui regime pluviométrico inconstante e irregular, causando grande problemática de carência de água nos municípios e grande empecilho para o desenvolvimento socioeconômico (Andrade *et al.*, 2018). Também, a exploração contínua e insustentável dos recursos naturais promove a degradação ambiental (Luz *et al.*, 2022), situação que expõe a fragilidade e a necessidade de estudar as transformações da paisagem terrestre, e o estabelecimento de estratégias para monitorar distúrbios naturais e antrópicos. Considerando a visão da escassez, e, por se tratar de um tema de grande relevância, visto que os recursos hídricos são imprescindíveis para a humanidade (Barbosa *et al.*, 2021), o monitoramento periódico do ambiente terrestre é essencial para promover o gerenciamento adequado que impulse o progresso da região.

Cada vez mais a implementação de tecnologias cresce com o passar dos anos, com mais ênfase ainda, a utilização de satélites, proporcionando os chamados dados orbitais, tornou-se

uma das principais ferramentas para análise e estudos avançados sobre a configuração da superfície terrestre, os quais são pertinentes para a detecção e monitoramento de mudanças do ambiente, proporcionando uma melhor avaliação, manejo e gerenciamento dos recursos naturais, como o solo, vegetação e corpos hídricos. Desta forma, é possível pontuar as principais causas de degradação dos recursos naturais. (Ferreira Júnior e Dantas, 2018).

O Sensoriamento Remoto (SR) é uma ferramenta que se torna fundamental na pesquisa hidrológica para o manejo de bacias, auxiliando na identificação e monitoramento de possíveis alterações nos recursos naturais através de índices espectrais e parâmetros biofísicos. Muitos estudos vêm aplicando conjuntos de técnicas e procedimentos de sensoriamento remoto e imagens de satélite no mapeamento de uso e cobertura do solo; avaliação da influência da variabilidade pluviométrica na dinâmica da cobertura vegetal e planejamento e gestão dos recursos hídricos de bacias hidrográficas (Galvêncio *et al.*, 2016; Ferreira Júnior e Dantas, 2018; Chaves, 2020; Bezerra, 2020; Lima *et al.*, 2021; Leonardo *et al.*, 2021).

Silva, Oliveira e Nascimento (2019) especificam que o SR permite a observação dos parâmetros espectrais do meio ambiente, resultando na disseminação de pesquisas de uso do solo, possibilitando o fornecimento de informações atualizadas e facilitando os diagnósticos de ocupações e parâmetros biofísicos. Além disso, as pesquisas realizadas com uso de satélite e técnicas de SR podem apoiar diversas aplicações, a exemplo, os estudos das dinâmicas de uso e cobertura do solo, monitoramento ecológico, avaliação de parâmetros do solo, desastres ambientais e monitoramento ambiental de bacia hidrográfica.

Estudos como o de Cai *et al.* (2024) utilizaram dados de mudança de uso e cobertura da terra através do cálculo e mapeamento de indicadores da superfície terrestre (incluindo o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e o albedo), para representar o processo-chave na interação vegetação-clima, na Bacia do Rio Hotan no Deserto de Taklamakan em Xinjiang, no oeste da China, empregando conjuntos de dados de imagens de satélite do Landsat de 1993 a 2019, visando fornecer sugestões para o planejamento e gestão da paisagem para uma região árida mais sustentável.

Na região Semiárida, maior parte do volume de água superficial está armazenado em açudes ou reservatórios, que muitas vezes se encontram em situação de colapso devido à estiagem prolongada da região ou com volume muito inferior à sua capacidade máxima de acumulação. Tal situação ratifica a necessidade de monitoramento contínuo acerca de eventos hidrológicos extremos, sobretudo para a proposição de medidas de gestão de recursos hídricos que visem atenuar os problemas de escassez em longo prazo minimizando assim a dificuldade dos usos múltiplos da água. Almeida *et al.* (2023) monitoraram o reservatório Poço da Cruz,

localizado em Ibimirim-PE, Semiárido do Brasil, delimitando e quantificando a sua área superficial através do o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI), para observar as mudanças na distribuição espaço-temporal do reservatório com relação à ocorrência de eventos chuvosos, no período de 2015 a 2020.

Sendo assim, através da utilização de imagens orbitais para realização de estudos, é possível uma maior redução de custos, maior agilidade na geração de resultados, assim como o mapeamento e monitoramento de áreas remotas com acesso limitado e de grandes áreas (Brenner e Guasselli, 2015; Ferreira *et al.*, 2016).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral dessa pesquisa é aplicar técnicas de sensoriamento remoto, por meio de índices espectrais, para realização de monitoramento ambiental de reservatórios e cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio Brígida em Pernambuco.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar a sazonalidade da cobertura vegetal em função da precipitação ao longo do tempo;
- Avaliar a influência dos dados hidrometeorológicos com as configurações do reservatório;
- Quantificar a variabilidade espaço-temporal do espelho de água de manancial hídrico, comparando com dados de órgão competente;
- Identificar tendências de alterações do uso e cobertura do solo por meio de dados geoespaciais da plataforma MapBiomas.

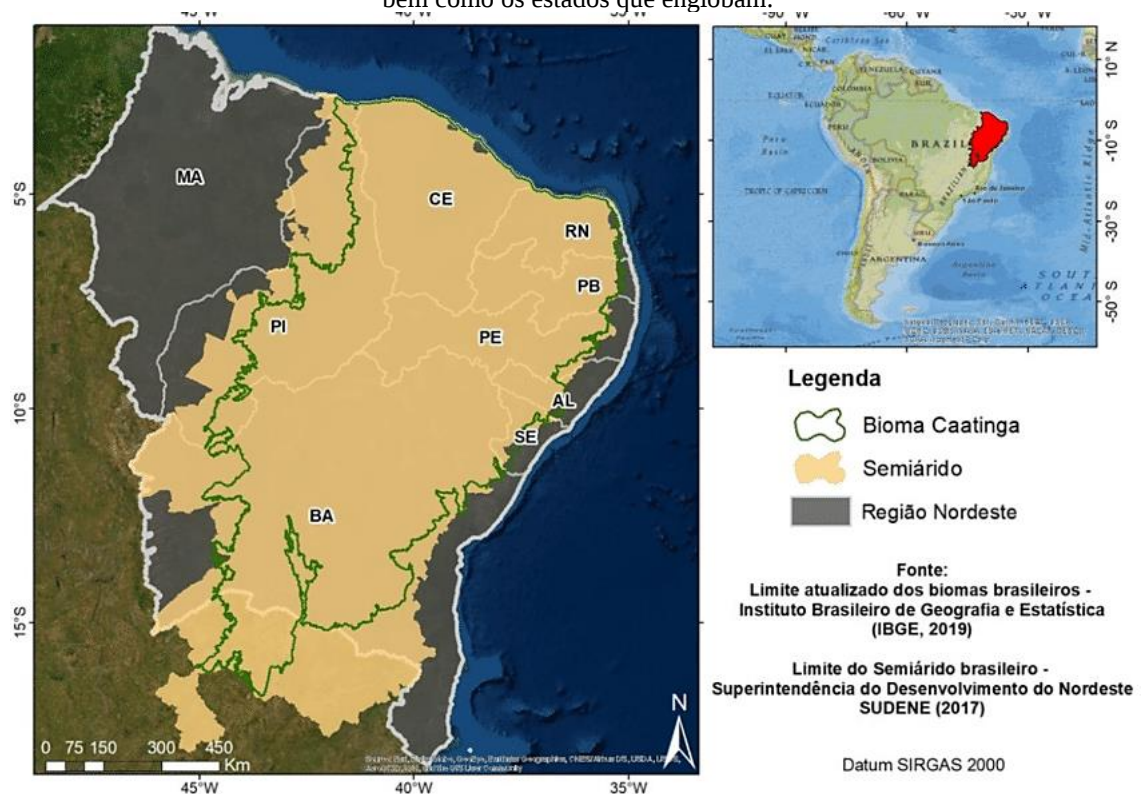
### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados conceitos pertinentes e trabalhos relevantes acerca dos seguintes tópicos: região Semiárida brasileira, Sensoriamento Remoto e suas aplicações na análise de mudanças ambientais.

#### 3.1 REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL

O Semiárido brasileiro (Figura 1) se estende pelos nove estados da região Nordeste e também pelo norte de Minas Gerais. No total, ocupa 12% do território nacional e abriga cerca de 28 milhões de habitantes divididos entre zonas urbanas (62%) e rurais (38%), sendo, portanto, um dos semiáridos mais povoados do mundo (INSA, 2024).

Figura 1 - Mapa de delimitação dos limites da região Nordeste, do Semiárido brasileiro e do bioma Caatinga, bem como os estados que englobam.



Fonte: Ganem *et al.* (2020).

A vegetação adaptada ao clima semiárido é composta por mata espinhosa tropical. Normalmente, é constituída por um estrato herbáceo-graminoso ao lado de árvores e arbustos, cuja densidade depende das condições de clima e do estado de conservação do solo. Grande

parte das espécies vegetais têm folhas que caem na época seca em resposta à adaptação fisiológica dessa vegetação à escassez de água, influenciando na denominação do termo “Caatinga” que significa “mata-branca” no tupi-guarani. Com a queda das folhas, os troncos esbranquiçados e brilhantes ficam visíveis e dominam a paisagem (INSA, 2024). Segundo dados do INSA, 85% do Semiárido brasileiro está em processo de desertificação moderado e 9% está efetivamente desertificado. Isso significa que a reversão do processo é quase impossível. Por isso, é fundamental a preservação e conservação da vegetação de Caatinga, visto que é ela que protege o solo da erosão.

Também, a oferta de água na região para usos múltiplos é aquém da sua demanda e em período de estiagem prolongada, a situação se agrava, impactando negativamente o abastecimento dos 1.262 municípios que a compõe, com reflexo nas atividades econômicas, em especial, a agrícola e industrial (INSA, 2024).

A região do Semiárido Brasileiro é delimitada a partir da precipitação pluviométrica e do índice de aridez. Os critérios técnicos e científicos aplicados são precipitação média igual ou inferior a 800 mm/ano e índice de aridez igual ou inferior a 0,50, com um percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano (Silva, 2021).

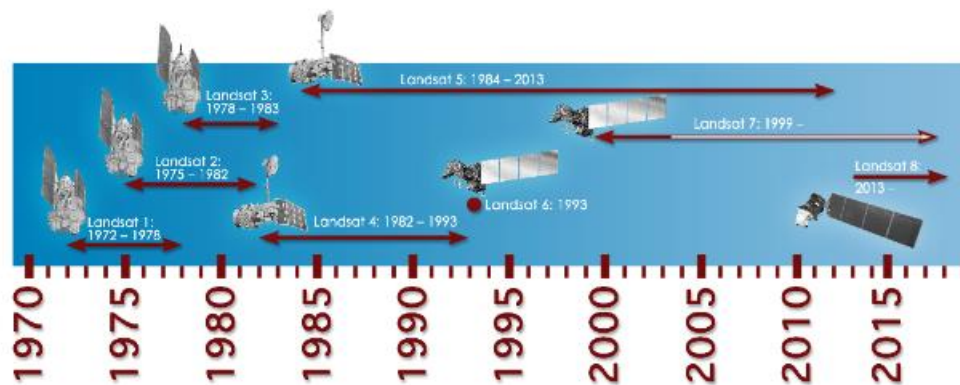
Devido a essas condições climáticas e ambientais, as pesquisas se intensificaram com o uso de dados de satélite, com o objetivo de compreender as principais vulnerabilidades climáticas e ambientais, como eventos de seca, condições de semiaridez, processos de degradação e desertificação, bem como a dinâmica da vegetação e as condições agropecuárias. Esses estudos abrangem desde os padrões de mudanças climáticas e ambientais em épocas passadas até as condições atuais, incluindo até mesmo projeções para o futuro (Silva, 2021).

### 3.2 SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto (SR) é a técnica e a ciência de adquirir informações sobre um objeto, área ou fenômeno sem a necessidade de contato físico direto com o objeto em questão (Jensen, 2009). Em 1957, a União Soviética lança o Sputnik, colocando em órbita da Terra o primeiro satélite artificial. Em 1960, a Agência Espacial Americana *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) lança o primeiro satélite destinado a obter informações da atmosfera terrestre. O sucesso das observações das imagens com informações da atmosfera impulsionou os pesquisadores a desenvolver um programa para a observação e mensuração dos recursos naturais da Terra. Em 1972, a NASA lança o satélite *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS). O sucesso dos primeiros satélites da série proporcionou a mudança do nome

do programa ERTS para *Land Remote Sensing Satellite* (LANDSAT), tendo como marco inicial o lançamento do LANDSAT 1 (Almeida e Oliveira, 2010). A série de satélites LANDSAT (Figura 2), mesmo sendo a primeira, possui uma gigantesca importância pelo seu acervo histórico e a contínua atualização de tecnologias mantendo características importantes.

Figura 2 - Série de satélites Landsat e suas datas de lançamento.



Fonte: Picchiello *et al.* (2022).

Os satélites estão entre os mais importantes elementos do Sensoriamento Remoto. Graças a eles, são possíveis as confecções de mapas temáticos com as mais variadas escalas de abrangência, aplicados para estimar variáveis geofísicas e biofísicas. Algumas das aplicações mais utilizadas para os dados de Sensoriamento Remoto são a modelagem de processos naturais (mudanças climáticas, eutrofização, desertificação, desastres naturais, etc) ou causados pelo homem (desmatamento, poluição, expansão urbana, deslizamentos, etc) (Solari, 2017).

### 3.2.1 Satélite Landsat 8

O satélite Landsat 8 (Figura 3) foi lançado em 11 de fevereiro de 2013, de lá pra cá mais de 1,1 milhão de cenas foram adquiridas, somando-se ao arquivo Landsat que começou há quase 45 anos e continua a ajudar a apoiar estudos em agricultura, florestas e qualidade/uso/gestão da água, desastres naturais e mudanças na terra. O satélite é composto pelos instrumentos *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) (USGS, 2024).

Figura 3 - Representação artística do Landsat 8 em órbita.



Fonte: USGS (2024).

O OLI mede nas porções visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (VNIR, NIR e SWIR) do espectro. O TIRS mede a temperatura da superfície terrestre em duas bandas térmicas com uma nova tecnologia que aplica a física quântica para detectar calor. O OLI captura dados com precisão radiométrica aprimorada em uma faixa dinâmica de 12 bits, o que melhora a relação sinal-ruído geral. Isso se traduz em 4096 níveis de cinza potenciais, em comparação com apenas 256 níveis de cinza em instrumentos Landsat 1-7 de 8 bits. O desempenho aprimorado de sinal-ruído permite uma melhor caracterização do estado e condição da cobertura do solo (USGS, 2024).

Os dados de 12 bits são dimensionados para inteiros de 16 bits e entregues nos produtos de dados de Nível 1. Os produtos são dimensionados para 55.000 níveis de cinza e podem ser redimensionados para a reflectância e/ou radiância do Topo da Atmosfera (TOA) usando coeficientes de redimensionamento radiométrico fornecidos no arquivo de metadados do produto (arquivo MTL) (USGS, 2024).

A Tabela 1 mostra as características principais das bandas multiespectrais do sensor OLI.

Tabela 1 - Características principais das bandas multiespectrais do sensor OLI.

| Sensor                           | Bandas Espectrais   | Resolução Espectral | Resolução Espacial | Resolução Temporal | Área Imageada | Res. Radiométrica |  |  |  |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|-------------------|--|--|--|
| OLI<br>(Operational Land Imager) | (B1) Costal/Aerosol | 0.433 - 0.453 μm    | 30 m               | 16 dias            | 185 km        | 12 bits           |  |  |  |
|                                  | (B2) Blue           | 0.450 - 0.515 μm    |                    |                    |               |                   |  |  |  |
|                                  | (B3) Greene         | 0.525 - 0.600 μm    |                    |                    |               |                   |  |  |  |
|                                  | (B4) Red            | 0.630 - 0.680 μm    |                    |                    |               |                   |  |  |  |
|                                  | (B5) NIR*           | 0.845 - 0.885 μm    | 15 m               |                    |               |                   |  |  |  |
|                                  | (B6) SWIR-1*        | 1.560 - 1.660 μm    |                    |                    |               |                   |  |  |  |
|                                  | (B7) SWIR-2*        | 2.100 - 2.300 μm    | 30 m               |                    |               |                   |  |  |  |
|                                  | (B8) PAN            | 0.500 - 0.680 μm    |                    |                    |               |                   |  |  |  |
|                                  | (B9) Cirrus         | 1.360 - 1.390 μm    |                    |                    |               |                   |  |  |  |

\*NIR – Infravermelho próximo; SWIR-1 e SWIR-2 – Infravermelho médio.

Fonte: USGS (2024).

### 3.2.2 Uso do Sensoriamento Remoto na análise de mudanças ambientais

O Sensoriamento Remoto é uma ferramenta adequada para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, permitindo estudos tanto na fase de viabilidade quanto no acompanhamento futuro. Além disso, possibilita a análise do uso e ocupação do solo, relacionando a ocupação com o assoreamento dos reservatórios. A utilização de imagens orbitais para esses estudos oferece vantagens como a redução de custos, maior agilidade na geração de resultados e a capacidade de mapear e monitorar áreas remotas de difícil acesso e grandes extensões (Brenner e Guasselli, 2015; Huang *et al.*, 2016; Ferreira *et al.*, 2016; Chaves, 2020).

As imagens capturadas pelos sistemas de sensores resultam em uma imagem digital. Esta imagem pode ser processada para realçar ou extrair informações específicas (Novo, 2000). O processamento pode incluir a composição colorida com diferentes bandas espectrais, a combinação da mesma cena em intervalos de tempo distintos, a comparação de dados de diferentes sensores ou a obtenção de novas informações, como a geração de índices. Além disso, o processamento também serve para reduzir erros ou ruídos inerentes ao processo de aquisição da informação.

Entre as técnicas de SR, destacam-se os índices espectrais, que fornecem informações relevantes para o monitoramento e as mudanças ocorridas em alvos naturais e artificiais na superfície terrestre. O índice espectral é obtido através de operações matemáticas entre os valores numéricos dos pixels das diferentes bandas de uma imagem.

A utilização de índices de vegetação em superfícies por meio de imagens orbitais de satélites é essencial para distinguir informações espectrais da vegetação. Isso é feito a partir da combinação de bandas multiespectrais de refletância espectral, que variam conforme o tipo de cobertura vegetal e possuem comprimentos de onda específicos. Esses índices indicam o comportamento da vegetação, bem como a quantidade e qualidade presentes no ambiente (Barbosa *et al.*; 2006; Souza *et al.*, 2020).

A característica semiárida da Caatinga proporciona uma oportunidade única para estudar a vegetação em resposta às secas recorrentes, devido aos impactos negativos dessas secas na erosão do solo (Barbosa *et al.*, 2019). No entanto, a resposta da vegetação da Caatinga aos índices de vegetação existentes ainda requer modelagens, validações e estudos adicionais. Muitos dos índices de vegetação não foram desenvolvidos especificamente para o bioma

Caatinga, que apresenta uma notável heterogeneidade vegetal devido à dinâmica do déficit pluviométrico na região (Silva Júnior, 2021).

Existem índices espectrais que destacam o comportamento espectral da vegetação e se correlacionam com seus parâmetros biofísicos (Epiphanyo *et al.*, 1996). A exemplo do SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), Albedo da superfície e MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*).

#### 3.2.2.1 Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

O índice espectral de vegetação *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) ou Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS) busca identificar a resposta vegetativa da superfície, minimizando o efeito da resposta espectral do solo (Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich, 2012). Para isso, esse índice utiliza um fator de ajuste "L" para reduzir o impacto do solo na radiação eletromagnética, característica que é particularmente útil em regiões semiáridas, onde a vegetação é mais esparsa e o solo está mais exposto.

No fator de ajuste "L", atribui-se o valor de 0,5 para áreas com cobertura vegetal intermediária. Em áreas com vegetação mais densa, utiliza-se o valor de 0,25. Quando o valor de "L" é igual a zero, o SAVI se torna semelhante ao NDVI, não necessitando de ajuste (Huete, 1988; Allen *et al.*, 2007). É importante destacar que, na região do Semiárido Brasileiro, alguns estudos utilizaram o fator de ajuste de 0,5 (Silva e Galvêncio, 2012; Alves *et al.*, 2018; Ferreira Júnior e Dantas, 2018; Batista *et al.*, 2020).

Nessa mesma configuração, em estudo feito por Rodrigues *et al.* (2022), o SAVI foi utilizado para analisar a dinâmica espaço-temporal do uso e ocupação do solo no município de Condado-PB, no período de 1989 a 2018, com o intuito de avaliar a influência de práticas tradicionais peculiares à região, a exemplo da agricultura de sequeiro e da pecuária tradicional.

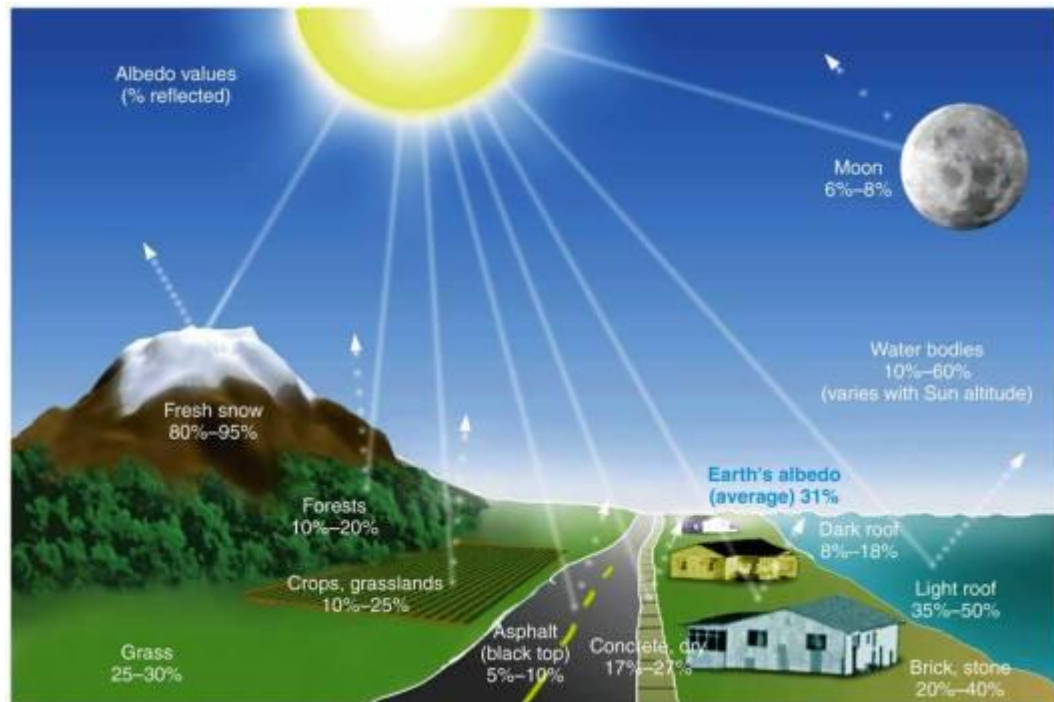
Sendo assim, a importância das análises temporais de imagens da terra e da cobertura vegetal reside na identificação de tendências de expansão das atividades antrópicas na paisagem, fornecendo suporte para diversos estudos em conservação ambiental e planejamento urbano.

#### 3.2.2.2 Albedo da superfície

Dependendo do tipo de cobertura do solo, seja vegetação, solo exposto ou áreas edificadas, a radiação proveniente do sistema solar é refletida em diferentes proporções (Figura

4). Essa taxa de refletividade da radiação é conhecida como albedo. No caso de desmatamento e aumento do solo exposto, o valor do albedo aumenta, enquanto a umidade do solo e a densidade da vegetação diminuem (Robinove *et al.*, 1981).

Figura 4 - Valores de albedo para coberturas diferentes.



Fonte: Salleh *et al.* (2013).

O albedo é um parâmetro biofísico utilizado para entender a estrutura física da superfície. Geralmente, é empregado em conjunto com outros índices de vegetação e a temperatura da superfície (Santos *et al.*, 2017a). Diferentes estudos identificaram relações inversas entre o albedo e o índice de vegetação, e uma relação direta com a temperatura. Assim, a remoção da vegetação tende a aumentar o albedo, alterando o saldo de radiação na superfície (Bezerra, 2020).

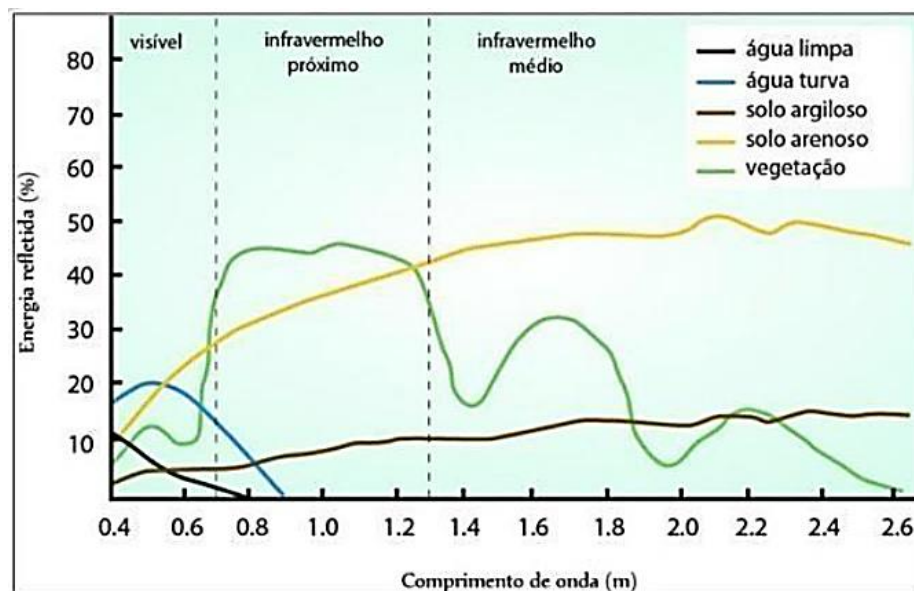
Cordão *et al.* (2023) utilizaram o albedo, juntamente com outros parâmetros biofísicos (índices de vegetação e temperatura de superfície) para determinar e monitorar a dinâmica desses parâmetros numa área agrícola de cultura irrigada no município de Sousa-PB (Semiárido brasileiro), através de imagens Landsat 8. Os autores concluíram que a influência do manejo e da sazonalidade na área foi detectada nos parâmetros biofísicos, havendo correlação entre as mesmas, pois, o incremento da biomassa na cultura, ocorre à redução da refletância no período chuvoso, enquanto, a redução dos índices vegetativos no período seco e sem a manutenção

hídrica adequada ocorre o aumento da refletância ocasionando a elevação do albedo e da temperatura de superfícies.

### 3.2.2.3 Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)

As características de refletância da água a distinguem de outros tipos de cobertura do solo (Figura 5), abrindo portas para a identificação, mapeamento e delimitação de corpos d'água através de imagens de satélite. Essa técnica oferece uma ferramenta valiosa para diversos estudos e aplicações.

Figura 5 - Comportamento espectral dos alvos por banda.



Fonte: Florenzano (2007).

Sendo assim, torna-se possível analisar as relações entre os corpos d'água e os demais elementos presentes numa bacia hidrográfica. Essa análise nos permite observar como os corpos d'água interagem com o entorno, mapeando as dinâmicas de uso da terra e suas implicações. Muitos estudos que exigem o mapeamento de corpos d'água, geralmente utilizam dados de sensoriamento remoto como uma ferramenta de obtenção de informações geoespaciais (Ali *et al.*, 2019; Chaves, 2020; Bezerra, 2020; Almeida, 2021; Soares, 2023; Almeida *et al.*, 2023).

O mapeamento do corpo hídrico pode ser feito pela delimitação manual do corpo d'água ou pela classificação automática de imagens. Nessa segunda forma, destacam-se os produtos obtidos através das técnicas de processamento digital de imagens de sensores ópticos, como exemplo, os produtos dos sensores a bordo do satélite Landsat, que permitem a combinação de

duas ou mais bandas do espectro do visível e infravermelho, gerando índices através desses processamentos.

Dentre os métodos e técnicas de processamento de imagens de Sensoriamento Remoto, com o objetivo de identificação de corpos hídricos, destaca-se o método criado por McFetters (1996), com o objetivo de realçar e delinear automaticamente as águas abertas através da operação de bandas multiespectrais, denominado de Índice da Diferença Normalizada de Água (*Normalized Difference Water Index* – NDWI). O método é uma variação do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), e combina as bandas verde e infravermelho próximo.

Em áreas com alta densidade de construções, o tradicional NDWI pode apresentar algumas limitações na identificação precisa de corpos d'água. Para superar esse desafio, Xu (2006) propôs uma modificação inovadora: o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI). O MNDWI se diferencia do NDWI por trocar a banda do infravermelho próximo (NIR) pela do infravermelho médio (MIR). Essa mudança estratégica revela-se crucial em áreas urbanas, pois as construções costumam apresentar alta reflectância no NIR, confundindo-se com os corpos d'água no NDWI tradicional.

Muitos estudos já comprovaram o melhor desempenho do índice modificado em relação ao anterior (Ali *et al.*, 2019; Gil, Padovani e Coelho, 2019; Tola *et al.*, 2024). As principais vantagens do MNDWI sobre o NDWI original incluem atribuir à água valores ainda mais positivos, visto que a banda do infravermelho médio absorve mais energia na água que a banda do infravermelho próximo; distinguir a água das áreas edificadas, uma vez que o uso da banda do infravermelho médio confere, nesse índice, valores negativos às áreas edificadas; promover maior contraste com as áreas de solo, visto que elas possuem maior refletância na banda do infravermelho médio do que no infravermelho próximo (Xu, 2006).

Tola *et al.* (2024) investigaram a mudança espaço-temporal nas extensões da superfície de água de lagos localizados na região do Central Rift Valley (CRV), na Etiópia, utilizando índices de água, para extrair e analisar a área da superfície dos lagos ao longo de 35 anos (1986–2020) e identificar potenciais causas para as mudanças. Dentre os índices utilizados, o MNDWI teve o melhor desempenho, com uma precisão geral superior a 96%. A diminuição da área da superfície do Lago Abiyata foi atribuída principalmente à captação de água para fabricação de carbonato de sódio e ao fluxo de entrada de água do rio.

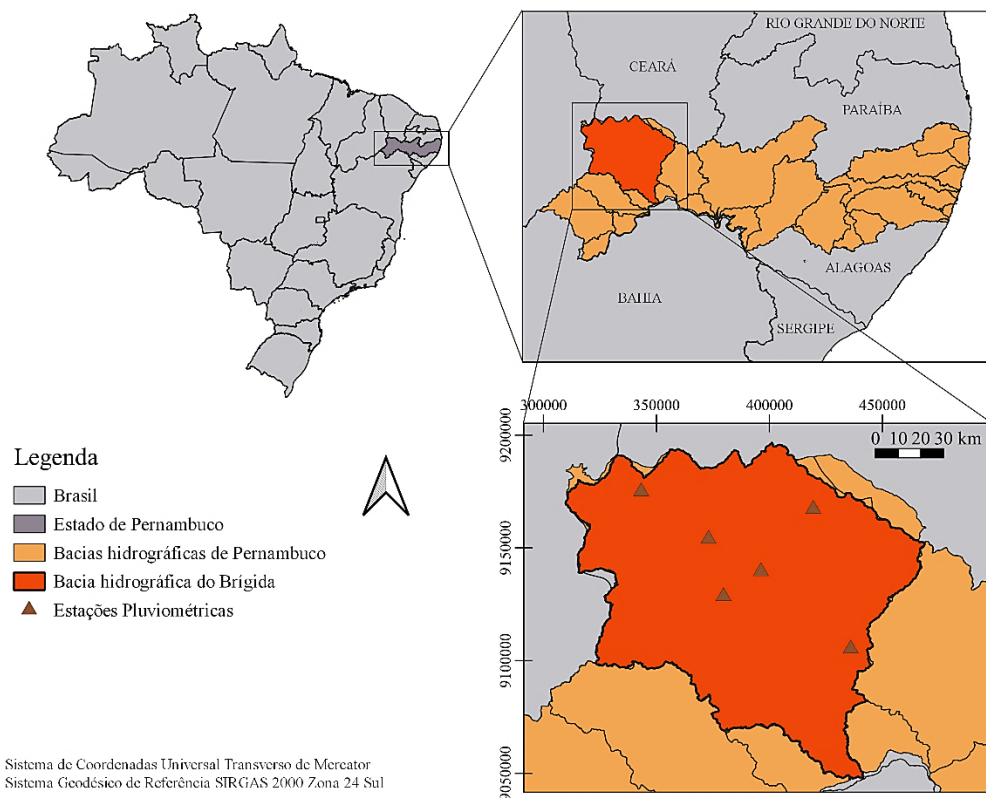
## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo está caracterizada a área de estudo e são conceituados o Material e Métodos, de maneira detalhada, utilizados para obtenção dos resultados deste trabalho.

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Brígida que está localizada no alto Sertão de Pernambuco, entre 07° 19' 02" e 08° 36' 32" de latitude sul, e 39° 17' 33" e 40° 43' 06" de longitude oeste (Figura 6). A bacia abrange uma área de 13.495,73 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 13,73% da superfície total do Estado. O rio Brígida nasce ao norte no município de Exú e apresenta uma extensão aproximada de 193 km até desaguar no rio São Francisco. A bacia abrange áreas de 15 municípios: os municípios totalmente inseridos na bacia são Bodocó, Granito, Ipubi e Trindade; os com sede na bacia são Exu, Moreilândia Araripina, Ouricuri e Parnamirim; e os municípios parcialmente inseridos na bacia são os de Cabrobó, Orocó, Santa Cruz, Santa Maria da Boa Vista, Santa Filomena e Serrita (APAC, 2024).

Figura 6 - Localização da bacia hidrográfica do rio Brígida.

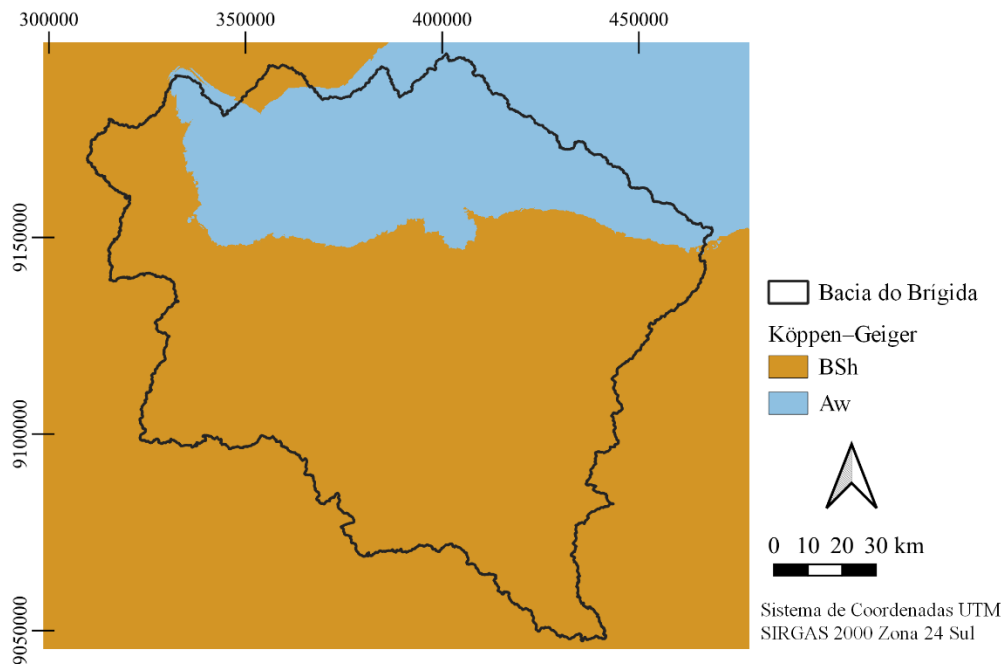


Fonte: A Autora (2024).

A bacia de estudo apresenta grande quantidade de reservatórios e é uma das beneficiadas pelo Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) que visa garantir a disponibilidade futura de água na região semiárida do Nordeste, proporcionando segurança hídrica a 12 milhões de pessoas em 390 municípios dos estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte, tendo como objetivo principal o desenvolvimento socioeconômico desses estados mais vulneráveis à seca no Nordeste do Brasil (CODEVASF, 2024).

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a região é classificada com dois tipos de clima diferentes: o tipo BSh (climas semiáridos quentes) e o Aw (tropical com inverno seco) (IPEF, 2024; Beck *et al.*, 2018; Alvares *et al.*, 2013), conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 - Classificação climática de Köppen-Geiger.



Fonte: A Autora; IPEF (2024).

O clima BSh é caracterizado por escassez de chuvas e grande irregularidade em sua distribuição; baixa nebulosidade; forte insolação; índices elevados de evaporação, e temperaturas médias elevadas (por volta de 27°C). A umidade relativa do ar é normalmente baixa, e as poucas chuvas (de 250 mm a 750 mm por ano) concentram-se num espaço curto de tempo, provocando enchentes torrenciais. Mesmo durante a época das chuvas (novembro a abril), sua distribuição é irregular, deixando de ocorrer durante alguns anos e provocando secas. A vegetação característica desse tipo de clima é a xerófila (Caatinga). Esse tipo de clima

predomina no interior da Região Nordeste, norte de Sergipe, oeste de Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí, e centro, noroeste, norte e nordeste da Bahia (EMBRAPA, 2024). Já o clima Aw apresenta estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro (julho é o mês mais seco). A temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C. As precipitações são superiores a 750 mm anuais, atingindo 1800 mm (EMBRAPA, 2024).

A precipitação dentro da bacia está dividida em quatro faixas de volume precipitado, variando de 624,94 a 961,67 mm/ano, com a estação úmida a ocorrer de dezembro a abril, com maior precipitação na região da Chapada do Araripe, localiza na porção mais ao norte. A temperatura varia de 23,75 a 26,07 °C, sendo a região mais quente localizada próximo ao Rio São Francisco, mais ao sul da bacia, próximo ao seu exutório. Encontra-se na bacia os seguintes tipos de solos: Aluvias, cambissolos, latossolo amarelo, Bruno não cálcicos, podzólico amarelo, planossolo, litólicos, regossolo, Vertissolos, areias quartozosas, podzólico vermelho-escuro e podzólico vermelho-marelo. A vegetação que se encontra na área é do tipo Caatinga (aproximadamente 42,68% de sua área) e o restante se encontra em estágio de uso, seja por agricultura de sequeiro como também pela exploração predatória de madeira para o pólo gesso do Araripe (Galvêncio *et al.*, 2007).

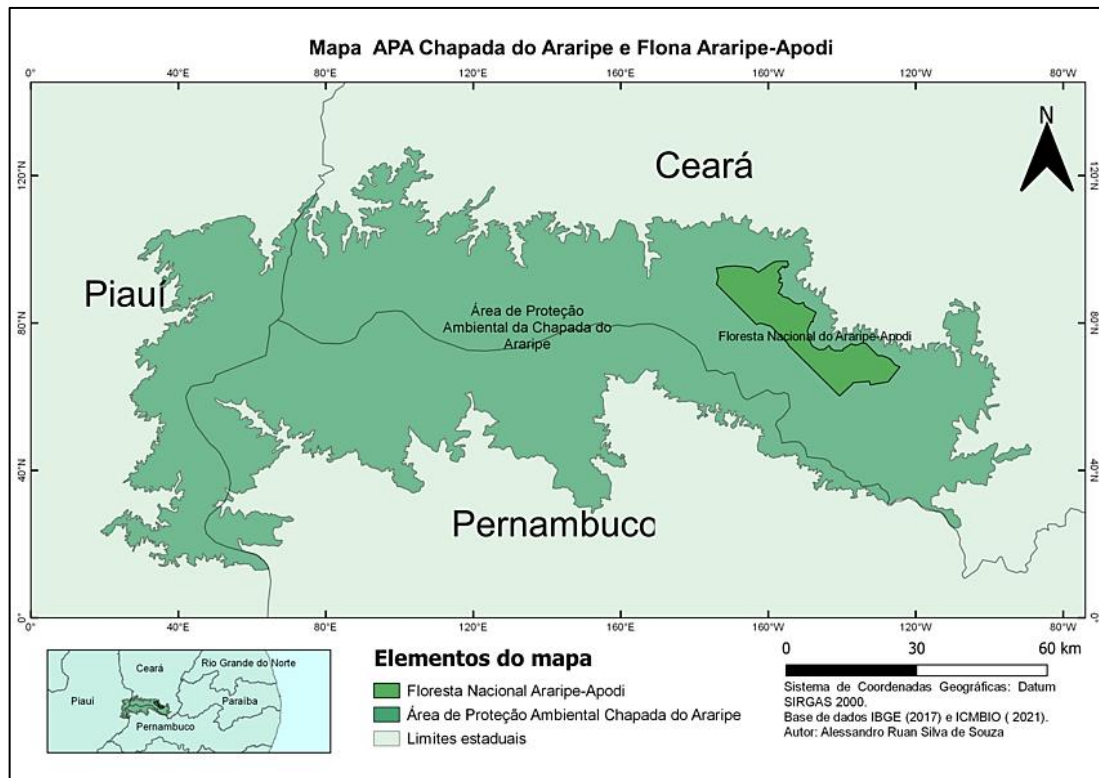
#### **4.1.1 Área de Preservação Ambiental (APA) da Chapada do Araripe**

A APA da Chapada do Araripe (Figura 8) foi criada pelo Decreto s/n de 04 de agosto de 1997, está localizada na região Nordeste do Brasil, seu bioma característico é a Caatinga, abrangendo uma área de 972.605,18 hectares nos estados do Ceará, Pernambuco e Piauí (ICMBIO, 2024).

Segundo Sousa *et al.* (2023), o planalto da Chapada do Araripe abrange a parte norte da bacia hidrográfica do rio Brígida que apresenta as maiores elevações, sendo considerada uma área com importante variabilidade espacial de precipitação e maior densidade de vegetação.

A Chapada do Araripe possui um rico acervo de recursos naturais e vegetais, onde convivem áreas de preservação pública com interesses de propriedades privadas. O surgimento da legislação ambiental e de instrumentos de conservação da APA Chapada do Araripe conflita muitas vezes com a extração dos recursos de forma predatória (Andrade e Mota, 2022).

Figura 8 - APA da Chapada do Araripe.

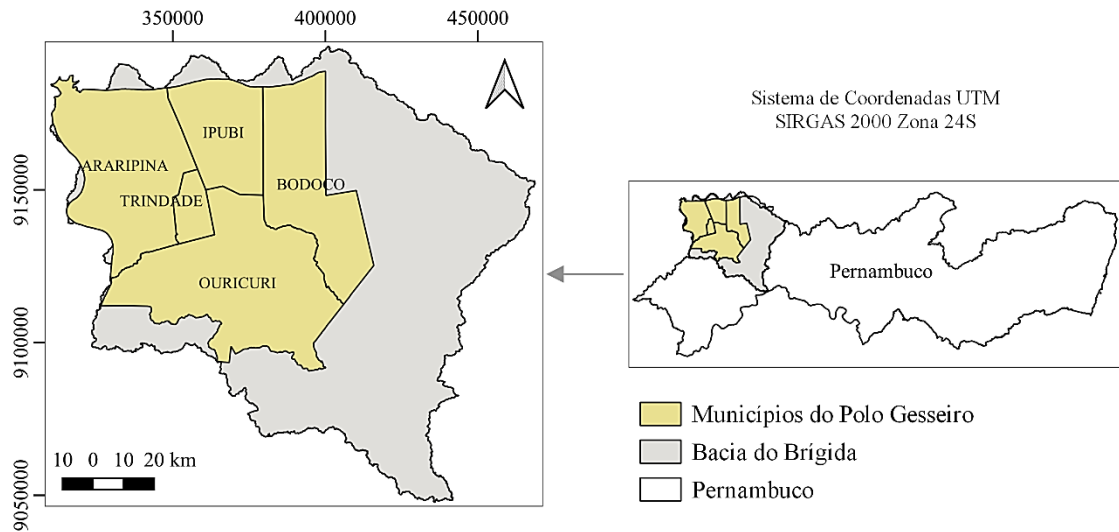


Fonte: Souza e Bezerra (2022).

#### 4.1.2 Polo Gesseiro do Araripe

A região do Araripe Pernambucano, localizada na mesorregião do Sertão de Pernambuco, área considerada o epicentro do Semiárido Nordeste, com subsolo Cristalino, possui uma área territorial de 11.546,77 km<sup>2</sup> e engloba dez municípios, sendo os cinco principais pernambucanos: Araripina, Bodocó, Ipubi, Ouricuri e Trindade (Figura 9), que juntos correspondem a 97% da produção, gerando 3.582 postos de empregos diretos e 14.328 indiretos. Conta com uma população de 256.990 habitantes, conforme o censo demográfico de 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (Sindusgresso, 2024).

Figura 9 - Bacia do Rio Brígida e Principais Municípios do Polo Gesseiro do Araripe



Fonte: A Autora (2024).

As atividades mineradoras nessa região tiveram início na década de 1960, graças a migração da atividade oriunda do estado do Rio Grande do Norte, que anteriormente se destacava nesse segmento (Silva, 2008). Hoje o Polo Gesseiro do Araripe, é um dos principais polos econômicos do interior de Pernambuco e conta com 55 mineradoras, 185 Beneficiadoras/Cachinadoras e 270 empresas de Pré-moldados/Artefatos de gesso (Sindusgesso, 2024).

Figura 10 - Extração da gipsita em mineradora de gesso.



Fonte: Diário de Pernambuco (2024).

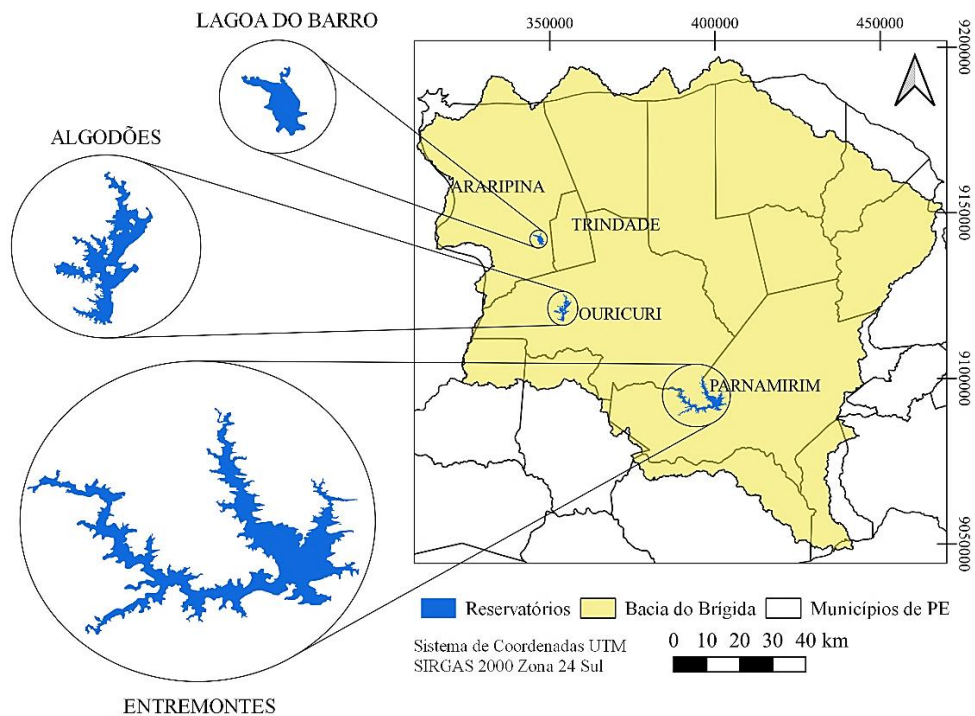
O Brasil tem destaque mundial em reservas do minério de gipsita, com um potencial de produção. Os depósitos mais importantes de gipsita fazem parte da sequência sedimentar cretácea, conhecida como Chapada do Araripe. A gipsita explorada nessa área é por muitos considerada a de melhor qualidade do mundo, com a pureza do minério variando entre 88% e 98% (Sindusgesso, 2024).

A região do Araripe Pernambucano oferece poucas oportunidades econômicas para seus habitantes, especialmente devido à baixa disponibilidade de água, o que prejudica as atividades agropecuárias. Embora enfrente problemas estruturais semelhantes a outras regiões do país, os municípios do Araripe dificilmente teriam o nível de desenvolvimento atual sem as atividades de mineração e beneficiamento de gipsita presentes em seu território (Santos *et al.* 2023).

#### 4.1.3 Reservatórios de Lagoa do Barro, Algodões e Entremontes

A fim de analisar a dinâmica espaço-temporal de reservatórios presentes na bacia hidrográfica do rio Brígida, foram escolhidos três: Lagoa do Barro, Algodões e Entremontes (Figura 11).

Figura 11 - Localização dos reservatórios na bacia do Brígida.



Fonte: A Autora (2024).

O reservatório de Lagoa do Barro está situado no município de Araripina, possuindo uma área de drenagem total de 1.541,8 km<sup>2</sup>, com o volume máximo de 13,16 hm<sup>3</sup>, mínimo de 0,0 e útil de 13,16 hm<sup>3</sup>. Sua principal demanda de retirada é para suprir abastecimento rural, seguido por irrigação, dessedentação animal e abastecimento urbano (ANA, 2017).

Em seguida, o reservatório de Algodões teve sua construção no ano de 1986 e fica situado no município de Ouricuri, tendo capacidade para 58,48 hm<sup>3</sup> e seu principal uso é para irrigação (APAC, 2014).

Por fim, o reservatório de Entremontes tem sua localização no município de Parnamirim, sendo seu ano de construção foi 1982, possuindo uma área de drenagem total de 5.082,60 km<sup>2</sup>, com o volume máximo de 339,33 hm<sup>3</sup> e mínimo de 12,94 hm<sup>3</sup> e volume útil de 326,39 hm<sup>3</sup>. Atende a demandas de irrigação, abastecimento rural e dessedentação animal (ANA, 2016).

## 4.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

### 4.2.1 Dados pluviométricos

Os dados pluviométricos foram obtidos através do site da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) para o período de 2013 a 2023. A análise da precipitação foi realizada em 6 estações espalhadas pela área de estudo e nos municípios onde os reservatórios estudados estão localizados. Os dados dos postos também foram utilizados para realização da espacialização da precipitação através da ferramenta “Interpolação IDW” do QGIS.

As estações escolhidas constam na Tabela 2, juntamente com as coordenadas geográficas e o código da APAC.

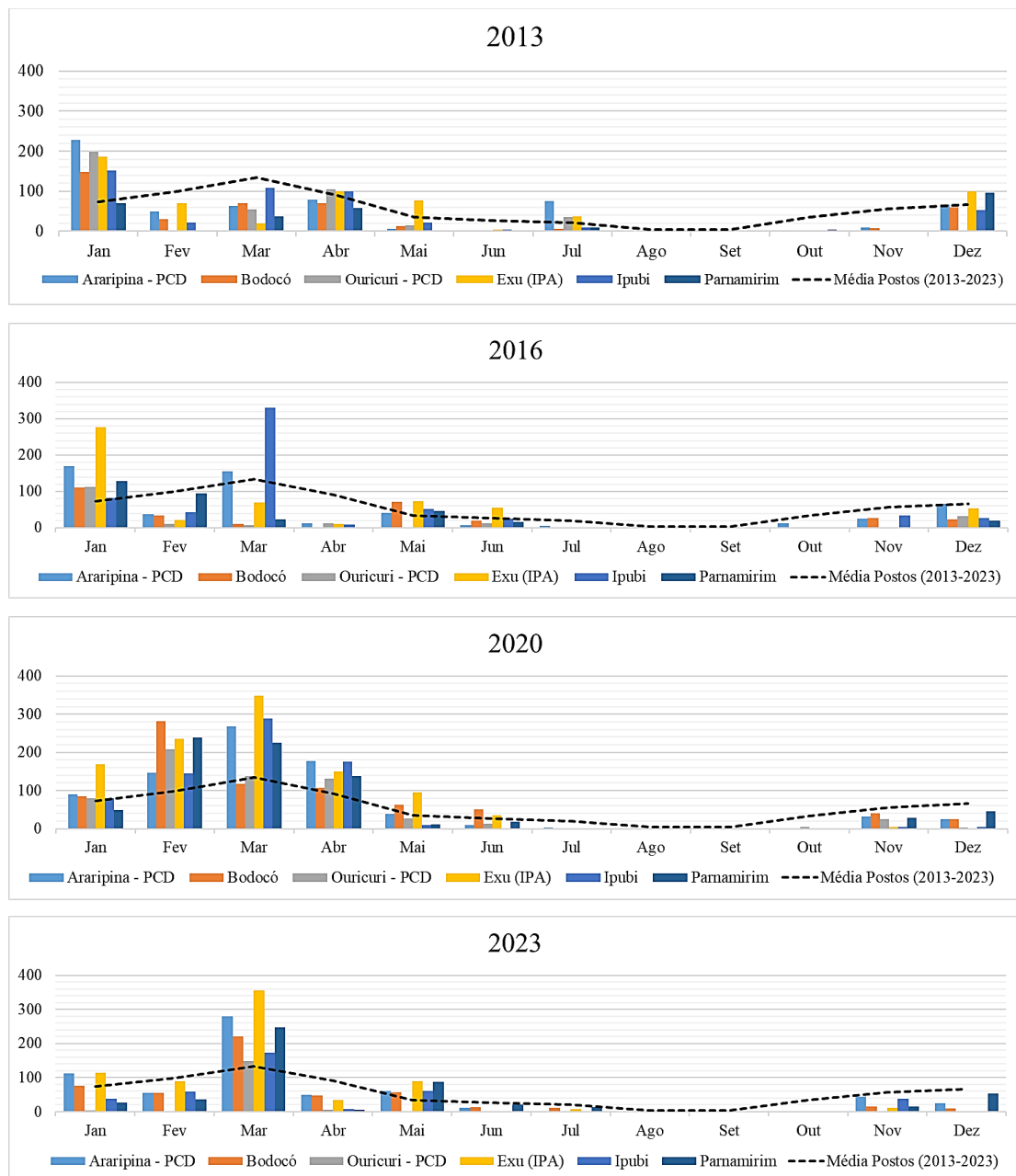
Tabela 2 - Postos pluviométricos escolhidos.

| <b>Código</b> | <b>Posto</b>    | <b>Longitude</b> | <b>Latitude</b> |
|---------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 225           | Araripina - PCD | -40,417          | -7,458          |
| 50            | Bodocó          | -39,938          | -7,781          |
| 373           | Ouricuri - PCD  | -40,092          | -7,879          |
| 550           | Exu (IPA)       | -39,732          | -7,533          |
| 84            | Ipubi           | -40,147          | -7,652          |
| 172           | Parnamirim      | -39,578          | -8,089          |

Fonte: APAC (2023).

A distribuição pluviométrica ao longo dos anos correspondentes a data das imagens de satélite usadas nesse estudo (2013, 2016, 2020 e 2023) estão na Figura 12 Para melhor entendimento e visualização sobre o regime de chuvas da região, foi utilizada a média dos postos escolhidos ao longo dos dez anos de estudo (2013 a 2023).

Figura 12 - Precipitação mensal (mm) na bacia do rio Brígida nos anos 2013, 2016, 2020 e 2023.



Fonte: APAC (2024).

Observando os dados, identifica-se que o período chuvoso se concentra entre os meses de dezembro a maio, sendo março o mês mais chuvoso. Dentre os anos analisados, 2013 e 2016 foram anos mais secos e 2020 e 2023 foram anos mais chuvosos.

Visto que a vegetação de Caatinga tem uma resposta rápida a presença de precipitação (Barbosa *et al.*, 2019), é importante analisar a existência de chuva no período anterior à data das imagens de satélite. Dessa forma, a Tabela 3 traz o acumulado de chuva nos postos pluviométricos, 30 dias antes da passagem do satélite.

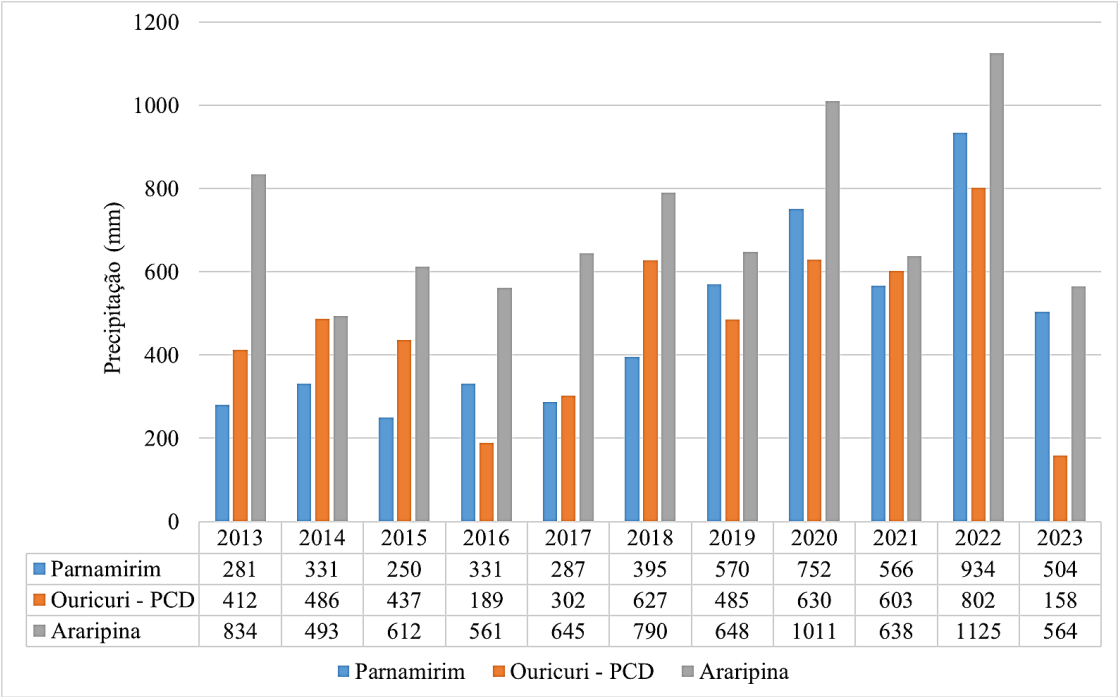
Tabela 3 - Precipitação acumulada 30 dias antes da passagem do satélite.

| ESTAÇÃO         | ACUMULADO DE CHUVA 30 DIAS ANTES (mm) |          |          |          |
|-----------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|
|                 | 05/10/13                              | 29/10/16 | 27/12/20 | 07/03/23 |
| Araripina - PCD | 0,0                                   | 13,0     | 25,0     | 56,0     |
| Bodocó          | 0,0                                   | 0,0      | 25,0     | 52,0     |
| Exu (IPA)       | 0,0                                   | 0,0      | 0,0      | 55,0     |
| Ipubi           | 0,0                                   | 0,0      | 5,0      | 59,0     |
| Ouricuri - PCD  | 0,0                                   | 0,0      | 2,6      | 0,0      |
| Parnamirim      | 0,0                                   | 0,0      | 44,7     | 32,4     |

Fonte: APAC (2024).

Outro recorte interessante a se fazer para entender melhor a capacidade de recarga dos reservatórios com a precipitação, é definir o panorama da precipitação anual ao longo de todos os anos entre 2013 e 2023. A Figura 13 traz os dados das estações dos mesmos municípios em que estão localizados os reservatórios.

Figura 13 - Precipitação anual ao longo dos anos de 2013 a 2023.



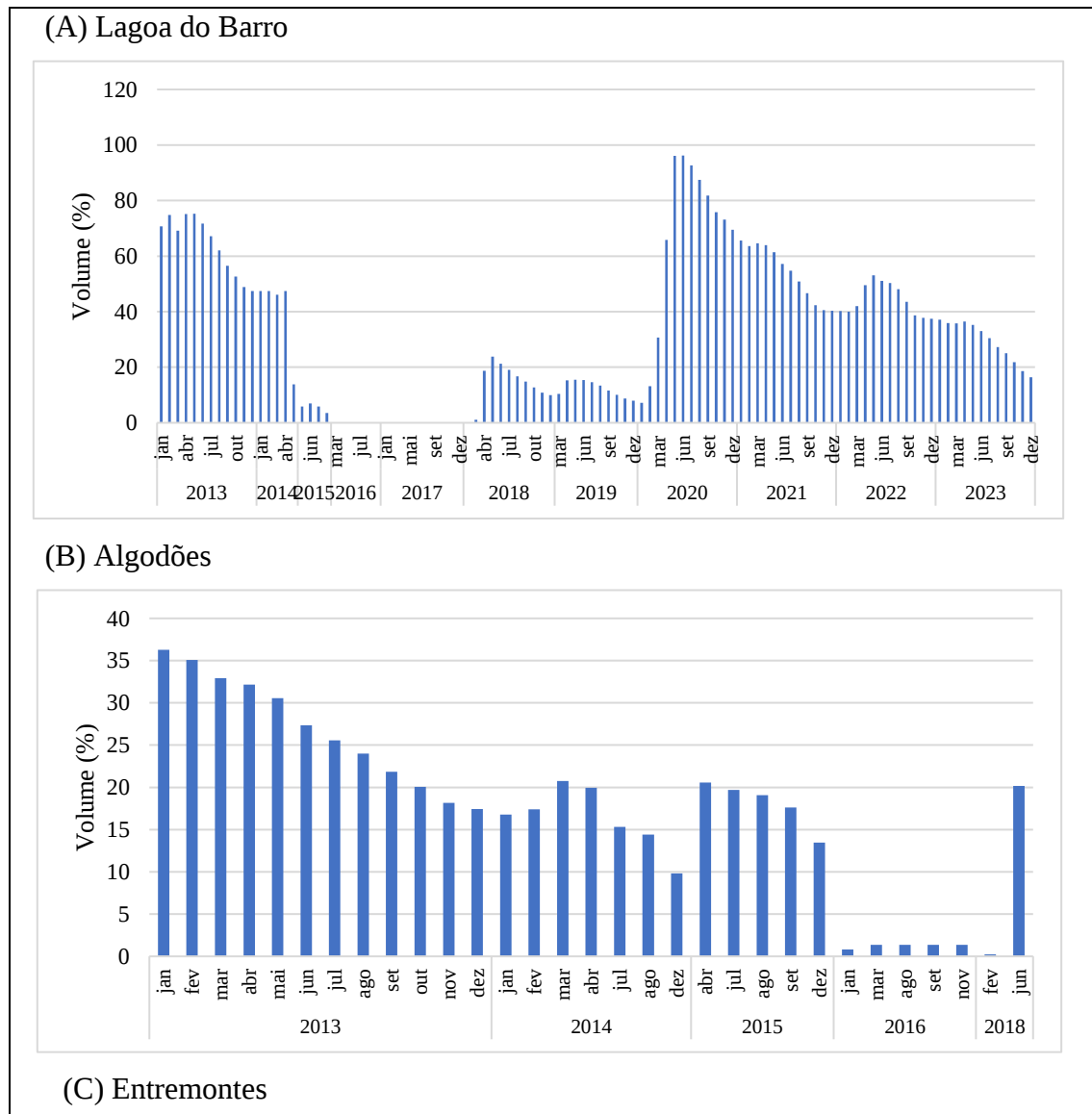
Fonte: APAC (2024).

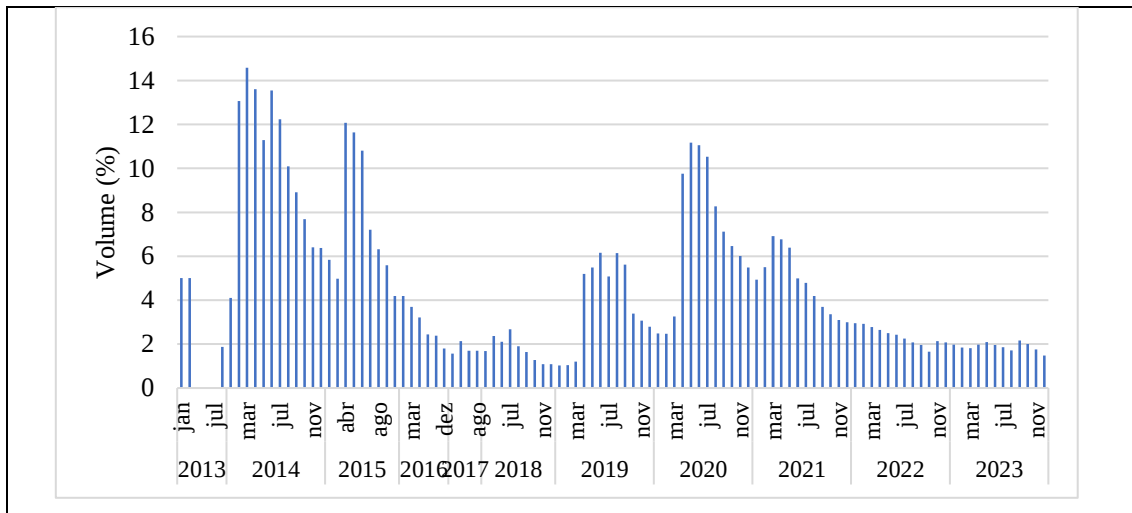
#### 4.2.2 Dados de volume útil dos reservatórios

Os dados de volume útil dos reservatórios de Lagoa do Barro, Algodões e Entremontes foram obtidos através do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), da ANA. A Figura 14, traz a média do volume útil calculada para cada mês, de acordo com a disponibilidade dos dados.

Para Algodões não havia dados relacionados ao ano de 2017 e nem após 2018. O ano de 2016 foi bastante crítico, principalmente para Lagoa do Barro e Algodões que estiveram praticamente secos. Outro fato que chama atenção é sobre o reservatório de Entremontes, ao longo dos anos desse estudo, não conseguir atingir mais do que 14% de sua capacidade.

Figura 14 - Volume útil dos reservatórios Lagoa do Barro, Algodões e Entremontes.





Fonte: ANA (2024).

### 4.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para um melhor entendimento dos processos metodológicos, a Figura 15 apresenta um fluxograma com as etapas desenvolvidas neste estudo. Posteriormente as etapas serão descritas detalhadamente.

Figura 15 - Fluxograma das etapas metodológicas.



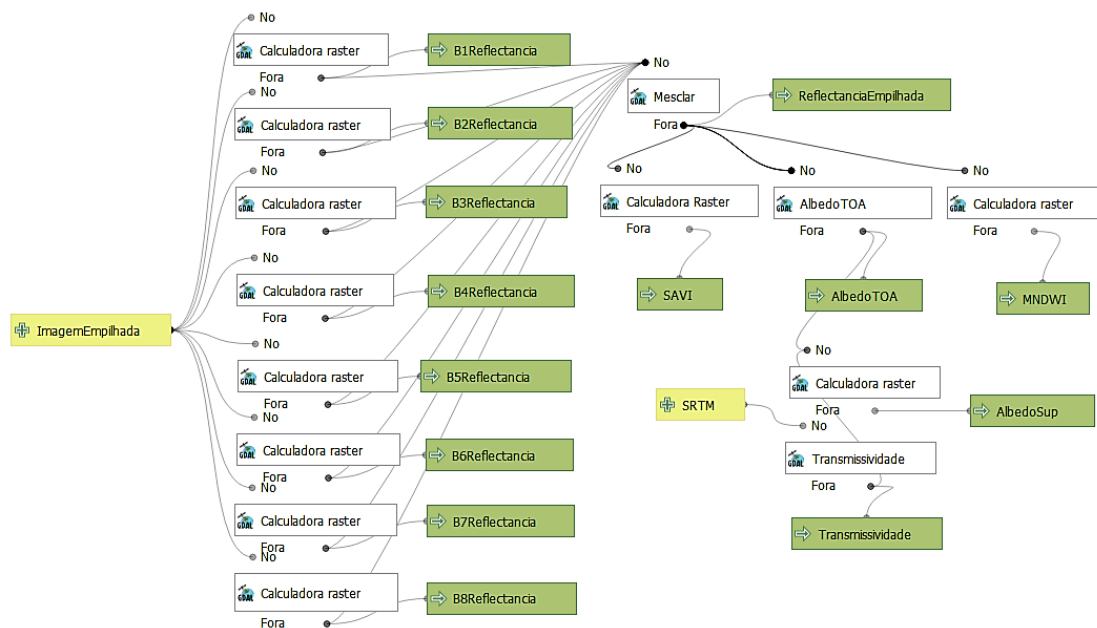
Fonte: A Autora (2024).

#### 4.3.1 Processamento digital das imagens

Todo processamento foi feito pelo software de livre acesso Quantum GIS (QGIS), versão 3.16.0, através do Modelador Gráfico (Figura 16). O Modelador Gráfico permite criar modelos complexos usando uma simples interface fácil de usar. Quando se trabalha com SIG,

a maioria das operações de análises não são isoladas, mas sim parte das cadeias de operações. Através do modelador gráfico, a cadeia de processos pode ser agregada num único processo, sendo mais fácil e mais conveniente a sua execução de um processo único num conjunto de diferentes dados de entrada. Não importa o número de etapas e os diferentes algoritmos envolvidos, o modelo é executado como um algoritmo único, poupando tempo e esforços, especialmente para modelos largos (QGIS, 2024).

Figura 16 - Modelador Gráfico do QGIS com algoritmo utilizado.



Fonte: A Autora (2024).

As imagens selecionadas foram referentes aos dias: 05/10/2013, 29/10/2016, 27/12/2020 e 07/03/2023, do satélite *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat 8), sensor *Operational Lander Imager* (OLI), Coleção 2, Nível 1, no topo da superfície (TOA), composta por bandas espectrais adquiridas gratuitamente através do site do *United States Geological Survey* (USGS, 2024). O critério para escolha das datas foi a menor incidência de nuvens e meses que contemplassem tanto o período seco, como o chuvoso.

Foram necessárias duas cenas para englobar toda a área da bacia do Brígida, sendo elas: órbita 217, ponto 065 e órbita 217 ponto 066. Ambas as imagens foram empilhadas, para então ser realizado o mosaico com as duas cenas. Em seguida, foi feito o recorte para a área de interesse e posteriormente as imagens orbitais e os arquivos vetoriais foram reprojetados para o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), UTM fuso 24 Sul.

#### 4.3.1.1 Mapa hipsométrico

A obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE) para a área da bacia hidrográfica do rio Brígida foi feita através do plugin “*Open Topography DEM Downloader*” do QGIS. O MDE escolhido foi o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial de 30 m.

#### 4.3.1.2 Reflectância

Para o processamento das imagens do LANDSAT-8 sensor OLI é necessária a conversão dos valores em nível de cinza (ND) para reflectância espectral. Utilizou-se os coeficientes radiométricos aditivos e multiplicativos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens e informações de características das bandas do sensor que constam na Tabela 1.

É preciso corrigir a refletância de acordo com o ângulo zenital solar ( $Z$ ) e o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol ( $dr$ ) na data da obtenção da imagem orbital e a distância Terra-Sol ( $d_{TS}$ ) disponível no arquivo metadados da imagem, em unidade astronômica, conforme as Equações 1 e 2:

$$\rho_{\lambda i} = \frac{(A_{pi} + M_{pi} * ND_i)}{\cos Z * dr} \quad (1)$$

$$dr = \left( \frac{1}{d_{TS}} \right)^2 \quad (2)$$

onde:

$\rho_{\lambda i}$  (adimensional) é a reflectância planetária no topo da atmosfera de cada banda  $i$ ;

$A_{pi}$  é o fator aditivo de redimensionamento de cada banda (disponível no arquivo metadados da imagem);

$M_{pi}$  é o fator multiplicativo de redimensionamento de cada banda (disponível no arquivo metadados da imagem);

$ND_i$  é o número digital correspondente a intensidade do pixel de cada banda;

$Z$  é o ângulo zenital solar obtido com base no ângulo de elevação do Sol ( $E$ ) disponível no arquivo metadados da imagem, uma vez que  $Z = 90 - E$ .

#### 4.3.1.3 SAVI

O *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI) foi desenvolvido por Huete (1988), sendo uma técnica de transformação que visa minimizar a influência da reflectância do solo nos índices de vegetação espectrais, que utilizam os comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo. Essa técnica permite modelar com mais precisão a radiância do infravermelho próximo nas copas mais abertas (Silva, Melo e Galvêncio, 2011). É processado de acordo com a Equação 3:

$$SAVI = \frac{(1 + L) * (\rho_{\lambda(NIR)} - \rho_{\lambda(RED)})}{(L + \rho_{\lambda(NIR)} + \rho_{\lambda(RED)})} \quad (3)$$

onde:

$\rho_{\lambda(NIR)}$  é a banda do infravermelho próximo;

$\rho_{\lambda(RED)}$  é a banda do vermelho;

L é o fator de ajuste ao solo que pode variar entre 0 e 1. O valor 0 não atinge mudanças e se assemelha ao NDVI; em áreas com vegetação de baixa densidade se atribui o valor 1; com vegetação de densidade intermediária, valor de 0,5; e para áreas com vegetação de altas densidades atribui o valor de 0,25 (Huete, 1988). Nesse sentido, no presente estudo, adotou-se o fator de ajuste no valor de 0,5 devido à região indicar uma cobertura vegetal intermediária na maior parte do ano, pois a Região Nordeste possui predominância do bioma Caatinga, no Semiárido Brasileiro (Silva, 2021).

#### 4.3.1.4 Albedo da superfície

O albedo de superfície, ou poder refletor da superfície é a fração incidente que é devolvida à atmosfera. Este é um parâmetro muito importante no balanço de radiação e de energia de uma superfície, (Leivas *et al.*, 2007). Para o cálculo do albedo planetário em imagens do Landsat 8, tem-se a Equação 4, seguindo Silva *et al.* (2016)

$$\alpha_{TOA} = 0,300 \rho_2 + 0,277 \rho_3 + 0,233 \rho_4 + 0,143 \rho_5 + 0,036 \rho_6 + 0,012 \rho_7 \quad (4)$$

onde:

$\rho_i$  é a reflectância planetária de cada banda do sensor OLI.

O albedo da superfície ( $\alpha$ ) ou albedo corrigido aos efeitos atmosféricos foi processado conforme a Equação 5 (Zhong e Li, 1988):

$$\alpha = \frac{\alpha_{TOA} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (5)$$

onde:

$\alpha_{TOA}$  é o albedo planetário;

$\alpha_p$  é a porção da radiação solar refletida pela atmosfera, considerado 0,03 conforme Bastiaanssen (2000);

$\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica para os dias de céu claro, conforme Equação 6 (Allen *et al.*, 2007)

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 * 10^{-5} * Z \quad (6)$$

onde:

Z corresponde a altitude de cada pixel (m), representado pelo Modelo Digital de Elevação (MDE).

#### 4.3.1.5 MNDWI

Proposto por Xu (2006), o *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) é uma derivação da equação do método do NDWI, que substitui a banda do infravermelho próximo para o infravermelho médio. O MNDWI consegue atribuir à água valores ainda mais positivos, visto que a banda do infravermelho médio absorve mais energia nos corpos d'água que a banda do infravermelho próximo. Dessa forma, é possível diferenciar a água das áreas construídas, pois o uso da banda do infravermelho médio atribui valores negativos às áreas construídas. Além disso, essa técnica pode aumentar o contraste com as áreas de solo, que apresentam maior refletância na banda do infravermelho médio em comparação com o infravermelho próximo. O cálculo do índice se dá por meio da Equação 7:

$$MNDWI = \frac{(\rho_{\lambda(GREEN)} - \rho_{\lambda(SWIR1)})}{(\rho_{\lambda(GREEN)} + \rho_{\lambda(SWIR1)})} \quad (7)$$

onde:

$\rho_{\lambda(\text{GREEN})}$  é a banda do verde;

$\rho_{\lambda(\text{SWIR1})}$  é a banda do infravermelho médio.

Após a obtenção do MNDWI, o arquivo raster foi transformado em vetor para calcular as áreas identificadas como feições de água e, assim, interpretar a variação entre os anos de estudo. O procedimento envolveu a obtenção de uma imagem binária através da ferramenta Calculadora Raster para o índice MNDWI, seguida pela criação da imagem binária, eliminando todos os pixels com valores menores que zero. Assim, restaram apenas os pixels correspondentes ao corpo hídrico que foram posteriormente convertidos para o formato vetorial para se obter o valor da área superficial.

#### 4.3.2 Classificação do uso e cobertura do solo

A análise do uso e cobertura do solo da área de estudo considerou os produtos provenientes da Coleção 8.0 do Projeto MapBiomass. Todos os mapas anuais de cobertura e uso da terra são produzidos a partir da classificação pixel a pixel de imagens Landsat. Todo processo é feito com extensivos algoritmos de aprendizagem de máquina (*machine learning*) através da plataforma *Google Earth Engine* que oferece imensa capacidade de processamento na nuvem (MapBiomass, 2024).

Os mapas gerados em formato raster, foram exportados para o QGIS. Utilizou-se a ferramenta “*r.report*”, da “Caixa de Ferramentas de Processamento”, para o cálculo das áreas. A ferramenta gera um arquivo de texto com o valor das áreas calculadas para cada classe de uso e cobertura do solo presente na imagem. O produto foi utilizado para a composição dos mapas de análise.

#### 4.3.3 Análises, comparação e mapeamento

A visualização da cartografia temática dos parâmetros, auxilia a entender os pontos mais críticos e as mudanças ocorridas. A avaliação da aplicação dos índices biofísicos foi realizada com base nos parâmetros estatísticos: mínimo, máximo, média, desvio padrão, histograma de frequência de pixels, coeficiente de correlação ( $r$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e também interpretação visual das imagens.

O coeficiente de correlação Pearson ( $r$ ) varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que o escore de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o escore da outra. No outro oposto, uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis (Figueiredo Filho e Silva Júnior, 2009). O cálculo se deu seguindo a Equação 8.

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

onde:

$r$  é o coeficiente de correlação de Pearson;

$x$  e  $y$  são os valores individuais nas séries de dados;

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias das séries de dados.

Para Cohen (1988), valores de correlação entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes. Dessa forma, quanto mais perto de 1 (independente do sinal) maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), é o quadrado do coeficiente de correlação e expressa a proporção da variância na variável dependente que é explicada pela variável independente. O  $R^2$  varia de 0 a 1, onde 0 indica que o modelo não explica nenhuma variância da variável dependente e 1 sugere que o modelo explica completamente a variância da variável dependente.

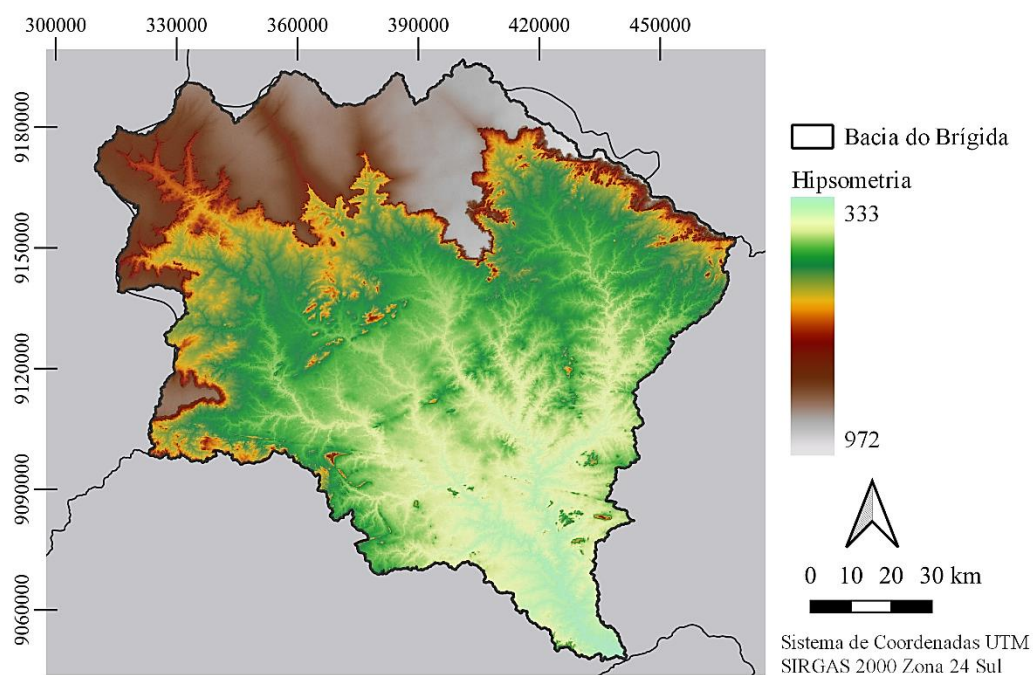
## 5 RESULTADOS E DICUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos sobre os parâmetros biofísicos: SAVI e albedo e a relação entre eles, a delimitação de áreas hídras através do MNDWI e a análise de uso e cobertura do solo com dados do MapBiomas, a partir da aplicação das metodologias.

### 5.1 COMPORTAMENTO HIPSOMÉTRICO DA ÁREA DE ESTUDO

A Figura 17 apresentou a variação espacial da hipsometria da bacia hidrográfica do rio Brígida. As cotas variam de 333 a 972 m, decrescendo do norte para o sul. A altitude média da bacia é de 557 m.

Figura 17 - Representação espacial da hipsometria da bacia hidrográfica do rio Brígida.

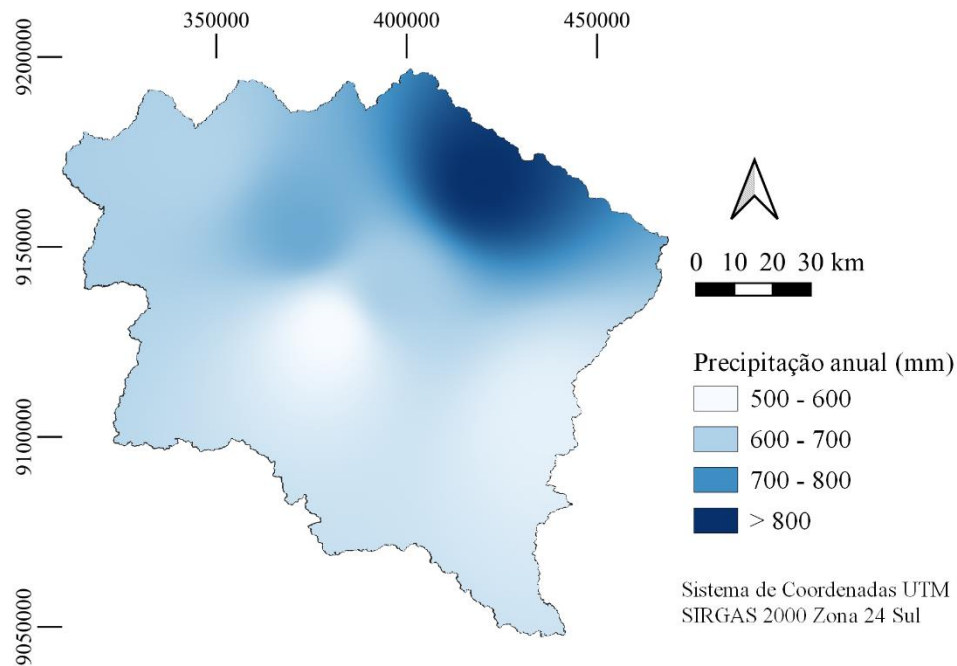


Fonte: A Autora (2024).

### 5.2 ESPACIALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO

A espacialização da precipitação através da ferramenta de interpolação IDW no QGIS, consta na Figura 18.

Figura 18 - Espacialização da precipitação na bacia do rio Brígida.



Fonte: A Autora (2024).

Os resultados mostraram que existem diferentes níveis de precipitação dentro da bacia. Galvêncio *et al.* (2007) identificaram quatro faixas de volume precipitado na bacia do Brígida, variando de 624,94 a 961,67 mm com maior precipitação na região da chapada do Araripe.

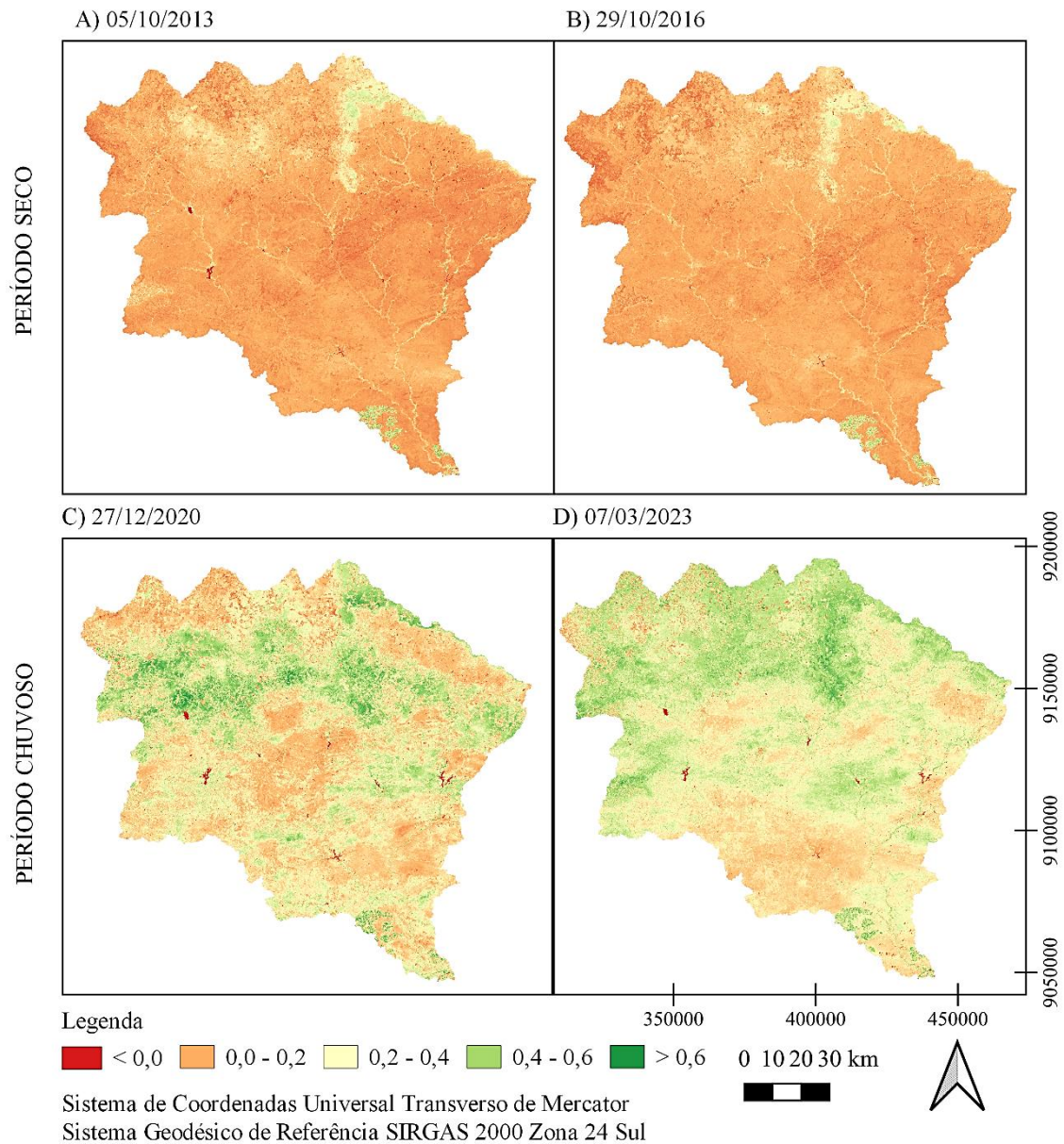
As maiores intensidades estão localizadas na porção norte onde se concentram as maiores altitudes abrangendo o planalto da Chapada do Araripe, área com considerável variabilidade espacial de precipitação e maior densidade de vegetação. Já a região sul e o centro, apresentaram os menores valores de precipitação pluviométrica. Apoiando os achados deste estudo, Sousa *et al.* (2023) observaram que na região norte da bacia do Brígida, a quantidade de precipitação aumentou com a elevação, e na parte sul, a diminuição da pluviometria está atrelada ao fato que a região faz parte da área de desertificação de Cabrobó, localizada no sul do Estado de Pernambuco, e é caracterizada pela ausência de cobertura vegetal e altos graus de erosão do solo.

### 5.3 SAVI

As cartas georreferenciadas representando a distribuição espacial do SAVI foram detalhadas na Figura 19. Ao analisar os resultados obtidos, são bem reconhecíveis as zonas com comportamento negativo variando até valores de 0,4 (entre o vermelho até o amarelo claro) e

as de comportamento positivo com valores maiores que 0,4 mostrando áreas onde a vegetação possui bons atributos de vigor (em tons de verde).

Figura 19 - Índice SAVI para a bacia do Brígida nos anos de 2013, 2016, 2020 e 2023.



Fonte: A Autora (2024).

É perceptível a alteração do perfil da vegetação na região entre os períodos seco e chuvoso, identificada pela substituição de áreas na cor vermelho que deram lugar a maiores áreas em verde. No período chuvoso, a presença de vigor vegetativo é melhor distribuída pela área da bacia, entretanto é possível perceber uma maior concentração de vegetação na porção norte, região onde se localiza uma parte da Chapada do Araripe e se concentram os maiores

índices pluviométricos (Figura 18), as maiores altitudes (Figura 17) e o clima Aw (Figura 7). Sousa *et al.* (2023), também identificaram essa maior concentração constatando em seu estudo que existe um aumento da quantidade de precipitação proporcional ao aumento da elevação da bacia hidrográfica do rio Brígida, que por sua vez, tem a elevação mais alta identificada em sua região norte, abrangendo a APA da Chapada do Araripe.

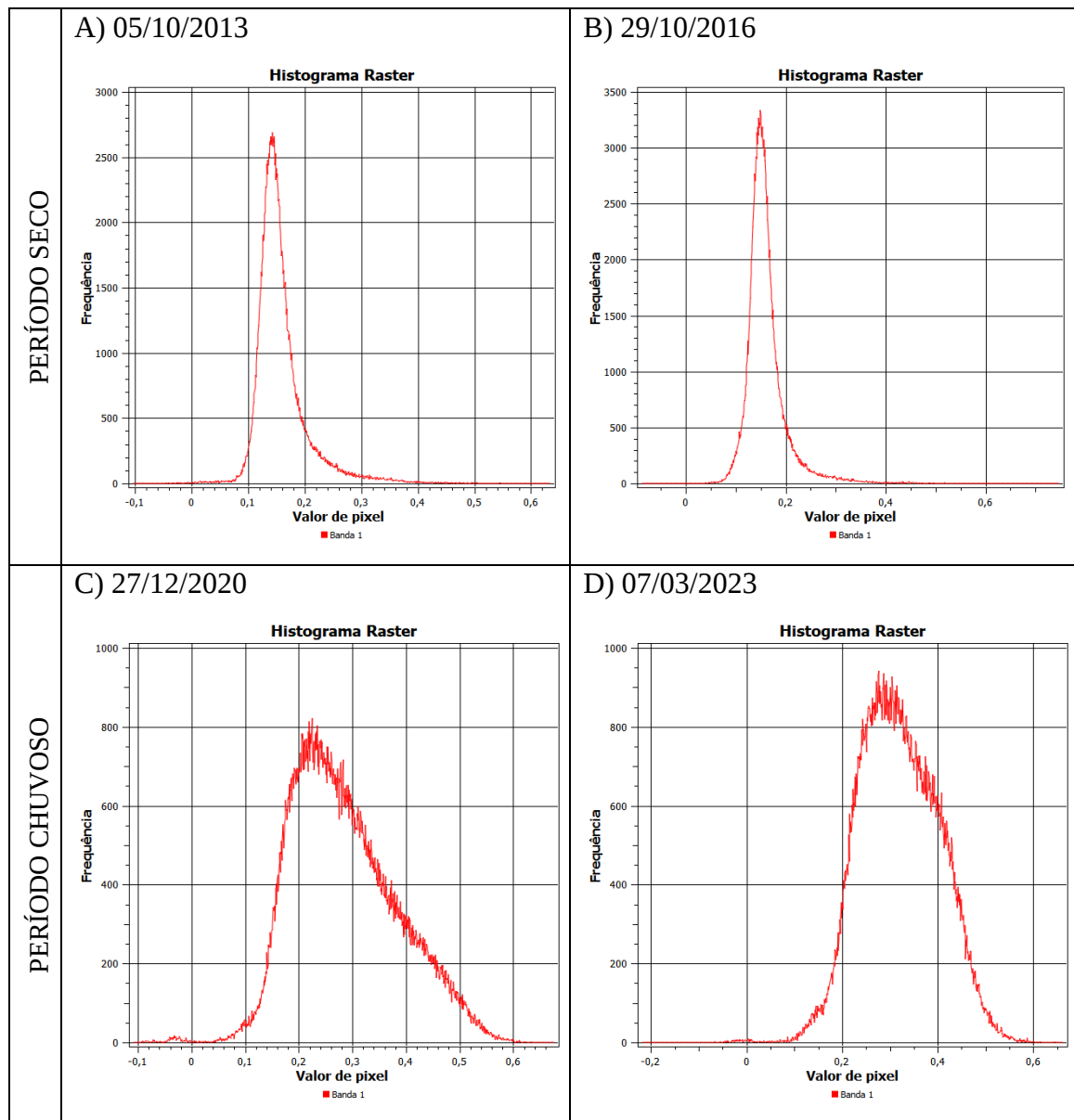
Essa maior concentração também pode ter relação com o que Pereira *et al.* (2020) observaram em seu mapeamento na APA das Onças no estado da Paraíba, em que as áreas de vegetação mais preservada predominaram nas áreas de maior altitude, com cotas de hipsometria acima dos 800 m (Figura 17), uma vez que nessas áreas há uma maior dificuldade, em virtude do fator topográfico, para o desenvolvimento de atividades e ocupação humana, significando, portanto, na maior conservação de seus padrões vegetacionais.

No período seco, também foi possível notar que há uma concentração de áreas verdes em um trecho na parte norte da bacia onde a altitude chega aos 900 metros. Resultados semelhantes foram encontrados por Galvêncio *et al.* (2016) quando analisaram a variação da vegetação dos períodos secos e chuvosos através do SAVI no município de Belo Jardim-PE e constataram que na estação seca, ocorreu uma mudança no perfil do dossel das plantas da região se concentrando um pouco de vegetação densa apenas nas áreas mais altas, entre 800 e 1.100 metros.

Observando o histograma do raster do SAVI (Figura 20), notou-se que há o mesmo comportamento na distribuição das duas imagens do período seco (Figura 20A e 20B), apresentando uma curva mais acentuada e com pico de frequência entre os valores 0,1 e 0,2, corroborando com o que foi visto nos mapas da Figura 19A e 19B, onde predomina a cor mais alaranjada correspondente a essa classe.

Para o período chuvoso, na imagem de dezembro de 2020, a maior frequência foi registrada entre 0,2 e 0,3 e na imagem de março de 2023 a maior distribuição se deu entre 0,2 e 0,4, gerando um leve deslocamento da curva para direita. Esse fato pode ser explicado pela distribuição da precipitação ao longo do ano, sendo março o mês com maior concentração de chuvas na média histórica e tendo apresentado também um maior acumulado de chuvas 30 dias antes da passagem do satélite no ano de 2023 (Tabela 3) que acabou acarretando no aumento do vigor vegetativo.

Figura 20 - Histograma do raster do índice de vegetação SAVI.



Fonte: A Autora (2024).

Na Tabela 4 constam os dados estatísticos do SAVI para cada imagem estudada. A média aumentou nas imagens do período chuvoso conforme esperado visto que houve aumento na frequência de pixels com valores mais positivos.

Tabela 4 - Dados estatísticos do SAVI.

| Período | Data       | Média | Desvio Padrão |
|---------|------------|-------|---------------|
| SECO    | 05/10/2013 | 0,159 | 0,047         |
|         | 29/10/2016 | 0,160 | 0,040         |
| CHUVOSO | 27/12/2020 | 0,285 | 0,098         |
|         | 07/03/2023 | 0,319 | 0,082         |

Fonte: A Autora (2024).

Rodrigues *et al.* (2022) analisando a dinâmica espacial e temporal do uso e ocupação do solo no município de Condado-PB através do índice SAVI, viram que o perímetro irrigado presente na sua área de estudo, mesmo tratando-se do período seco, a irrigação garantiu a reflectância espectral referente à vegetação arbórea e arbustiva.

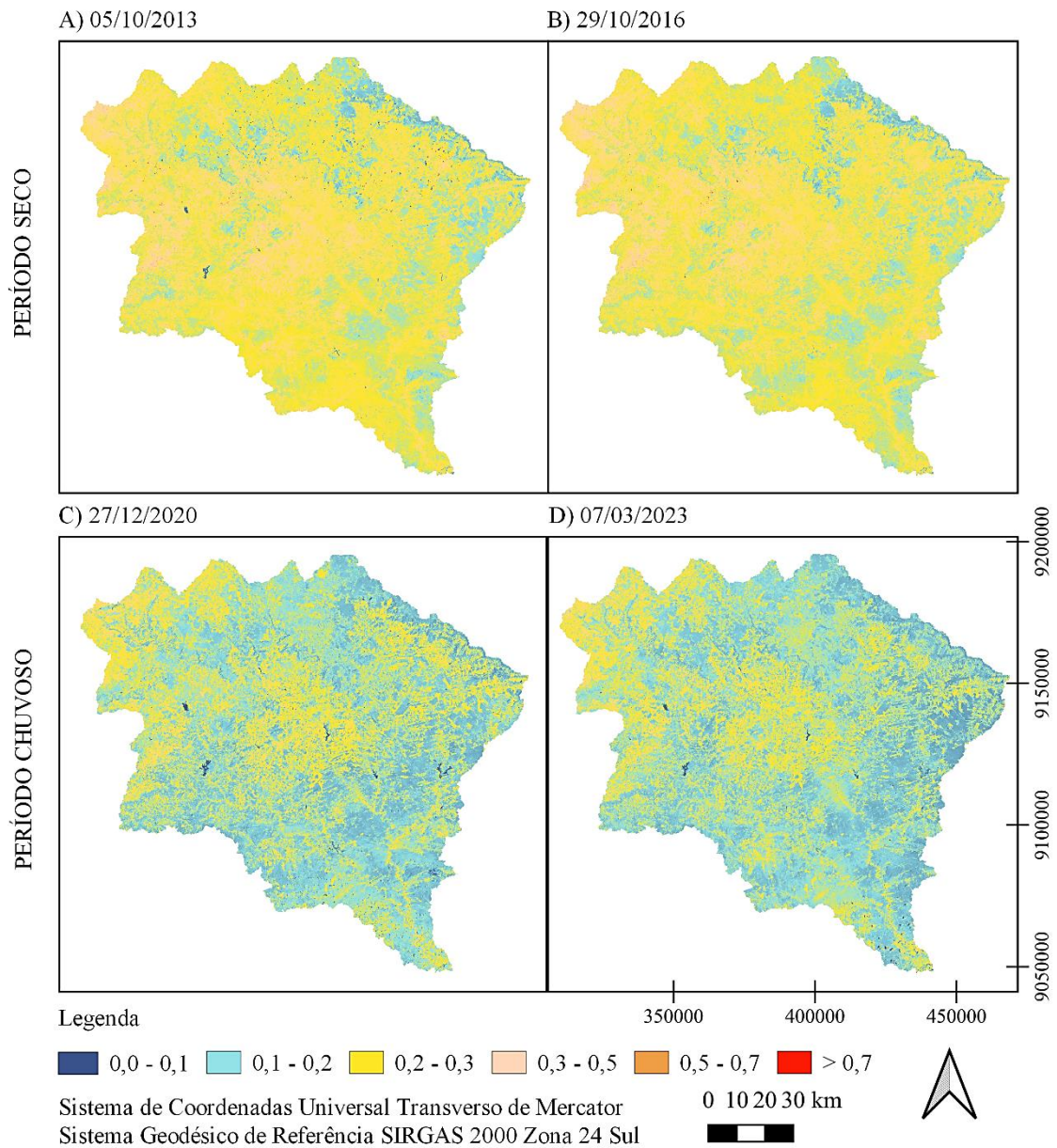
O desvio padrão se mostrou mais próximo de zero nos anos secos, indicando uma maior homogeneidade dos dados em relação os anos chuvosos, entretanto a diferença foi pequena. Rêgo *et al.* (2012) encontraram valores parecidos de desvio padrão para o SAVI no período seco de 0,06, mas já para o chuvoso de o resultado foi de 0,14.

#### 5.4 ALBEDO DA SUPERFÍCIE

As cartas georreferenciadas representando a distribuição espacial do albedo da superfície foram apresentadas na Figura 21. Assim como no SAVI, pode-se notar que o processo de aumento de precipitação no período chuvoso gera uma mudança da resposta espectral da região, onde há uma diminuição da predominância de pixels correspondentes a classe representada pela cor amarela (0,2 – 0,3) e o aumento de pixels da classe azul claro (0,1 – 0,2).

Alves *et al.* (2014) quando pesquisaram o albedo na área da bacia do alto curso do Rio Paraíba, localizada na parte sudoeste do Planalto da Borborema, no estado da Paraíba, relataram que a variação desta variável depende da estação do ano, uma vez que essas mudanças coincidem com as mudanças nas estações chuvosa e seca.

Figura 21 - Albedo para a bacia do Brígida nos anos de 2013, 2016, 2020 e 2023.

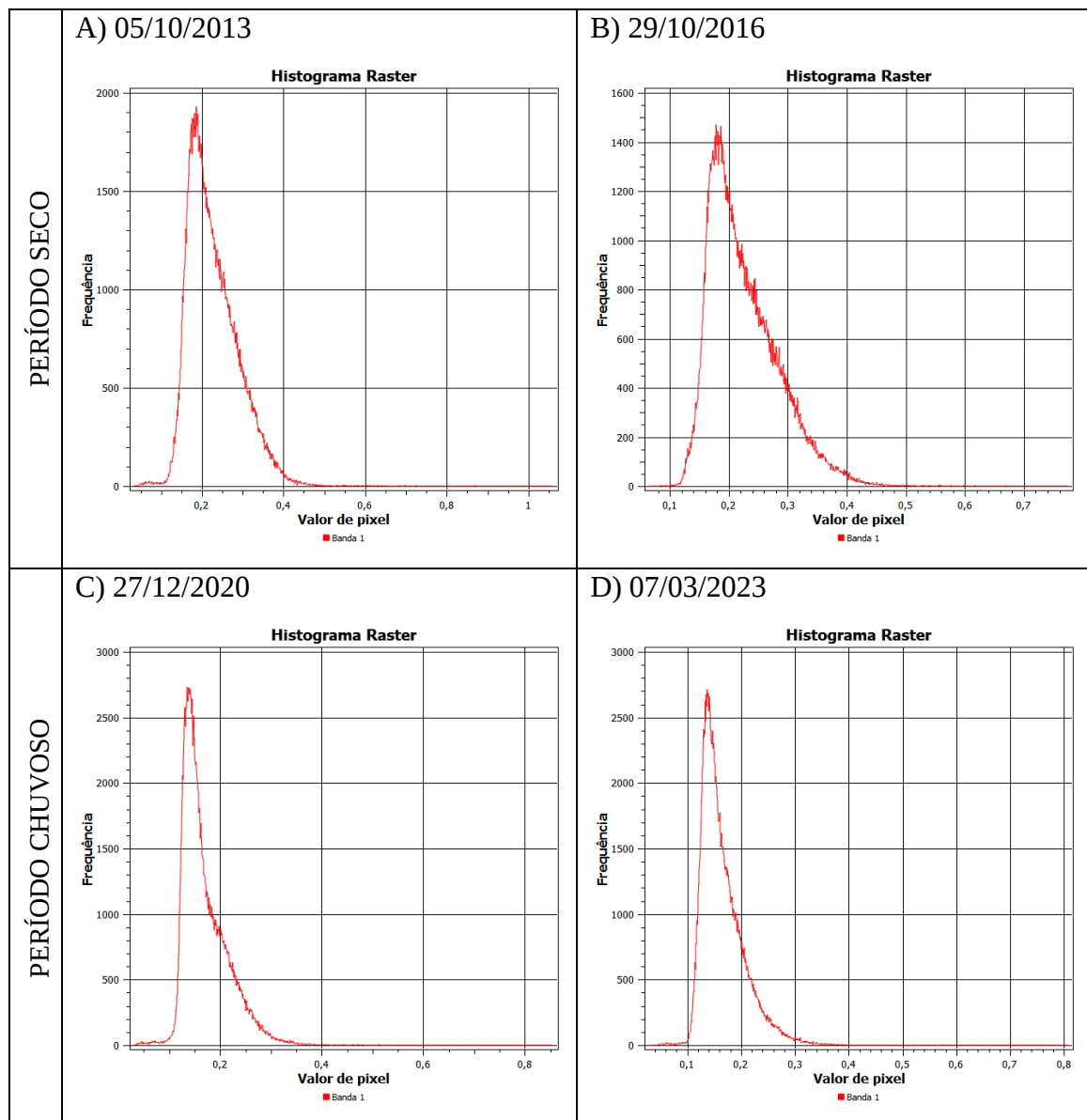


Fonte: A Autora (2024).

Essa diminuição da classe (0,2 – 0,3) e aumento da classe (0,1 – 0,2) foi vista também através do histograma do raster do albedo (Figura 22), onde notou-se que no período chuvoso, o pico de frequência desloca-se para a esquerda, indicando que a maior presença de pixels está entre 0,1 – 0,2. Wang e Davidson (2007) afirmaram que as condições hídricas do solo e da planta influenciam diretamente os padrões sazonais do albedo. Solos mais úmidos absorvem mais radiação eletromagnética e, devido à maior umidade, reduzem a refletância, resultando na diminuição dos valores de albedo, corroborando com os resultados encontrados.

A predominância da classe (0,2 – 0,3) no período seco corroboram com Ferreira Júnior e Dantas (2018) que verificaram valores de albedo de 0,21 correspondendo a áreas de pouca vegetação, na bacia hidrográfica do Rio Pacoti-CE, que tem características semelhantes a bacia estudada com vegetação de caatinga e clima semiárido.

Figura 22 - Histograma do raster do albedo.



Fonte: A Autora (2024).

Outro fator que chama atenção nas imagens do período seco (Figura 21A e 21B), é que assim como no SAVI, há uma concentração de pixels com valores mais baixos de albedo, correspondendo a vegetação mais úmida na parte norte da bacia, região da Chapada do Araripe. Santos *et al.* (2017b), estimaram a evapotranspiração real (ETa) na bacia do rio Brígida,

comparando o ano seco de 1990 e o ano chuvoso de 2009 e constataram que áreas com maiores altitudes na parte norte da bacia apresentavam maior cobertura vegetal, valores mais baixos de albedo e temperatura de superfície e, maiores valores de índices de vegetação, incluindo o SAVI, e ETa (Evapotranspiração Real) para ambos os anos analisados, identificado assim um padrão espacial bem definido para estas variáveis na bacia.

Na Tabela 5 constam os dados estatísticos do albedo para cada imagem estudada. A média diminui nas imagens do período chuvoso conforme esperado visto que houve maior frequência de pixels na classe com valores menores (0,1 – 0,2) em relação ao período seco, como visto nos mapas do albedo (Figura 21) e no histograma (Figura 22).

Tabela 5 - Dados estatísticos do albedo.

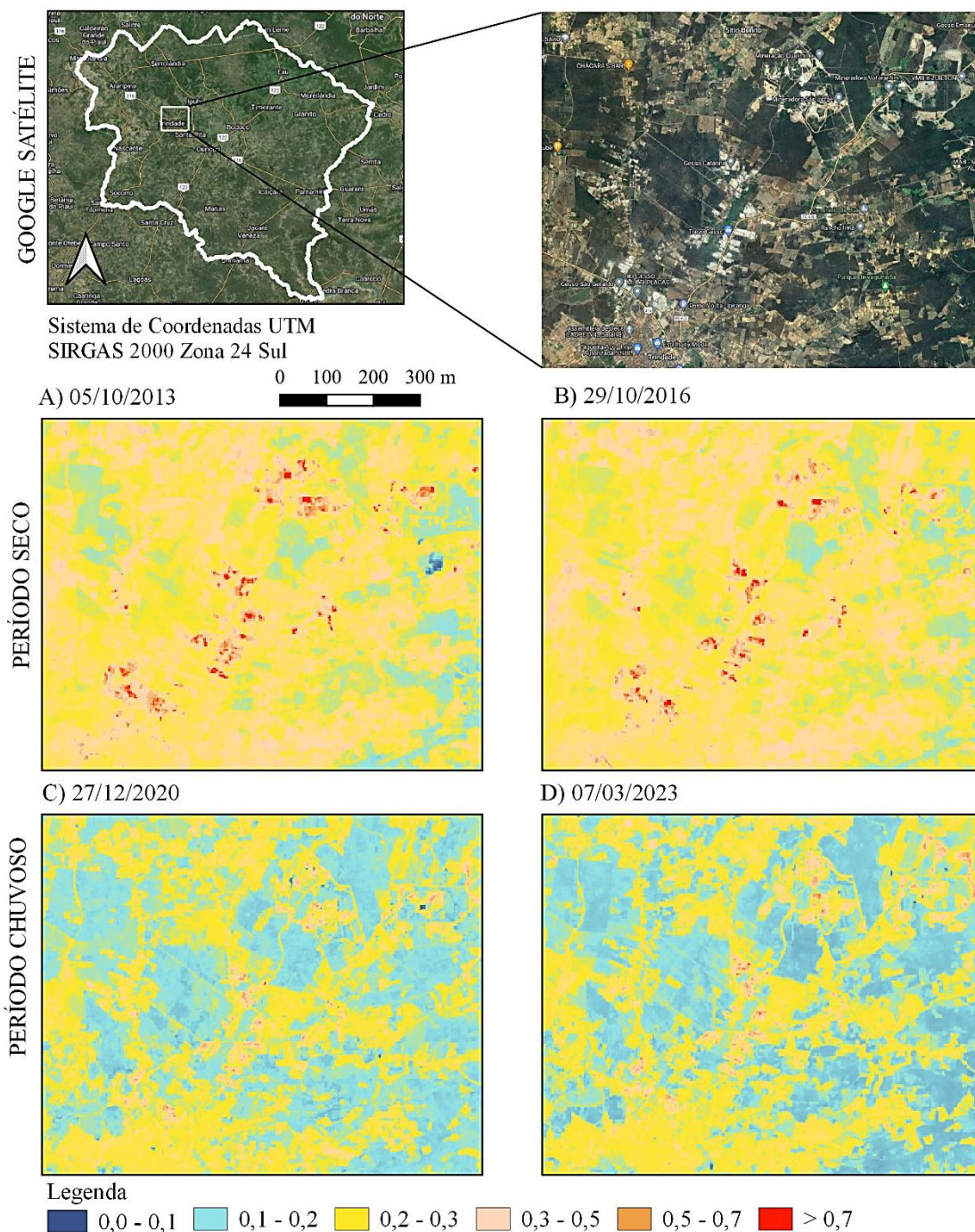
| Período | Data       | Média | Desvio Padrão |
|---------|------------|-------|---------------|
| SECO    | 05/10/2013 | 0,228 | 0,063         |
|         | 29/10/2016 | 0,225 | 0,058         |
| CHUVOSO | 27/12/2020 | 0,170 | 0,046         |
|         | 07/03/2023 | 0,165 | 0,040         |

Fonte: A Autora (2024).

Ainda na Tabela 5, o desvio padrão se mostrou mais próximo de zero nos anos chuvosos, indicando uma maior homogeneidade dos dados em relação os anos secos, entretanto a diferença foi pequena. Resultados semelhantes foram encontrados por Lima *et al.* (2021) em estudo no município de Petrolina, onde o desvio padrão variou entre 0,04 a 0,07 e os valores mínimos entre 0,02 e 0,04, sendo estes condizentes com os valores encontrados nesta pesquisa.

Outro ponto importante que chama atenção, é o comportamento do albedo em relação a presença de diversas mineradoras de gesso na região, conhecida como o Pólo Gesseiro do Araripe. Um recorte foi feito para melhor visualização e análise (Figura 23).

Figura 23 - Recorte da imagem do albedo contendo mineradoras de gesso.



Fonte: A Autora (2024).

O gesso é um material branco e dessa forma grande parte da energia incidente é refletida. Segundo Moraes, Finger e Paulo (2012), em uma superfície branca, o índice do albedo poderá aproximar-se de 1, valor de um corpo branco ideal com reflexão total, ou seja, com reflexão de 100% da radiação incidida sobre ele.

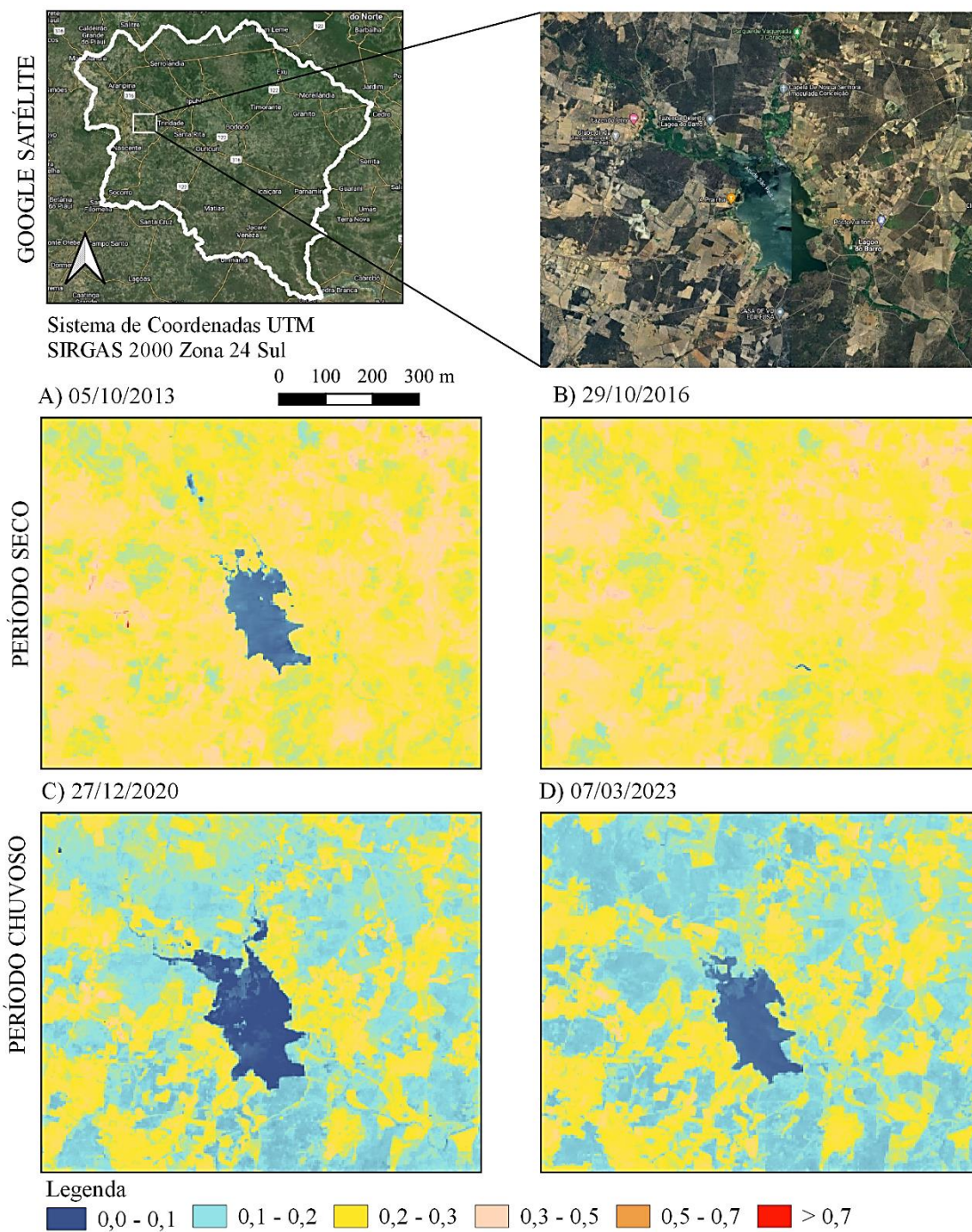
A imagem de satélite do Google na Figura 23, mostra área urbana do município de Trindade (na parte inferior esquerda) e diversas mineradoras de gesso no seu entorno identificadas pela coloração mais clara. Essas áreas ficam bem evidenciadas principalmente no período seco onde os valores de albedo foram maiores.

A área urbana ficou representada principalmente pelas classes entre 0,2 a 0,5. Giongo e Vettorazzi (2014) obtiveram resultados significantes acima de 0,31 para áreas específicas, com pouca ou nenhuma vegetação, como áreas urbanizadas e áreas antropizadas, além de áreas agrícolas, que estavam com solo exposto. Ferreira Júnior e Dantas (2018) encontraram valores entre 0,21 e 0,36 relacionados a solo exposto e áreas com pouca vegetação que podem também significar áreas com resposta espectral para regiões com atividades antrópicas, como comunidades rurais.

O comportamento do albedo de superfície também foi analisado em relação a um corpo hídrico (Figura 24). Verificou-se presença do reservatório Lagoa do Barro na tonalidade azul escuro (classe 0,0 – 0,1). Silva *et al.* (2019) encontraram valores de albedo de 0,05 no leito do Rio São Francisco. Silva *et al.* (2016), computando o albedo da superfície com imagens Landsat-8 OLI no semiárido brasileiro, encontraram valores de albedo para o ano de 2013, inferiores a 0,09 compreendendo os corpos d'água (represa de São Gonçalo e pequenos lagos, rios e córregos). As áreas urbanas, em geral, apresentam albedo superior a 25%, o que também é observado em áreas de solo com grande exposição, corroborando com os resultados encontrados.

No ano de 2016, o reservatório encontrava-se seco como pode ser visto na Figura 24B. Esse fato é confirmado pelos dados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da ANA (2024) que indicou a falta de água no reservatório nesse período (Figura 14).

Figura 24 - Recorte da imagem do albedo contendo o reservatório Lagoa do Barro.

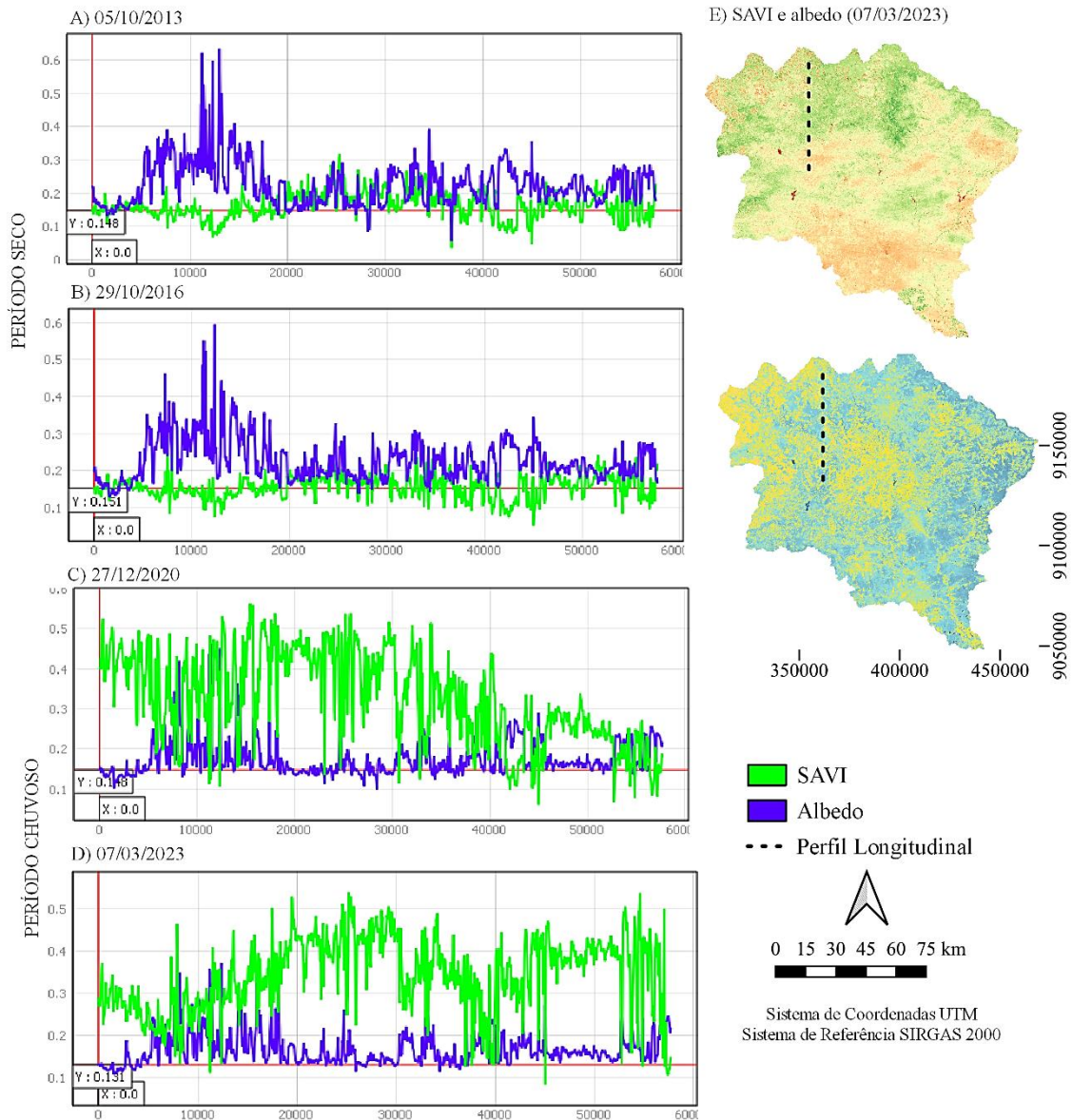


Fonte: A Autora (2024).

## 5.5 RELAÇÃO ENTRE SAVI E ALBEDO DA SUPERFÍCIE

Afim de entender o comportamento de redução ou aumento da vegetação através do monitoramento temporal e espacial dos parâmetros biofísicos SAVI e albedo, traçou-se um perfil longitudinal representado na Figura 25.

Figura 25 - Perfil longitudinal do SAVI e albedo.



Fonte: A Autora (2024).

A escolha do local para o traçado do perfil foi feita de modo que abrangesse a maioria dos usos e coberturas do solo presente na bacia. Buscou-se abranger parte da Chapada do Araripe, área urbana do município de Trindade, área de mineração de gesso e regiões de caatinga.

Observou-se o mesmo padrão nos anos secos entre si, como também nos anos chuvosos. Entretanto, entre o período seco e chuvoso houve grande mudança principalmente no SAVI evidenciando a diferença da condição da vegetação entre os períodos distintos de precipitação. Os maiores valores de albedo foram registrados no período seco, confirmando os resultados demonstrados pelo histograma (Figura 22) e os picos se referem as áreas de mineração de gesso.

Além disso, outro ponto observado é uma provável relação inversamente proporcional entre os dois índices. De acordo com Bezerra (2020), diferentes estudos detectaram as relações inversas entre o albedo e o índice de vegetação, indicando que a retirada da vegetação favorece o aumento do albedo, que altera o saldo de radiação.

Alves *et al.* (2018) averiguaram na bacia hidrográfica do alto curso do rio Paraíba que quando a vegetação está mais verde e densa, reflete menos, apresentando menor albedo. À medida que a vegetação diminui ou perde sua folhagem devido ao estresse hídrico da estação seca, a refletividade aumenta, pois o solo fica mais descoberto e as áreas mais claras. Por outro lado, durante a estação chuvosa, quando a vegetação se desenvolve, o albedo diminui consideravelmente. Este mesmo comportamento foi identificado nesta pesquisa.

Com o intuito que analisar essa relação, foram escolhidos 200 pontos distribuídos em alvos com menores valores de albedo (reservatórios e vegetação úmida como perímetros irrigados) e alvos com maiores valores de albedo (área urbana e mineradoras de gesso). A Tabela 6 e a Figura 26 mostraram os valores obtidos e os gráficos de dispersão. Os gráficos a esquerda de cor azul indicam a correlação entre os alvos com menores valores de albedo e os gráficos a direita de cor laranja representam os alvos com maiores valores de albedo.

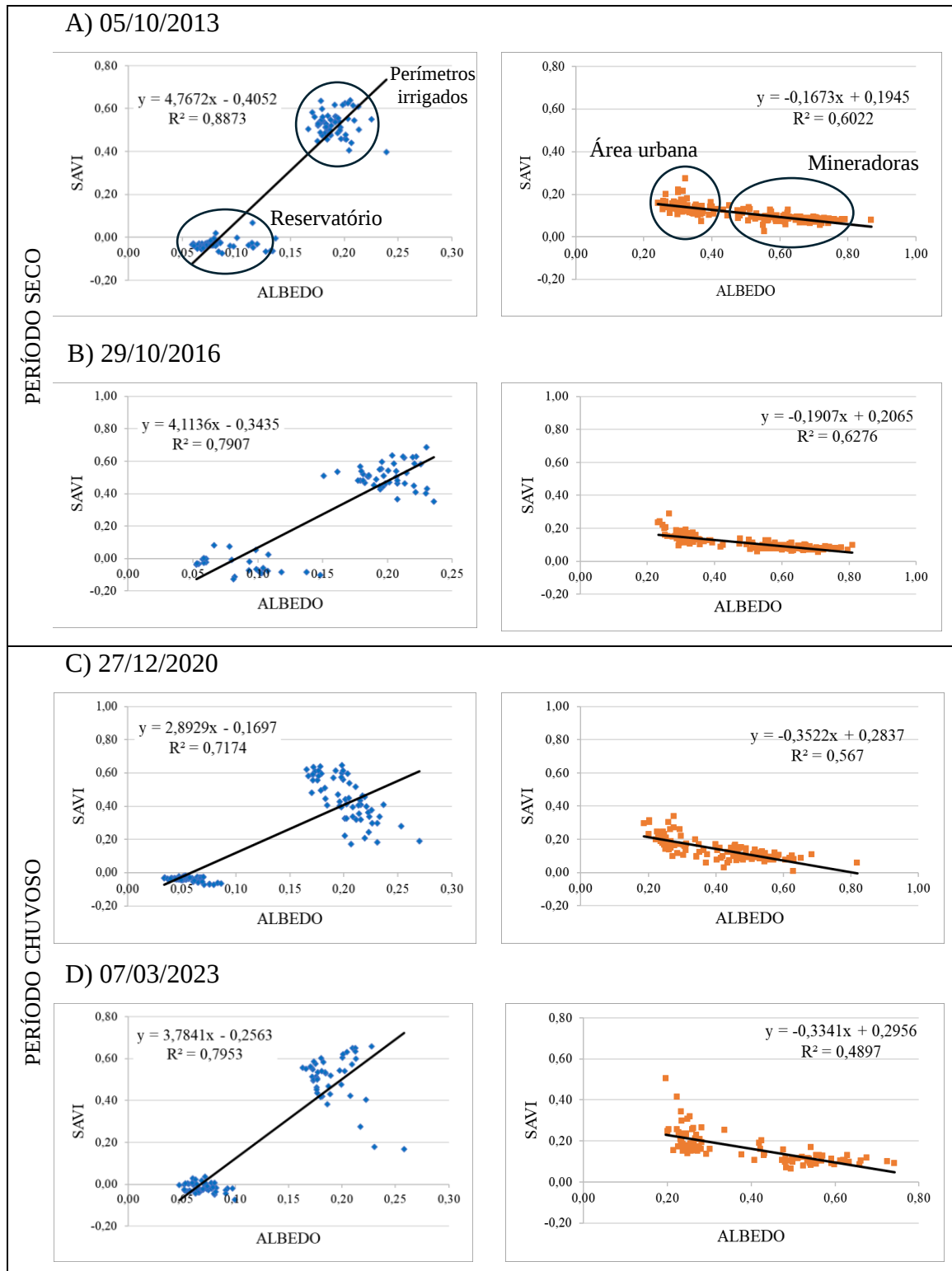
O valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) apresentou resultados mais satisfatórios para os alvos com menores valores de albedo tanto no período chuvoso quanto no seco.

Tabela 6 - Coeficiente de correlação (r) e  $R^2$  entre os pares de grandezas analisados.

| Data               |            |                         | SAVI x Albedo<br>Menor | SAVI x Albedo<br>Maior |
|--------------------|------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| PERÍODO<br>SECO    | 05/10/2013 | Coef. de Correlação (r) | 0,942                  | -0,776                 |
|                    |            | $R^2$                   | 0,887                  | 0,602                  |
|                    | 29/10/2016 | Coef. de Correlação (r) | 0,889                  | -0,792                 |
|                    |            | $R^2$                   | 0,791                  | 0,628                  |
| PERÍODO<br>CHUVOSO | 27/12/2020 | Coef. de Correlação (r) | 0,847                  | -0,753                 |
|                    |            | $R^2$                   | 0,717                  | 0,567                  |
|                    | 07/03/2023 | Coef. de Correlação (r) | 0,892                  | -0,700                 |
|                    |            | $R^2$                   | 0,795                  | 0,490                  |

Fonte: A Autora (2024).

Figura 26 - Valores de  $R^2$  para menores valores de albedo (azul) e maiores valores de albedo (laranja).



Fonte: A Autora (2024).

Pela Tabela 6, observando o Coeficiente de Correlação ( $r$ ) é possível deduzir algumas conclusões. Em todos os cenários de maiores valores de albedo, indicou-se uma correlação negativa com o SAVI, mostrando que há uma tendência de diminuição do índice de vegetação

ao passo que o albedo aumenta, como esperado. Alves *et al.* (2014) evidenciaram que os índices de vegetação (NDVI e SAVI) e o albedo tem comportamento oposto, ou seja, à medida que o albedo diminui o índice de vegetação aumenta.

Entretanto, esse mesmo comportamento não ocorreu para os menores valores de albedo que apresentou forte correlação, porém positiva. Uma hipótese é que pelos menores valores de albedo estarem associados a áreas de corpos hídricos, esses alvos apresentam resposta espectral do albedo diferente da vegetação influenciando na relação com esses índices.

Guilherme *et al.* (2020) em estudo analisando a relação entre tipos de cobertura do solo com a temperatura de superfície utilizando índices espectrais, entre eles o albedo, utilizou amostras de pontos nas quais foram descartados os pontos correspondentes aos corpos hídricos, pois os autores acreditam distorceria os resultados. Dessa forma, cabe uma reflexão e mostra-se a necessidade de estudos mais aprofundados nesse sentido.

## 5.6 DELIMITAÇÃO DE ÁREAS HÍDRICAS ATRAVÉS DO MNDWI

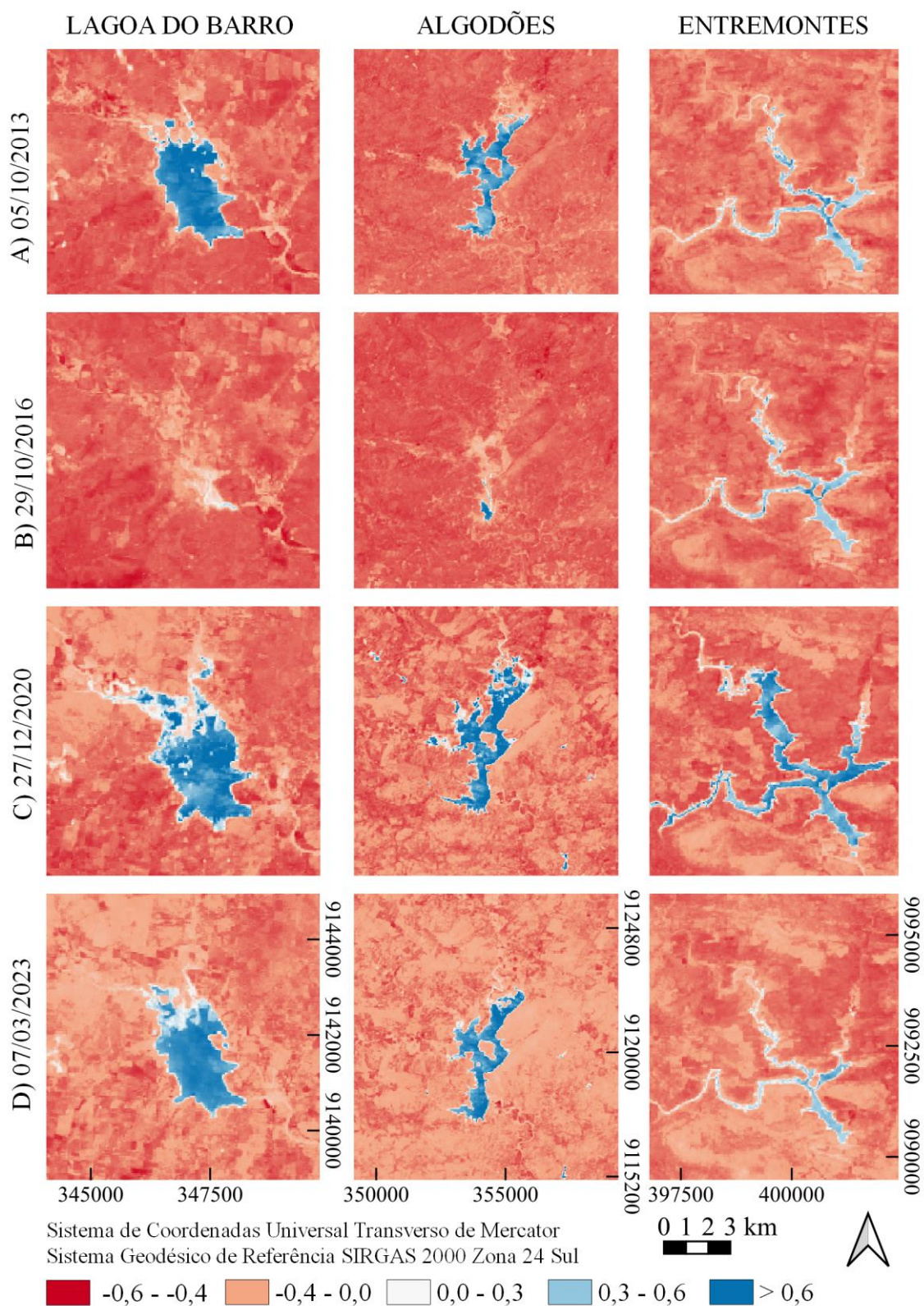
Visando estudar a dinâmica espaço-temporal de reservatórios presentes na bacia do Brígida, no período de tempo desse estudo, de 2013 a 2023, utilizou-se o *Modified Normalized Water Difference Index* (MNDWI) para delimitação dos espelhos d'água dos corpos hídricos. De acordo com Ali *et al.* (2019), o MNDWI é um dos métodos mais precisos para detectar, medir e monitorar os corpos d'água superficiais pois eles podem se aglomerar em duas classes compostas por áreas com água e não-água.

A Figura 27 mostrou as cartas georreferenciadas do índice MNDWI, com foco nos reservatórios escolhidos: Lagoa do Barro (localizado no município de Araripina), Algodões (localizado no município de Ouricuri) e Entremontes (localizado no município de Parnamirim).

É possível identificar que houve variações na área do espelho d'água dos reservatórios ao longo do tempo, alternando entre períodos com maior volume de água e períodos mais secos.

A presença de água é indicada pelas classes do índice com valores positivos (MNDWI > 0), que são caracterizados pelas cores branca e tons de azul. Leonardo *et al.* (2021), utilizaram o MNDWI na região do entorno do reservatório de Poço da Cruz - PE e encontraram valores superiores a 0,624 para a classe que representa o corpo hídrico.

Figura 27 - Índice MNDWI para reservatórios da bacia do Brígida nos anos de 2013, 2016, 2020 e 2023.



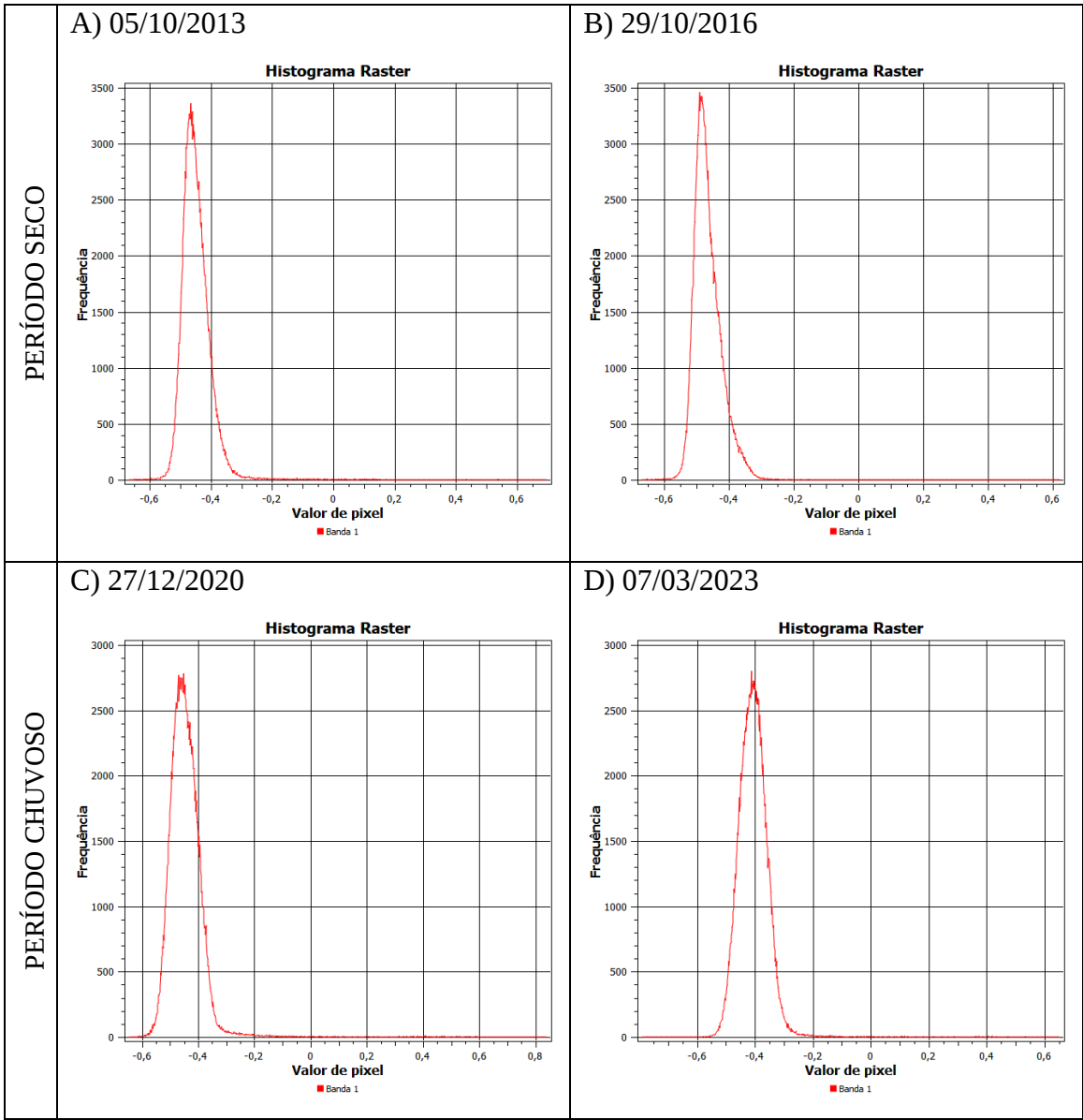
Fonte: A Autora (2024).

As áreas não-hídricas, como por exemplo, solo exposto e vegetação, no entorno dos reservatórios, são evidenciadas por valores negativos (MNDWI < 0) indicados pelas classes na

cor vermelha. Leonardo *et al.* (2021) também encontraram resultados semelhantes na região de solo em torno do reservatório de Poço da Cruz com os valores mais baixos para o MNDWI entre -0,4 e -0,6.

Nas imagens referentes ao período seco ficou evidenciado um estresse hídrico sofrido pela cobertura vegetal, caracterizado pela predominância de tons vermelhos mais fortes do que no período úmido. Esse fato também é confirmado pelo histograma do raster do MNDWI na Figura 28, onde o pico de maior frequência de pixels se encontra entre os valores -0,6 e -0,4. No período chuvoso, esse pico se desloca para direita principalmente na imagem de março de 2023 por ser o mês mais chuvoso, indicando uma melhor caracterização da cobertura vegetal.

Figura 28 - Histograma do raster do MNDWI.

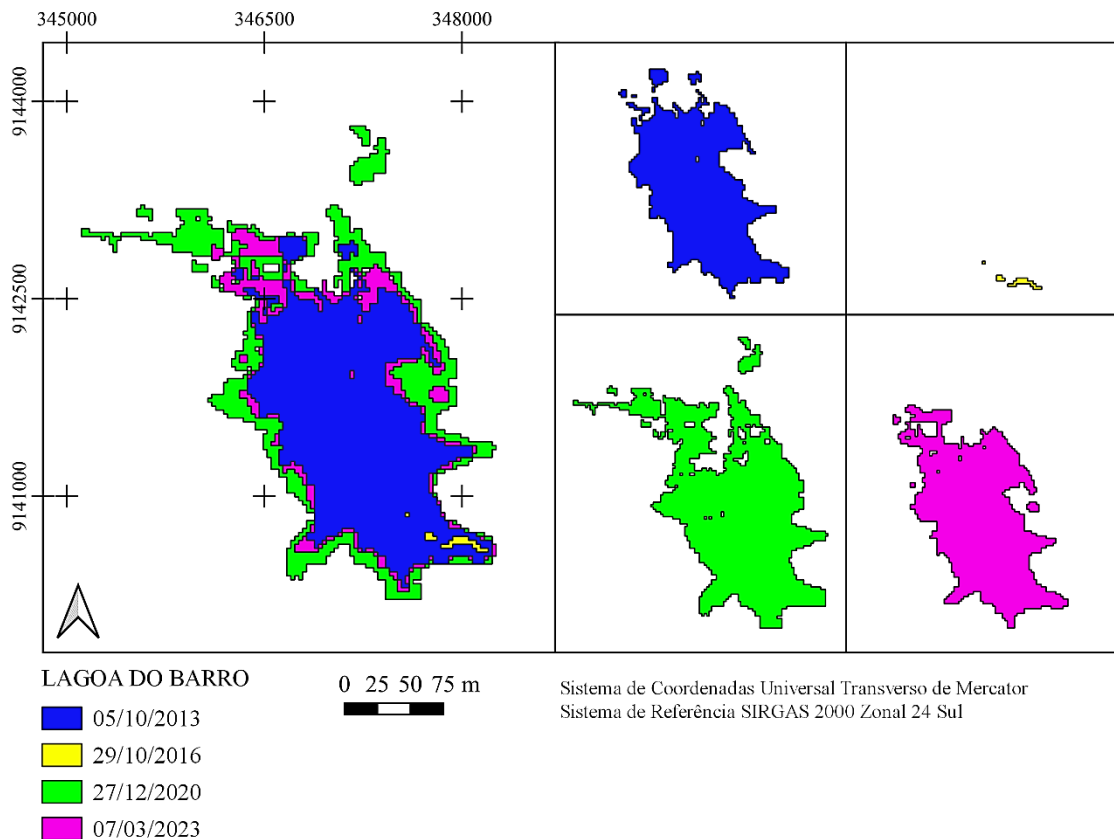


Fonte: A Autora (2024).

### 5.5.1 Reservatório Lagoa do Barro

A realização da técnica de vetorização possibilitou o cálculo da área utilizando ferramentas do QGIS. A análise comparativa da área superficial do espelho d'água do reservatório foi detalhada na Figura 29.

Figura 29 - Área superficial do espelho d'água do reservatório de Lagoa do Barro.



Fonte: A Autora (2024).

Observou-se que o ano de 2016 foi o mais crítico dos anos analisados onde o reservatório ficou praticamente seco. Analisando a distribuição pluviométrica no posto localizado no município de Araripina (Figura 12) é possível perceber que 2016 foi um ano mais seco, com a maioria dos meses com chuva abaixo do esperado. A precipitação nesse ano foi de 561 mm, sendo a menor dos quatro anos analisados (Figura 13 e Tabela 7), se concentrando nos primeiros meses do ano (Figura 12). Nos meses que antecederam a data da imagem de 2016, entre abril e setembro, a precipitação acumulada foi de 78,6 mm, não sendo suficiente para influenciar na recarga hídrica do reservatório.

Um estudo feito por Marengo *et al.* (2018), avaliou os padrões climáticos de seca no Nordeste brasileiro de 2010 a 2016 e constataram que houve uma sequência de anos secos que afetaram os níveis dos reservatórios na região, levando a uma crise hídrica.

Bezerra e Bezerra (2016) ressaltam que na porção Setentrional nordestina brasileira a área detentora dos menores índices pluviométricos é onde estão localizados a maioria dos reservatórios responsáveis pela demanda hídrica para usos múltiplos.

A área superficial do espelho d’água calculada para o reservatório de Lagoa do Barro, foi detalhada na Tabela 7. O ano de 2020 apresentou a maior área superficial, seguido por 2023 e 2013. Esses resultados corroboram com os dados de volume do SAR obtidos pela ANA (2024), que indicaram que o reservatório estava praticamente seco no ano de 2016 e com sua capacidade quase total em 2020 (Figura 14)

Tabela 7 - Área superficial do reservatório Lagoa do Barro.

| ANO        | ÁREA (km²) | PREC. ANUAL (Araripina) |
|------------|------------|-------------------------|
| 05/10/2013 | 2,284      | 834 mm                  |
| 29/10/2016 | 0,023      | 561 mm                  |
| 27/12/2020 | 3,567      | 1011 mm                 |
| 07/03/2023 | 2,690      | 564 mm                  |

Fonte: A Autora; APAC (2024).

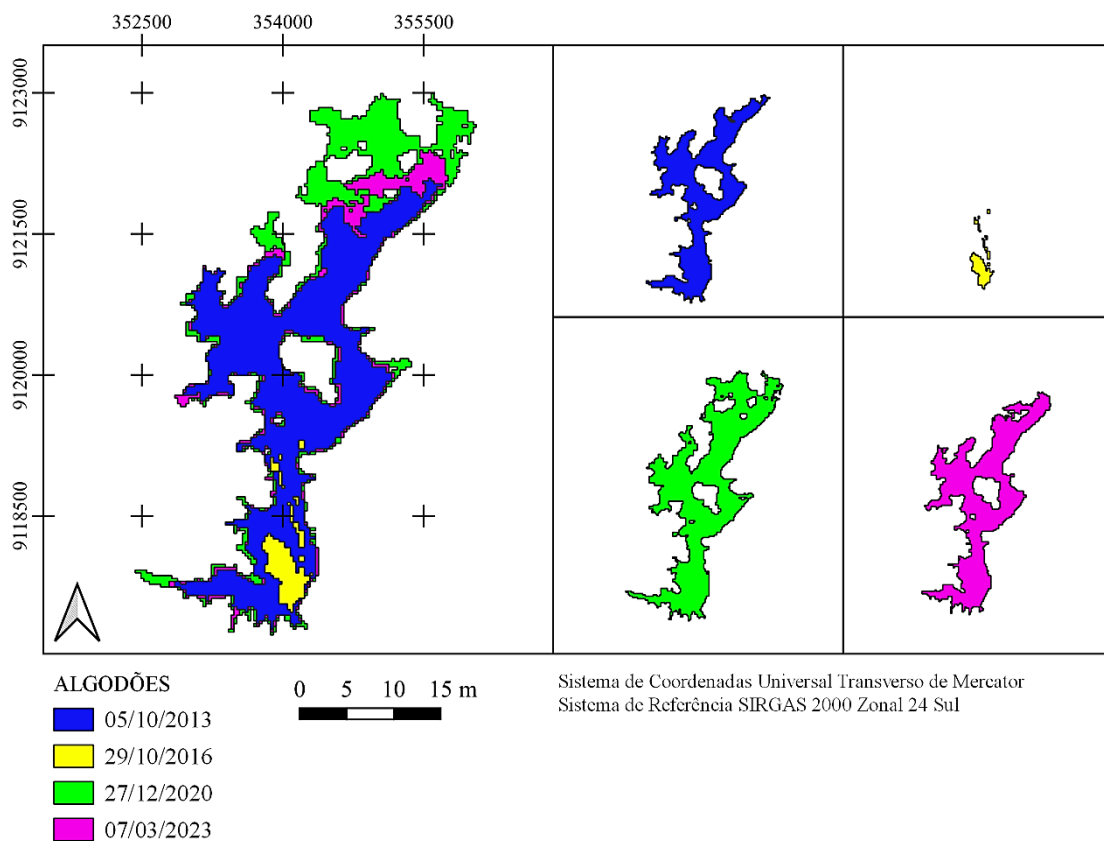
5.5.2 Reservatório Algodões

A análise comparativa da área superficial do espelho d’água do reservatório foi detalhada na Figura 30. Assim como no estudo de caso do reservatório de Lagoa do Barro, o espelho d’água de Algodões também teve seu ano mais crítico em 2016, dentre os anos de estudo. Analisando a distribuição pluviométrica no posto localizado no município de Ouricuri (Figura 12) é possível perceber que 2016 foi um ano consideravelmente seco nessa região do estudo, com chuva abaixo do esperado. A precipitação nesse ano foi de 189 mm (Figura 13 e Tabela 8), sendo 112,7 mm apenas no mês de janeiro (Figura 12). Nos meses que antecederam a data da imagem de 2016, entre fevereiro e outubro, a precipitação acumulada foi de apenas 43,4 mm, não sendo suficiente para gerar alguma resposta no volume do reservatório.

Silva *et al.* (2022) avaliaram a dinâmica espaço-temporal de corpos hídricos da microrregião do Vale do Ipojuca, no Semiárido brasileiro, no período de 2014 a 2021 e constataram uma redução significativa da área dos corpos hídricos entre 2014 (1226 ha, ano de maior disponibilidade hídrica) e 2017 (683 ha), principalmente em 2016 (558 ha). Os autores

indicaram que essa dinâmica está associada à ocorrência de secas severas no Nordeste brasileiro que provocaram reduções significativas nos volumes dos corpos hídricos perdurando até meados de 2019.

Figura 30 - Área superficial do espelho d'água do reservatório de Algodões.



Fonte: A Autora (2024).

A área superficial do espelho d'água calculada para o reservatório de Algodões, foi detalhada na Tabela 8. Na mesma linha que Lagoa do Barro, o ano de 2020 apresentou a maior área superficial, seguido por 2023 e 2013. Esses resultados corroboram com os dados de volume do SAR obtidos pela ANA (2024), que indicaram que o reservatório estava praticamente seco no ano de 2016 (Figura 14). Não foram encontrados dados de volume referentes aos anos subsequentes a 2018

Tabela 8 - Área superficial do reservatório Algodões.

| ANO        | ÁREA (km <sup>2</sup> ) | PREC. ANUAL (Ouricuri-PCD) |
|------------|-------------------------|----------------------------|
| 05/10/2013 | 3,857                   | 412 mm                     |
| 29/10/2016 | 0,256                   | 189 mm                     |
| 27/12/2020 | 5,782                   | 630 mm                     |
| 07/03/2023 | 4,375                   | 158 mm                     |

Fonte: A Autora; APAC (2024).

Um estudo feito por Bacalhau, Ribeiro Neto e Oliveira (2017) no reservatório de Algodões, constatou que em maio de 2016 a área do espelho d'água foi de 422.730 m<sup>2</sup>. Segundo os autores, houve um decaimento contínuo desde o ano de 2011 até março de 2016, reduzindo o volume de 53 hm<sup>3</sup> para 0,74 hm<sup>3</sup>, correspondendo a 1,2% da capacidade máxima do açude, estando em junho deste ano completamente em colapso. A partir disso, visto que não houve chuvas significativas até o mês de outubro de 2016, a redução da área superficial se deu de forma esperada.

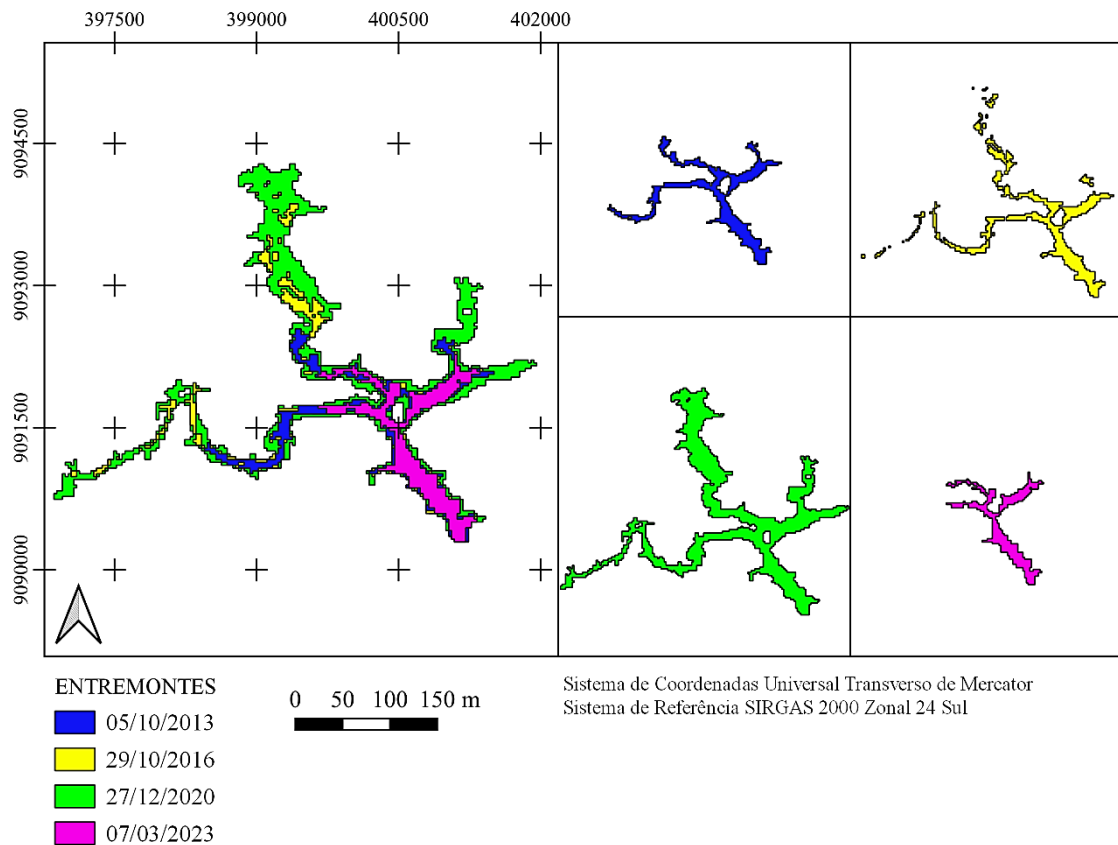
Ainda de acordo com Bacalhau, Ribeiro Neto e Oliveira (2017), a situação do açude Algodões revelou-se bastante preocupante para a gestão pública e a população. O baixo nível do açude tornou inviável a captação de água, levando a gestão municipal a adotar uma solução temporária para continuar o abastecimento: a aquisição de caixas d'água e a contratação de carros-pipa.

### **5.5.3 Reservatório Entremontes**

A análise comparativa da área superficial do espelho d'água do reservatório foi detalhada na Figura 31. Diferentemente dos casos anteriores, o ano de 2016 não foi o mais seco para o reservatório de Entremontes, mesmo a precipitação não sendo tão expressiva. Esse comportamento pode estar associado com o gerenciamento da água armazenada no reservatório que é destinado a diferentes usos múltiplos: abastecimento rural (48%), dessedentação animal (43%) e irrigação (9%) (ANA, 2024).

Já o ano de 2020, como nos demais reservatórios, apresentou o maior espelho d'água, sendo o segundo ano mais chuvoso de 2013 até 2023, com precipitação anual expressiva de 752 mm (Figura 13), de acordo com o posto pluviométrico de Parnamirim, sendo capaz de gerar uma recarga do reservatório.

Figura 31 - Área superficial do espelho d'água do reservatório de Entremontes.



Fonte: A Autora (2024).

A área superficial do espelho d'água calculada para o reservatório de Entremontes, foi detalhada na Tabela 9. O ano de 2016 foi a segunda maior área superficial, seguido por 2013 e 2023. Esses resultados estão em acordo com os dados de volume do SAR obtidos pela ANA (2024), que indicaram que o reservatório em 2023 apresentou o menor volume útil dos anos de estudo, como também o ano de 2020 mostrou ter maior volume (Figura 14).

Tabela 9 - Área superficial do reservatório Entremontes.

| ANO        | ÁREA (km <sup>2</sup> ) | PREC. ANUAL (Parnamirim) |
|------------|-------------------------|--------------------------|
| 05/10/2013 | 0,895                   | 281 mm                   |
| 29/10/2016 | 1,116                   | 331 mm                   |
| 27/12/2020 | 2,688                   | 752 mm                   |
| 07/03/2023 | 0,574                   | 504 mm                   |

Fonte: A Autora; APAC (2024).

Nascimento *et al.* (2018) analisaram a variabilidade temporal do espelho d'água do reservatório Entremontes entre os anos de 2013 a 2015, utilizando outra metodologia através

do índice NDVI. Em setembro de 2013 a área da lâmina de água do reservatório foi de 1,019 km<sup>2</sup>.

Já Soares (2023), aplicando o MNDWI, encontrou resultados mais próximos ao desse estudo, para setembro de 2013, de 0,965 km<sup>2</sup> para a área superficial do reservatório de Entremontes.

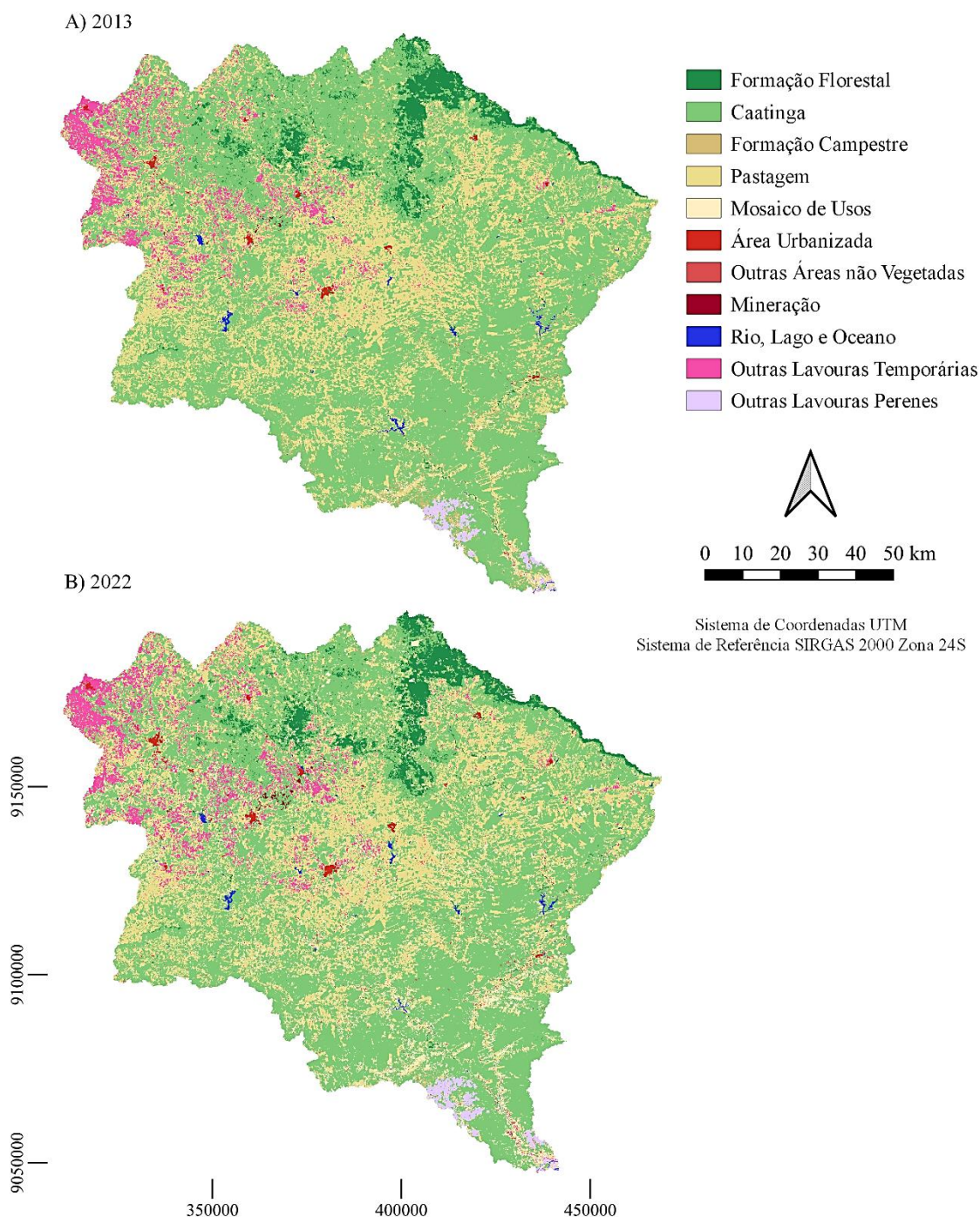
## 5.7 ANÁLISE DO USO E COBERTURA DO SOLO

A Figura 32 apresenta os mapas com as principais classes espaciais de uso e cobertura do solo para os anos de 2013 e 2022, provenientes da plataforma MapBiomias. Vale ressaltar que o projeto de mapeamento da plataforma contempla em seu acervo (até a data deste trabalho) imagens classificadas até o ano 2022, motivo pelo qual não foi possível comparar com produtos relacionadas ao ano de 2023.

Ao norte da bacia, onde a Chapada do Araripe está localizada em altitudes mais elevadas, é onde se concentra grande parte da classe de Formação Florestal. Essa região apresenta maior variabilidade espacial de precipitação em decorrência da altitude, como foi evidenciado pelos estudos de Sousa *et al.* (2023) e Galvêncio *et al.* (2007). É onde também tem maior densidade de vegetação, como verificado pelos mapas SAVI e albedo, que por sua vez sofrem influência da distribuição de precipitação.

Quando comparam-se as Figura 19 e Figura 21 com a Figura 32 para verificar o nexo precipitação–vegetação na bacia, particularmente nas áreas mais altas, observou-se que mesmo em períodos de seca, o dossel da Caatinga de espécies arbóreas (Formação Florestal) permanece, enfatizando a importância de conservar e gerenciar o uso da terra nessas áreas, fato também constatado por Sousa *et al.* (2023), que afirmam que as zonas mais elevadas, sem dúvida, oferecem serviços ecológicos vitais para a região, mesmo em períodos de estiagem.

Figura 32 - Mapas de dinâmica espaço-temporal anual de uso e cobertura do solo.



Fonte: A Autora; MapBiomias (2024).

Na Tabela 10 foram apresentadas as áreas correspondentes a cada classe de uso e cobertura do solo. A classe de Formação Florestal teve aumento, indicando que essa área vem sendo preservada, principalmente por se tratar de uma Área de Preservação Ambiental (APA). Lima *et al.* (2020) constataram que a porcentagem de cobertura vegetal dentro da APA se manteve cerca de 20% superior que fora da APA durante o período analisado (1999-2009), fator

que pode ter contribuído por estar associada ao efeito positivo da APA como proteção ambiental.

Tabela 10 - Áreas das classes de uso e cobertura do solo.

| CLASSE                      | 2013                    |       | 2022                    |       |
|-----------------------------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
|                             | ÁREA (km <sup>2</sup> ) | (%)   | ÁREA (km <sup>2</sup> ) | (%)   |
| Formação Florestal          | 516.457                 | 3,76  | 573.751                 | 4,18  |
| Caatinga                    | 8.015.519               | 58,33 | 7.427.648               | 54,05 |
| Formação Campestre          | 219.559                 | 1,60  | 31.858                  | 0,23  |
| Pastagem                    | 4.046.855               | 29,45 | 3.715.184               | 27,03 |
| Mosaico de Usos             | 182.032                 | 1,32  | 1.094.118               | 7,96  |
| Área Urbanizada             | 31.328                  | 0,23  | 46.013                  | 0,33  |
| Outras Áreas não Vegetadas  | 13.449                  | 0,10  | 48.565                  | 0,35  |
| Mineração                   | 3.099                   | 0,02  | 9.083                   | 0,07  |
| Rio, Lago e Oceano          | 33.189                  | 0,24  | 35.789                  | 0,26  |
| Outras Lavouras Temporárias | 599.271                 | 4,36  | 666.048                 | 4,85  |
| Outras Lavouras Perenes     | 81.478                  | 0,59  | 94.179                  | 0,69  |
| TOTAL                       | 13.742.236              | 100   | 13.742.236              | 100   |

Fonte: A Autora; MapBiomias (2024).

Em contrapartida, observa-se que as classes de vegetação menos densa (Caatinga, Formação Campestre) diminuíram, ao passo que as demais classes aumentaram, principalmente a classe de Mosaico de Usos que teve o aumento mais expressivo. A classe Mosaico de Usos é definida como áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura.

Essa relação inversa entre essas classes, que também foi vista por Sousa *et al.* (2023), ocorre em decorrência do desmatamento de áreas de floresta de Caatinga que foram desmatadas para darem lugar a atividades agropecuárias e áreas antropizadas.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa evidenciam a eficácia das técnicas de Sensoriamento Remoto e análise espaço-temporal aplicadas aos dados de satélite e hidrometeorológicos, proporcionando informações essenciais para orientar políticas públicas relacionadas às bacias hidrográficas em níveis nacional e internacional. Essas descobertas são fundamentais para a caracterização detalhada das bacias hidrográficas e podem subsidiar o desenvolvimento de técnicas de gerenciamento e gestão dos recursos hídricos.

A análise dos índices SAVI e albedo da superfície na bacia hidrográfica do rio Brígida revela um panorama dinâmico e significativo das variações na vegetação e nas condições ambientais ao longo dos anos estudados. Observou-se que o SAVI, indicativo do vigor vegetativo, apresenta comportamento distinto entre os períodos seco e chuvoso, refletindo diretamente na resposta espectral da vegetação. Durante os períodos chuvosos, houve um aumento geral no SAVI, sugerindo uma maior densidade e saúde da vegetação, especialmente em áreas de maior altitude, como na região da Chapada do Araripe.

Por outro lado, o albedo mostrou-se inversamente proporcional ao SAVI, com valores mais elevados no período seco, especialmente em áreas urbanas e de mineração de gesso, onde a presença de superfícies claras resulta em maior refletância. Esse comportamento é importante para entender o impacto das atividades humanas e das variações climáticas na superfície terrestre.

A relação entre SAVI e albedo foi analisada através de correlações que confirmaram a tendência esperada: à medida que o albedo aumenta, o SAVI tende a diminuir, indicando uma redução na cobertura vegetal. Entretanto, em análises isoladas para os menores valores de albedo a correlação não se comportou de maneira esperada, indicando a necessidade mais pesquisas.

Além disso, a utilização do MNDWI permitiu uma análise detalhada dos corpos d'água na bacia, revelando variações significativas nos reservatórios ao longo dos anos, influenciadas diretamente pelas condições hidrológicas e climáticas, sendo possível calcular a variação da área do espelho d'água de reservatórios com precisão, confirmando assim a potencialidade da utilização do MNDWI como ferramenta na gestão dos recursos hídricos.

Assim, conclui-se que a integração desses índices biofísicos e a análise espacial proporcionam uma compreensão abrangente das dinâmicas ambientais na bacia do Brígida, contribuindo para o monitoramento e a gestão sustentável dos recursos naturais e para o planejamento adequado do uso do solo na região.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se alternativas com maior resolução, como a base de dados *Harmonized Landsat Sentinel 2* (HLS) que possui maior resolução temporal, para monitoramento contínuo dos índices espectrais ao longo de um período mais extenso para capturar variações sazonais e interanuais mais detalhadas, considerando também eventos extremos climáticos. Também é interessante investigar tendências de longo prazo nos índices SAVI e albedo para avaliar possíveis mudanças climáticas e impactos ambientais persistentes na região. Essas sugestões não apenas aprofundariam o entendimento das dinâmicas ambientais na bacia do Brígida, mas também apoiariam políticas de gestão sustentável e conservação dos recursos naturais na região, promovendo a sustentabilidade a longo prazo.

## REFERÊNCIAS

- ALI, M. I.; DIRAWAN, G. D.; HASIM, A. H.; ABIDIN, M. R. Detection of Changes in Surface Water Bodies Urban Area with NDWI and MNDWI Methods, 2019. Article in **International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology**, June 2019, vol. 9 n. 3, p. 946-951, 2019.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – **Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.380-394, 2007.
- ALMEIDA, D. N. O.; ARAÚJO, D.; SOARES, D. R.; MAIA, F. M. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, S. M.; OLIVEIRA, L. M. M. Delimitation of water areas using remote sensing in Brazil's semiarid region. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**. 58. 20-29, 2023.
- ALMEIDA, D. N. O. **Geotecnologia como ferramenta para delimitação de corpos hídricos no semiárido do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, p. 73, 2021.
- ALMEIDA, J. A. P; OLIVEIRA, P. J. **Sensoriamento Remoto I**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, CESAD, 2010.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, T. L.; AZEVEDO, P.V.; SANTOS, C. A. C.; SANTOS, F. A. C. Comportamento sazonal do albedo e dos índices de vegetação na bacia hidrográfica do alto curso do rio Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física** 07, n.05(Número Especial-VIWMCRHPE), 1015-1027, 2014.
- ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V.; SANTOS, C. A. C.; SANTOS, F. A. C. Evolução Espaço-Temporal do Albedo e da Cobertura Vegetal da Superfície na Bacia Hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba, **Geosul**, vol. 33, no. 66, pp. 147-71, 2018.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Reservatórios do Semiárido Brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação**. Relatório Final. Brasília: ANA, Engecorps Engenharia S.A., 2017. Disponível em: [https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c3c25b76-f711-41ea-a79e-c8d30c287e53/attachments/ANEXO\\_E\\_-\\_Capibaribe,\\_Contas,\\_Ipojuca,\\_Jacupe,\\_Vaza-Barris,\\_Afluentes\\_do\\_So\\_Francisco.pdf](https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c3c25b76-f711-41ea-a79e-c8d30c287e53/attachments/ANEXO_E_-_Capibaribe,_Contas,_Ipojuca,_Jacupe,_Vaza-Barris,_Afluentes_do_So_Francisco.pdf). Acesso em: 15 jul. 24.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação—Reservatório Entremontes**, 2016. Disponível em: [http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/semiario/204res/SF\\_Entremontes.pdf](http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/semiario/204res/SF_Entremontes.pdf). Acesso em: 02 jul. 2024.

ANA, Agência Nacional de Águas. **SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**, 2024. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/nordeste-e-semiarido/pernambuco>. Acesso em: 30 jun. 24.

ANDRADE, C. B.; OMENA, J. A. M.; VILLAR, A. C.; GUSMÃO, L.; RODRIGUES, D. F. B.; OLIVEIRA, L. M. M. Avaliação de índices de vegetação e características fisiográficas no Sertão Pernambucano. **Revista Brasileira de Meio Ambiente** 4, 97-107, 2018.

ANDRADE, R. L.; MOTA, J. L. do N. Chapada do Araripe: entre a economia e o socioambiental. **Brazilian Journal of Business**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 432–443, 2022.

APAC, Agência Pernambucana de Águas e Climas. **Atlas climatológico do Estado de Pernambuco: normais climatológicas 1991-2020**. / Agência Pernambucana de Águas e Clima. Gerência de Meteorologia e Mudanças Climáticas. – Recife: APAC, GMMC, 2023.

APAC, Agência Pernambucana de Águas e Climas. **Bacia Do Rio Brígida**. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-rio-brigida/161-bacias-hidrograficas-rio-brigida/25-bacia-do-rio-brigida>. Acesso em: 16 jun 2024.

APAC, Agência Pernambucana de Águas e Climas. **Ficha técnica com cota volume – Algodões**, 2014. Disponível em: [https://www.apac.pe.gov.br/images/media/1602686911\\_algodoesFicha.pdf](https://www.apac.pe.gov.br/images/media/1602686911_algodoesFicha.pdf). Acesso em: 08 jul. 2024.

APAC, Agência Pernambucana de Águas e Climas. **Histórico de Chuvas**, 2024. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em: 02 jul. 2024.

BACALHAU, J. R.; RIBEIRO NETO, A.; OLIVEIRA, L. M. M. Aplicação de índice de vegetação no monitoramento da seca: açude Algodões no sertão pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 283–293, 2017. DOI: 10.24221/jeap.2.3.2017.1449.283-293.

BARBOSA, A. H. S.; CUELLAR, M. D. Z.; MOREIRA, M. M.; ARRAES, K. A.; SILVA, C. S. P. Seis anos de seca: Análise Espaço-temporal dos Espelhos d'água dos Reservatórios do Ceará por Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física** 14, 04, 2220-2241, 2021.

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.

BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. V. L.; 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**, Volume 148, p. 235-252, 2019.

BASTIAANSEN, Wim G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of hydrology**, v. 229, n. 1-2, p. 87-100, 2000.

BATISTA, P. H. D.; ALMEIDA, G. L. P.; SILVA, J. L. B.; PANDORFI, H.; SILVA, M. V.; SILVA, R. A. B.; JUNIOR, J. J. F. Short-term grazing and its impacts on soil and pasture degradation. **DYNA: Revista de la Facultad de Minas**, vol. 87 n. 213, p. 123-128, 2020.

BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Sci. Data** 2018, 5, 180214. <https://www.nature.com/articles/sdata2018214>

BEZERRA, A. C. **Mudanças ambientais no estado de Pernambuco**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). UFRPE, p. 145, 2020.

BEZERRA, M. B.; BEZERRA, A. P. P. S A crise hídrica como reflexo da seca: o Nordeste Setentrional em alerta. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 2, p. 623–632, 2016.

BRENNER, V. C.; GUASSELLI, L. A. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS – Brasil. *In: Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, 2015.

CAI, Y.; WU, J.; YIMITI, T.; LI, Z.; YANG, X.; DONG, S. The landscape altered the interaction between vegetation and climate in the desert oasis of Hotan River Basin, Xinjiang, China. **Ecological Modelling**, v. 491, 110687, May 2024,

CHAVES, D. R. **Análise espaço temporal das barragens no estado do Pará nos últimos 20 anos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental) - Universidade Federal do Pará. p. 42, Tucuruí, 2020.

CODEVASF, Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. **NOTÍCIAS: Codevasf apresenta perspectivas para operação do PISF em reunião de comissão da Câmara**, 2024. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/noticias/2014/codevasf-apresenta-perspectivas-para-operacao-do-pisf-em-reuniao-de-comissao-da-camara>. Acesso em: 16 de jun. 2024.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale, NJ, Erlbaum, 1988.

CORDÃO, M. A.; SANTOS DINIZ, R. R.; CARVALLO GUERRA, H. O.; OLIVEIRA, C. W.; SANTOS, C. L. M. Monitoramento do pomar de coqueiro irrigado por parâmetros biofísicos determinados por imagem de Landsat 8. **Nativa**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 233–240, 2023.

COSTA, R.; BAPTISTA, G.; GOMES, H.; DANIEL, F.; SALVADOR, M.; HERDIES, D. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**. 28. 100254. 2020.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. **Investimentos e gás natural no Polo Gesseiro do Araripe**, 2024. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/economia/2024/02/investimentos-e-gas-natural-no-polo-gesseiro-do-araripe.html>. Acesso em: 04 de jul. 2024.

DISRAELI, B. **Benjamin Disraeli Quotes: Benjamin Disraeli, quotes, quotations, famous quot Paperback**. Createspace Independent Publishing Platform, 4 jul. 2016.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Clima**, 2024. Disponível em: <https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm#:~:text=Aw%20%2D%20Clima%20tropical%2C%20com%20inverno,mm%20anuais%2C%20atingindo%201800%20mm.> Acesso em: 25 de jun. 2024.

EPIPHANIO, J. C. N.; GLERIAN, J.; FORMAGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v.31, n.6, p.445-454, 1996.

FERREIRA, Í. O.; ZANETTI, J.; GRIPP, J. S.; MEDEIROS, N. G. Viabilidade do uso de imagens do sistema RapidEye na determinação da batimetria de águas rasas. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 68, n. 7, 2016.

FERREIRA JÚNIOR, J. J.; DANTAS, M. J. F. Análise do albedo da superfície e de índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Rio Pacoti/CE. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, ahead of print, 2018.

FIGUEIREDO FILHO, D. B., SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, Vol. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FLORENZANO, T.G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 2ª edição de imagens de satélite para estudos ambientais. Oficina de Textos, Sao Paulo, 2007.

GALVÍNCIO, J. D.; PEREIRA, J. A. S.; FRANÇA, L. M. A.; LINS, T. M. P. Análise da variação da vegetação dos períodos secos e chuvosos através do SAVI e albedo de superfície no município de Belo Jardim – PE. **REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA** Fortaleza, Brasil, v. 10, n. 2, p.133-146, jul./de. 2016.

GALVÍNCIO, J. D.; SÁ, I. I. S.; MOURA, M. S. B.; RIBEIRO, J. G. Determinação das características físicas, climáticas e da paisagem da bacia hidrográfica do rio Brígida com o auxílio de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. **Revista de Geografia**, 2007, 24, p. 83–96.

GANEM, K. A.; DUTRA, A. C.; OLIVEIRA, M. T.; FREITAS, R. M.; GRECCHI, R.; VIEIRA, R. M. S. P.; ARAI, E.; SILVA, F. B.; SAMPAIO, C. B. V.; DUARTE, V.; SHIMABUKURO, Y. E. Mapeamento da Vegetação da Caatinga a partir de Dados Ópticos de Observação da Terra – Oportunidades e Desafios. **Revista Brasileira de Cartografia**. vol. 72, n. Especial 50 anos, 2020.

GIL, A. P.; PADOVANI, C. R.; COELHO, A. L. N. Comparação entre NDWI e MNDWI para o mapeamento de áreas inundadas no pantanal do taquari. *In: Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, 2019.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. 2014. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 18 (8), 2014

GUILHERME, A. P.; BIUDES, M. S.; MOTA, D. S.; DE MUSIS, C. R. Relationship between soil cover type and surface temperature. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 32, p. 539–550, 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-47462.

HUANG, C.; CHEN, Y.; ZHANG, S.; LI, L.; SHI, K.; LIU, R. Surface water mapping from suomi NPP- VIIRS imagery at 30 m resolution via blending with Landsat data. **Remote Sensing**. 8(8), 631, 2016.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment** 25, 3, 295-309, 1988.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe.html>. Acesso em: 02 jul. 2024.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 11 jun. 2024.

ICMBIO, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **APA da Chapada do Araripe**, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/caatinga/lista-de-ucs/apa-da-chapada-do-araripe>. Acesso em: 27 jun. 24.

IPEF, Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. **Acervo Histórico IPEF: Geodatabase**, 2024. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/acervohistorico/geodatabase/>. Acesso em: 10 de jun. 2024.

INSA, Instituto Nacional do Semiárido. **O semiárido Brasileiro**. Disponível em: <http://www.gov.br/insa/pt-br/semiarido-brasileiro>. Acesso em: 02 jul. 2024.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres**. Parêntese, São José dos Campos, 598 p. 2009.

LEIVAS, J.; FONTANA, D.; BERLATO, M.; CARDOSO, L. Variação Diária do Albedo sobre uma superfície vegetada e sobre um lago na estação experimental da UFRGS-RS. *In*: Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 05 de julho de 2007.

LEONARDO, H. R. A. L.; SALGUEIRO, C. O. B.; ALMEIDA, D. N. O.; SANTOS, S. M.; OLIVEIRA, L. M. M. Sensoriamento Remoto Aplicado na Geoespacialização do Reservatório Poço da Cruz - PE e seu Entorno. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.14, n.06 (2021) 3592-3607.

LIMA, D. J. S., COELHO, L. F. M., RODRIGUES, R.G. Influência da Indústria do Gesso e da Agropecuária na Dinâmica da Cobertura Vegetal no Polo Gesseiro do Araripe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n.07, p. 3326-3335, 2020.

LIMA, J. F.; OLIVEIRA, L. M. M.; FARIAS, A. A. M.; SILVA, B. B.; RODRIGUES, D. F. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Geotecnologia para Caracterização do Albedo e Temperatura da Superfície no Sertão de Pernambuco, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 35481, 2021.

LUZ, L. R.; GIONGO, V.; SANTOS, A. M.; LOPES, R. J. C.; LIMA JÚNIOR, C. Biomass and vegetation index by remote sensing in different caatinga forest áreas. **Ciência Rural** 52, 2, e20201104, 2022.

MAPBIOMAS. **Visão geral da metodologia**, 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/visao-geral-da-metodologia/#>. Acesso em: 03 de jul. 2024.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Características climáticas da seca de 2010-2016 na região semiárida do nordeste brasileiro. *In: Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90, 1973–1985, 2018.

MARIANO, D.; SANTOS, C.; WARDLOW, B.; ANDERSON, M.; SCHILTMAYER, A.; TADESSE, T.; SVOBODA, M. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**. 213. 129-143, 2018.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing** 17, 1425-1432, 1996.

MORAES, M. G. S.; FINGER, A.; PAULO, I. J. C. Caracterização preliminar da variabilidade sazonal do albedo da superfície no cerrado sensu stricto matogrossense. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)**, Rio de Janeiro, n. 26, p. 13–17, 2012.

NASCIMENTO, E. F.; OLIVEIRA, L. M. M.; BEZERRA, U. A.; ALMEIDA, D. N. O.; AZEVEDO, L. S. **Água: discussões sobre o uso, acesso e inovação** - obra do IX Meio Ambiente Em Foco – Capítulo 16 - Variabilidade temporal do espelho d'água do reservatório Entremontes– Pernambuco utilizando sensoriamento remoto - ISBN: 978-85-9535-084-7. Recife: Editora Itacaiúnas, 2018.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

PEREIRA, J. A. V.; SOUZA, Y. G.; CORREIA, I. M. G.; SOUZA, B. M. Uso e cobertura do solo e comparação entre os índices de vegetação SAVI e NDWI na Área de Proteção Ambiental das Onças, Paraíba, Brasil. **Revista de Geografia (Recife)** V. 37, No. 2, 2020.

PICCHIELLO, E. C.; GUTERRES, M. X.; GALVÃO, M.; CORREIA, A. R. Avaliação temporal da dinâmica de ocupação espacial do solo nas áreas do entorno de aeroportos regionais. *In: Air Transportation Symposium*. SBTA. SITRAER, São José dos Campos, 2022.

PNSH, Plano Nacional de Segurança Hídrica. **O Índice de Segurança Hídrica (ISH)**. Disponível em: <https://pnsh.ana.gov.br/seguranca>. Acesso em: 09 ago. 2024.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 176p., 2.ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

QGIS. O modelador gráfico, 2024. Disponível em: [https://download.qgis.org/qgisdata/2.8/pt\\_BR2/docs/user\\_manual/processing/modeler.html](https://download.qgis.org/qgisdata/2.8/pt_BR2/docs/user_manual/processing/modeler.html). Acesso em: 03 jul. 2024.

RÊGO, S. C. A.; LIMA, P. P. S.; LIMA, M. N. S.; MONTEIRO, T. R. R. Análise comparativa dos índices de vegetação NDVI e SAVI no município de São Domingos do Cariri-PB. **REVISTA GEONORTE**, Edição Especial, V.2, N.4, p.1217 – 1229, 2012.

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

RODRIGUES, R. B.; ARAÚJO, S. M. S.; BEZERRA, M. F.; SOUSA, L. A. Análise da dinâmica espacial e temporal do uso e ocupação do solo no município de Condado-PB (1989-2018). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, 2022.

SALLEH, S. A.; LATIF, Z. A.; PRADHAN, B.; WAN MOHD, W. M. N.; CHAN, A. Functional relation of land surface albedo with climatological variables: a review on remote sensing techniques and recent research developments, **Geocarto International**, DOI:10.1080/10106049.2012.748831, 2013.

SANTOS, C. A. C.; COSTA, M. V. G.; SILVA, M. T.; SILVA, L. L. Obtenção de Parâmetros Ambientais na Região Semiárida da Paraíba por Dados MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 633–647, 2017a.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M.; NETO, R. M. B. Estimativa de evapotranspiração para diferentes coberturas de solo em uma região semiárida brasileira: Um estudo de caso da bacia do rio Brígida, Brasil. **Journal of South American Earth Sciences**, 74, 54-66, 2017b.

SANTOS, J. P. O.; EL-DEIR, S. G.; SILVA, K. A.; ARAÚJO, J. R.E. S.; SOUSA, V. F. O.; SILVA FILHO, J. A. Conservação ambiental no polo gesso do Araripe: relações econômicas e legais. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente -RAMA**, 16, n. 4, e10541, 2023.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; et al. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 3-8, 2016.

SILVA, D. A. O.; LOPES, P. M. O.; MOURA, G. B. A.; SILVA, E. F. F.; SILVA, J. L. B.; BEZERRA, A. C. Evolução Espaço-Temporal do Risco de Degradação da Cobertura Vegetal de Petrolina-PE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 34 (1), Jan-Mar, 2019.

SILVA, E.; MELO, J.; GALVINCIO, J. Identificação das Áreas Susceptíveis a Processos de Desertificação no Médio Trecho da Bacia do Ipojuca - PE através do Mapeamento do Estresse Hídrico da Vegetação e da Estimativa do Índice de Aridez. **Revista Brasileira de Geografia Física**, América do Norte, 2011.

SILVA, J. G.; OLIVEIRA, L. M. M.; NASCIMENTO, E. F. Análise temporal da cobertura do solo por índices de vegetação no município de Belo Jardim – PE. *In: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, RN, 2164 – 2167, 2019.

SILVA, J. L. B. **Dinâmica espaço-temporal dos recursos hídricos e da cobertura vegetal da Região Nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). – Universidade Federal Rural de Pernambuco, p. 162, Recife-PE, 2021.

SILVA JÚNIOR, U. J. **Monitoramento por sensoriamento remoto da vegetação no cenário de caatinga das áreas de mata ciliar associadas ao reservatório artificial de Serrinha II – PE, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Universidade Federal de Pernambuco, p. 98, 2021.

SILVA, L. G.; GALVÍNCIO, J. D. Análise comparativa da variação nos índices NDVI e SAVI no Sítio PELD – 22, em Petrolina – PE, na primeira década do século XXI. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 6, p. 1446-1456, 2012.

SILVA, M. V.; PANDORFI, H.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; SILVA, J. L. B.; ALMEIDA, G. L. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; MESQUITA, M.; FERREIRA, M. B.; SANTANA, T. C.; MARINHO, G. T. B.; et al. Técnicas de sensoriamento remoto via Google Earth Engine para avaliação da degradação do solo na região semiárida brasileira, Brasil. **Journal of South American Earth Sciences**, 120, 104061, 2022.

SILVA, P.R. **Pernambuco (1850 –1950): Cem Anos de Reflexão, Antes do Cluster do Gesso**. 131 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Administração) Faculdade Boa Viagem, Recife, 2008.

SINDUSGESSO, Sindicato das Indústrias do Gesso do Estado de Pernambuco. **Dados do Setor**, 2024. Disponível em: [https://sindusgesso.org.br/dados-do-setor/#:~:text=N%C3%BAmero%20de%20habitantes%20Polo%20Gesseiro,%E2%80%9320IBGE\)%20%7C%20256.990%20hab](https://sindusgesso.org.br/dados-do-setor/#:~:text=N%C3%BAmero%20de%20habitantes%20Polo%20Gesseiro,%E2%80%9320IBGE)%20%7C%20256.990%20hab). Acesso em: 02 jul. 2024.

SOARES, D. R. **Dinâmica espaço-temporal de coberturas hídrica e vegetal por sensoriamento remoto na bacia do rio Brígida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, p. 70, 2023.

SOLARI, R. A. F. **Aplicação de métodos de classificação supervisionada em imagens do Sentinel-2, como suporte ao cadastro ambiental rural**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade de Brasília, UnB, Brasília, p. 150. 2017.

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**, v. 15, 2023.

SOUZA, A.; BEZERRA, F. O Soldadinho-do-Araripe (*Antilophia bokermanni* Coelho e Silva, 1988) como espécie bandeira no Cariri Cearense. *In book: Meio Ambiente e Sustentabilidade: conceitos e aplicações* (pp.211) Publisher: Editora IME, 2022.

SOUZA, F. H. Q.; MARTINS, P. H. A.; MARTINS, T. H. D.; TEODORO, P. E.; BAIO, F. H. R. The use of vegetation index via remote sensing allows estimation of soybean application rate. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 17, 100279, p. 1-8, 2020.

TOLA, T. L.; ZHANG, K.; CHUKALLA, A. D.; LIU, L.; EZAZ, G. T.; ELSADEK, E. A.; ABDALLAH, M. Spatiotemporal lakes surface area changes over 35 years and potential causes in the Central Rift Valley, Ethiopia, **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Volume 54, 2024,

USGS, United States Geological Survey. **EarthExplorer**, 2024. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 22 maio. 2024.

USGS, United States Geological Survey. **Landsat 8**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>. Acesso em: 04 jul. 2024.

WANG, S.; DAVIDSON, A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 2-4, p. 133-142, 2007.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006.

ZHONG, Q.; LI, Y. H. Satellite observation of surface albedo over the Qinghai-Xizang plateau region. **Advances in Atmospheric Science**, vol. 5, pp. 57-65, 1988.