



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

DÉBORA RODRIGUES SOARES

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DE COBERTURAS HÍDRICA E VEGETAL POR
SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA DO RIO BRÍGIDA**

Recife

2023

DÉBORA RODRIGUES SOARES

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DE COBERTURAS HÍDRICA E VEGETAL POR
SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA DO RIO BRÍGIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Leidjane Maria Maciel de Oliveira.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

S676d Soares, Débora Rodrigues.
Dinâmica espaço-temporal de coberturas hídrica e vegetal por sensoriamento remoto na bacia do rio Brígida / Débora Rodrigues Soares, 2023.
69 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.
Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Índices espectrais. 3. Landsat. 4. Bacia do Brígida.
I. Oliveira, Leidjane Maria Maciel de (Orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG / 2023 - 178

DÉBORA RODRIGUES SOARES

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DE COBERTURAS HÍDRICA E VEGETAL POR
SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA DO RIO BRÍGIDA**

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

Aprovada em 24/07/2023

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Leijdjane Maria Maciel de Oliveira - UFPE

BANCA EXAMINADORA

Participação por vídeo conferência
Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador interno e Presidente da banca)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Participação por vídeo conferência
Dr. Diego Cezar dos Santos Araújo (Examinador externo)
Politécnico Di Milano - Itália

Participação por vídeo conferência
Prof.^a Dra. Rochele Sheila Vasconcelos (Examinador externo)
Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças para continuar e evoluindo minha fé; à minha família que sempre esteve ao meu lado, dispondo de todo amor e carinho em minha jornada nem sempre fácil; ao meu namorado, que sempre me ajudou e me apoiou em minhas decisões, mesmo que a distância; e a minha orientadora, por me passar tanto conhecimento, sempre com grande solicitude, altruísmo e bondade no coração.

RESUMO

O estudo e análise da dinâmica espaço-temporal de uma região disponibiliza dados sobre o nível de mudanças que ocorrem em um local específico com o passar do tempo. Essas informações sobre alterações beneficia a tomada de decisões e ampara a gestão local sobre o modo como lidar com as dificuldades que possam surgir, e o método que auxilia na geração desses dados é sensoriamento remoto. O presente trabalho envolve a utilização de sensores remotos a bordo dos satélites Landsat 5 – TM e Landsat 8 – OLI, que disponibilizam bandas espectrais que serão processadas para gerar os índices espectrais: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Melhorado (EVI), Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) e Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI). Os índices irão dispor informações sobre a dinâmica espaço-temporal da vegetação e das áreas hídricas de três reservatórios na Bacia do Rio Brígida, localizada em Pernambuco, bem como da região da Chapada do Araripe inserida na bacia, em oito imagens de satélite em datas diferentes sendo elas dos dias 16 de junho de 1990, 02 de novembro de 1994, 23 de setembro de 1997, 06 de julho de 2003, 27 de novembro de 2009, 09 de setembro de 2013, 15 de julho de 2018 e 30 de outubro de 2022. Os resultados dessa dissertação permitiram observar as alterações da quantidade de vigor vegetativo na bacia e de área molhada nos reservatórios estudados ao longo das diferentes datas, tendo se destacado a imagem de 16 de junho de 1990 demonstrando os maiores valores nos índices de vegetação e de água e as imagens de 02 de novembro de 1994, 09 de setembro de 2013 e 15 de julho de 2018 indicando as menores áreas hídricas dos reservatórios de Chapéu, Lopes II e Entremontes, respectivamente.

Palavras-chave: índices espectrais; Landsat; Bacia do Brígida.

ABSTRACT

The study and analysis of the space-time dynamics of a region provides data on the level of changes that occur in a specific location over time. This information on changes benefits the decision-making and supports local management on how to deal with difficulties that may arise, and the method that helps to generate this data is the remote sensing. The present work involves the use of remote sensors on board of the Landsat 5 – TM and Landsat 8 – OLI satellites, which provide spectral bands that will be processed to generate the spectral indices: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Difference Water Index (NDWI) and Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). The indices will provide information on the space-time dynamics of the vegetation and water areas of three reservoirs in the Brígida River Basin, located in Pernambuco, as well as the Chapada do Araripe region insert in the basin, in eight satellite images on different dates, which are from June 16, 1990, November 02, 1994, September 23, 1997, July 6, 2003, November 27, 2009, September 9, 2013, July 15, 2018 and October 30, 2022. The results of this dissertation observed the changes in the amount of vegetation vigor in the basin and wetland in the studied reservoirs, over the dates, highlighting the image of the date of June 16, 1990 showing the biggest values in vegetation and water indices, and the images of November 02, 1994, September 9, 2013 and July 15, 2018 indicating the smallest hydric areas for the Chapeu, Lopes II and Entremontes reservoirs, respectively.

Keywords: espectral indexes; Landsat; Brígida Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro eletromagnético.....	17
Figura 2 - Render do satélite Landsat 4 e 5	19
Figura 3 - Render do satélite Landsat 8 em órbita.....	21
Figura 4 - Localização da Bacia do rio Brígida.....	25
Figura 5 - Localização dos reservatórios Chapéu, Entremontes e Lopes II	26
Figura 6 - Vista para o lado do reservatório de Lopes II.....	27
Figura 7 - Paramento de montante do reservatório de Chapéu.....	28
Figura 8 - Vista do lago a montante do reservatório de Chapéu	29
Figura 9 - Vertedouro da Barragem do reservatório de Entremontes.....	30
Figura 10 - Torre de comando da tomada d'água do reservatório de Entremontes.....	30
Figura 11 - Fluxograma de atividades	31
Figura 12 - Dados pluviométricos mensais de Parnamirim e Ouricuri	38
Figura 13 - Classificação do NDVI na Bacia do Rio Brígida.	40
Figura 14 - Histograma Raster do índice de vegetação NDVI.....	42
Figura 15 - Classificação do índice de vegetação EVI na Bacia do Rio Brígida	45
Figura 16 - Histograma Raster do índice de vegetação EVI	46
Figura 17 - Localização dos pontos na área de estudo.	48
Figura 18 - Comparativo dos valores médios entre NDVI e EVI	49
Figura 19 - Comparação do EVI de 1994 e 2022	50
Figura 20 - Comparação do NDVI de 1994 e 2022.....	51
Figura 21 - NDWI do Reservatório de Chapéu	53
Figura 22 - NDWI do Reservatório de Entremontes	54
Figura 23 - NDWI do Reservatório de Lopes II.....	55
Figura 24 - Área molhada através do MNDWI do Reservatório de Chapéu.....	56
Figura 25 - Área molhada através do MNDWI do Reservatório de Entremontes.....	57
Figura 26 - Área molhada através do MNDWI do Reservatório de Lopes II	58
Figura 27 - Comparativo das Médias dos valores de MNDWI e NDWI do Reservatório de Chapéu	61
Figura 28 - Comparativo das Médias dos valores de MNDWI e NDWI do Reservatório de Entremontes	62

Figura 29 - Comparativo das Médias dos valores de MNDWI e NDWI do Reservatório de Lopes
.....62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Instrumentos do Landsat 5	20
Tabela 2 - Instrumentos do Landsat 8	21
Tabela 3 - Datas e satélites das imagens.....	32
Tabela 4 - Descrição do NDVI em intervalo de classes para cobertura de vegetação	34
Tabela 5 - Comparação de valores da classificação do índice de vegetação NDVI.....	44
Tabela 6 - Comparação de valores da classificação do índice de vegetação EVI.....	48
Tabela 7 - Coeficiente de determinação (R^2) para comparação de valores entre EVI e NDVI	49
Tabela 8 - Soma de chuva 5 dias antes da data da imagem.....	52
Tabela 9 - Áreas de água dos reservatórios de Chapéu, Entremontes e Lopes II, de acordo com os anos	59
Tabela 10 - Dados dos reservatórios	60
Tabela 11 - Coeficiente de determinação (R^2) para comparação de valores entre NDWI e MNDWI.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento
APA	Área de Preservação Ambiental
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
EVI	Índice de vegetação melhorado
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IVs	Índice de Vegetação
MNDWI	Índice modificado da diferença normalizada de água
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	MultiSpectral Instrument
NDVI	Índice de vegetação de diferença normalizada
NDWI	Índice da diferença normalizada da água
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
PDI	Processamento Digital de Imagem
QGIS	Aplicativo profissional SIG Livre
SAR	Sistema de Acompanhamento de Reservatórios
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SR	Sensoriamento Remoto
SRC	Sistema de Referência de Coordenadas
TM	<i>Thematic Mapper</i> , ou Mapeador Temático
TOA	Top of Atmosphere
USGS	<i>United States Geological Survey</i> , ou Serviço Geológico dos Estados Unidos

LISTA DE SIMBOLOS

$L\lambda_i$	Calibração Radiométrica
$\rho_{\lambda 5}$	Reflectância para TM Landsat 5
$P_{\lambda 8}$	Reflectância para OLI Landsat 8 e/ou MSI do Sentinel;
r_o	Quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol
r	Distância Terra-Sol
ρ_v	Reflectância para banda do vermelho
ρ_{azul}	Reflectância para banda do azul
ρ_{verde}	Reflectância para banda do verde
ρ_{IVp}	Reflectância para o infravermelho próximo
ρ_{MIR}	Reflectância para infravermelho médio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1	SENSORIAMENTO REMOTO (SR).....	17
3.1.1	Semiárido Brasileiro.....	18
3.1.2	Missão Landsat.....	18
3.1.2.1	Landsat 5	19
3.1.2.2	Landsat 8	21
3.2	ÍNDICES ESPECTRAIS.....	22
3.2.1	Comportamento Espectral da Vegetação e Áreas Hídricas.....	23
3.2.2	Calibração Radiométrica	24
4.	METODOLOGIA	25
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	25
4.1.1	Reservatório de Lopes II	27
4.1.2	Reservatório de Chapéu.....	27
4.1.3	Reservatório de Entremontes.....	29
4.1.4	Área de Preservação Ambiental (APA) da Chapada do Araripe.....	31
4.2	FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES	31
4.3	DADOS DAS IMAGENS LANDSAT	31
4.4	PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS	32
4.5	PROCESSAMENTO DE IMAGENS	33
4.5.1	Reflectância	33
4.5.2	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	33
4.5.3	Índice de Vegetação Melhorado (EVI)	34
4.5.4	Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI)	35
4.5.5	Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI).....	35
4.5.6	Classificação dos Índices.....	35
4.5.7	Identificação das áreas d'água dos reservatórios	36
4.6	DADOS DA AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUA E CLIMA (APAC)	36

4.7	DADOS DA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA).....	36
4.8	COMPARATIVO DE ÍNDICES.....	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.1	ANÁLISE DA COBERTURA VEGETAL	40
5.2	ANÁLISE DAS ÁREAS HÍDRICAS.....	52
6	CONCLUSÃO.....	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

O estudo e análise da dinâmica espaço-temporal de uma região gera dados sobre o nível de mudanças que ocorrem em um local específico com o passar do tempo. A habilidade de detectar e quantificar mudanças no ambiente e seu balanço energético global, depende de sensores remotos que proporcionam medidas consistentes e calibradas das características da superfície terrestre (CHANDER; MARKHAM, 2003).

A utilização de sensores remotos para obtenção das mudanças ambientais se resume na definição de Sensoriamento Remoto (SR). Para Meneses e Almeida (2012), o Sensoriamento Remoto se trata da ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície da Terra por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com a matéria terrestre.

Essas interações da radiação eletromagnéticas trazem consigo possibilidades de estimativa de alterações superficiais, tornando possível o monitoramento ambiental com a observação dinâmica em larga escala do meio ambiente, utilizando-se de índices de vegetação (LI *et al.*, 2020), ou como a utilização de índices para averiguar regiões que sofreram grandes alterações como queimadas (PEREIRA *et al.*, 2016).

O sensoriamento remoto tem um papel importante no estudo da biosfera através da habilidade de fazer medidas repetidas da característica da vegetação em escala global (GAO *et al.*, 2000), e esse monitoramento operacional da cobertura vegetativa terrestre atualmente envolve a utilização de índices espectrais de vegetação (HUETE *et al.*, 1997). A utilização dos índices espectrais tem uma ampla gama de utilizações dentro do SR, sendo os índices de vegetação (IV) e os índices de água dois efetivos e amplamente utilizados na obtenção de coberturas da superfície terrestre.

Com o desenvolvimento do uso dos índices espectrais, as análises do comportamento de superfícies evoluíram, trazendo consigo o estudo dos fatores que poderiam causar mudanças na dinâmica comportamental da região. Um estudo, realizado por Albuquerque *et al.* (2014), analisou o comportamento dos índices espectrais NDVI e NDWI sob diferentes intensidades pluviométricas. Outro estudo realizado nesse aspecto de inclusão de variáveis na averiguação de mudanças de coberturas foi o realizado por Macandza (2022), que empregou a regressão logística e técnicas de SIG para compreender a dinâmica da cobertura florestal, se utilizando de coeficientes de determinação R^2 para averiguar a relação entre as variáveis do seu modelo.

Se utilizando do sensoriamento remoto e dos índices de vegetação e água será viável a análise da área de estudo do trabalho em questão, focada na análise da Bacia do Brígida e trazendo ênfase a Área de Preservação Ambiental (APA) da Chapada do Araripe, localizadas na região Oeste do Estado de Pernambuco, Brasil. De acordo com Fachine e Galvínio (2014), a Bacia do Brígida está inserida no clima semiárido do nordeste brasileiro, possuindo um regime pluviométrico de extrema irregularidade, constituindo um cenário de escassez de água que constitui um entrave ao desenvolvimento socioeconômico e a subsistência das populações. Quanto a APA Chapada do Araripe, de acordo com Andrade e Mota (2022), sua importância se destaca por sua expressão natural e cultural, abrigando acervos arqueológicos e possuindo grande potencial botânico, tornando necessária uma análise de posicionamentos entre ambientalistas e desenvolvimentistas.

O presente estudo tem como proposta gerar dados para averiguar a dinâmica espaço-temporal de coberturas hídrica e vegetal da bacia hídrica do Rio Brígida, destacando a análise da vegetação na APA Chapada do Araripe. A escolha da bacia envolveu sua associação, ao norte, com a APA da Chapada do Araripe, bem como o fato de ser uma das bacias inseridas na bacia do Rio São Francisco, fazendo parte da integração no Projeto Transposição de Águas do Rio São Francisco, citado no Relatório Síntese de Viabilidade Técnico-Econômica e Ambiental realizado pela ENGEORPS/HARZA (2000), com os reservatórios de Entremontes e Chapéu recebendo as águas da transposição por meio de canais localizados no Eixo Norte.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral dessa dissertação envolve determinar a dinâmica espaço-temporal de coberturas hídrica e vegetal através de técnicas de sensoriamento remoto na bacia hídrica do Rio Brígida, destacando a análise da vegetação na APA da Chapada do Araripe.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos da dissertação envolvem:

- Analisar da variabilidade temporal e espacial das áreas de vegetação inseridas na Bacia do Rio Brígida e envolvendo as regiões da APA da Chapada do Araripe em diferentes datas;
- Quantificar a variabilidade espaço-temporal do espelho de água de 3 mananciais hídrico de destaque e comparando os resultados de variabilidade espaço-temporal com dados de órgão competente;
- Comparar a influência dos dados hidrológicos com a dinâmica espaço-temporal dos índices vegetais processados e analisar as possíveis e plausíveis justificativas.

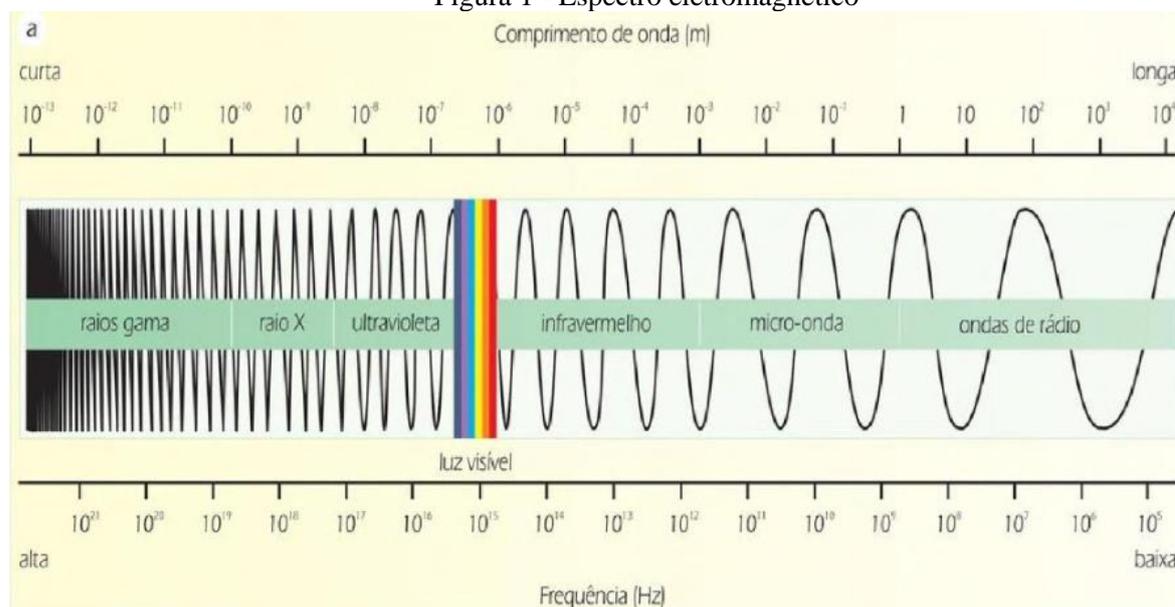
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 SENSORIAMENTO REMOTO (SR)

O sensoriamento remoto se tornou uma importante ferramenta para avaliação da cobertura terrestre, que se iniciou com o uso de fotografias aéreas, e, com o passar dos anos, evoluiu para sensores de alta tecnologia. De acordo com Moraes (2002), o Sensoriamento Remoto é um conjunto de atividades para obtenção de informações dos objetos terrestres sem necessitar de contato direto, e envolve a detecção, aquisição e análise da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres, registradas por sensores remotos.

Segundo Florenzano (2011), a energia eletromagnética propagada com a velocidade da luz se trata da radiação eletromagnética, que é a energia utilizada no sensoriamento, e é medida em frequência, em Hz, e comprimento de onda, em metro. O espectro eletromagnético é representado pela distribuição dessa radiação eletromagnética segundo sua frequência e seu comprimento de onda. A Figura 1 representa as regiões do espectro magnético.

Figura 1 - Espectro eletromagnético



Fonte: Florenzano (2011).

Os sensores remotos são dispositivos capazes de detectar a energia em determinadas faixas do espectro eletromagnético e transformá-las em um sinal elétrico, registrando-as de modo que o sinal possa ser armazenado ou transmitido em tempo real para posteriormente ser convertido em informações que descrevem as feições dos objetos que compõem a superfície terrestre (MORAES, 2002).

As variações da energia eletromagnética são coletadas por sistemas sensores imageadores ou não-imageadores. Os sistemas imageadores fornecem uma imagem da região observada por meio de *scanners*, por exemplo, como é o caso do Landsat 5. Nele, cada banda representa um espectro, visível ou não, sendo esse espectro representado por um intervalo de comprimento de onda específico.

Contudo, o modo como essa energia é refletida e captada pelo sensor pode variar consideravelmente. De acordo com Merchant e Narumanani (2010), a reflectância espectral da superfície terrestre se trata de uma função complexa de cobertura de solo, iluminação do ângulo solar e condições atmosféricas. Em uma imagem, os valores de pixels do mesmo tipo de cobertura podem variar dependendo de situações de sol ou sombra, por exemplo.

3.1.1 Semiárido Brasileiro

De acordo com o Instituto Nacional do Semiárido - INSA (2023), o semiárido brasileiro se caracteriza, principalmente, pela irregularidade das chuvas e pelas altas taxas de evapotranspiração, elementos que, em conjunto, podem contribuir para o risco de escassez hídrica, sendo uma região suscetível a mudanças climáticas.

Ainda de acordo com o INSA (2023), grande parte das espécies vegetais têm folhas que caem na época seca em resposta a adaptação fisiológica dessa vegetação a escassez de água. Esse fato pode ser um motivador para causar diferenças nos índices de vegetação.

De acordo com Marengo *et al.* (2011), o trimestre mais seco do semiárido ocorre entre agosto e outubro, tendo os mínimos de chuva ocorrendo de junho a setembro, além disso, cita-se que a variabilidade do clima da região se determina de acordo com a posição geográfica, o relevo, as características da superfície e os sistemas de tempo atuantes na região.

3.1.2 Missão Landsat

A missão Landsat é composta por oito satélites operacionais de observação terrestre, que utilizam o sensoriamento remoto para coletar dados e imagens do planeta (USGS, 2023). Tendo sido anunciado em setembro de 1966, como Projeto EROS (Earth Resources Observation Satellites), ele buscou trabalhar para benefício do campo do gerenciamento de recursos naturais através de uma visão holística da superfície terrestre.

Realizado por um esforço coletivo entre o Departamento do Interior (DOI), Administração Aeronáutica e Espacial Nacional (NASA) e o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), os satélites foram alocados em uma órbita heliossíncrona e próxima

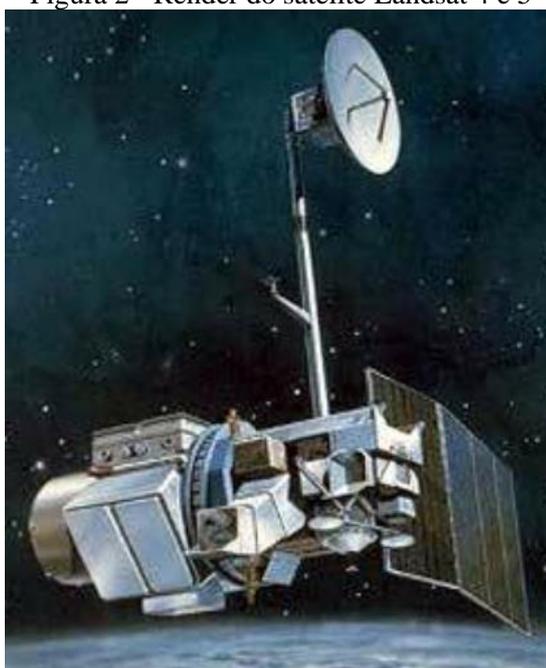
aos polos Norte e Sul, permitindo a espaçonave do satélite passar pelo equador em diferentes longitudes, completando a imagem completa do planeta Terra após 251 orbitas, durando, no total, 16 dias. Em 23 de julho de 1972 os esforços interagências obtiveram sucesso com o lançamento do Earth Resources Technology Satellites (ERTS-1), posteriormente nomeado de Landsat 1.

Para catalogar as imagens, configurou-se uma série de caminhos de grade desenhados paralelamente às linhas de latitude. Esse sistema de referência de grades ficou conhecido como Sistema de Referência Mundial, ou *Worldwide Reference System* (WRS-1), totalizando 251 orbitas e 119 linhas, e cada intersecção desses caminhos e linhas denota o centro nominal da cena do Landsat. A extensão do WRS-1 é o *Worldwide Reference System-2* (WRS-2), possuindo 233 orbitas e 124 linhas. Os Landsat de 1 a 3 usam o sistema WRS-1, e os Landsat de 4 a 9 se utilizam do WRS-2. A cada dia, os Landsat 8 e 9 juntos percorrem 28 orbitas, podendo promover uma imagem completa da superfície terrestre a cada aproximados 8 dias.

3.1.2.1 Landsat 5

Desenvolvido pela NASA, o Landsat 5 foi lançado em 1 de março de 1984, carregando os instrumentos de Scanner Multiespectral (MSS) e o Mapeador Temático (TM), e proporcionou dados de imageamento terrestre durante quase 29 anos, possuindo um ciclo de 16 dias (USGS, 2023).

Figura 2 - Render do satélite Landsat 4 e 5



Fonte: USGS (2023).

Sobre seus sensores, o Scanner Multiespectral (MSS) possui quatro bandas espectrais, com intervalo de amostragem do solo, ou tamanho do pixel, de 57 x 79 metros. O Mapeador Temático, por sua vez, promoveu dados do infravermelho de médio alcance, e possui resolução de 30 metros nas bandas refletivas e 120 metros na banda termal. Ambos os sensores possuem resolução Radiométrica de 8 bits. A Tabela 1 indica todas as bandas de ambos os instrumentos:

Tabela 1 - Instrumentos do Landsat 5

Scanner Multiespectral (MSS)			
Banda	Espectro	Comprimento de onda (nm)	Resolução (metros)
4	Verde visível	500 – 600	57 x 79
5	Vermelho Visível	600 – 700	57 x 79
6	Infravermelho Próximo	700 - 800	57 x 79
7	Infravermelho Próximo	800 - 1100	57 x 79
Mapeador Temático (TM)			
Banda	Espectro	Comprimento de onda (nm)	Resolução (metros)
1	Azul visível	450 - 520	30
2	Verde visível	520 – 600	30
3	Vermelho visível	630 – 690	30
4	Infravermelho próximo	760 – 900	30
5	Infravermelho próximo	1550 – 1750	30
6	Termal	1040 – 1250	120
7	Infravermelho médio	2080 - 2350	30

Fonte: USGS (2023)

Análises como a de Teixeira, Candeias e Tavares Junior (2017), fizeram a utilização do TM/Landsat 5 na área do reservatório de Itaparica, localizado na Bacia do Rio São Francisco, entre os estados de Pernambuco e Bahia, comparando os índices NDVI, NDWI e NDBI com e sem correção atmosférica, e concluíram que existem diferenças de resultados para os índices processados com e sem a correção.

Outro estudo que também se utilizou do satélite TM/Landsat 5 foi o realizado por Serban, Maftai e Dobrică (2022), que buscou detectar mudanças na superfície hídrica do lago Nuntasi-Tuzla, na România, através de índices de água e vegetação como MNDWI e NDVI e modelos preditivos no período entre 1984 e 2021. Em seus resultados foi revelado que houve uma significativa diminuição da superfície hídrica do lago, entre os anos de 2003 e 2020, tendo a seca hidrológica identificada nos anos 2011, 2012, 2013 e 2020 correspondendo com os menores valores observados na superfície de água do lago em questão.

3.1.2.2 Landsat 8

Lançado em 11 de fevereiro de 2013, o Landsat 8 carrega os instrumentos *Operational Land Imager (OLI)* e o *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*, sendo o TIRS medindo a temperatura da superfície terrestre por meio de uma nova tecnologia que aplica física quântica para detectar o calor.

Figura 3 - Render do satélite Landsat 8 em órbita



Fonte: USGS (2023).

O OLI captura dados com precisão Radiométrica de mais de 12-bits de faixa dinâmica, possibilitando 4096 potenciais níveis de cinza, e melhora a relação sinal-ruído. Essa melhora do sinal para ruído permite melhorar a caracterização do estado e condição da cobertura terrestre. A escalada dos dados de 12-bits para 16-bits integrou os produtos de dados Level-1.

Tabela 2 - Instrumentos do Landsat 8

<i>Operational Land Imager (OLI)</i>			
Banda	Espectro	Comprimento de onda (nm)	Resolução (metros)
1	Aerossol Coastal	430 – 450	30
2	Azul	450 – 510	30
3	Verde	530 – 590	30
4	Vermelho	640 - 670	30
5	Infravermelho Próximo	850 – 880	30
6	Infravermelho de Ondas Curtas 1 (SWIR)	1570 – 1650	30
7	Infravermelho de Ondas Curtas 2 (SWIR)	2110 – 2290	30
8	Pancromático	500 - 680	15
9	Cirrus	1360 - 1380	30
<i>Thermal Infrared Sensor (TIRS)</i>			

Banda	Espectro	Comprimento de onda (nm)	Resolução (metros)
10	TIRS 1	10600 - 11190	100
11	TIRS 2	11500 - 12510	100

Fonte: USGS (2023)

Um exemplo de utilização do Landsat 8-OLI foi o realizado por Özelkan (2020), que fez uso de 28 imagens multiespectrais e multitemporais do satélite Landsat 8 – OLI para a água da barragem do Lago Atikhisar, na Turquia, entre 2013 e 2017, utilizando três modelos diferentes do índice de água NDWI. Como resultado, percebeu-se que à medida que a área do lago crescia, a discriminação de água em outras classes é melhor na região do infravermelho próximo, e que a performance do NDWI que se utiliza das bandas do infravermelho próximo e do verde são melhores em termos do efeito da expansão do lago.

Outro estudo foi o realizado por Prasetyo *et al.* (2019), que se utilizou de imagens Landsat 8 – OLI para realizar uma correlação entre os índices de vegetação tais como NDVI e SAVI, em 11 distritos da Java Central, localizados na Indonésia. Em seu trabalho foi concluído que a visualização multivariada mostra que os dados dos índices de vegetação formam um padrão aglomerado a depender da semelhança entre suas características, tendo os índices de vegetação NDVI e SAVI uma correlação positiva.

3.2 ÍNDICES ESPECTRAIS

As aplicações do Sensoriamento Remoto via satélite podem abranger diversos setores, tais como o monitoramento dinâmico de usos de solo e evoluções de biodiversidade, florestas e pastagens, manejo dos recursos hídricos da superfície e até o monitoramento das ocorrências dos eventos catastróficos (LIU, 2007). O índice espectral se trata de uma equação que se utiliza dos valores numéricos dos pixels das bandas de uma imagem, e podem ser referentes, entre diversos outros aspectos, ao uso do solo, vegetação e recursos hídricos.

Ao longo dos anos surgiram estudos que comprovaram a utilidade dos índices espectrais. Esses estudos podem envolver características físicas da paisagem, como realizado por Galvêncio *et al.*, 2007, que estimou, com o auxílio do NDVI, uma cobertura por remanescente de caatinga em 42,68% da área da bacia do Rio Brígida, podendo ser aumentada em 12% nos períodos úmidos e como estudo determinado por Andrade *et al.*, 2018, que utilizou no NDVI e o NDWI para analisar a cobertura vegetal dos municípios de Exú e Moreilândia, no Sertão pernambucano, detectando predominância de solo exposto e vegetação rasteira. Também pode ser realizada a análise de índices juntamente com o comportamento pluviométrico tal

como realizado por Albuquerque *et al.* (2014), que obteve dados pluviométricos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e identificou uma baixa nos valores de NDWI e NDVI, nas cenas estudadas, para períodos de baixa precipitação, no município de Souza - PB.

Para os índices de água, o imageamento por sensoriamento remoto foi usado na avaliação de recurso hídricos e na gestão costeira, sendo essas aplicações resultado do delineamento de águas abertas usando técnicas de extração de informação temática, e, espelhando-se nos índices de vegetação, foram propostos índices de água se utilizando do mesmo princípio de duas bandas (XU, 2006; GAO, 1996).

Para Xu (2006), as imagens de SR têm sido usadas há muito tempo na avaliação de recursos hídricos, tendo essas aplicações envolvido o delineamento de águas abertas usando técnicas de extração de informações temáticas. Enquanto para Huete *et al.* (2002) os índices de vegetação permitem comparações espaciais e temporais confiáveis da atividade fotossintética terrestre e das variações estruturais do dossel.

3.2.1 Comportamento Espectral da Vegetação e Áreas Hídricas

O comportamento espectral dos objetos, de acordo com Moraes (2002), é identificado como o conjunto de valores sucessivos da reflectância do objeto ao longo do espectro eletromagnético, também conhecido como assinatura espectral. Ou seja, a variação da porcentagem de energia refletida em cada comprimento de onda é o que nos faz reconhecer os objetos.

A energia eletromagnética interage de maneira diferente a depender do alvo, mas sempre em acordo com suas propriedades físico-químicas e biológicas. São essas diferenças que possibilitam a distinção e reconhecimento dos objetos no SR. Contudo, segundo Florenzano (2011), existem fatores que podem interferir no comportamento espectral dos objetos, tais como o nível e método de aquisição de dados, as condições intrínsecas ao alvo, as condições ambientais, a localização do alvo em relação a fonte e ao sensor e a atmosfera.

Esse comportamento se demonstra tanto para solos quanto para a água. Em acordo com as características do comportamento espectral do solo, conforme definido por Liu (2007), existem fatores que exercem mais influência no comportamento espectral do solo, que são os teores da matéria orgânica, textura, capacidade de troca de cátions (CTC), composição mineralógica, rugosidade e umidade. Diante dessa alteração do comportamento espectral em acordo com seus fatores, várias bandas-chave podem ser usadas para identificação do tipo do solo em função da sua variação de propriedades físico-químicas.

Ainda de acordo com Liu (2007), os solos úmidos possuem menor reflectância que os secos, enquanto as cores vermelha e amarela dos solos estão associadas aos teores das diferentes formas de óxido de ferro, assim, na faixa do infravermelho próximo, a absorção da radiação é relacionada com o teor de óxido de ferro no solo.

Enquanto para Xu (2006), uma das maneiras de extrair informações sobre a água é usando a razão entre bandas, sendo uma banda de comprimentos de onda visíveis e outro de comprimentos de onda do infravermelho próximo (NIR), resultando em presenças de vegetação, terra suprimidas e recursos hídricos aprimorados.

3.2.2 Calibração Radiométrica

A resolução radiométrica se define pelos níveis de cinza que um sensor consegue mostrar. Quanto maior a resolução radiométrica, maior será a quantidade de níveis de cinza processados, e, por consequência, mais informação haverá na imagem, não apenas em relação a definição visual, mas também aos valores que podem ser obtidos na imagem. Cada pixel possui um número digital (ND), que pode variar sua cor do branco ao preto, e entre essa variação se mostram os diferentes níveis de cinza. Esses níveis de cinza representam a intensidade da energia eletromagnética média medida pelo sensor, para a área correspondente ao pixel (CRACKNELL, HAYES 2007; STAR, ESTES, e MCGWIRE K. C., 1997).

Contudo, os dados que chegam do satélite são dados brutos, e precisam de redimensionamento para se tornarem dados significativos, e por esse motivo é feita a calibração radiométrica do sensor TM do Landsat 5. Essa calibração envolve fatores de reescalonamento máximo e mínimo da banda específica. A equação que demonstra a calibração é identificada pela Equação 1.

$$L_{\lambda_i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} * ND \quad (1)$$

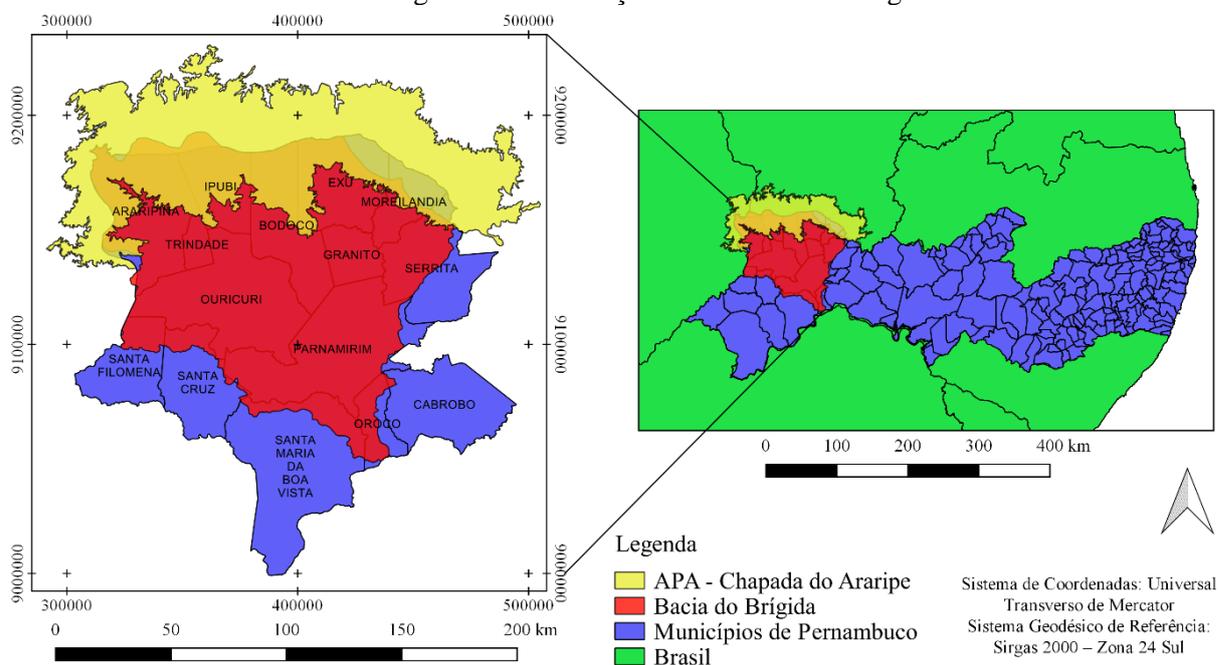
onde: “ a_i ” e “ b_i ” são a radiância espectral mínima e máxima ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$), respectivamente, e i corresponde á banda e o ND refere-se a intensidade do pixel, valor inteiro que possui 255 intensidades de cinza, de acordo com sua resolução radiométrica. Os coeficientes de calibração usados para imagens do sensor TM se referem ao proposto por Chander *et al.* (2009).

4 METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Brígida, localizada no Sertão pernambucano, limitada ao norte pelos estados do Ceará e Piauí e com o grupo de bacias GI9, ou seja, o grupo de bacias de pequenos rios interiores 9. Ao Sul, a bacia do Brígida se delimita com o grupo de bacias de pequenos rios interiores 6, ou GI6, à Oeste delimita-se com o estado do Piauí e à Leste pela bacia do rio Terra Nova e com o grupo de bacias de pequenos rios interiores 5, ou GI5.

Figura 4 - Localização da Bacia do rio Brígida



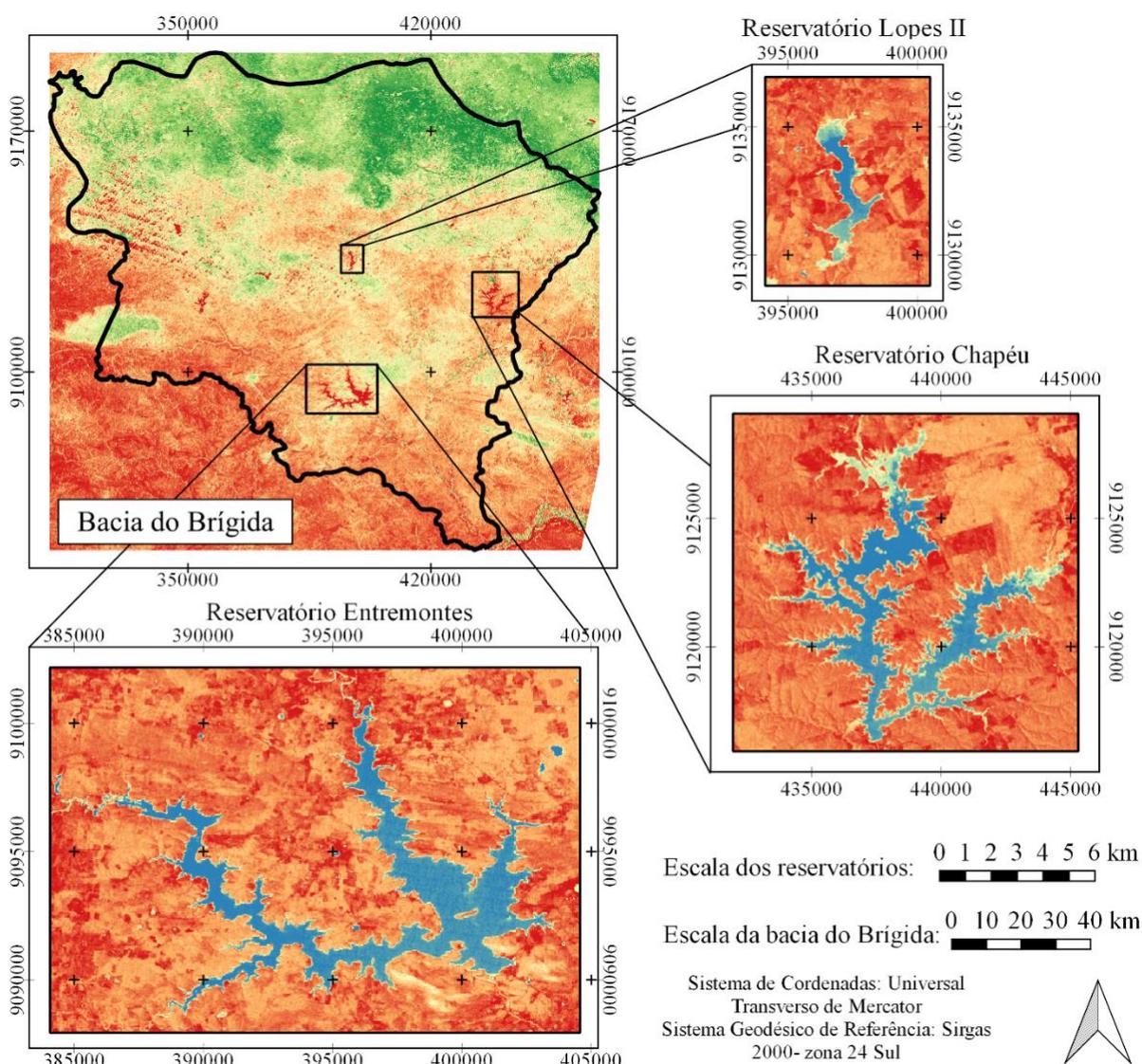
Fonte: Autora (2023).

O rio Brígida deságua no Rio São Francisco e, segundo Galvíncio *et al.* (2007), sua nascente é considerada na Chapada do Araripe, onde se encontra o município de Exú. De acordo com APAC (2023), o rio possui extensão de 193 km, e tem como maiores tributários o rio São Pedro, seguido pelo riacho Gravatá.

Ainda de acordo com APAC (2023), a bacia do rio Brígida tem área de 13.495,73 km², correspondendo a 13,73% do estado de Pernambuco, abrangendo 15 municípios, sendo os municípios totalmente inseridos na bacia: Bodocó, Granito, Ipubi e Trindade, os municípios com sede na bacia são Exu, Moreilândia Araripina, Ouricuri e Parnamirim, e os municípios parcialmente inseridos na bacia são os de Cabrobó, Oroco, Santa Cruz, Santa Maria da Boa Vista, Santa Filomena e Serrita.

Para a averiguação das áreas de água na bacia, foram escolhidos três reservatórios entre os seis maiores reservatórios da bacia do Brígida, de acordo com o Sistema de Acompanhamento de Reservatórios – SAR (2023). Na escolha foi observada a proximidade entre as regiões dos reservatórios, bem como a menor incidência de nuvens, para que fosse possível a visualização dos corpos hídricos em uma região por um longo período. Após as análises, as áreas molhadas escolhidas foram as dos reservatórios de Chapéu, Entremontes e Lopes II.

Figura 5 - Localização dos reservatórios Chapéu, Entremontes e Lopes II



Fonte: Autora (2023).

4.1.1 Reservatório de Lopes II

Segundo o relatório de estudo sobre reservatórios do Semiárido Brasileiro, realizado pela ANA (2016), o município em que se encontra o reservatório de Lopes II é Bodocó e o rio que o abastece é o riacho Gravatá. Seu ano de construção foi 1969, com uma área de drenagem total de 2.382 km², com o volume máximo de 23,94 hm³, mínimo de 0,68 e útil de 23,26 hm³. O nível de água máximo operacional do reservatório é 99,0 metros e o mínimo de 92,00. A extensão da barragem principal é de 950,00 metros, com a cota do coroamento da barragem principal em 102,5 metros e a cota da soleira do vertedor principal de 99 metros.

Figura 6 - Vista para o lado do reservatório de Lopes II



Fonte: ANA (2016)

De acordo com o relatório da ANA (2016), o reservatório de Lopes II possui, dentre suas demandas totais de retirada, 1% voltado para o abastecimento urbano, sendo Bodocó a sede municipal abastecida, 3% voltado para irrigação, 41% para abastecimento rural e 55% para dessedentação animal. O volume total de afluente anual era de 145,04 hm³ em 2016 e sua demanda total possui vazão de 67 l/s.

4.1.2. Reservatório de Chapéu

De acordo com o relatório de estudo sobre os reservatórios do Semiárido brasileiro, realizado pela ANA (2016), o município no qual se encontra o reservatório de Chapéu é o de Parnamirim e o rio que o abastece é o riacho do Brígida. Seu ano de construção foi 1986,

possuindo uma área de drenagem total de 2.954,8 km², com o volume máximo e útil iguais de 188,0 hm³. A cota máxima operacional do reservatório é 406,23 metros e a mínima de 391,00, seu tipo de vertedor principal é canal aberto sem soleira vertedora e possui, dentre suas demandas totais de retirada, 7% voltado para irrigação, 33% para abastecimento rural e 61% para dessedentação animal.

Figura 7 - Paramento de montante do reservatório de Chapéu



Fonte: ANA (2016)

O volume total de afluente anual era de 242,84 hm³ em 2016, contudo essa oferta hídrica pode ter sido modificada devido ao Projeto de Integração do Rio São Francisco. As demandas totais do reservatório têm vazão de 94 l/s.

Figura 8 - Vista do lago a montante do reservatório de Chapéu



Fonte: ANA (2016)

4.1.3 Reservatório de Entremontes

Ainda de acordo com o relatório de estudo dos reservatórios do Semiárido Brasileiro, realizado pela ANA (2016), o reservatório de Entremontes está localizado no município de Parnamirim e o rio que o abastece é o riacho São Pedro. Seu ano de construção foi 1982, possuindo uma área de drenagem total de 5.082,60 km², com o volume máximo de 339,33 hm³ e mínimo de 12,94 hm³ e volume útil de 326,39 hm³. O nível de água máximo operacional do reservatório é 388,8 metros e a mínima de 374,00 metros, o tipo de vertedor principal é a soleira livre com perfil Creager, a extensão de sua barragem principal é de 990 metros e a altura é de 29,5 metros, sendo a estrutura de tomada d'água para abastecimento de demandas e para liberação para jusante realizadas em galerias duplas com tubulação envelopada de concreto de 1,2 metros de diâmetro.

Figura 9 - Vertedouro da Barragem do reservatório de Entremontes



Fonte: ANA (2016)

O reservatório possui demandas totais de retirada com 9% voltado para irrigação, 48% voltado para abastecimento rural e 43% para dessedentação animal, com a vazão de demandas totais em 98 l/s. O volume total de afluente anual era de 289,29 hm³ em 2016, contudo essa oferta hídrica pode ter sido modificada devido ao Projeto de Integração do Rio São Francisco ANA (2016).

Figura 10 - Torre de comando da tomada d'água do reservatório de Entremontes



Fonte: ANA (2016)

4.1.4 Área de Preservação Ambiental (APA) da Chapada do Araripe

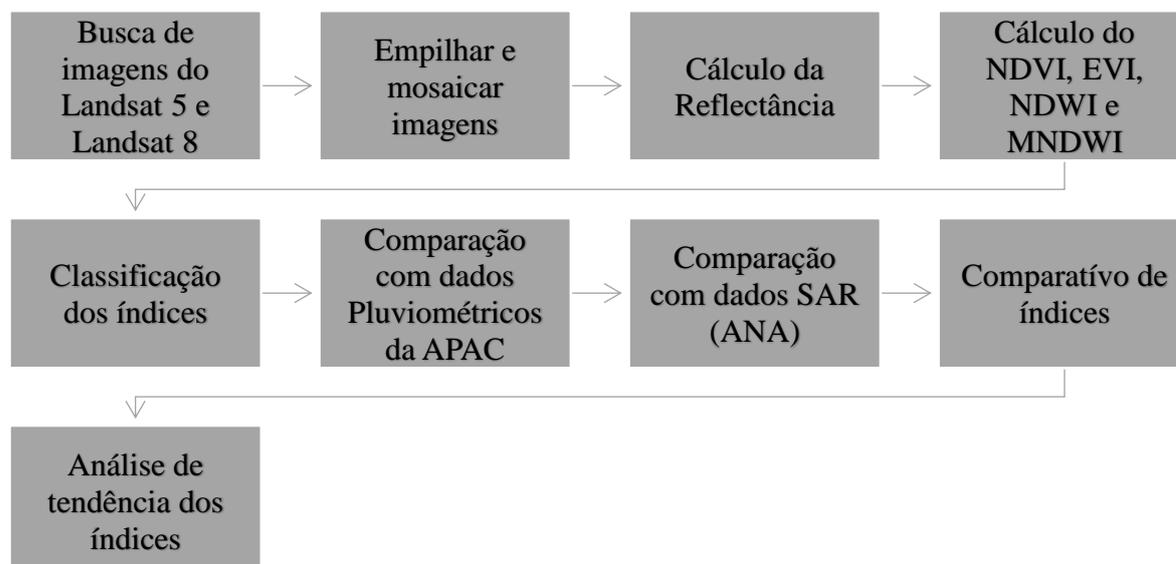
A Chapada do Araripe, segundo Andrade e Mota (2022), possui um rico acervo de recursos naturais e vegetais onde convivem as áreas de preservação pública com os interesses de propriedades privadas, e tem, no surgimento da legislação ambiental e de instrumentos de conservação das APAs, um conflito com a extração predatória dos recursos.

De acordo com Brasil (2023), o bioma da APA Chapada do Araripe é a caatinga, e a região possui uma área de 972.605,18 hectares, com diploma de criação datado de 04 de agosto de 1997. Sua área é distribuída entre os estados do Ceará, Pernambuco e Piauí, e tem intersecção da sua parte ao sul com a região norte da Bacia do Brígida. De acordo com Sousa *et al.* (2023), a região ao norte da Bacia do Brígida, que abrange a Chapada, apresenta uma alta elevação, e tem em sua área uma considerável variabilidade espacial de chuva e uma alta densidade de vegetação.

4.2 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

Sobre o modo como o presente trabalho foi realizado, se destacam as atividades dispostas no fluxograma definido na Figura 11. Cada um de seus pontos e metodologias utilizadas serão comentados posteriormente.

Figura 11. Fluxograma de atividades



Fonte: Autora (2023).

4.3 DADOS DAS IMAGENS LANDSAT

Para efetivação desta pesquisa utilizaram-se oito datas diferentes (Tabela 3), ao longo de 32 anos, com dados orbitais do satélite Landsat 5 com o sensor *Thematic Mapper* (TM) e do

Landsat 8 com os sensores *Operational Land Imager* (OLI). A imagem completa da bacia se encontrou em duas cenas, ambas na órbita 217 e nos pontos 65 e 66, sendo elas obtidas por meio do site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2023).

Foram buscadas imagens com a cobertura de nuvens menor que 2%, excetuando-se um caso em que, devido à escassez de imagens, foi obtido uma imagem com cobertura de 7%. Foram buscadas imagens na estação seca do ano, em acordo com a baixa incidência de nuvens, e se obteve imagens nas datas e satélites conforme Tabela 3:

Tabela 3 - Datas e satélites das imagens

DATA	SENSOR/SATÉLITE
16/06/1990	TM / Landsat 5
02/11/1994	TM / Landsat 5
23/09/1997	TM / Landsat 5
06/07/2003	TM / Landsat 5
27/11/2009	TM / Landsat 5
09/09/2013	OLI / Landsat 8
15/07/2018	OLI / Landsat 8
30/10/2022	OLI / Landsat 8

Fonte: Autora (2023).

4.4 PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS

O pré-processamento, bem como o processamento das imagens foram realizados pelo *software* Quantum GIS, ou QGIS, versão 2.18.22, de livre acesso, que vem sendo utilizado em diversos trabalhos com foco em diversos índices, tais como o realizado por Teixeira, Candeias e Tavares Junior (2017), que realizou uma comparação dos índices físicos na região do reservatório de Itaparica, localizado na região da Bacia do Rio São Francisco, utilizando o Quantim GIS.

As imagens multiespectrais foram baixadas em diferentes bandas raster, cada uma representando um espectro em específico. Portanto, as bandas precisavam ser empilhadas através da ferramenta de miscelânea, de modo que em uma única imagem fosse possível obter todas as bandas juntas, compondo uma única cena multiespectral e permitindo a visualização da imagem colorida pela composição de vermelho (R), verde(G) e azul (B), conhecida por RGB.

Como a bacia do Brígida possui mais de 13.000 km² de extensão, foi necessária mais de uma cena do Landsat para abranger toda a bacia. Considerando isso, foi necessário realizar o mosaico, das duas cenas através da ferramenta de processamento “Mosaico” do QGIS, transformando as duas cenas em uma só imagem.

Uma vez que as cenas foram empilhadas e mosaicadas, foi realizada a reprojeção das imagens vetoriais e raster para o mesmo Sistema de Referência de Coordenadas (SRC). O código SRC utilizado foi o EPSG 31984, que utiliza o Sistema de Coordenadas Universal Transverso de Mercator e o sistema geodésico de referência é o Sirgas 2000, zona 24 Sul.

Desta forma, após a reprojeção, foi realizado o recorte das imagens, para ser possível identificar apenas a região da Bacia do Brígida. Após mesclar, moisaicar, reprojeter e recortar as imagens, foi possível realizar o seu processamento.

4.5 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Para as imagens do Landsat 5 - TM e Landsat 8 - OLI, foi necessário realizar o cálculo das reflectâncias de cada imagem, para ser possível calcular os índices NDWI, MNDWI, EVI e NDVI. Os procedimentos utilizados envolvem a calibração Radiométrica das imagens para possibilitar o cálculo das reflectâncias e índices.

4.5.1 Reflectância

A reflectância se trata da razão entre o fluxo de energia solar refletida e o fluxo de energia solar incidente na região, e deve ser corrigida em acordo com o fator de escala aditivo e multiplicativo disposto no arquivo de metadados disponibilizado. O cálculo da reflectância no TOA para o OLI Landsat 8 e para o TM Landsat 5 é identificada pela Equação 3, de acordo com os dados do produto Landsat disponibilizado pelo USGS (2023).

$$\rho_{\lambda} = M_p * Q_{cal} + A_p \quad (3)$$

sendo “ ρ_{λ} ” a reflectância planetária no TOA, “ M_p ” o fator de escala multiplicativo específico da banda, “ Q_{cal} ” o valor do pixel calibrado e quantizado, também identificado por número digital (ND), “ A_p ” o fator de escala aditivo específico da banda.

4.5.2 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, proposto por Rouse *et al.* (1973), se obtém através da razão entre a diferença da banda do infravermelho próximo (ρ_{IVp}) e a banda do vermelho (ρ_v) e a soma das mesmas bandas. Sua equação é definida pela Equação 4.

$$NDVI = \frac{\rho_{IVp} - \rho_v}{\rho_{IVp} + \rho_v} \quad (4)$$

onde para o TM Landsat 5, as bandas do infravermelho próximo e do vermelho corresponde, respectivamente, às bandas 4 e 3, e para o OLI Landsat 8, as bandas do infravermelho próximo

e do vermelho são, respectivamente, as bandas 5 e 4. Para superfícies com vegetação o valor do NDVI será positivo, enquanto para superfícies de água ou de nuvens, o valor será negativo.

De acordo com Aquino *et al.* (2018), que realizou o uso do sensoriamento remoto para identificar áreas com risco de degradação na região de Tauá, no estado do Ceará, utilizando a série histórica de 27 anos, entre 1985 e 2011, e foi estabelecido, em seu estudo, os valores de NDVI da Tabela 4.

Tabela 4 - Descrição do NDVI em intervalo de classes para cobertura de vegetação

Classe	Critério de classe
≤ 0	Solo exposto ou água
$0 < \text{NDVI} \leq 0.2$	Muito baixo
$0.2 < \text{NDVI} \leq 0.4$	Baixo
$0.4 < \text{NDVI} \leq 0.6$	Moderadamente baixo
$0.6 < \text{NDVI} \leq 0.8$	Moderadamente alto
$0.8 < \text{NDVI} \leq 1$	Alto

Fonte: Adaptado de Aquino *et al.* (2018).

Os valores considerados como classe de cobertura de vegetação moderadamente baixo, moderadamente alto e alto serão considerados na análise da cobertura de vegetação comparativa entre duas datas diferentes. Essas classes, dispostas em valores maiores que 0,4, serão utilizados para a análise comparativa da vegetação da região.

4.5.3 Índice de Vegetação Melhorado (EVI)

O Índice de Vegetação Melhorado (EVI), proposto por Huete *et al.* (1997), analisa as áreas de vegetação mais densa, utilizando as bandas do infravermelho próximo, vermelho e azul (ρ_{azul}), bem como outros fatores e coeficientes. Seu processamento é realizado por meio da Equação 5.

$$\text{EVI} = \frac{G * (\rho_{\text{IVp}} - \rho_v)}{L + \rho_{\text{IVp}} + C1 * \rho_v - C2 * \rho_{\text{azul}}} \quad (5)$$

onde para o TM Landsat 5, a banda do azul corresponde à banda 1 e para o OLI Landsat 8 corresponde à banda 2; “G” corresponde ao fator de ganho ($G=2,5$); “L” se refere ao ajuste de fundo do dossel vegetal ($L=1$) e “C1” e “C2” correspondem aos coeficientes de ajuste da influência de aerossóis ($C1=6$; $C2=7,5$). Os valores do EVI variam de -1 a +1, e para vegetação saudável os valores variam de 0,2 a 0,8.

4.5.4 Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI)

O Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) proposto por Gao (1996), utiliza duas bandas de infravermelho: o infravermelho próximo (ρ_{IVp}) e o infravermelho médio (ρ_{MIR}). Seu cálculo ocorre de acordo com a Equação 6.

$$NDWI_{GAO} = \frac{\rho_{IVp} - \rho_{MIR}}{\rho_{IVp} + \rho_{MIR}} \quad (6)$$

onde para o TM Landsat 5, a banda do infravermelho médio corresponde à banda 5, e para o OLI Landsat 8 corresponde à banda 6. Os valores positivos indicam regiões de água, porém, de acordo com Gao (1996), é esperado que o NDWI também seja sensível a mudanças de água líquida na vegetação, isso significa que, a depender da vegetação, os valores de NDWI podem ser positivos para ela.

4.5.5 Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI)

O Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI) proposto por Xu (2006), utiliza as bandas do verde (ρ_{verde}) e do infravermelho médio, sendo utilizada a Equação 7 para sua identificação.

$$MNDWI = \frac{\rho_{verde} - \rho_{MIR}}{\rho_{verde} + \rho_{MIR}} \quad (7)$$

onde para o Landsat 5 - TM, a banda do verde corresponde à banda 2, e para o OLI Landsat 8 corresponde à banda 3. De acordo com Xu (2006), os valores positivos referentes à água no MNDWI serão melhores que no NDWI, devido à maior absorção de luz no espectro do infravermelho médio do que no infravermelho próximo, e os valores de solo e vegetação ainda terão valores negativos, considerando que o solo reflete o infravermelho médio mais que o infravermelho próximo e a vegetação reflete o infravermelho médio ainda mais que a luz verde.

4.5.6 Classificação dos Índices

A classificação dos índices ocorreu de acordo com as propriedades das camadas geradas pelo processamento desses índices. Primeiramente foi alterada a renderização da camada para banda simples falsa-cor, em seguida foi escolhido um gradiente de cores de acordo com o índice analisado e feita a nova classificação pelo modo de intervalos iguais. Por fim, ainda foi considerado o histograma raster das imagens ao longo dos anos, para averiguar a frequência dos valores dos pixels e detalhar as regiões de diferentes classes.

4.5.7 Identificação das áreas d'água dos reservatórios

Após a classificação dos índices, foi utilizado o MNDWI para identificar a área molhada através dos resultados do processamento das imagens, utilizando a ferramenta calculadora raster do software de livre acesso QGIS. Uma vez detectada a região de água, realizou-se a conversão de raster para vetor (poligonização) das regiões, e depois foi observada a área de água através da tabela de atributos.

4.6 DADOS DA AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUA E CLIMA (APAC)

Os dados obtidos através do site da APAC se referiam à distribuição pluviométrica mensal dos anos de 1990, 1994, 1997, 2003, 2009, 2013, 2018 e 2022. Foram observados postos de medição pluviométrica nas regiões centrais da Bacia do Brígida, em municípios próximos aos reservatórios analisados e que tivessem a maior quantidade de dados possível para o período analisado.

Com essas informações foi possível identificar o período seco e o período chuvoso da região através da disposição dos dados em planilhas eletrônicas. Ainda foi averiguado o regime pluviométrico de 5 dias anteriores às datas de aquisição das imagens, para lincar os resultados pluviométricos aos índices estudados.

Também foram obtidos dados referentes aos boletins de monitoramento de reservatórios recentes da bacia do Brígida, para averiguar a situação indicada pela APAC e analisá-la juntamente com os resultados obtidos pelos índices de água nos três reservatórios observados.

4.7 DADOS DA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA)

Para a complementação dos dados obtidos pela APAC, também foram buscados dados históricos sobre o volume dos reservatórios no site do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), da ANA, para comparação com os valores de volume e área de água encontrados durante os oito anos pesquisados.

Devido ao fato de o SAR ter sido criado apenas em 2013 e lançado oficialmente em 2014 (ANA, 2023), nem todos os anos avaliados possuem o resultado disposto no sistema. Porém, dentre os anos disponíveis, efetivou-se uma avaliação dos resultados obtidos nesse estudo com os resultados dispostos pela ANA, buscando maior detalhamento dos resultados.

Durante a avaliação, foi realizada uma comparação entre os dados processados e os dados do SAR nas datas dos anos de 2013, 2018 e 2022, verificando se havia uma

compatibilização entre os dados de área de água processados no QGis e o volume de água disposto no SAR.

4.8 COMPARATIVO DE ÍNDICES

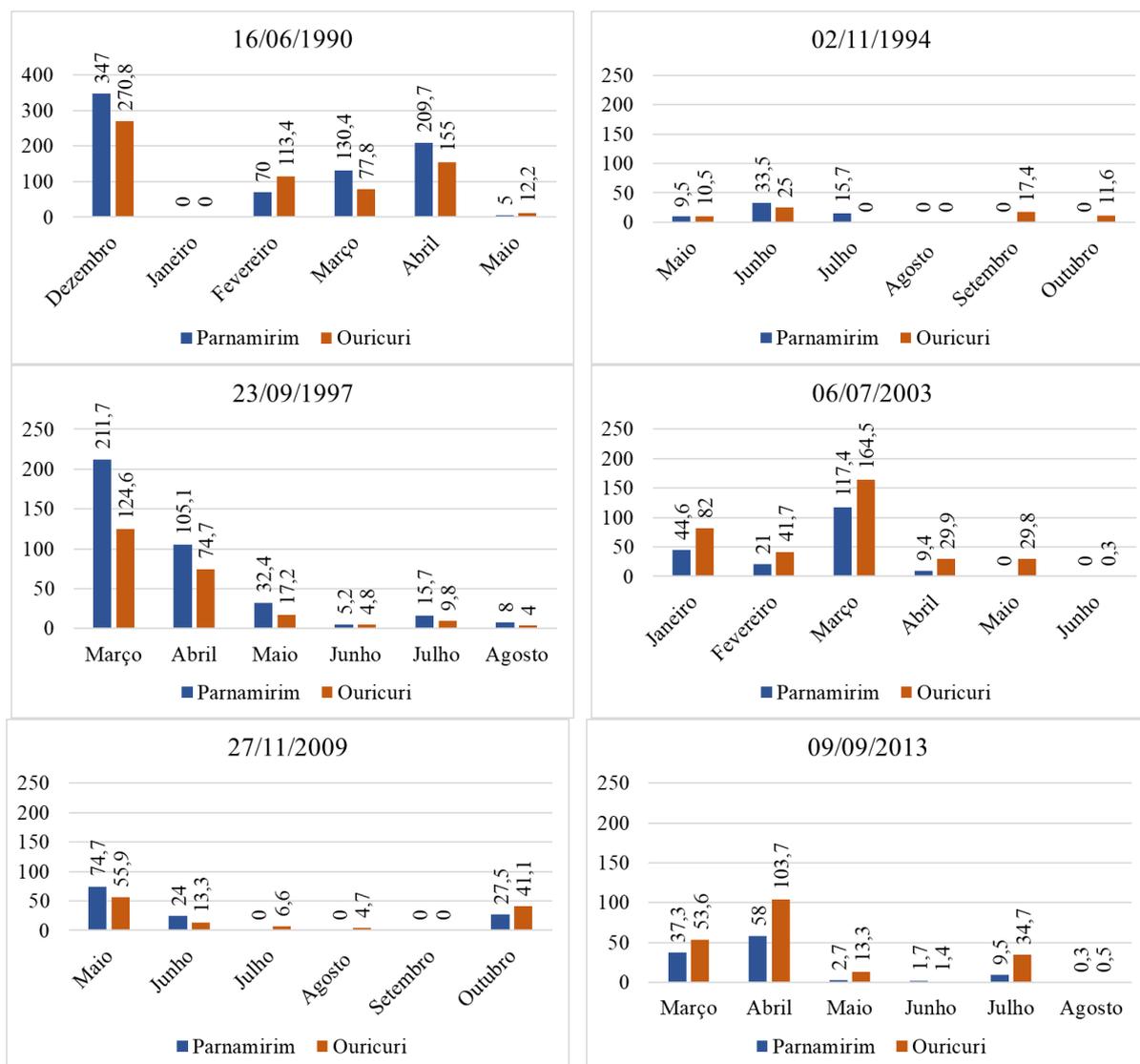
Para identificar as correlações dos resultados entre os índices de vegetação e água, foram escolhidos aleatoriamente 72 pontos na imagem região da Chapada do Araripe para a comparação dos índices de vegetação e 40 pontos em cada reservatório, para comparação com os índices de água.

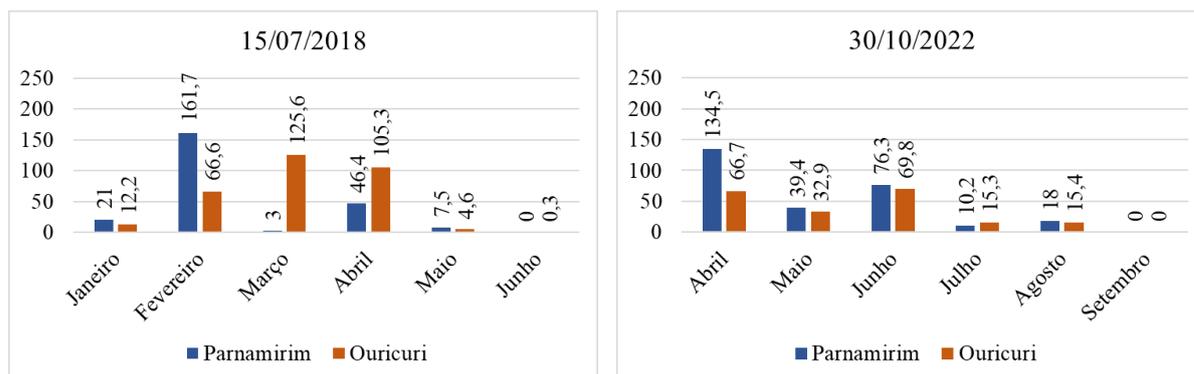
Foram identificados os valores dos índices NDVI e EVI em cada um dos pontos em todas as oito datas pesquisadas, bem como os valores de MNDWI e NDWI. Os resultados foram dispostos em planilha eletrônica e foi encontrado o coeficiente de determinação (R^2) entre os índices, e a linha de tendência dos seus valores médios.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os resultados analisados foi possível determinar a dinâmica espaço-temporal de coberturas hídrica e vegetal na região da Bacia do Brígida - PE, de acordo com as cartas georreferenciadas que tornaram possível a classificação da superfície da região. Previamente foi realizada a análise dos índices pluviométricos seis meses antes das imagens. A média mensal dos municípios, considerando os postos analisados, se encontram na Figura 12.

Figura 12 - Dados pluviométricos mensais de Parnamirim e Ouricuri





Fonte: Autora (2023).

Diante dos resultados obtidos pela averiguação dos dados pluviométricos mensais disponibilizados pela APAC (2023), detectou-se que o período seco nos dados coletados era entre os meses de junho e novembro, sendo, entre esses 6 meses, o mês de novembro apresentado como mês mais chuvoso e os meses de agosto e setembro os meses menos chuvosos.

O reservatório de Lopes II tem sua área total de água distribuída entre os municípios de Bodocó e Ouricuri. Já os reservatórios de Chapéu e Entremontes têm seu vertedouro no município de Parnamirim, e para Entremontes a área molhada se distribui entre Ouricuri e Parnamirim. Portanto, os dados pluviométricos pesquisados envolverão os municípios de Ouricuri e Parnamirim.

Diante dos dados, quanto a Ouricuri, os dados pluviométricos foram obtidos de 4 postos pluviométricos, enquanto para o município de Parnamirim, foram observados 3 postos, buscando entre eles os que obtivessem maior quantidade de dados e menos erros. O ano de 1994 se destacou devido aos seus postos constarem índices baixos de dados pluviométricos para os municípios verificados, durante os períodos pesquisados, e com índices baixos, sendo 17,4 mm em setembro e 11,6 em outubro, enquanto 1990 se evidenciou como o ano com maior índice pluviométrico dentre todos os anos, tendo chovido 209,7 mm no mês de abril e 130,4 mm no mês de março, para o município de Parnamirim, e 155 mm no mês de abril e 77,8 mm no mês de março, para o município de Ouricuri.

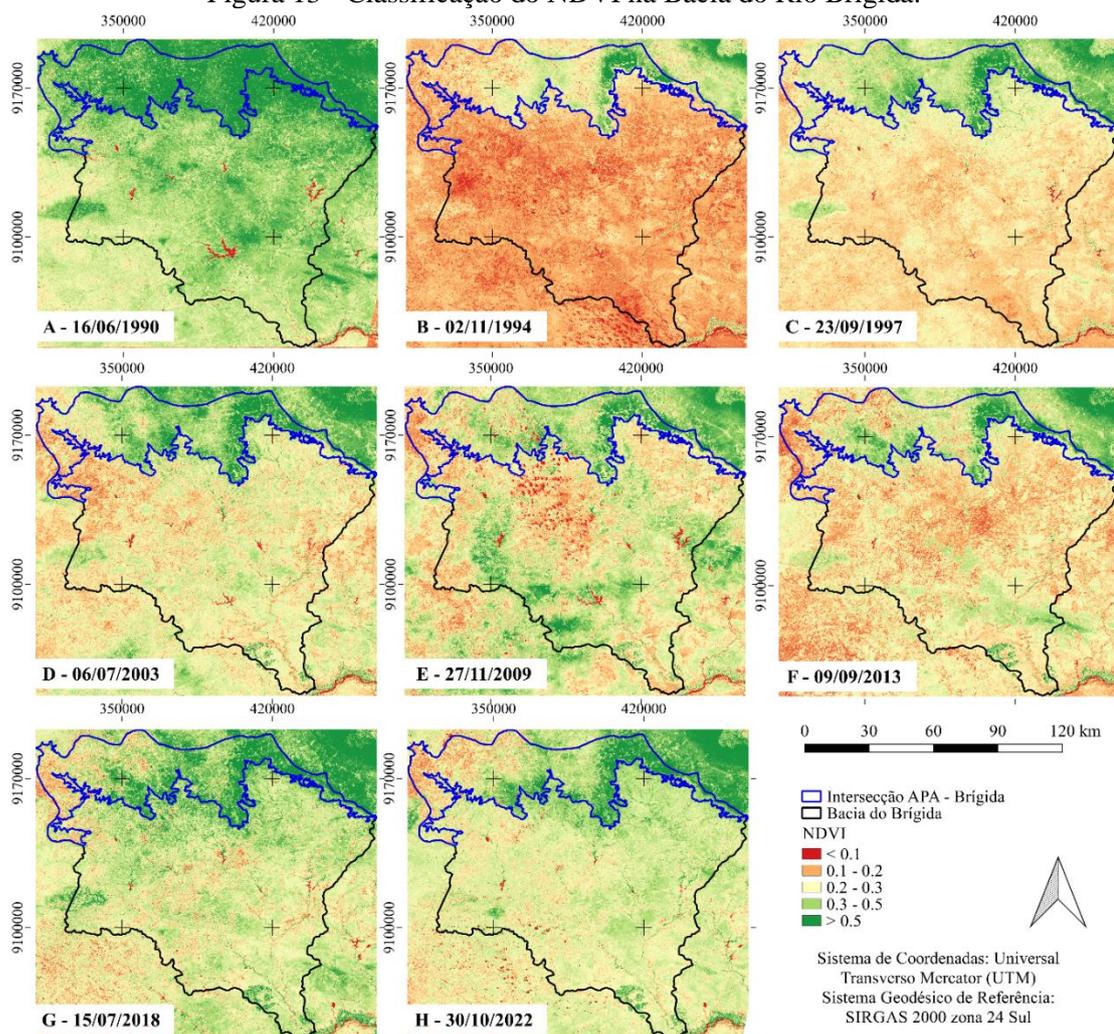
No período entre 1997 e 2022 houve baixa quantidade de chuvas nos 3 meses anteriores às imagens, com chuvas abaixo de 50 mm, excetuando-se 2018 em Ouricuri, que registrou chuvas com soma de 105,3 mm no mês de abril. Os anos entre 2003 e 2013 demonstraram baixo índice pluviométrico nos três meses anteriores às imagens.

5.1 ANÁLISE DA COBERTURA VEGETAL

No índice NDVI (Figura 13), as classes dos valores obtidos se dispuseram entre 5 classificações. Para valores maiores que 0,3 foram dispostas 2 classificações, com as regiões de vegetação mais destacada sendo identificada pela cor verde, e para as regiões menos verdes, de solo exposto ou de regiões de água, foram utilizadas 3 classificações, sendo identificadas pelas cores amarelo, laranja e vermelho. Com a classificação, foi perceptível que nas datas dos anos de 2003 a 2022 houve uma menor cobertura vegetal, destacando-se as imagens dos anos de 2013, e na imagem dos anos de 1990 a 1997 houve maior cobertura de vegetação, destacando-se positivamente a data do ano de 1990.

Também foi possível perceber que existe uma região ao Norte de todas as imagens que se destaca pela maior quantidade de vegetação. Essa região foi identificada como a parte Sul da Área de Preservação da Chapada do Araripe, que tem sua intersecção com a região Norte da Bacia do Brígida, em Pernambuco, destacada nas imagens pelo contorno azul.

Figura 13 - Classificação do NDVI na Bacia do Rio Brígida.



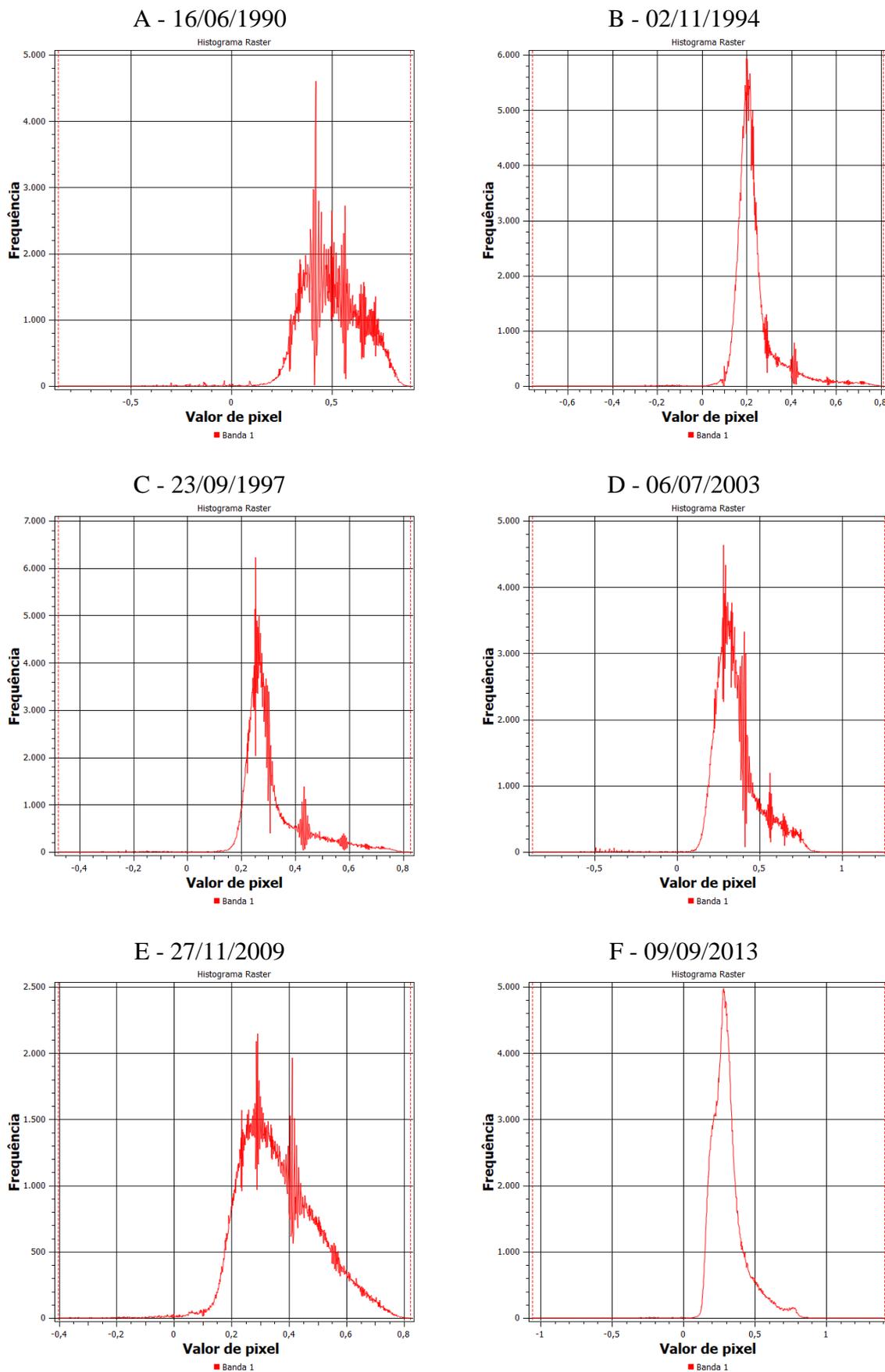
Fonte: Autora (2023).

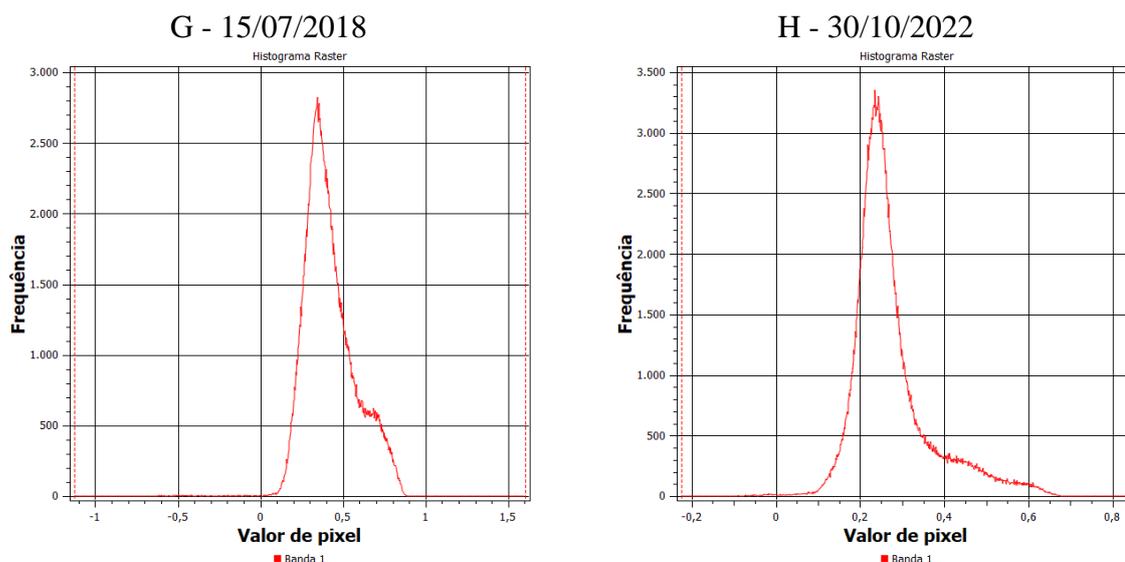
Na avaliação feita por Andrade *et al.* (2018), que realizaram o processamento dos índices NDVI e NDWI nos municípios de Exú e Moreilândia no dia 21 de setembro de 2008, obtiveram-se resultados próximos aos encontrados nesse trabalho. No seu estudo, foi percebido que as regiões ao Norte dos municípios possuíam valores maiores nas classes dos índices, indicando uma maior quantidade de áreas de alta intensidade de cobertura vegetal e matas nativas. Na imagem analisada datada de 27/11/2009 (E), percebe-se que existe uma maior intensidade de vegetação na região nordeste da bacia do Brígida, onde se localizam os municípios de Exú e Moreilândia. Esse fato também foi exposto por Sousa *et al.* (2023), que constatou em seu estudo que existe um aumento da quantidade de precipitação proporcional ao aumento da elevação da bacia, que por sua vez, tem a elevação mais alta identificada em sua região norte, abrangendo a Chapada do Araripe.

Com o histograma raster das imagens (Figura 14), foi possível perceber que nas datas dos anos de 2022 a 2013 a curva de frequência dos pixels se demonstrou mais acentuada e com valores próximos a 0,2, demonstrando valores de pixels com variações continuadas, com aumento das frequências realizado de maneira constante. Já entre as datas dos nos 2009 e 1990, a frequência de pixels foi mais bem distribuída entre 0,2 e 0,8, explanando uma maior variação na quantidade de vigor vegetativo ao longo da Bacia do Brígida, e demonstrando maiores variações nas frequências, com ampla distribuição de valores de pixels, destacando-se a data de 16 de junho de 1990 (A) como a data de valores de pixel mais variados.

Houve destaque nas datas dos anos de 2022 (H), com alta frequência de valores baixos de pixels, próximos de 0,25, podendo indicar baixo vigor vegetativo, e na data de 1990 (A), há maior frequência valores mais altos de pixel, variando entre 0,3 e 0,7. As datas de 1994 e 2013 (B e F, respectivamente), obtiveram as maiores frequências de valores baixos de pixels, distribuídos entre 0,2 e 0,3.

Figura 14 - Histograma Raster do índice de vegetação NDVI





Fonte: Autora (2023).

Esses resultados corroboram com Sousa *et al.* (2023), que realizou uma análise espaço-temporal de precipitação e secas na Bacia do Brígida, e sua dinâmica de uso e cobertura do solo, também utilizando o NDVI, observando dados de 40 estações climáticas por uma série de tempo de 55 anos. Em seu estudo, foi detectado pelo índice de vegetação uma degradação ambiental que ocorreu durante um período de severa seca datado entre os anos de 2012 e 2013.

Adicionalmente, em estudo realizado com o NDVI nessa mesma bacia do Rio Brígida datado de 13/09/2002, conforme Galvíncio *et al.* (2007), ficou evidenciado a cobertura remanescente de Caatinga na referida bacia hidrográfica em 42,68% de sua área, em época seca, possuindo aproximadamente 50% de sua área coberta por vegetação. Entre as datas de 16/06/1990 e 06/07/2003, conforme os histogramas e a Figura 14 A e D, notou-se que a região do Brígida possui uma frequência bem distribuída dos valores de *pixel*, podendo indicar uma alta variação entre regiões com e sem vegetação.

De acordo com a Tabela 5, percebeu-se que a imagem de 1990 mostrou valor médio de pixels de 0,502, o mais alto de todos, demonstrando alta cobertura vegetal, e na imagem do ano de 1994 o valor médio foi de 0,236, menor de todos, demonstrando, em termos práticos, que a região se destacou por sua baixa cobertura vegetal.

Tabela 5 - Comparação de valores da classificação do índice de vegetação NDVI

Ano	Máximo	Médio	Mínimo	Desvio Padrão
16/06/1990	0.890	0.502	-0.862	0.149
02/11/1994	0.809	0.236	-0.759	0.099
23/09/1997	0.826	0.313	-0.478	0.113
06/07/2003	1.256	0.358	-0.875	0.135
27/11/2009	0.821	0.367	-0.403	0.134
09/09/2013	1.406	0.313	-1.056	0.119
15/07/2018	1.489	0.444	-2.031	0.161
30/10/2022	0.898	0.429	-0.159	0.154

Fonte: Autora (2023).

O desvio padrão em 15/07/2018 foi de 0,161, e em 30/10/2022 foi de 0,154, ou seja, ambos os anos possuíam desvio padrão relativamente alto, provando que os dados estavam espalhados por uma ampla gama de valores de pixels. Contudo, se destacando a data do ano de 02/11/1994, uma vez que se percebe, na Figura 13 B, referente as cartas do NDVI, regiões com menor vigor vegetativo ao longo da Bacia do Brígida, possuindo uma quantidade de vegetação destoante na região da APA da Chapada do Araripe.

Na análise do índice espectral EVI (Figura 15), foi perceptível uma correlação com o resultado do índice NDVI. As datas de 16/06/1990 e 02/11/1994 se consolidaram de maior e menor vigor vegetativo, respectivamente. Contudo, no índice EVI é possível notar que os resultados das classificações foram mais acentuados, o que condiz com Huete *et al.* (2002), o qual afirmaram que o EVI apresenta maior destaque às variações estruturais no dossel, incluindo o índice de área foliar, tipo de dossel, fisionomia vegetal e arquitetura do dossel.

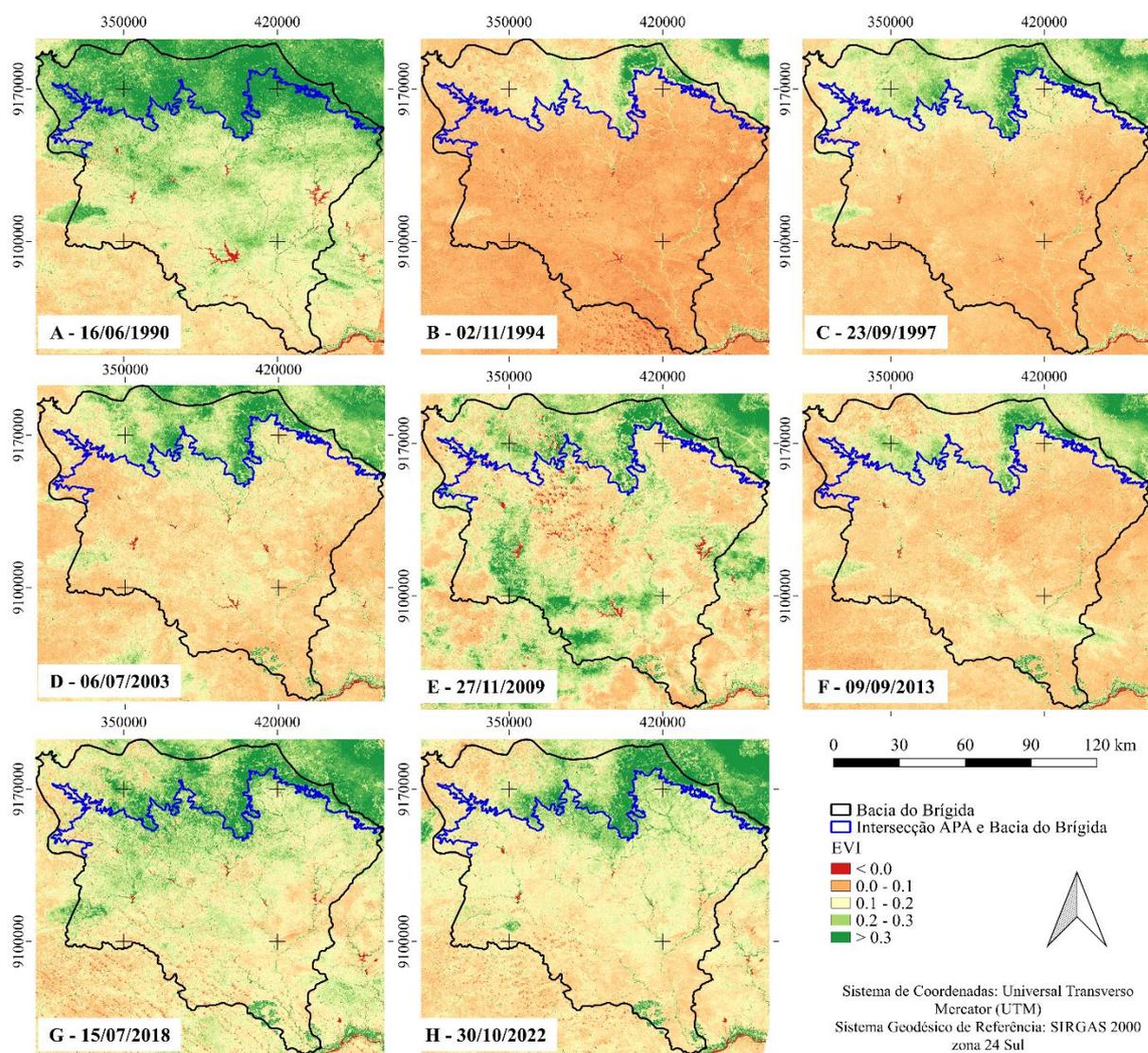
O estudo realizado por Rossi, Rogan e Schneider (2013), que utilizou o EVI do MODIS como um método de avaliação para averiguar os danos florestais após o furacão Felix, ocorrido em 4 de setembro de 2007, na Nicarágua. Foi escolhido o EVI para a realização da análise devido a sua alta sensibilidade ao verde do dossel e por sua resistência a neblina atmosférica, e foi concluído que os produtos do EVI proveram informações complementares e precisas na distribuição espacial dos danos florestais pós-furacão comparados a esboços de produtos de mapeamento.

No índice espectral EVI, as classes dos valores obtidos também se dispuseram entre 5 classificações. Para valores maiores que 0,2 foram dispostas 2 classificações para regiões de vegetação mais destacada identificada pela cor verde. Para as regiões de solo exposto, menor

densidade vegetativa ou regiões de água, foram utilizadas 3 classificações, disposta entre valores menores que 0,2, sendo identificadas pelas cores amarelo, laranja e vermelho.

Nos resultados evidenciados na Figura 15 para as oitos datas pesquisadas, observou-se na classificação que foi perceptível nas datas dos anos de 1994 (B) e 1997 (C) que houve uma baixa resposta a cobertura vegetal, destacando-se novamente a data de 02/11/1994 como de menor vigor vegetativo, nas datas de 16/06/1990 e 27/11/2009 houve uma resposta bem distribuída entre as classes dos níveis de vegetação, com suas regiões variando consideravelmente entre solo exposto e regiões com vigor vegetativo. Houveram semelhanças entre o índice NDVI e EVI em relação ao maior vigor vegetativo na data de 16/06/1990 e menor vigor na data de 02/11/1994.

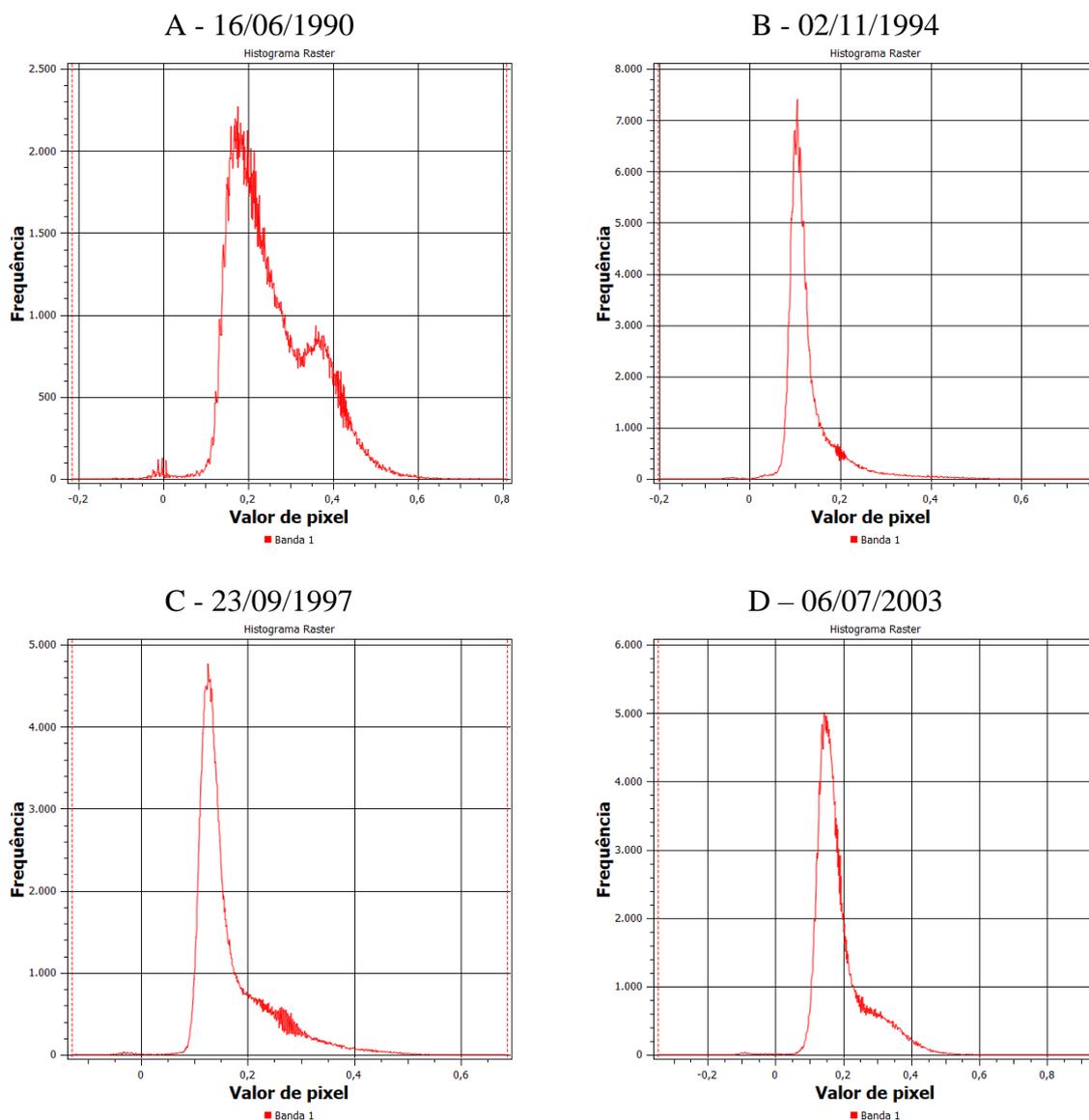
Figura 15 - Classificação do índice de vegetação EVI na Bacia do Rio Brígida

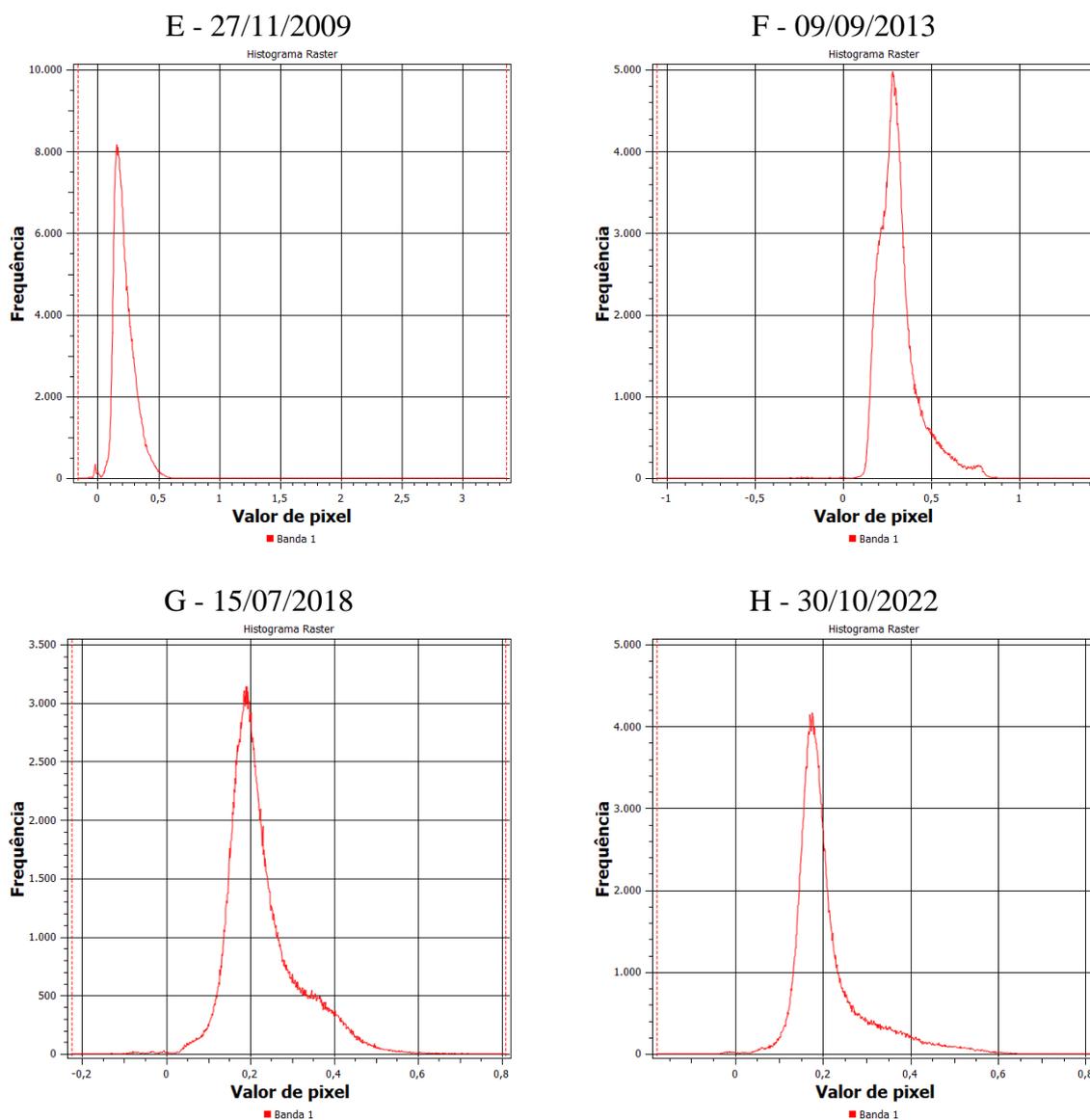


Fonte: Autora (2023).

Em relação ao histograma raster do EVI, identificado na Figura 16, notaram-se que nas imagens dos anos de 1994 (B) e 2009 (E) a curva de frequência dos pixels se demonstrou mais acentuada e com alta frequência de valores próximos a 0,2, sendo a imagem de 02/11/1994 com maior frequência de valores próximos de 0,1. Na imagem de 16/06/1990 (A) a frequência de pixels foi mais bem distribuída entre os valores 0,1 e 0,6, expondo alta variação no vigor vegetativo em relação as outras imagens.

Figura 16 - Histograma Raster do índice de vegetação EVI





Fonte: Autora (2023).

Considerando a Tabela 6, a data de 16/06/1990 mostrou valor médio de pixels em 0,256, sendo ele o mais alto em relação aos outros anos, e possuindo o maior desvio padrão, demonstrando uma distribuída cobertura vegetal. Na data de 02/11/1994 demonstrou-se o menor valor médio, de 0,130, e com o menor desvio padrão em relação aos outros anos, demonstrando que a região se destacou por sua baixa cobertura vegetal e mais solo exposto.

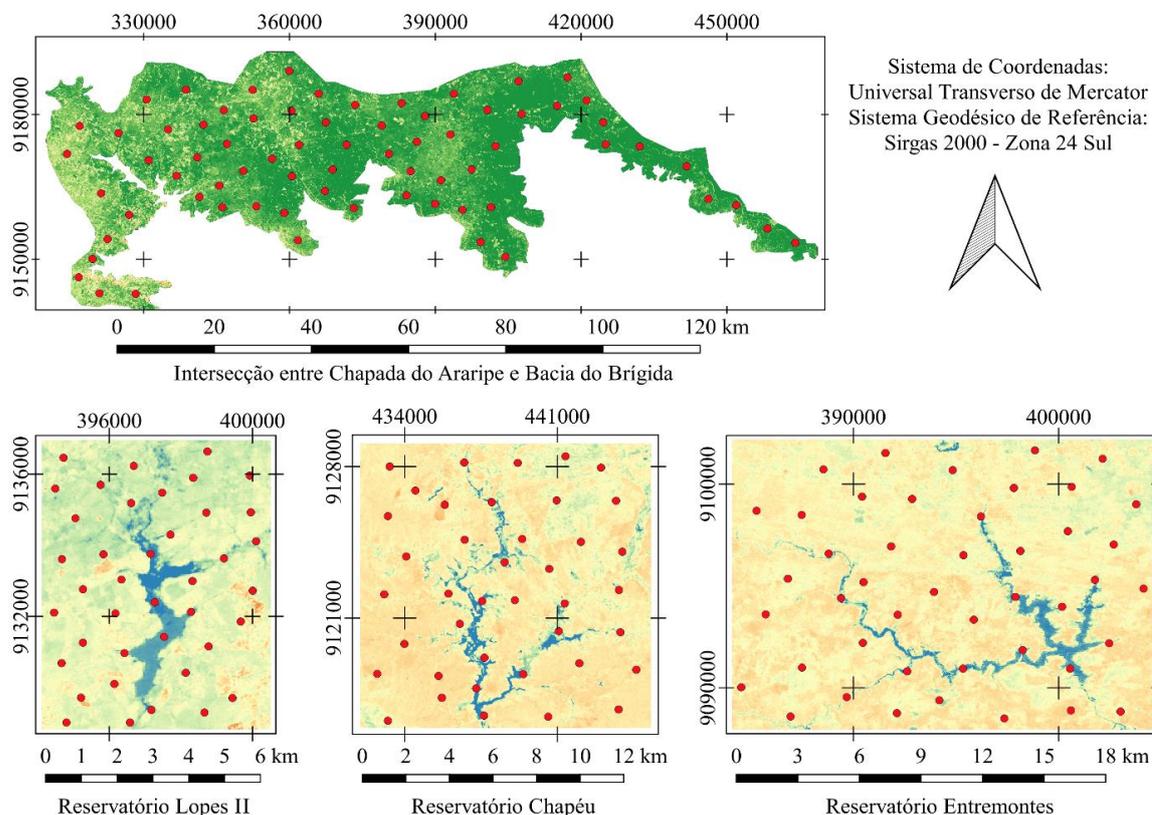
Tabela 6 - Comparação de valores da classificação do índice de vegetação EVI

Data	Máximo	Médio	Mínimo	Desvio Padrão
16/06/1990	0.808	0.256	-0.216	0.098
02/11/1994	0.758	0.130	-0.203	0.058
23/09/1997	0.686	0.167	-0.129	0.070
06/07/2003	0.934	0.190	-0.346	0.076
27/11/2009	3.353	0.217	-0.162	0.093
09/09/2013	0.788	0.170	-0.177	0.063
15/07/2018	0.808	0.228	-0.225	0.086
30/10/2022	0.812	0.213	-0.178	0.084

Fonte: Autora (2023).

Para realizar uma comparação entre os índices de vegetação (Tabela 7), utilizou-se 72 pontos na Área de Preservação Ambiental da Chapada do Araripe, conforme Figura 17, que mostraram os valores dos índices durante os oito anos. Nele foi possível perceber que os valores do coeficiente de determinação (R^2) se mostraram, sua maioria, acima de 90%, demonstrando que existe uma boa correlação entre os valores dos índices NDVI e EVI, com a exceção das imagens dos anos de 2009 e de 1990.

Figura 17 - Localização dos pontos na área de estudo.



Fonte: Autora (2023).

O mesmo método utilizando pontos e coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado por Macandza (2022), que utilizou a regressão logística e técnicas GIS na análise dinâmica da cobertura florestal em Mabote e Funhalouro, Inhambane, ao sul de Moçambique. Em seu estudo, o modelo utilizado mostrou que as técnicas utilizadas permitiram um novo dimensionamento para interpretar a dinâmica da cobertura florestal, podendo ainda os resultados serem utilizados para basear novas decisões de política florestal.

Nessa data de 27/11/2009, existiram pontos onde foi identificado água no índice EVI, sendo representada por valores negativos, que não foram constatados pelo NDVI. Isso pode ter ocasionado um aumento na variação dos resultados explicitado pelo coeficiente R^2 .

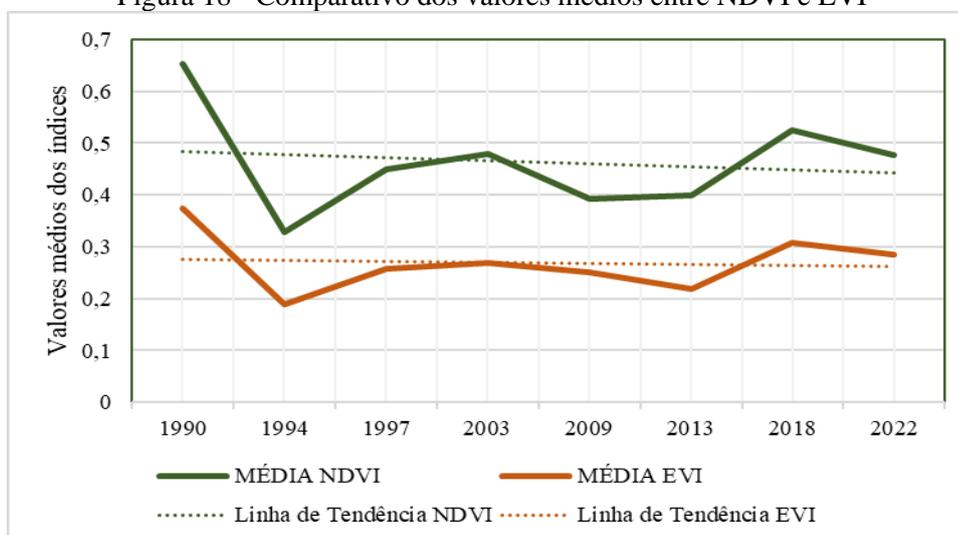
Tabela 7 - Coeficiente de determinação (R^2) para comparação de valores entre EVI e NDVI

Datas	16/06 /1990	02/11 /1994	23/09 /1997	06/07 /2003	27/11 /2009	09/09 /2013	15/07 /2018	30/10 /2022
R^2	82,81%	95,45%	92,86%	91,67%	35,15%	90,64%	92,83%	92,73%

Fonte: Autora (2023).

Além disso, buscou-se a média dos dois índices nos 72 pontos, e observou-se que o índice NDVI demonstrou uma leve tendência de diminuição de seus valores ao longo das datas, conforme demonstrado na Figura 18. Essa diminuição demonstra que, ao longo dos períodos analisados, existe uma menor quantidade de pixel com alto vigor vegetativo ao longo das datas ou há possível aumento de áreas desmatadas, uma vez que, quanto menor o valor do EVI, menos saudável será a vegetação ou maior a quantidade de solo exposto. No índice EVI, com o passar dos anos, observou-se que seus valores médios também indicaram uma redução, porém menos explícita, com linha de tendência quase horizontal.

Figura 18 - Comparativo dos valores médios entre NDVI e EVI

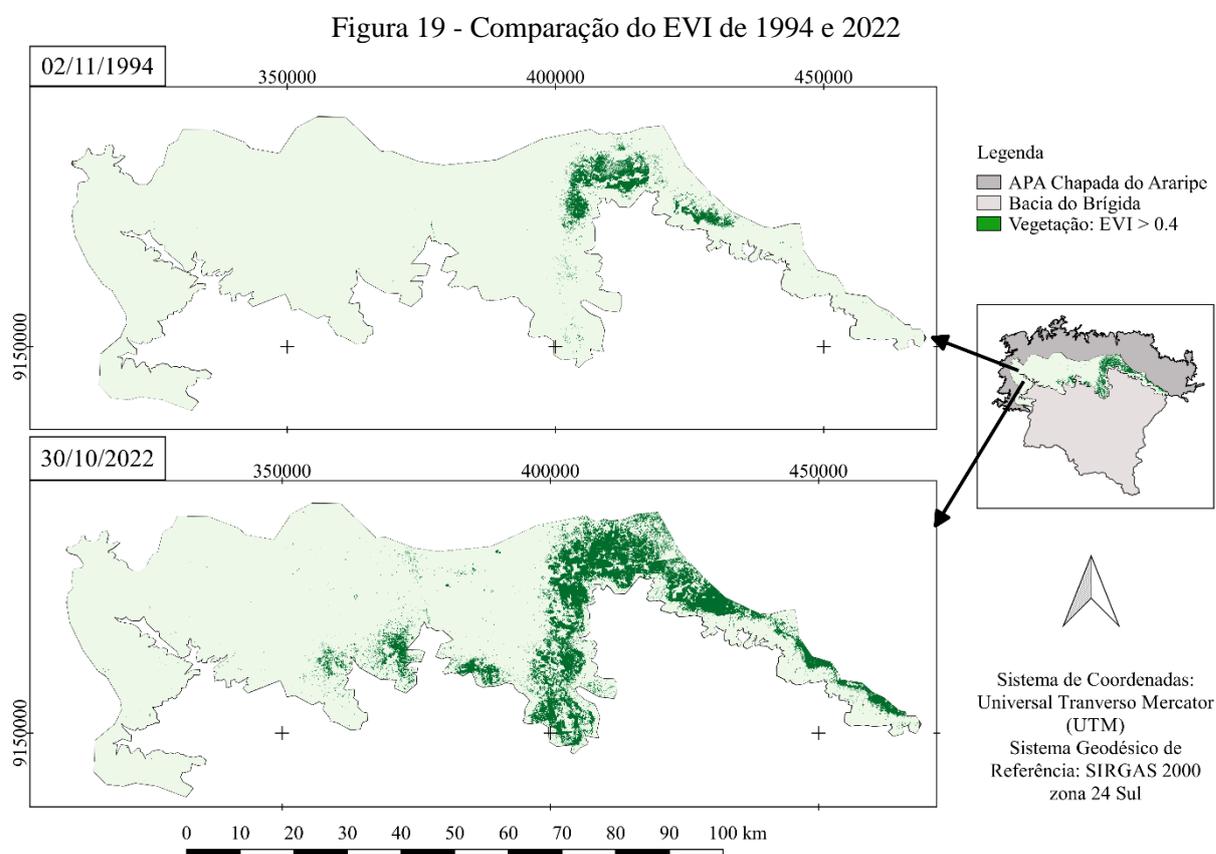


Fonte: Autora (2023).

Durante a tese realizada por Silva (2020), na bacia do Brígida com 19 datas ao longo de 25 anos, foi demonstrada uma tendência de diminuição dos valores de EVI entre os anos de 1986 a 2011, com a média histórica dos valores do índice caindo de aproximadamente 0,3 para 0,15, sugerindo uma intensificação dos períodos secos e interferindo diretamente no desenvolvimento da vegetação da bacia hídrica.

Dentre os anos pesquisados, buscou-se entre as datas analisadas, dias de maior proximidade entre diferentes anos para uma comparação entre as regiões de vegetação da intersecção entre a APA Chapada do Araripe e a Bacia do Brígida. As datas se referiram aos anos de 1994 e 2022, que tinham a diferença temporal de 28 anos e 3 dias, e foram buscados valores de índices que representassem a vegetação de maior vigor vegetativo, classificada no EVI e NDVI em valores maiores que 0,4.

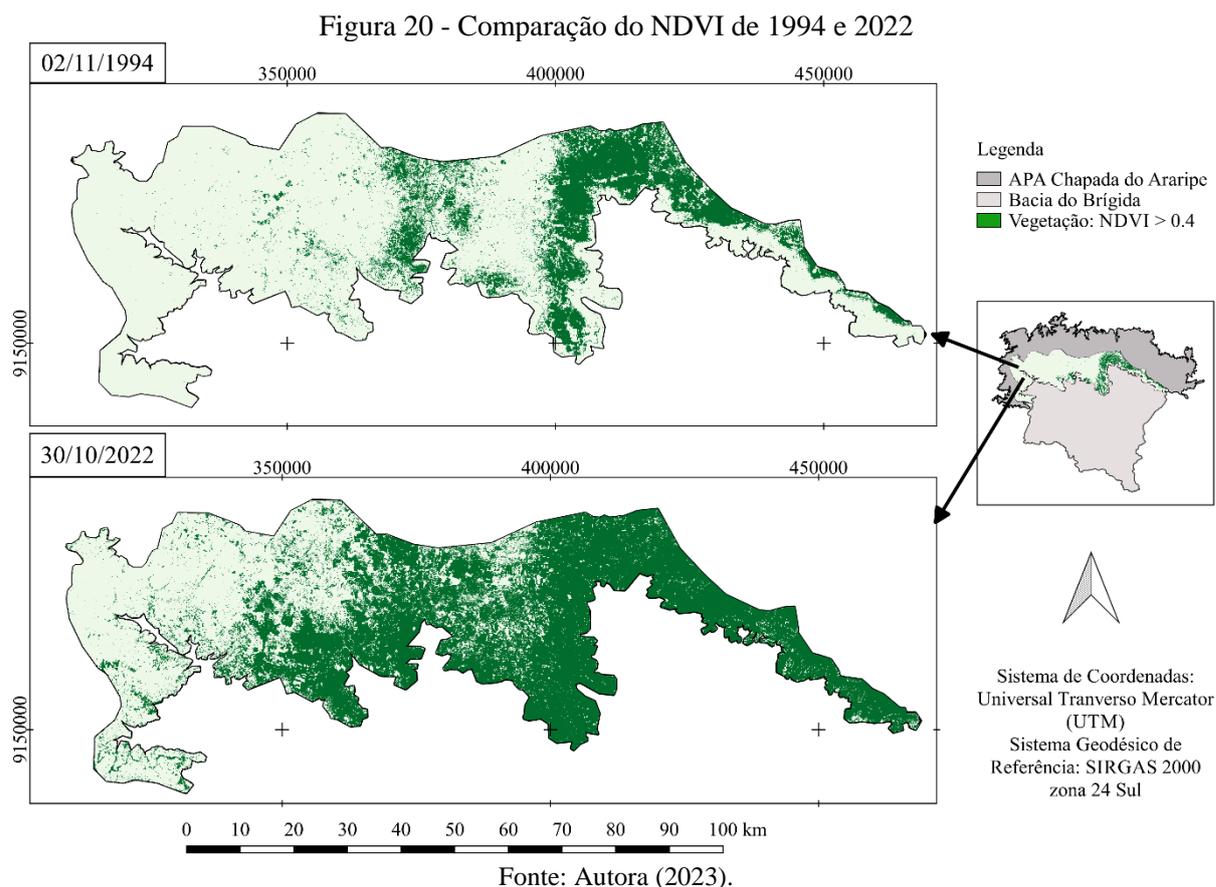
Diante dos resultados, demonstrados na Figura 19, foi identificado que a região Leste da intersecção entre a APA e a Bacia, representou um maior vigor vegetativo para a data de 02/11/1994 e para 30/10/2022. Também foi identificado, entre as imagens que houve um aumento do vigor entre as datas de 1994 e 2022.



Fonte: Autora (2023).

Em tese realizada por Silva Neto (2013), que analisou a perda da vegetação natural na Chapada do Araripe na porção do estado do Ceará entre os anos de 1975 e 2007, e constatou-se que a paisagem primitiva no oeste da região da Chapada foi totalmente alterada e deu lugar às atividades antrópicas, e não foram constatadas áreas que em processo de recuperação. Contudo, ao leste da Chapada, existem áreas cobertas pela vegetação primitiva, com preservação da fauna, que formam fragmentos de tamanhos e formas variadas, e ao lado dessas áreas começaram a surgir outras que estão em recuperação e já possuem espécies nativas.

Para o NDVI e a mudança vegetativa, identificada na Figura 20, foi observado que a região Leste da intersecção entre a APA e a Bacia representou um maior vigor vegetativo para ambas as datas, contudo, para a data de 2022 há uma extensa distribuição vegetativa para o centro da intersecção. O motivo da proximidade de resultados em relação a vegetação pode estar definido pela quantidade de chuva nos cinco dias anteriores à imagem, que auxiliou no aumento do vigor vegetativo para a data de 30/10/2022.



A soma da pluviometria para os 5 dias anteriores às imagens está disposta na Tabela 8. Para a maioria das datas, não houve ocorrência de chuva nos dias anteriores a passagem do sensor, contudo, observa-se que houve uma precipitação considerável entre os dias 25 e 30/10/2022, resultado em 58,2 mm para o posto de Parnamirim e 15,3 mm no posto de Ouricuri.

Essa precipitação pode ter motivado o aumento das regiões em verde identificado pela classificação do NDVI, conforme a Figura 20.

A diferença entre os resultados dos índices EVI e NDVI pode estar no fato disposto por Huete *et al.* (2002), que afirmaram sobre o EVI apresentar maior destaque às variações estruturais no dossel, tipo de dossel e arquitetura do dossel. Isso sugere que o EVI responde melhor a diferenças no dossel da vegetação, contudo, a chuva nos 5 dias anteriores não se mostrou suficiente para causar alterações no dossel, porém, foram motivadoras da melhora do vigor vegetativo demonstrado através do NDVI.

Tabela 8. Soma de chuva 5 dias antes da data da imagem

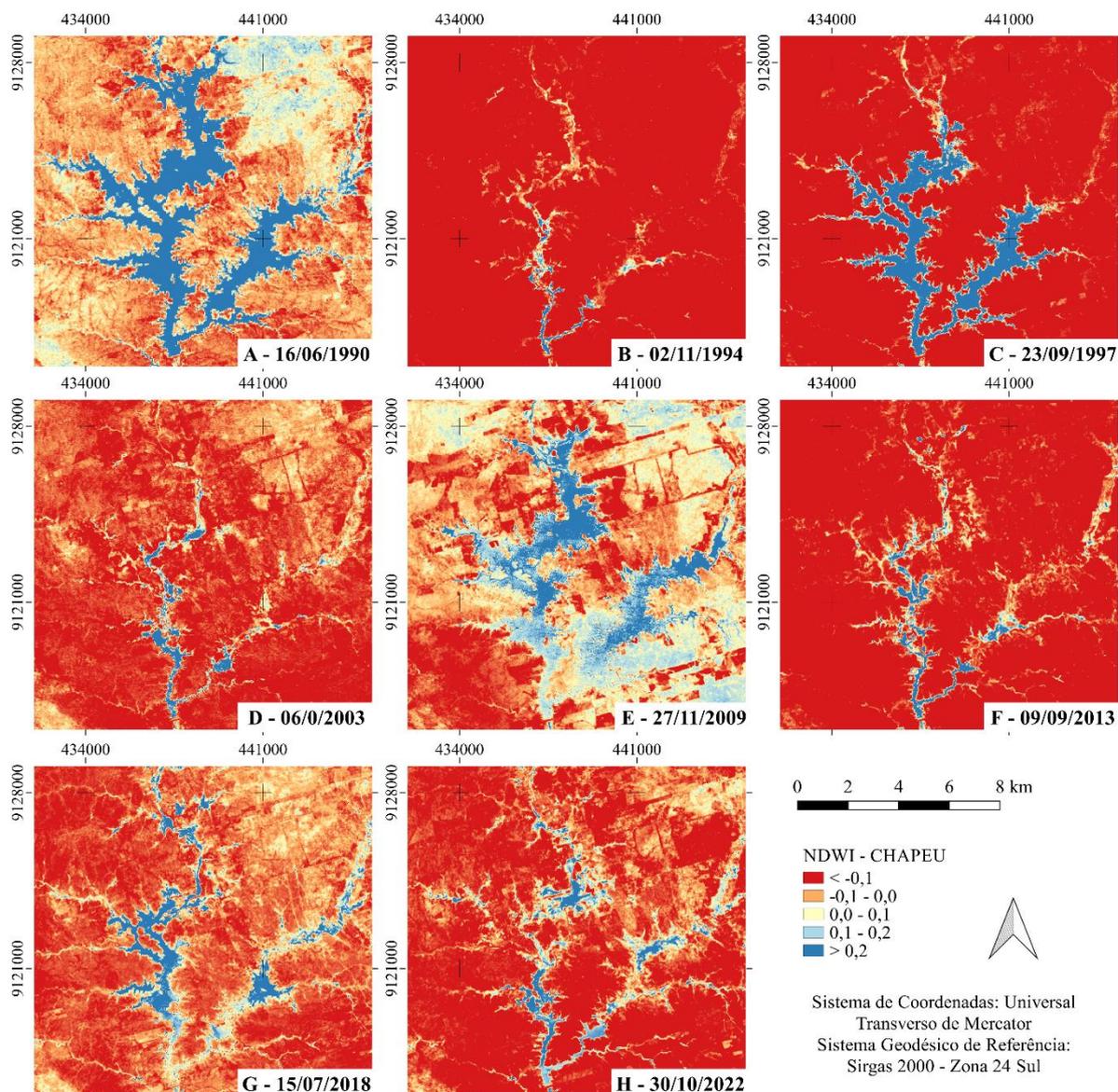
	Código do Posto	Município	Soma (mm)
16/06/1990	413	Parnamirim	0
	230	Ouricuri	1,6
02/11/1994	235	Parnamirim	0
	5	Ouricuri	0
23/09/1997	235	Parnamirim	0
	37	Ouricuri	0
06/07/2003	172	Parnamirim	-
	373	Ouricuri	0
27/11/2009	172	Parnamirim	0
	373	Ouricuri	0
09/09/2013	172	Parnamirim	0
	373	Ouricuri	0
15/07/2018	172	Parnamirim	0
	373	Ouricuri	0
30/10/2022	172	Parnamirim	58,2
	373	Ouricuri	15,3

Fonte: Autora (2023).

5.2 ANÁLISE DAS ÁREAS HÍDRICAS

Após analisar os dados de pluviometria da APAC, foi analisado o índice NDWI, referente a região molhada dos reservatórios de Chapéu, Entremontes e Lopes II. Para o NDWI do reservatório de Chapéu, identificado na Figura 21, os anos de 1990 e 2009 se destacaram como as épocas com maior área d'água e 1994 demonstra pouca área hídrica.

Figura 21 - NDWI do Reservatório de Chapéu



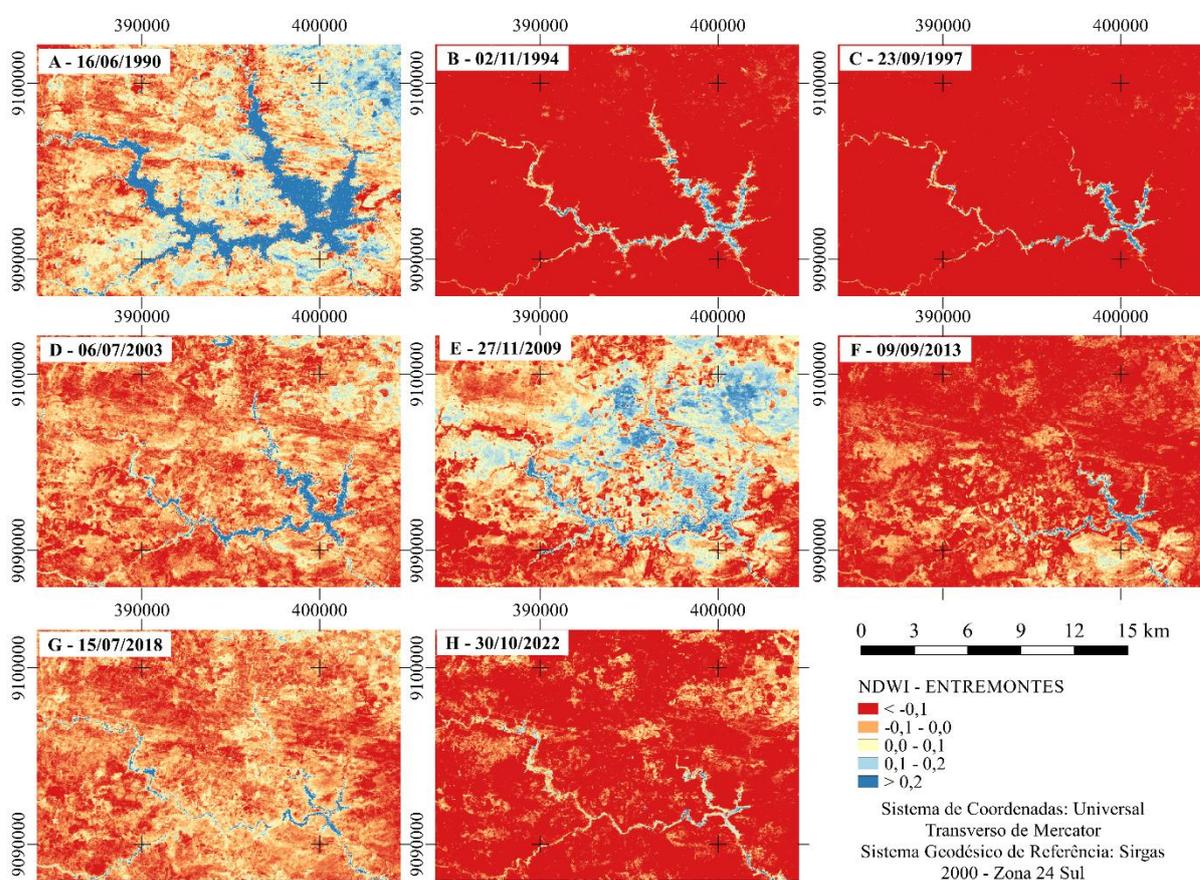
Fonte: Autora (2023).

As imagens de 16/06/1990 e 27/11/2009 foram referentes aos meses em que ocorreu precipitação no município de Parnamirim, de acordo com a Figura 12, região onde se encontra o reservatório. Contudo, as imagens também demonstram que o NDWI foi sensível a água da vegetação, assim como identificado, em menor intensidade, na imagem de 16/06/1990, 27/11/2009. Isso se demonstra no fato das imagens em questão explanarem pontos de alto valor de índice, definidos pela cor azul, mesmo para regiões fora das áreas do reservatório, proporcionando uma imagem azulada ao redor do reservatório. Por sua vez, as imagens de 02/11/1994, 06/07/2003 e 09/09/2013 demonstraram menores áreas hídricas, e de acordo com

os dados pluviométricos para os meses e anos em questão, houve baixa precipitação para o determinado período.

Para o reservatório de Entremontes (Figura 22), os resultados se mostraram compatíveis com o NDWI do reservatório de Chapéu (Figura 21), sendo as imagens de 1990 e 2009 com destacada área hídrica, e tendo a água da vegetação igualmente acentuada, assim como na imagem de julho de 2003. A imagem de 09/09/2013 também demonstrou ínfima área molhada, assim como a imagem de 30/10/2022, sendo compatível com os dados pluviométricos do mês de agosto de 2013 e setembro de 2022 nos municípios de Parnamirim e Ouricuri (Figura 12), onde se insere a região do reservatório de Entremontes.

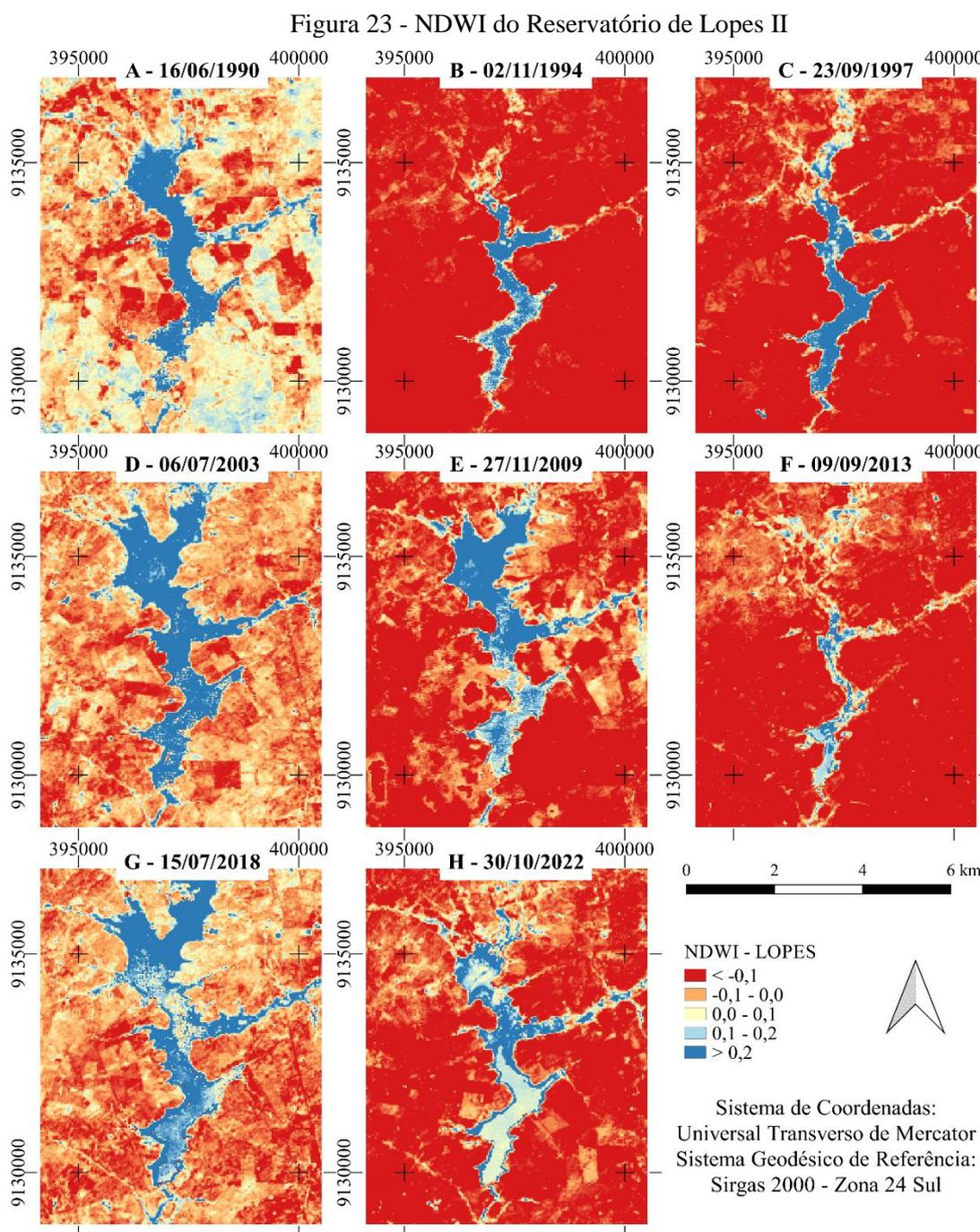
Figura 22 - NDWI do Reservatório de Entremontes



Fonte: Autora (2023).

No reservatório de Lopes II (Figura 23), que configura sua região de reservatório entre Bodocó e Ouricuri, mais uma vez a situação se repetiu, tendo as imagens de 16/06/1990, 27/11/2009 e 06/07/2003 em destaque devido a ampla área hídrica, enquanto 02/11/1994 e 09/09/2013 obtiveram baixas regiões hídricas. Contudo, no caso de Lopes II, a data de 15/07/2018 também se destacou pela grande região de área molhada, e em análise com os dados

pluviométricos de Ouricuri (Figura 12) o ocorrido pode se justificar pela alta precipitação em abril de 2018, que demonstrou alta pluviosidade.



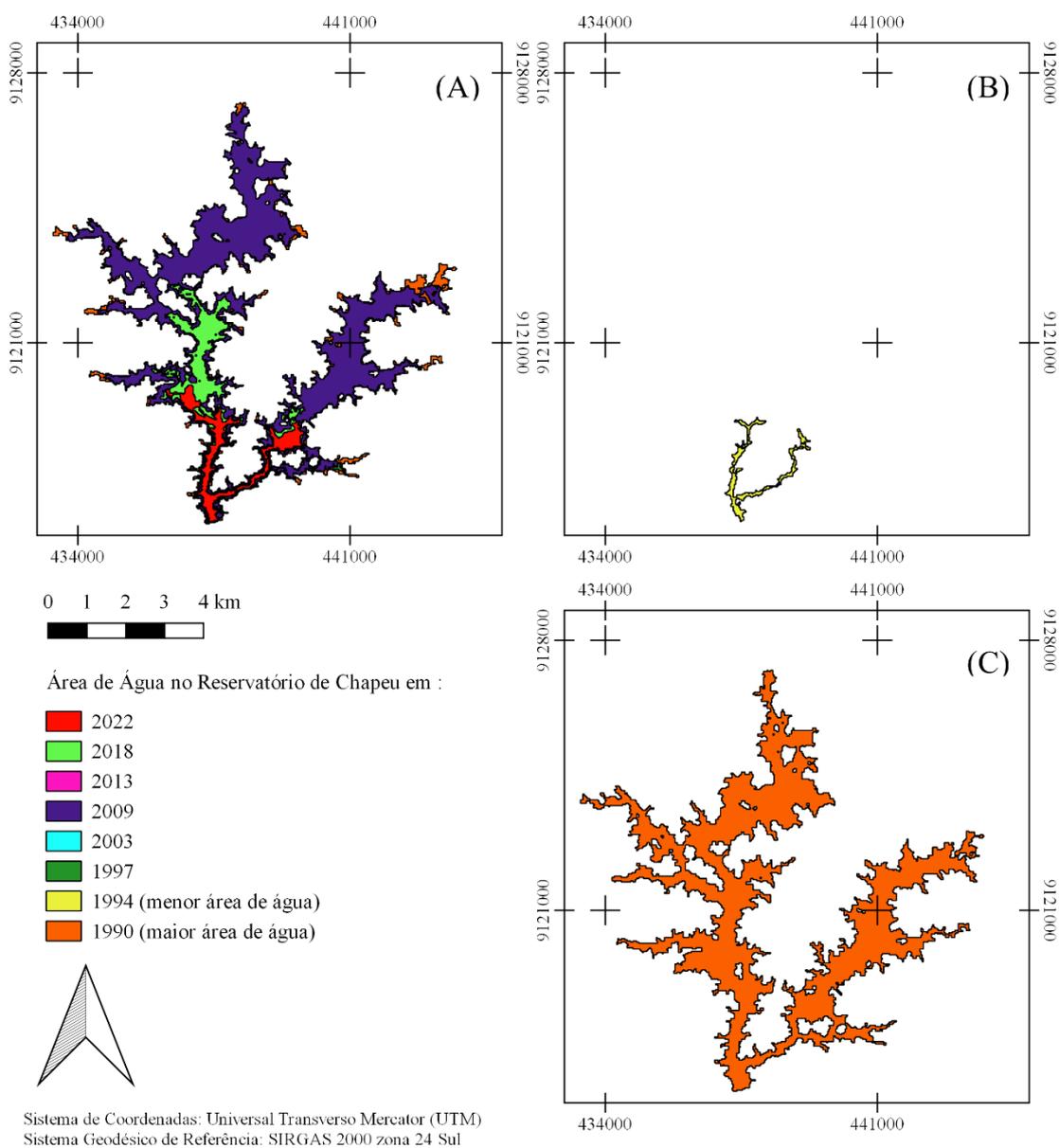
Fonte: Autora (2023).

Considerando a sensibilidade do NDWI para a água da vegetação, para realizar o cálculo das áreas molhadas dos reservatórios foi utilizado o índice MNDWI, que não possui a mesma sensibilidade para áreas vegetativas. Essa sensibilidade para de ocorrer através da substituição da banda do infravermelho próximo pela banda do verde (XU, 2006).

Para o reservatório de Chapéu, a maior área hídrica reportada por meio do MNDWI ocorreu na data de 16/06/1990 (Figura 24 - C), também tendo destaque a data de 27/11/2009,

em azul escuro, como segunda maior área hídrica (Figura 24 - A). O destaque da área hídrica corrobora o resultado obtido pelo NDWI (Figura 21) e a menor área hídrica na data do ano de 02/11/1994 (Figura 24 - B), também corroborando com o NDWI.

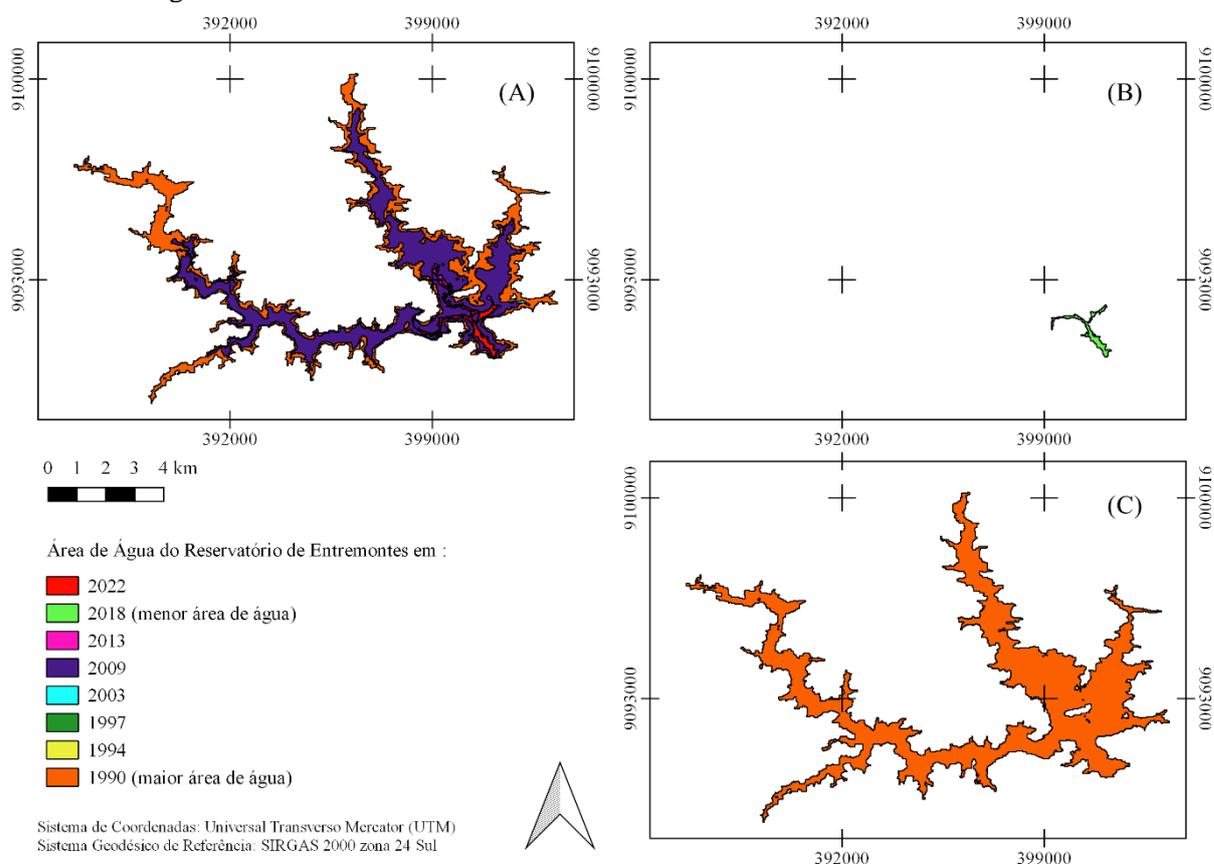
Figura 24 - Área molhada através do MNDWI do Reservatório de Chapéu



Fonte: Autora (2023).

No reservatório de Entremontes (Figura 25), a maior área hídrica também ocorreu em 16/06/1990 (Figura 25 - C), sendo destacado a data de 27/11/2009 como segunda maior área hídrica (Figura 25 - A). A menor área hídrica foi observada em 15/07/2018 (Figura 25 - B). A área de maior região molhada corrobora com o NDWI de Entremontes (Figura 22), contudo o NDWI demonstrou que as imagens de menor área molhada poderiam ser as de 09/09/2013 ou 30/10/2022.

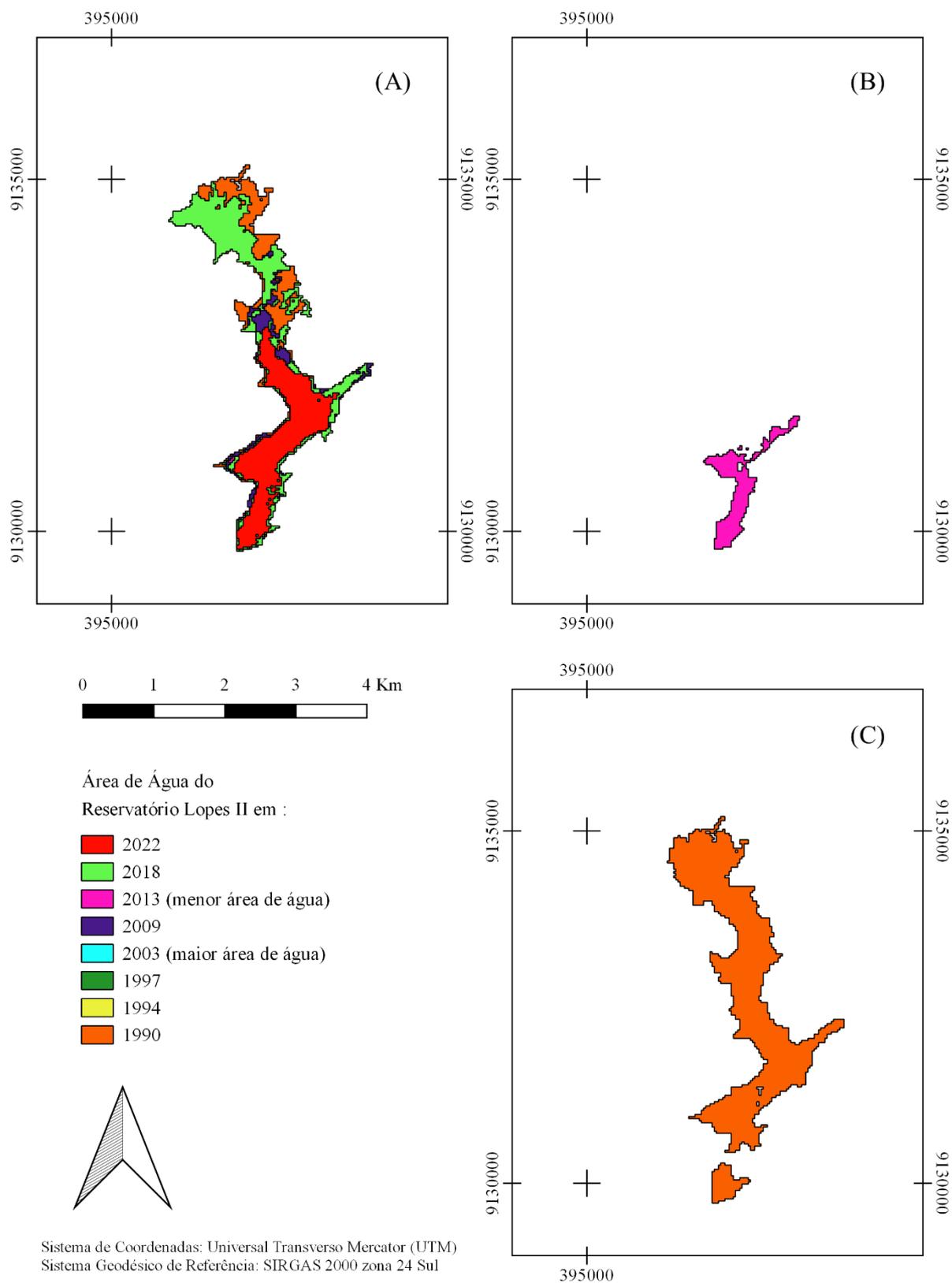
Figura 25 - Área molhada através do MNDWI do Reservatório de Entremontes



Fonte: Autora (2023).

Quanto ao reservatório de Lopes II, e de acordo com a Figura 26, sua menor área hídrica ocorreu em 09/09/2013 (Figura 26 - B), enquanto a data de 16/06/1990 correspondeu a maior área hídrica (Figura 26 - C), igualando-se às datas com maior área hídrica dos outros reservatórios. Seu resultado também encontra base no resultado definido pelo NDWI de Lopes II, demonstrado na Figura 23.

Figura 26 - Área molhada através do MNDWI do Reservatório de Lopes II



Fonte: Autora (2023).

Os valores numéricos das áreas hídricas, em hm², encontrados através do processamento do MNDWI de todos os reservatórios nas datas analisadas foram disponibilizados na Tabela 9. Entre os três reservatórios, a data de 1990 foi destacada como o ano em que ocorreu as maiores áreas molhadas, e sendo o ano de 2018 do reservatório de Entremontes tendo a menor área d'água percentual entre todos os reservatórios estudados (41,67 hm²).

Tabela 9 - Áreas de água dos reservatórios de Chapéu, Entremontes e Lopes II, de acordo com os anos

CHAPEU			ENTREMONTES			LOPES		
Data	Área (hm ²)	% da máx.	Data	Área (hm ²)	% da máx.	Data	Área (hm ²)	% da máx.
30/10/2022	156,42	8%	30/10/2022	63,63	2%	30/10/2022	134,73	41%
15/07/2018	401,4	20%	15/07/2018	41,67	1%	15/07/2018	263,7	80%
09/09/2013	83,7	4%	09/09/2013	96,48	3%	09/09/2013	50,22	15%
27/11/2009	1829,16	89%	27/11/2009	1535,3	52%	27/11/2009	176,76	54%
06/07/2003	202,14	10%	06/07/2003	774,54	26%	06/07/2003	143,1	43%
23/09/1997	1055,7	51%	23/09/1997	223,47	7%	23/09/1997	117,63	36%
02/11/1994	62,46	3%	02/11/1994	505,89	17%	02/11/1994	132,03	40%
16/06/1990	2057,94	100%	16/06/1990	2979,8	100%	16/06/1990	329,13	100%
MIN=	62,46		MIN=	41,67		MIN=	50,22	
MAX=	2057,94		MAX=	2979,8		MAX=	329,13	

Fonte: Autora (2023).

De acordo com o Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da ANA (2023), que disponibilizou os dados do volume e cota dos reservatórios estudados, com datas próximas as datas pesquisadas, encontrados na Tabela 10, se observou que, dentre as datas de referência, o menor volume e cota encontrado foi para o reservatório de Lopes II em 09 de setembro de 2013, e o maior volume e cota ocorreu em 15 de julho de 2018 no reservatório de Chapéu, e para 30 e 31 de outubro de 2022 o maior volume e cota ocorreu no reservatório de Chapéu, e o menor volume foi em Entremontes. Os dados do SAR corroboram com o resultado obtidos observando a área de água do MNDWI para as mesmas datas, dispostos anteriormente na Tabela 9.

Esses resultados podem se adequar aos resultados obtidos por Leonardo *et al.* (2021), que analisou a vegetação e área de água no reservatório de Poço da Cruz em imagens dos anos 2000, 2013 e 2020, em Pernambuco, e foi ressaltado que houve um maior estresse hídrico nos anos de 2000 e 2013, que se apresentou devido a redução dos valores dos índices

pluviométricos, contudo, em 2020, em seus resultados do NDWI apresentaram a maior área hídrica, entre as três datas pesquisadas.

Tabela 10 - Dados dos reservatórios

RESERVATÓRIO	COTA (m)	VOLUME (hm³)	DATA DE REFERÊNCIA
Chapéu	395,03	18,06	18/09/2013
Entremontes	S/INF	S/INF	-
Lopes II	92,94	1,59	09/09/2013
Chapéu	398,96	39,52	15/07/2018
Entremontes	372,81	8,11	14/07/2018
Lopes II	98,6	21,26	16/07/2018
Chapéu	395,2	18,4	31/10/2022
Entremontes	371,28	3,98	31/10/2022
Lopes II	96,89	11,57	30/10/2022

Fonte: SAR / ANA (2023).

Na comparação entre os índices de água, os 40 pontos em cada reservatório mostraram que os valores dos índices em relação ao coeficiente de determinação (R^2) se mostraram baixos, em sua maioria abaixo de 70%, conforme a Tabela 11, demonstrando que existe uma baixa correlação entre os valores dos índices NDWI e MNDWI. Apenas a data de 1997 demonstrou uma correlação acima de 90% para o reservatório de Chapéu.

De modo geral, se percebeu que muitos dos valores de NDWI se mostravam positivos, identificando ponto de água, enquanto o MNDWI identificava um valor negativo, ou seja, de região não molhada, para o mesmo ponto. Esse pode ter sido o fator que influenciou a baixa correlação entre os índices.

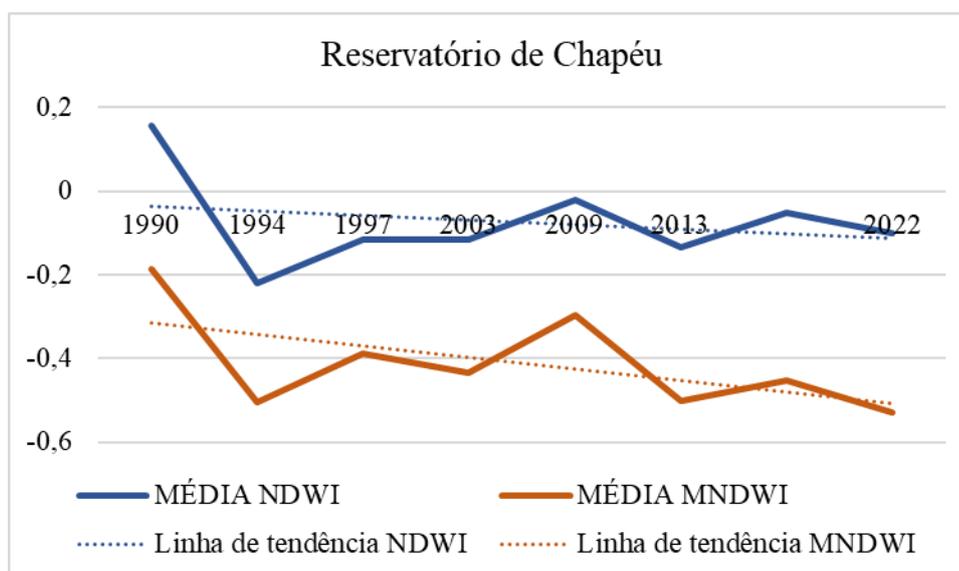
Tabela 11. Coeficiente de determinação (R^2) para comparação de valores entre NDWI e MNDWI

CHAPEU								
ANO	1990	1994	1997	2003	2009	2013	2018	2022
R²	87,56 %	82,58%	92,05%	82,46%	62,87%	75,25%	17,92%	37,18%
LOPES								
ANO	1990	1994	1997	2003	2009	2013	2018	2022
R²	50,4%	63,6%	37,17%	9,68%	24,33%	0,36%	6,32%	12,98%
ENTREMONTES								
ANO	1990	1994	1997	2003	2009	2013	2018	2022
R²	78,45 %	81,76%	86,15%	73,83%	20,51%	6,52%	1,86%	34,85%

Fonte: Autora (2023).

Sobre a média dos dois índices de água (NDWI e MNDWI) nos 40 pontos, observou-se que ambos os índices, para todos os reservatórios, demonstraram uma tendência de diminuição de seus valores ao longo dos anos de maneira similar, sendo as médias da maioria das datas negativa para os índices d'água, indicando maior quantidade de área seca nas regiões dos reservatórios. Os resultados dos comparativos das médias dos valores dos reservatórios de Chapéu, Entremontes e Lopes se encontram nas Figuras 27, 28 e 29, respectivamente.

Figura 27 - Comparativo das Médias dos valores de MNDWI e NDWI do Reservatório de Chapéu

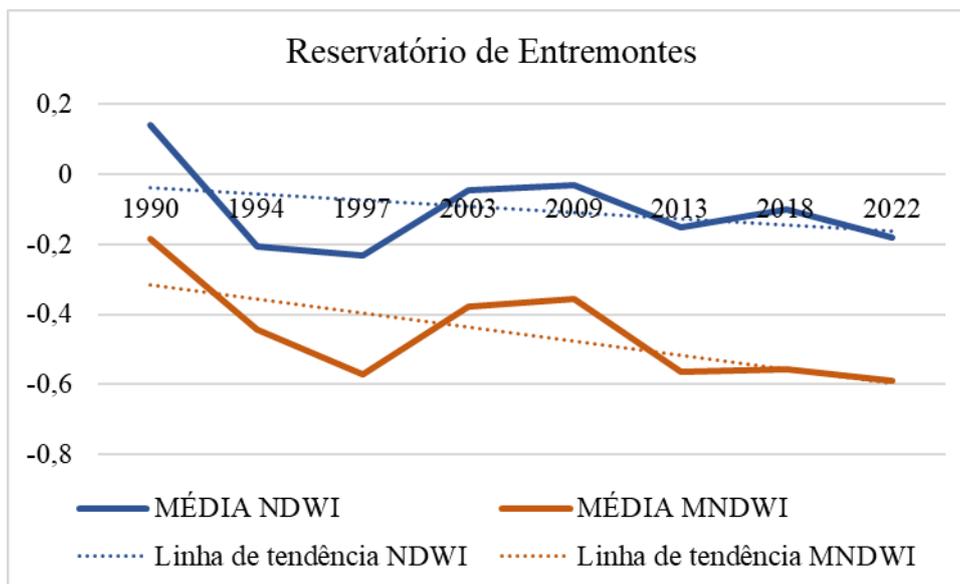


Fonte: Autora (2023).

Essa diminuição das médias, bem como médias com valores negativos, pode indicar que, ao longo das datas dos anos, existe uma maior quantidade de área não molhadas, uma vez que os índices MNDWI e NDWI são negativos para as regiões sem água, deixando claro uma tendência de diminuição das áreas hídricas dos reservatórios, contudo, vale salientar que a diminuição analisada se encontra de modo mais sutil para o índice NDWI.

O resultado obtido nessa dissertação corrobora com Sousa *et al.* (2023), que concluíram, com o uso do MNDWI, que a dinâmica dos corpos hídricos da Bacia do Brígida indicou números baixos de corpos hídricos ao longo dos anos estudados, ameaçando a segurança hídrica na região.

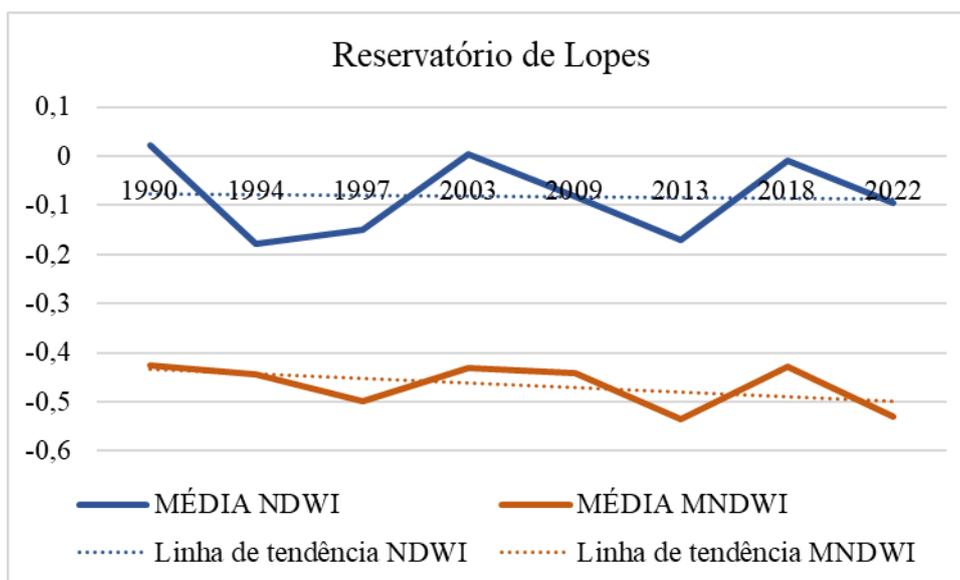
Figura 28 - Comparativo das Médias dos valores de MNDWI e NDWI do Reservatório de Entremontes



Fonte: Autora (2023).

De modo geral, no índice NDWI observou-se que seus valores de média eram maiores que os valores de MNDWI. Isso ocorre devido ao fato de o NDWI reconhecer a água da vegetação, indicando assim áreas de vegetação como áreas molhadas, o que causou o aumento a quantidade de valores positivos do NDWI e, por sua vez, as maiores médias dos valores encontrados quando comparados com os valores de MNDWI.

Figura 29 - Comparativo das Médias dos valores de MNDWI e NDWI do Reservatório de Lopes



Fonte: Autora (2023).

Os resultados aqui encontrados, referentes a área hídrica dos três reservatórios estudados através dos índices NDWI e MNDWI se assemelham com o resultado obtido por Chaves (2019), que utilizou o MNDWI, e indicou uma diminuição dos espelhos d'água de seis açudes na bacia do Rio Brígida, dentre eles os açudes de Chapéu, Entremontes e Lopes II, entre os anos de 2009 e 2019. Em sua análise, foi possível estimar a variação do índice entre 2009 e 2019, e se observou que a seca exerceu influencia na disponibilidade hídrica, reduzindo o volume de água armazenado nos reservatórios monitorados.

Os dados aqui obtidos através dos índices MNDWI e NDWI para o ano de 2013 também corroboram com o relatório climático divulgado pela *World Meteorological Organization* (WMO, 2014), que cita 2013 como o ano em que o nordeste brasileiro experienciou sua pior seca nos últimos 50 anos (Chaves, 2019). Esse fator pode ter influenciado as baixas áreas hídricas identificadas no reservatório de Lopes II, bem como nos baixos valores obtidos pelos índices de vegetação NDVI e EVI.

6 CONCLUSÃO

Após as observações sobre os índices NDVI, EVI, NDWI e MNDWI, é possível concluir que, de acordo com as datas buscadas, a quantidade de vigor vegetativo e de área molhada nos reservatórios vem diminuindo constantemente, para todos os índices nas datas analisadas. Esse resultado se identificou através das linhas de tendência dos valores dos índices obtidos pontualmente, indicando um motivo para se ter atenção sobre a situação das regiões de vegetação na bacia hidrográfica do rio Brígida e dos seus reservatórios.

Também se salienta que, para os índices estudados, existem diferenças entre os índices de vegetação, bem como entre os índices de água. Para índices de vegetação, os resultados com o EVI se mostraram mais sensíveis a mudanças no dossel, principalmente para a região da Área de Preservação da Chapada do Araripe, enquanto para o NDVI o vigor vegetativo se consolidava com a alteração dos índices pluviométricos.

Para os índices de água, notou-se que, para a obtenção de dados técnicos em relação a avaliação da área de água, o MNDWI é mais indicado em relação ao NDWI para regiões onde exista alta intensidade de vegetação, devido a sensibilidade do NDWI de detectar a água da vegetação, dificultado a obtenção adequada das regiões hídricas dos mapas cartográficos.

Em relação a recomendações para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização do Google Earth Engine (GEE), para a realização do processamento dos índices de água e vegetação, para promover maior celeridade na obtenção dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ANA, Agência Nacional de Águas. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/nordeste-e-semiarido/pernambuco>. Acesso em: 22 de maio de 2023.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Reservatórios do Semiárido Brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação**. Relatório Final. Brasília: ANA, Engecorps Engenharia S.A., 2016.
- ANDRADE, C. B.; OLIVEIRA, L. M. M.; OMENA, J. A. M.; GUSMÃO, A. C. V. L.; RODRIGUES, D. F. B. **Avaliação de índices de vegetação e características fisiográficas no sertão Pernambucano**. Revista Brasileira de Meio Ambiente, v. 4, n. 1, p. 97 – 107, 2018.
- ANDRADE, R. L.; MOTA, J. L. N. **Chapada do Araripe: entre a economia e o socioambiental**. Brazilian Journals of Business, v. 4, n. 1, p. 432-443, jan./mar. 2022.
- ALBUQUERQUE, E. M.; ANDRADE, S. C. P.; MORAIS H. F.; DINIZ, J. M. T; SANTOS, C. A. C. **Análise do comportamento do NDVI e NDWI sob diferentes intensidades pluviométricas no município de Souza – PB**. Revista de Estudos Geoambientais, Rio Tinto, n. 01, v. 01, jan-abr, 2014.
- APAC, Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Monitoramento Pluviométrico**. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#> Acesso em: 25 de abril de 2023.
- APAC, Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Bacias Hidrográficas – Rio Brígida**. Disponível em: <http://200.238.107.184/bacias-hidrograficas/40-bacias-hidrograficas/25-bacia-do-rio-brigida>. Acesso em: 26 de abril de 2023.
- AQUINO, D. N.; NETO, O. C. R.; MOREIRA, M. A.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M. **Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region**. Revista Ciência Agronômica, v. 49, n. 3, p. 420-429, jul-set, 2018.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **APA Chapada do Araripe**. Brasília: MMA, (2023). 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: 06 de julho de 2023.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. **Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 41, n° 11, nov. 2003.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. **Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors**. Remote Sensing of Environment, 113, p. 893-903, 2009.
- CHAVES, João Victor Bezerra. **Geotecnologia como ferramenta na espacialização superficial dos açudes da bacia hidrográfica do rio Brígida**. 2019. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

CHEN, S. C.; HERZ, R. **Estudos Quantitativos e Calibração Radiométrica de Dados Digitais do Landsat-5**. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, Salvador, Brasil, p. 499-506, 14-19 abril 1996.

CRACKNELL, A. P.; HAYES, L. **Introduction to remote sensing**. CRC press, 2007.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Satélites de monitoramento: LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>. Acesso em: 05 de maio de 2023.

ENGEORPS/HARZA. Projeto Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional; Relatório R32 – Relatório Síntese de Viabilidade Técnico Econômica e Ambiental – São Paulo: ENGEORPS/HARZA, 2000. 330 p.

FECHINE, J. A. L.; GALVÍNIO, J. D. **Uma forma de convivência com a seca: Bacia Hidrográfica do Rio Brígida – Pernambuco – Brasil**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 07, n. 4, p. 724-730, 2014.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2011.

GALVÍNIO, 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. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 24, no 2, p. 239-306 mai/ago. 2007.

GAO, B.C. **NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space**. Remote Sensing of Environment, v. 58, n°. 3, p. 257-266, 1996.

GAO, X.; HUETE, A. R.; NI, W.; MIURA, T. **Optical-Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination**. Remote Sensing of Environment, v. 74, p. 609-620, 2000.

HUETE, A.R.; LIU, H.Q.; BATCHIL, Y.K.; LEEUWEN, W. van. **A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS**. Remote Sensing of Environment, v.59, p.440-451, 1997.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA L. G. **Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices**. Remote Sensing of Environment, v. 83, p. 195 – 213, 2002.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema de Referência**. Disponível em: https://geofpt.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/sirgas/sisref_2.pdf. Acesso em: 16 de maio de 2023. 2023 - a.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeto Mudança do Referencial Geodésico**. Diretoria de Geociências – IBGE. Departamento de Cartografia e Geodésia. Informativo nº 1 – Referencial Geocêntrico. Disponível em:

https://geofpt.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/pmrg/informativo1.pdf. 2023 – b.

INSA, Instituto Nacional do Semiárido. **O semiárido Brasileiro**. Disponível em: <http://www.gov.br/insa/pt-br/semiariado-brasileiro>. Acesso em: 20 de agosto de 2023.

LEONARDO, H. R. A.; SALGUEIRO, C. O. B.; ALMEIDA, D. N. O.; SANTOS, S. M.; OLIVEIRA, L. M. M. **Sensoriamento remoto aplicado na Geoespacialização do Reservatório de Poço da Cruz – PE e seu entorno**. Revista Brasileira de Geografia, v. 14, n. 16, p. 3592-3607, 2021.

LI, J.; PEI, Y.; ZHAO, S.; XIAO, R.; SANG, X.; ZHANG C. **A review of Remote Sensing for Environmental Monitoring in China**. Remote Sensing, v. 12, 2020.

LIU, W.T.H. Aplicações de sensoriamento remoto. Campo Grande: UNIDERP, 908 p., 2007.

LIU, H. Q.; HUETE, A. R. **A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. v. 33, p.457–465, 1995.

MACANDZA, M. M. **Use of Logistic Regression and GIS Techniques in the Analysis of Forest Cover Dynamics in Mabote and Funhalouro, Inhambane, Southern Mozambique**. Sociedade & Natureza, Uberlândia - MG, v. 34, 2022.

MARENCO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. Campina Grande – PB: Instituto Nacional do Semiárido, 2011.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: UnB. 2012.

MERCHANT, J. W.; NARUMALANI, S. **Integrating remote sensing and geographic information system**. The SAGE Handbook of Remote Sensing. Nebraska: SAGE publications. 2010.

MORAES, E. C. **Capítulo 1 - Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. INPE-8984-PUD/62. 2002.

ÖZELKAN, E. **Water Body Detection Analysis Using NDWI Indices Derived from Landsat-8 OLI**. Polish Journal of Environmental Studies, v. 29, n. 2, p. 1759-1769, 2020.

PEREIRA, A. A.; TEIXEIRA, F. R.; LIBONATI, R.; MELCHIORI, E. A.; CARVALHO, L. M. T. **Avaliação de índices espectrais para identificação de áreas queimadas no Cerrado utilizando dados Landsat TM**. Revista Brasileira de Cartografia, nº 68/8, ISSN 1665-1680, 2016.

PRASETYO, S. Y. J.; CANDRA, D. W.; HARTOMO, K. D.; SIMANJUNTAK, B. H.; PASELENG, M. C. **The Machine Learning to Detect Drought Risk in Central Java Using Landsat 8 OLI Remote Sensing Images**. 5th International Conference on Science and Technology (ICST), Yogyakarta, Indonésia. 2019.

ROSSI, E.; ROGAN, J.; SCHNEIDER, L. **Mapping Forest damage in northern Nicaragua after Hurricane Felix (2007) using MODIS enhanced vegetation index data.** *GIScience & Remote Sensing*, v. 50, n. 4, p. 385-399, 2013.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.** Prog. Rep. RSC 1978-1. Remote Sensing Cent., Texas A&M Univ., College Station, 1973.

SAR, Sistema de Acompanhamento de Reservatórios. **Nordeste e Semiárido.** Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/nordeste-e-semiarido/pernambuco>. Acesso em: 02 de maio de 2023.

SERBAN, C.; MAFTEI, C.; DOBRICA, G. **Surface water change detection via water indices and predictive modeling using remote sensing imagery: a case study of Nuntasi-Tuzla Lake, Romania.** *Water*, v. 14, 556, 2022.

STAR, J. L.; ESTES, J. E.; MCGWIRE K. C. **Integration of geographic information systems and remote sensing.** Cambridge University Press, 1997.

SILVA, B.B.; BRAGA, A.C.; OLIVEIRA, L.M.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; BARBOSA JÚNIOR, B. **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, Fabianny Joanny Bezerra Cabral. **Uso de índices físicos e de sensoriamento remoto para quantificação da seca e aridez e determinação da susceptibilidade à desertificação no semiárido pernambucano.** 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020. 226 f. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/37727>.

SILVA NETO, B. **Perda da vegetação natural da Chapada do Araripe (1975/2007) no estado do Ceará.** 2013. Tese (Doutorado em geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013. 186 f. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/104464/silvaneto_b_dr_rcla.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

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. **Spatitemporal analysis of Rainfall and Droughts in a Semiarid Basin of Brazil: Land Use and Land Cover Dynamics.** *Remote Sensing*, v. 15, 2023.

TEIXEIRA, A. M. A.; CANDEIAS, A. L. B.; TAVARES JUNIOR, J. R. **Comparação dos índices de vegetação para imagens TM/Landsat 5, com correção e sem correção atmosférica.** *Revista Brasileira de Geomática*, v. 5, n. 4, p. 524-542, out./dez. 2017.

USGS, *United States Geological Survey*. **Landsat Satellite Missions.** Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>. Acesso em: 03 de maio de 2023.

USGS, *United States Geological Survey*. **Landsat 5**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5>. Acesso em: 03 de maio de 2023.

USGS, *United States Geological Survey*. **Landsat 8**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>. Acesso em: 03 de maio de 2023.

USGS, *United States Geological Survey*. **Using the USGS Landsat Level-1 Data Product**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>. Acesso em: 05 de maio de 2023.

USGS, *United States Geological Survey*. **Landsat 8-9 Calibration and Validation (Cal/Val) Algorithm Description Document (ADD)**. Disponível em: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1747_Landsat8-9_CalVal_ADD-v4.pdf. P.736. Acesso em: 05 de maio de 2023.

XU, H. **Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery**. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14):3025–3033, 2006.

World Meteorological Organization (WMO), 2014. **WMO statement on the status of the global climate in 2013**. WMO, n. 113.