

## **Estimation of Water Volume in Reservoirs Using Spectral Indices: A Case Study with NDVI in the Milagres Reservoir (Pernambuco, Brazil)**

Felipe Alves Ferreira\*, Renata Barros Pinheiro\*\*, H lvio Alessandro de Lima Ferreira\*\*\*, Luis Augusto Clemente da Silva\*\*\*\*, Josicleda Domiciano Galv ncio\*\*\*\*\*, Suzana Maria Gico Lima Montenegro\*\*\*\*\*

\*Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil,  
felipe.alvesf@ufpe.br.

\*\*Mestra em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, renata.pinheiro@apac.pe.gov.br.

\*\*\*Bacharel em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, helvio.ferreira@ufpe.br.

\*\*\*\*Analista de Geoprocessamento na Agência Pernambucana de águas e Clima, Recife, Pernambuco, Brasil,  
augusto.clemente@apac.pe.gov.br.

\*\*\*\*\*Professora Titular do Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, josicleda.galvinctio@ufpe.br.

\*\*\*\*\*Professora Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, suzana.montenegro@ufpe.br.

Received 20 November; accepted 28 December.

### **Abstract**

The mapping of land use and land cover is essential for understanding changes in the terrestrial environment, identifying natural transformations, and human interventions over different periods and locations. However, traditional data collection and analysis methods for monitoring water bodies can be expensive and labor-intensive, especially in extensive areas. In this context, Remote Sensing stands out as an accessible technique that utilizes satellite images and drones to monitor the Earth. This study focuses on the use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Water Index (NDWI) to monitor water bodies, with a specific focus on the Milagres Reservoir, part of the São Francisco River Integration Project with the Northeastern Basins (PISF) in Pernambuco, Brazil. NDVI is employed to distinguish aquatic areas, while NDWI values are explored to identify the presence of water. Landsat-8 satellite images were processed using the QGIS software, including atmospheric correction to enhance image quality. The obtained data were compared with information provided by the Ministry of Regional Development (MIDR), enabling the creation of a Water Level-Area-Volume (WAV) curve and the development of polynomial equations to estimate water volumes based on NDVI values. The results showed statistically acceptable correlations between estimated and real values, especially for water levels and areas. However, volume values exhibited larger discrepancies, suggesting the need for periodic reviews of the reservoir's bathymetry. It is recommended to explore images from other satellites, such as Sentinel-2A and CBERS 4A, to improve result accuracy. Additionally, the inclusion of NDWI in the methodology can enrich the analysis, providing a more comprehensive view of water resource distribution. In summary, this study offers a promising approach for remote water body monitoring, with the potential to enhance water resource management in regions like Brazil's Northeastern semi-arid area.

Keywords: Monitoring, Water security, semiarid

## **Estimativa de volume de água em reservatórios com índices espectrais: estudo de caso com NDVI no Reservatório Milagres (Pernambuco, Brasil)**

### **Resumo**

O mapeamento de uso e cobertura do solo é vital para entender as transformações no ambiente terrestre, incluindo mudanças naturais e intervenções humanas. No entanto, métodos tradicionais de monitoramento de corpos d'água pode ser caros e trabalhosos. O Sensoriamento Remoto, utilizando satélites e drones, surge como uma técnica acessível. Este estudo foca no uso do NDVI e NDWI para monitorar corpos d'água, especialmente o Reservatório Milagres, parte do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF) em Pernambuco. O NDVI ajuda a identificar áreas aquáticas, enquanto o NDWI detecta a presença de  gua. Usando imagens do satélite Landsat-8 processadas no software QGIS, incluindo correção atmosférica, os dados são comparados com informações do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Os resultados possibilitam a criação de uma Curva Cota- rea-Volume (CAV) e o desenvolvimento de equações para estimar volumes de água com base em valores de NDVI. Houve correlações aceitáveis entre os valores estimados e reais, especialmente

para cotas e áreas. Porém, os volumes mostraram divergências, apontando a necessidade de revisões periódicas na batimetria. Recomenda-se explorar imagens de outros satélites, como Sentinel-2A e CBERS 4A, para aprimorar a precisão. A inclusão do NDWI na metodologia pode enriquecer a análise, oferecendo uma visão mais completa da distribuição dos recursos hídricos. Em resumo, o estudo apresenta uma abordagem promissora para o monitoramento remoto de corpos d'água, com potencial para melhorar a gestão de recursos hídricos em regiões como o semiárido nordestino do Brasil

Palavras-chave: Monitoramento, Segurança hídrica, semiárido.

## 1. Introdução

O crescimento populacional constante está gerando uma crescente demanda por água em todo o mundo. A projeção global para 2025 prevê uma população de 9 bilhões de pessoas, com o maior aumento concentrado em pequenas e médias cidades de países em desenvolvimento, que já enfrentam conflitos relacionados à água afetando aproximadamente 800 milhões de indivíduos. Esses conflitos têm resultado em crises humanitárias e migrações em escalada contínua. Nos países em desenvolvimento, as taxas de falta de acesso à água potável são quatro vezes maiores, e a falta de acesso ao saneamento básico é duas vezes mais prevalente, o que tem repercussões óbvias na saúde pública. No total, mais de 180 milhões de pessoas não têm acesso a água potável, um requisito fundamental em cenários humanitários (WORLD WATER COUNCIL, 2018).

No Nordeste brasileiro, especialmente na região do Semiárido, o monitoramento dos recursos hídricos assume uma importância crucial devido à sua escassez. As mudanças climáticas frequentes são uma característica marcante dessa região e impactam a economia, a agricultura, a qualidade de vida e expõem a população a secas severas e extremas que ocorrem em intervalos curtos ao longo dos anos (Carmo e Lima, 2020).

Atualmente, as temperaturas médias na região variam entre 22°C e 25°C, com previsões indicando um aumento para 27°C e 28°C até 2050 em algumas áreas. Paralelamente, os índices hídricos apontam para um aumento na escassez de água durante esse período, agravado pelos tipos climáticos como "subsumido", "seco subsumido" e "semiárido" que caracterizam a situação climática atual (Santos et al., 2010).

Para enfrentar os desafios de abastecimento de água na região, o Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR) implementou o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF) desde 2005. Esse projeto visa atender uma população estimada em cerca de 12 milhões de habitantes, distribuídos em 390 municípios localizados nos estados de Pernambuco, Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba. O PISF abrange uma extensão total de 477 km, divididos em dois eixos: o Eixo Norte, com início em Cabrobó, Pernambuco, e o Eixo Leste, partindo do município de Floresta, também em Pernambuco (MIDR, 2020). Essa iniciativa representa um esforço significativo

para mitigar os desafios relacionados à água na região e melhorar a qualidade de vida das comunidades afetadas.

O mapeamento do uso e cobertura do solo permite o conhecimento das transformações nas diversas esferas do sistema terrestre, caracterizando as mudanças e analisando a distribuição espacial de parâmetros naturais e do espaço em que houve a intervenção humana, bem como suas possíveis modificações em diferentes períodos, possibilitando o monitoramento do ambiente (Barbosa et al., 2019).

Os métodos convencionais de coletas e análises para monitoramento de corpos hídricos são de elevados custos, uma vez que o estudo do solo, água, vegetação e rochas se faz necessário ao longo de sua vasta extensão. Dentre as possíveis técnicas para as análises espaciais, encontra-se o Sensoriamento Remoto, o qual, de acordo com Barros et al. (2020), permite utilizar dados captados dos por drones e satélites, instrumentos estes que disponibilizam as imagens da região desejada.

O sensoriamento remoto surge como uma alternativa que se baseia nas observações terrestres por meio das radiações eletromagnéticas com base no espectro eletromagnético no espaço, convertendo essas informações em imagens ou gráficos acessíveis para análise (Zanotta et al., 2019). Com o uso deste recurso, é possível ter uma visão da Terra a partir do espaço de forma eficiente e econômica para a obtenção de informações que permitem uma análise abrangente da área de interesse, incluindo a cobertura do solo e a dinâmica dos corpos d'água (Barbosa et al., 2019).

Dentro deste contexto, a utilização de índices espectrais busca identificar alvos específicos do espectro eletromagnético, sendo possível a partir daí o monitoramento dos recursos hídricos, permitindo assim o estudo hidrológico e ambiental de áreas como fonte primordial para o monitoramento, principalmente do semiárido nordestino, e dentre os índices espectrais que permitem essa avaliação, estão o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) e o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) (Silva et al., 2017).

O NDVI proposto por Rouse et al. (1974), é amplamente utilizado para monitorar a cobertura vegetal, aproveitando dados espectrais capturados por sensores de satélite. Já o NDWI, sugerido por McFeeters (1996), desempenha um papel fundamental nos estudos de avaliação e monitoramento dos

ecossistemas aquáticos. Ambos esses índices se beneficiam das bandas espectrais registradas por sensores de satélite, permitindo uma variedade de aplicações, como aprimoramento da agricultura, detecção de incêndios, monitoramento de mudanças no uso da terra e avaliação da qualidade da água.

Uma das utilizações ainda em fase preliminar de estudo diz respeito à utilização dos índices espectrais para identificação das massas d'água e sua disponibilidade quantitativa em termos de volume.

A análise das características físicas e da dinâmica do Reservatório do Poço da Cruz, como demonstrado no estudo de Leonardo et al. (2021) em Pernambuco por meio do sensoriamento remoto, proporciona um aprofundado entendimento da gestão dos recursos hídricos na região. Menezes (2021) conduziu uma pesquisa sobre a variação do espelho d'água ao longo do tempo no reservatório de Sobradinho, revelando mudanças significativas em sua extensão e comportamento. Soares (2023) explorou a dinâmica espaço-temporal das coberturas hídricas e vegetais na Bacia do Rio Brígida, também em Pernambuco, por meio de técnicas avançadas de sensoriamento remoto.

Em resumo, esses estudos mostram a eficiência destas técnicas como uma ferramenta fundamental na análise e vigilância de corpos d'água, realçando seu potencial em contribuir para a gestão hídrica e ambiental. Eles destacam a capacidade destas tecnologias para fornecer informações cruciais para fundamentar decisões relacionadas à gestão de recursos hídricos. Além disso, demonstram a aplicabilidade desse método no monitoramento da dinâmica de reservatórios, permitindo a identificação de tendências e variações valiosas para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, bem como o registro de mudanças na cobertura hídrica e vegetal ao longo do tempo.

A construção dos reservatórios do PISF para o abastecimento de água, além de realizar alteração no meio ambiente, é um grande desafio para os responsáveis pela obra devido sua complexidade, e o elemento final que foi projetado e executado, pode apresentar mudanças significativas nos valores de volume de água que serão monitorados e disponibilizados para os gestores responsáveis com a perspectiva das tomadas de decisões na vida da população.

Por este motivo, a determinação precisa da curva cota-área-volume exerce um papel fundamental para que estes empreendimentos proporcionem abastecimento e segurança hídrica seus usuários. Esta curva é determinada através do levantamento das curvas de níveis do reservatório, ou seja, para cada leitura de cota, será possível obter a área e assim conseguir determinar o volume daquele corpo hídrico (Gondim et al., 2017).

Diante desta perspectiva, o presente estudo tem como objetivo estabelecer correlações entre o NDVI e o volume de água de um reservatório, tendo como exemplo de aplicação um estudo de caso no Reservatório Milagres, construído no estado de Pernambuco, como parte componente do complexo de obras do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional – PISF. Para isto, buscou-se estabelecer uma equação entre a área gerada pelo NDVI e a curva Cota-área-volume (CAV) do reservatório.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Descrição da área de Estudo

O estudo foi realizado no Reservatório Milagres (Figura 1) localizado no Eixo Norte do PISF, entre os municípios de Salgueiro e Verdejante no estado de Pernambuco na bacia hidrográfica Terra Nova, inseridos na unidade geoambiental da Depressão Sertaneja. O terreno onde foi implantada a Barragem Milagres apresenta morfologia relativamente suave, com dois talwegues principais que convergem para uma drenagem comum, que possui uma paisagem típica do semiárido nordestino, modelado pela erosão peculiar as estas áreas, com uma brusca queda de altitudes a partir do norte dos municípios (MIDR, 2020).

O reservatório Milagres, localiza-se na Bacia Hidrográfica de Terra Nova, ou Unidade de Planejamento 12 (UP-12) do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERNAMBUCO, 2022), a qual se caracteriza por problemas de segurança hídrica, uma vez que possui um déficit hídrico de mais de 60% considerando demanda frente à oferta. A UP-12 como um todo, apresenta precipitação anual média entre 600-900 mm, temperaturas mínimas média anual entre 20,5°C e 22,5°C, temperatura máxima média anual entre 31,6°C e 32,0°C, de 230 a 240 horas/mês de radiação solar, evaporação total anual entre 2400 mm e 3500 mm (PERNAMBUCO, 2022). Geologicamente, encontra-se quase por completo sobre domínio de rochas cristalinas, com a exceção de rochas sedimentares a norte da bacia, favorecendo a reserva hidrogeológica do aquífero de Cedro e a ocorrência de solos aluvionares no curso d'água do Riacho Milagres, a jusante do Reservatório Milagres

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO MILAGRES (PERNAMBUCO)

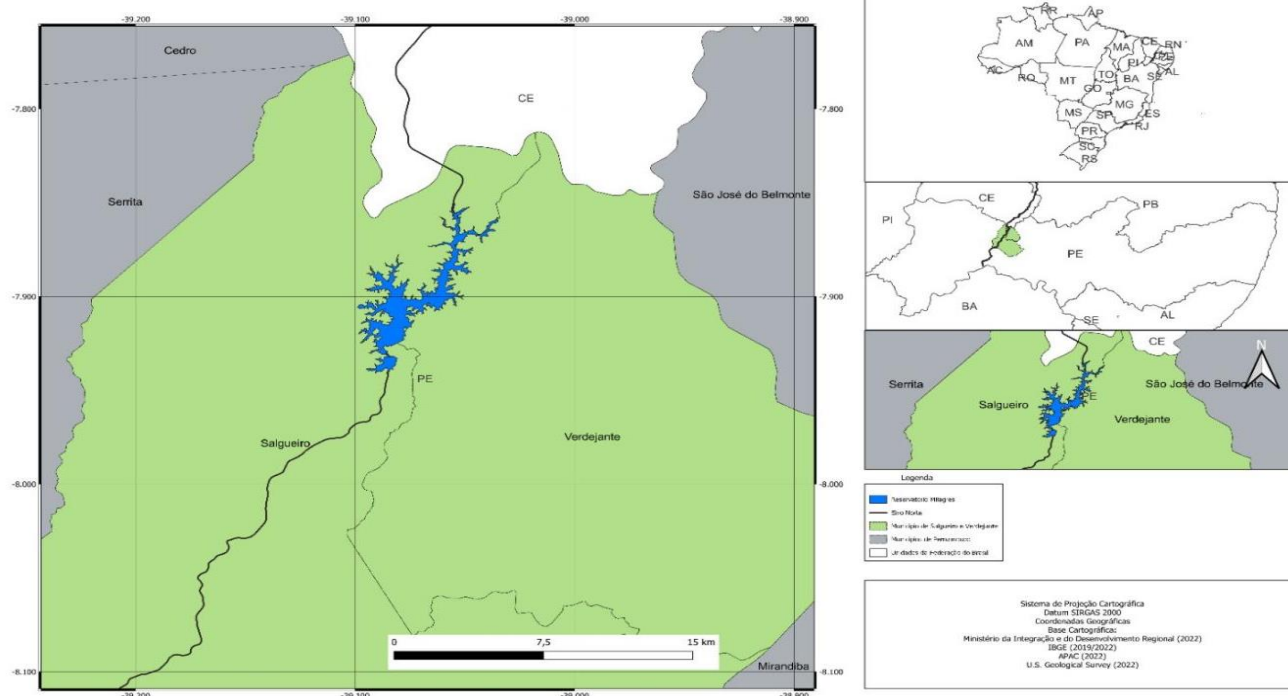


Figura 1. Reservatório Milagres no Eixo Norte do PISF.

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), o eixo Norte tem início dos seus 260 km de extensão no município de Cabrobó, no estado de Pernambuco, passando pelos reservatórios do Tucutu, Terra Nova, Serra do Livramento, Mangueira, Negreiros e Milagre no mesmo estado, seguindo até o reservatório de Jati, depois Atalho, Porcos, Cana Brava, Cipó, Boi I e finalizando no Boi II, localizados no estado do Ceará (CE) e por último no estado da Paraíba, seguindo pelo reservatório de Morros, Boa Vista, Salgado, finalizando no Açude Engenheiro Ávidos em Cajazeiras na Paraíba, sendo está a rede principal de distribuição do projeto de integração (ANA, 2020).

Há também a presença dos ramais associados de distribuição que transportam as águas diretamente do eixo para outros corpos, como por exemplo, do reservatório Mangueira para o Açude Entremontes no

PE, do Jati para o Cinturão das Águas do Ceará, do Boi I para o Rio Piancó, do Salgado para a Bacia do rio Jaguaribe e para o rio Apodi/Mossoró que banha os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, simultaneamente (ANA, 2020).

O Eixo Norte está inserido dentro de 04 bacias, no nível dos três estados receptores. Sua captação inicial localiza-se no leito do Rio São Francisco no município de Cabrobó. Ao todo passa pelos municípios de Cabrobó, Salgueiro, Terra Nova e Verdejante em Pernambuco, Penaforte, Jati, Brejo Santo, Mauriti e Barro, no Ceará, e em São José de Piranhas, Monte Horebe e Cajazeiras, na Paraíba (Figura 2). O eixo é composto de reservatórios novos em seu trajeto, mas também conta com a presença de reservatórios antigos, como é o caso do reservatório de Atalho no Ceará e o reservatório final do trecho, que é o Engenheiro Ávidos na Paraíba.

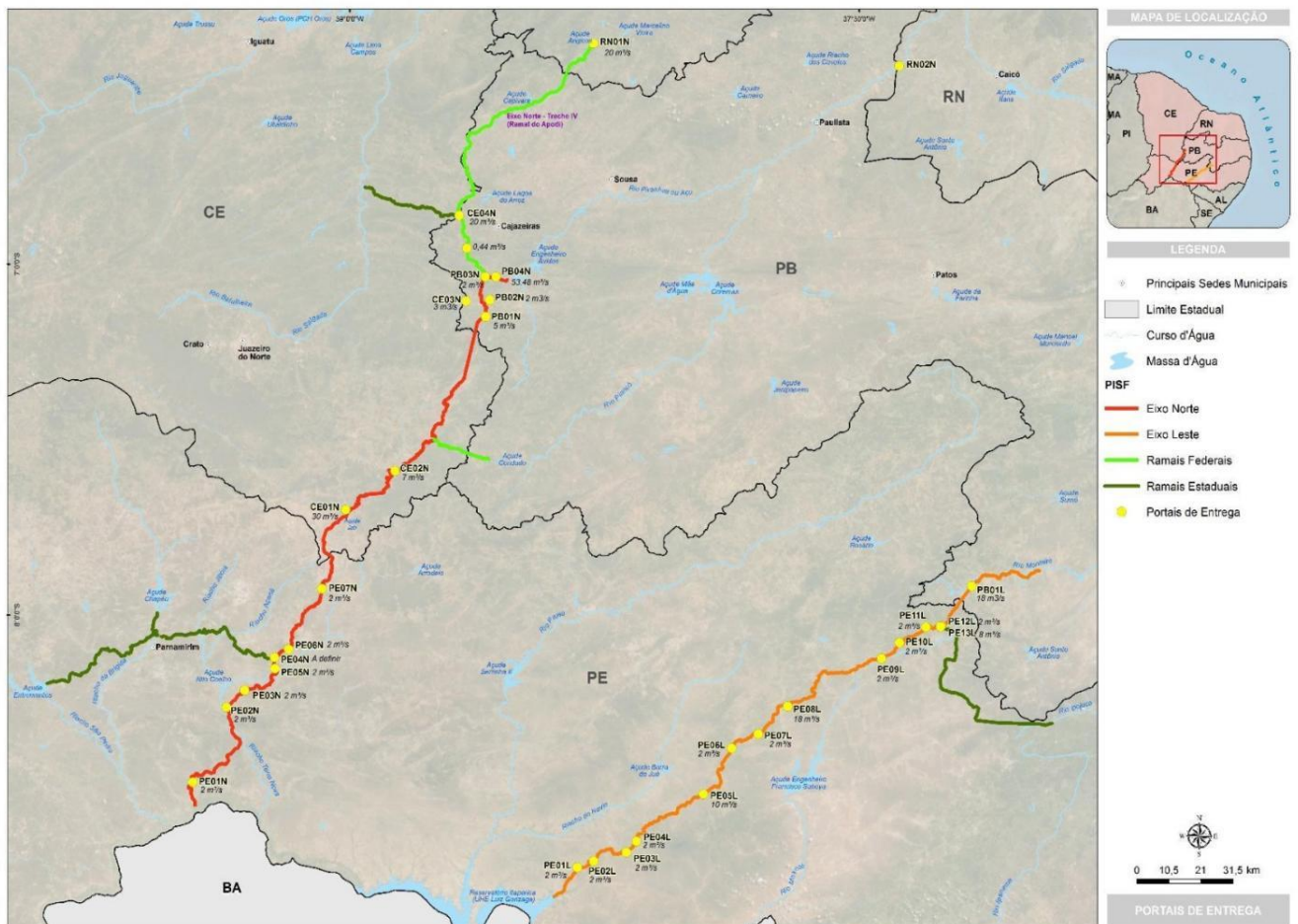


Figura 2. Mapa de Infraestrutura Hídrica do PISF (Fonte: APAC, 2023).

## 2.2 Obtenção dos dados

Para execução deste estudo foram obtidos dados de nível do reservatório Milagres, a partir do monitoramento deste reservatório que é realizado pelo Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR), o qual disponibiliza um portal de monitoramento aos atores diretamente envolvidos com a gestão do PISF. Desta forma, os valores das cotas, áreas e volumes de água para o reservatório Milagres foram obtidos junto a este Portal, pelo perfil da gestão da Apac.

Além dos dados de nível, foram obtidas imagens de satélite gratuitas disponibilizadas por meio do portal do United States Geological Survey (USGS, 2023). O satélite utilizado para este estudo é o Landsat-8, sensor OLI no período entre 2019 e 2023, com inspeção visual nas imagens apresentadas pelo portal de forma a identificar a baixa presença de nuvens no polígono estudado. O satélite Landsat-8 possui como características principais, ampla cobertura da terra, disponibilização gratuita, resolução espacial de 30 metros, resolução temporal de 16 dias, dentre outros aspectos interessantes de uso.

O intervalo de tempo para os dados obtidos foi estabelecido de 22/04/2019 a 31/10/2022 para fins de compilação dos níveis do reservatório e de busca das imagens de satélite, pois em 2019 o reservatório se encontrava com pouca água, já que as águas do Rio São Francisco ainda não haviam sido bombeadas para o reservatório naquele momento e também não havia monitoramento por parte do MIDR.

## 2.3. Índice espectral utilizado

Para a utilização das técnicas de sensoriamento remoto, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) proposto por Rouse et al. (1974) (Equação 1) gera a imagem junto com seus parâmetros estatísticos relevantes para uma análise completa do local.

(1)

$$NDVI = \frac{\rho(NIR) - \rho(Red)}{\rho(NIR) + \rho(Red)}$$

Em que:

NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;

$\rho(\text{Red})$  - Fator de reflectância bidirecional na banda do vermelho;

$\rho(\text{NIR})$  - Fator de reflectância bidirecional na banda do infravermelho próximo.

Este índice indica a proporção e a condição da vegetação verde e seus valores variam de -1 a 1, sendo classificados como água e sombra de nuvens os valores negativos ou igual a zero, parâmetro essencial para este estudo adequado por Alvarenga e Moraes (2014) e Vasconcellos et al. (2016).

Para este estudo o NDVI foi utilizado em especial para avaliar corpos hídricos. Assim, os valores avaliados em geral são os do intervalo de -1 a 0 que indicam água. Sendo que zero indica vegetação arbustiva. A determinação do índice foi realizada utilizando a ferramenta "Calculadora Raster" no QGIS, sendo utilizadas as bandas 4 (Red) e 5 (NIR) do satélite Landsat 8.

## 2.4 Técnicas de geoprocessamento

Com as imagens selecionadas, as etapas de correção atmosférica, cálculo do NDVI, recorte do polígono do reservatório, reclassificação da imagem raster, alteração da simbologia e obtenção das áreas por meio de algoritmo foram realizadas no software QGIS, versão 3.16 (2022).

A correção atmosférica das imagens obtidas pelo satélite Landsat 8 foi realizada utilizando o plug-in "*Semi-Automatic Classification Plugin*" (SCP) no software QGIS. Este plug-in possibilita o download, pré-processamento e pós-processamento das imagens antes do cálculo do NDVI. É importante ressaltar a significância desse procedimento, uma vez que a correção atmosférica desempenha um papel fundamental no processamento de imagens orbitais. Ela tem como objetivo minimizar a influência dos fatores atmosféricos, contribuindo para a melhoria da qualidade das informações contidas nas imagens (Rani et al., 2016).

O resultado desse processo é a geração de um arquivo no formato GeoTIFF, o qual é caracterizado por possuir um Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) bem definido. No contexto do estudo, o SRC utilizado é o EPSG: (projeção SIRGAS 2000/UTM zona 24), o qual é especificamente alinhado com o território do município de Milagres, garantindo uma análise espacial precisa e consistente. Para a análise das imagens, com o propósito de discernir e quantificar com precisão as áreas aquáticas em reservatórios, o processo inicia-se com a aplicação da

ferramenta "Recortar raster pela camada de máscara", qual é empregada com o intuito de criar uma nova camada delimitada da região de interesse, visando à redução do volume computacional necessário para análise.

Posteriormente, a área de interesse é submetida à reclassificação do NDVI, com o objetivo de distinguir os valores correspondentes à água (faixa de -1 a 0) das demais classificações. Para este fim, são exploradas as funcionalidades das ferramentas "r.recode" ou "r.reclass" disponíveis no ambiente do algoritmo GRASS incorporado ao QGIS, com a escolha da ferramenta dependente da complexidade exigida pela reclassificação em questão.

Os parâmetros fundamentais para a execução da reclassificação são registrados em um arquivo de texto, o qual é subsequente e diretamente carregado na ferramenta escolhida, culminando na realização do processo de reclassificação. Como resultado, obtém-se um arquivo contendo duas classes predominantes: uma relativa aos valores situados no intervalo entre -1 e 0, representativos das áreas aquáticas, e outra englobando valores variando de 0 a 1 (Souza et al., 2019). A regra no arquivo de texto a ser carregado no QGIS, deve conter os seguintes intervalos

-1.0:0:1 – Corpo Hídrico

0:1.0:2 – Outros Objetos

A determinação da extensão das áreas aquáticas no reservatório é concretizada mediante a aplicação do algoritmo "r.report", o qual calcula de forma precisa a área correspondente às classificações previamente estabelecidas. Para exemplificar, a área das plantações irrigadas é acessível a partir do campo de classificação número 1 presente no arquivo de texto gerado.

Este método proporciona uma abordagem eficaz e metódica para a identificação e quantificação das áreas aquáticas em reservatórios por meio de imagens de satélite. O procedimento não apenas simplifica a interpretação dos dados obtidos, mas também enriquece substancialmente as análises referentes à cobertura aquática em uma dada região.

## 3. Resultados e discussão

Visualmente, os resultados decorrentes da aplicação do NDVI já permitem constatar o fato de que houve alterações no volume entre 2019 e 2020. Em 2020, o reservatório havia sido completamente concluído e as águas do PISF já haviam chegado até ele, sendo possível uma comparação entre os valores antes e depois da chegada das águas do PISF (Figura 3).

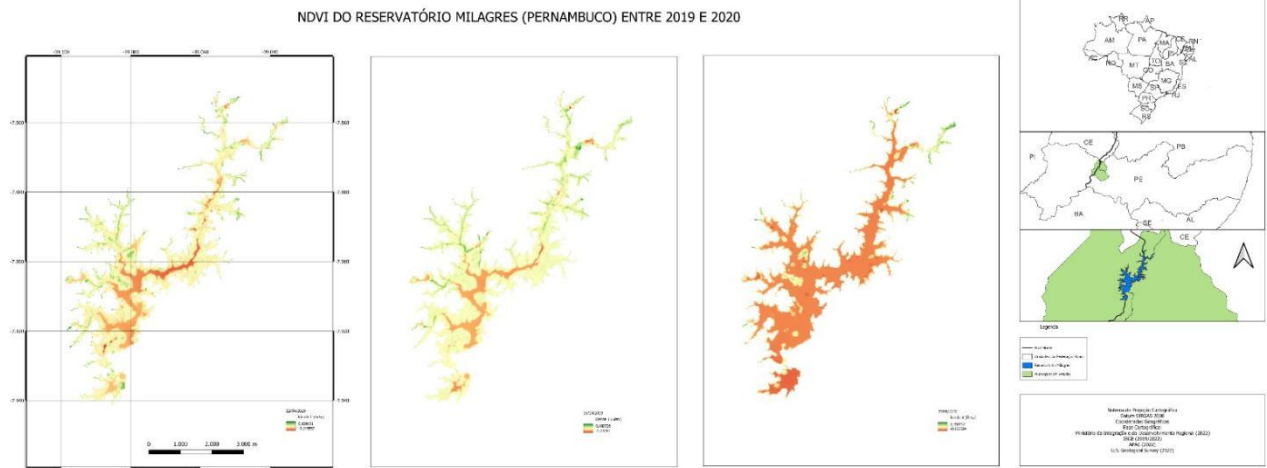


Figura 3. NDVI do reservatório Milagres entre 2019 e 2020.

A escolha das datas, entre 2021 (Figura 4) e 2022 (Figura 5), leva em consideração que os dados enviados ao MIDR e disponibilizados à APAC baseiam-se na leitura de uma régua no reservatório, refletindo a cota no momento da medição. Essa seleção de datas tem o propósito de avaliar a capacidade do método em identificar eventuais erros na leitura das cotas. Além disso, visa verificar se,

mesmo quando a leitura é precisa, os valores fornecidos pelo MIDR podem diferir dos obtidos por meio da técnica aplicada, o que pode indicar a eficácia do estudo ou possíveis mudanças significativas no reservatório.

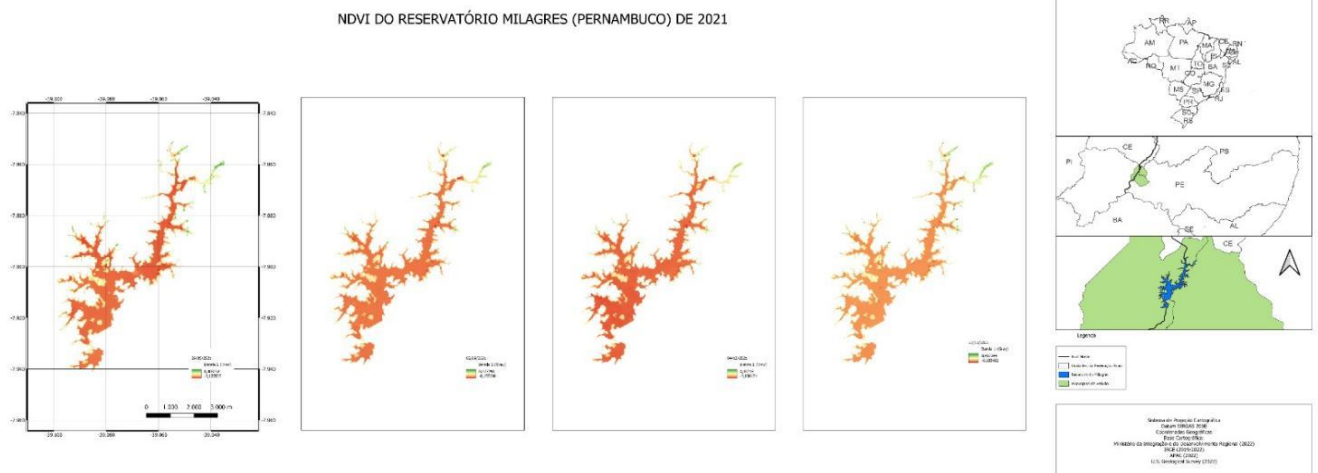
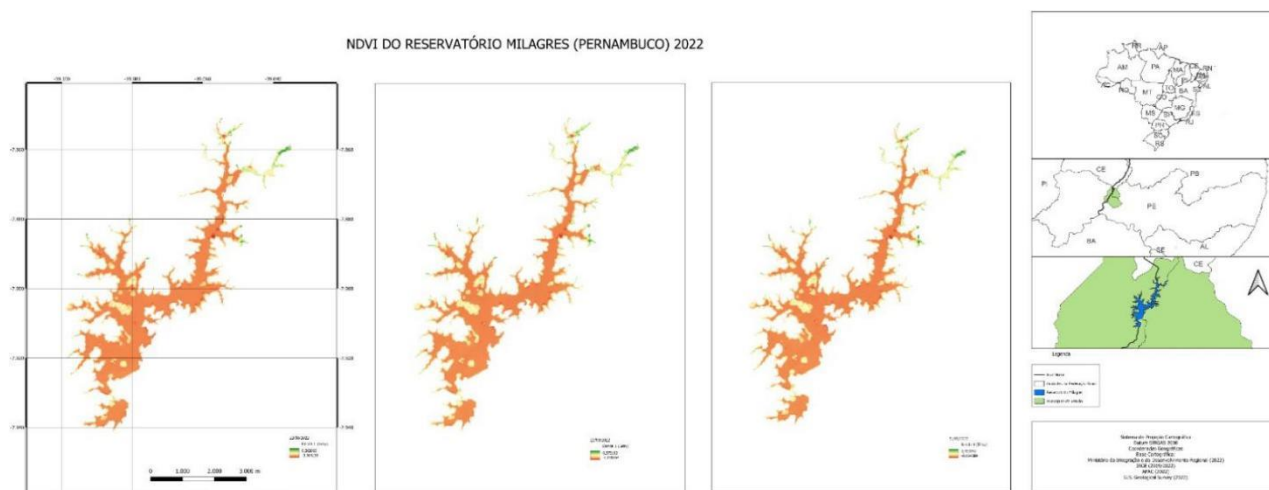


Figura 4. NDVI do reservatório Milagres em 2021.



Os dados disponibilizados pelo Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR) relativos às cotas, áreas e volumes, desempenharam um papel fundamental na nossa pesquisa. Esses dados foram essenciais para a elaboração do gráfico conhecido como Curva Cota-Área-Volume (CAV). Através dessa curva, foi capaz extrair equações polinomiais que variam do primeiro ao sexto grau. Essas equações foram construídas considerando os coeficientes de Pearson, os quais foram calculados com base nos pontos das variáveis X e Y do gráfico. É importante ressaltar que, quanto mais próximo de 1 for

A partir de informações técnicas sobre a construção do reservatório, quando cheio, a cota do nível de água é 491 m, o espelho de água presente na superfície é de 10,20 km<sup>2</sup>, o que corresponde aproximadamente ao volume de 92.000.000,00 m<sup>3</sup>, assim como mostra a Tabela 1, que possui os dados necessários para a elaboração destas curvas na planilha eletrônica.

| COTA | Área (Km²) | Volume (m³)X10^6 | Volume (m³) |
|------|------------|------------------|-------------|
| 463  |            | -                | 0           |
| 464  | 0,11       | 0,39             | 387.368     |
| 465  | 0,18       | 0,58             | 581.053     |
| 466  | 0,27       | 0,77             | 774.737     |
| 467  | 0,37       | 0,97             | 968.421     |
| 468  | 0,48       | 1,36             | 1.355.789   |
| 469  | 0,60       | 1,94             | 1.936.842   |
| 470  | 0,74       | 2,71             | 2.711.579   |
| 471  | 0,88       | 3,49             | 3.486.316   |
| 472  | 1,03       | 4,65             | 4.648.421   |
| 473  | 1,20       | 5,81             | 5.810.526   |
| 474  | 1,38       | 7,36             | 7.360.000   |
| 475  | 1,59       | 8,52             | 8.522.105   |
| 476  | 1,82       | 10,46            | 10.458.947  |
| 477  | 2,10       | 12,01            | 12.008.421  |
| 478  | 2,40       | 15,11            | 15.107.368  |
| 479  | 2,76       | 17,43            | 17.431.579  |
| 480  | 3,21       | 20,92            | 20.917.895  |
| 481  | 3,69       | 24,79            | 24.791.579  |

|     |       |       |            |
|-----|-------|-------|------------|
| 482 | 4,15  | 28,67 | 28.665.263 |
| 483 | 4,61  | 32,93 | 32.926.316 |
| 484 | 5,11  | 37,96 | 37.962.105 |
| 485 | 5,63  | 43,39 | 43.385.263 |
| 486 | 6,22  | 48,81 | 48.808.421 |
| 487 | 7,00  | 56,94 | 56.943.158 |
| 488 | 7,65  | 64,30 | 64.303.158 |
| 489 | 8,39  | 72,83 | 72.825.263 |
| 490 | 9,35  | 82,12 | 82.122.105 |
| 491 | 10,20 | 92,00 | 92.000.000 |

Fonte: MIDR (2023).

Com estes valores apresentados conforme a Tabela 1, foram elaborados os gráficos da curva Cota x Área x Volume (CAV), e inserida a equação polinomial que melhor se ajustasse aos dados em uma

planilha eletrônica (Excel), apresentando melhores correlações de diferentes valores estabelecidos estatisticamente.

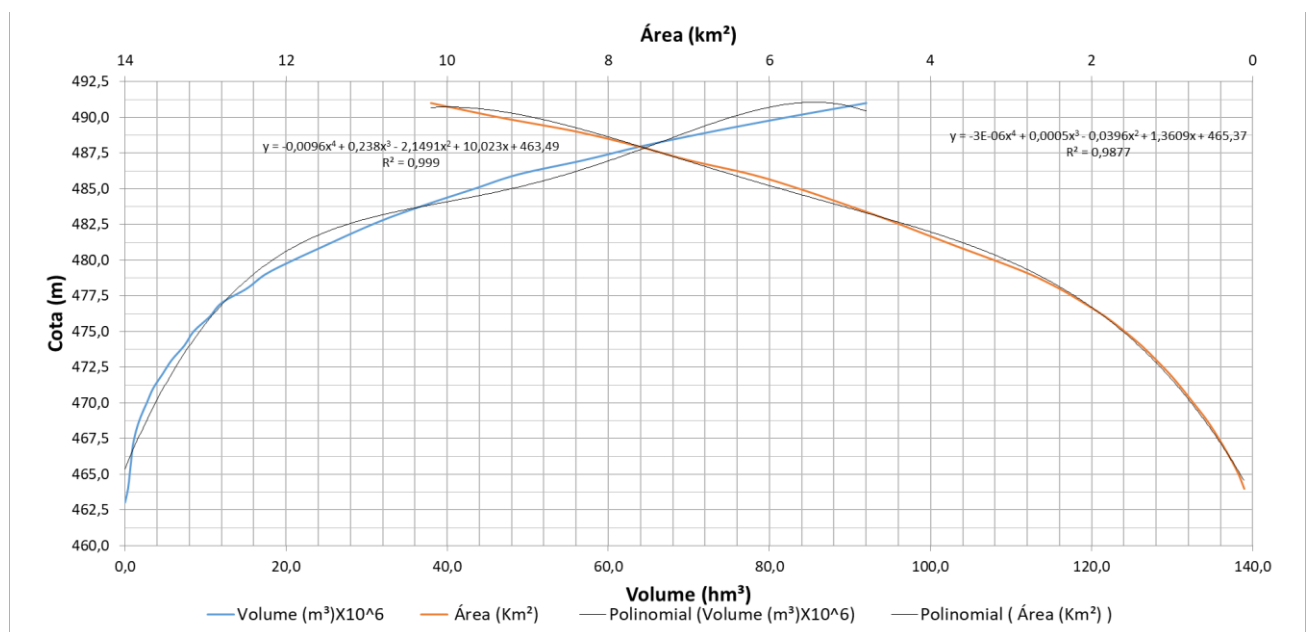


Figura 6: Curva cota-área-volume. Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados do MIDR (2023).

A análise foi realizada em duas partes: Cota versus Área e Área versus Volume. Isso permite utilizar os valores de área estimados por meio do

NDVI, obtidos por sensoriamento remoto, e inseri-los nas equações que desenvolvemos (Figura 6).

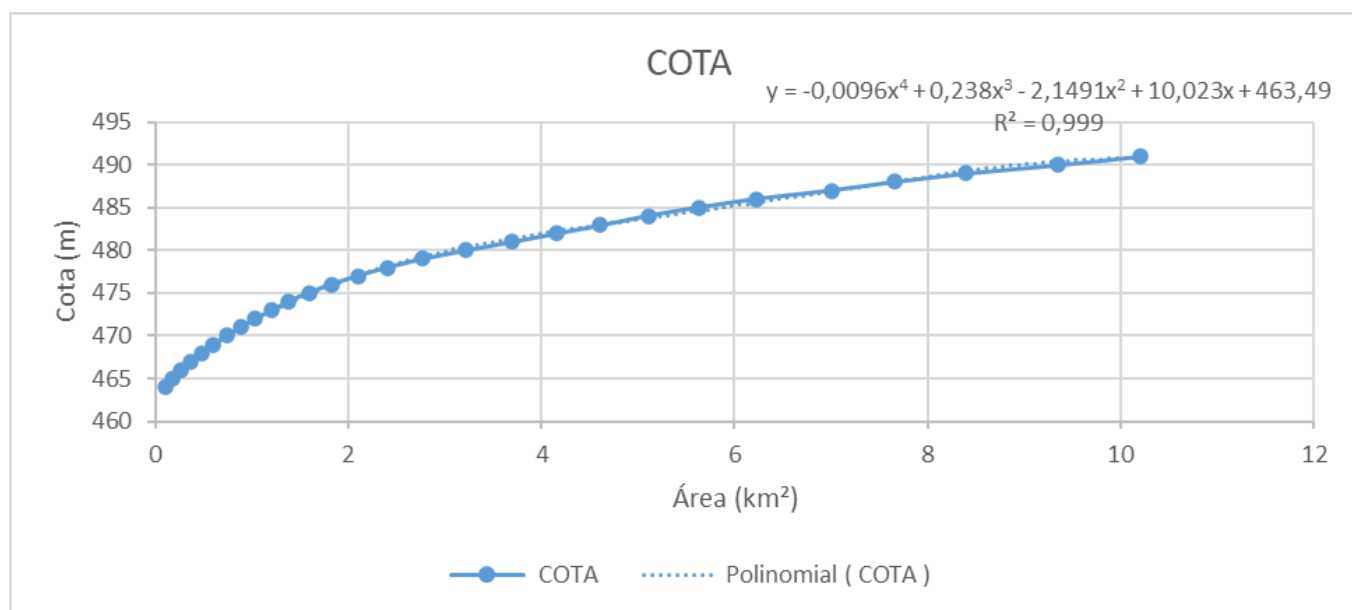


Figura 7. Curva cota-área.

No caso da curva Cota versus Área, a equação polinomial de 4º, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,999, destacou-se como a mais satisfatória. Isso se confirmou através de um teste que incorporou os valores de área conhecidos da curva

original, demonstrando que os valores estimados estão extremamente próximos aos valores reais.

Dessa forma, conseguimos determinar os valores das cotas e dos volumes correspondentes (Tabela 2).

**Tabela 2:** Valores de cota-área obtidos.

| Data       | NDVI    |                        | MIDR    |                        | Desvio Padrão(%) |                        |
|------------|---------|------------------------|---------|------------------------|------------------|------------------------|
|            | Cota(m) | Area(km <sup>2</sup> ) | Cota(m) | Area(km <sup>2</sup> ) | Cota(m)          | Area(km <sup>2</sup> ) |
| 22/04/2019 | 475,96  | 1,82                   | *       | *                      | *                | *                      |
| 15/10/2019 | 474,27  | 1,47                   | *       | *                      | *                | *                      |
| 27/06/2020 | 488,65  | 7,99                   | 488,59  | 7,95                   | 0,04             | 0,03                   |
| 17/10/2020 | 488,25  | 7,75                   | 488,14  | 7,82                   | 0,08             | 0,05                   |
| 29/05/2021 | 487,53  | 7,34                   | 487,97  | 7,59                   | 0,31             | 0,18                   |
| 02/09/2021 | 488,23  | 7,75                   | 488,58  | 7,95                   | 0,24             | 0,14                   |
| 04/10/2021 | 488,42  | 7,86                   | 488,84  | 8,10                   | 0,29             | 0,18                   |
| 21/11/2021 | 487,69  | 7,43                   | 488,22  | 8,12                   | 0,38             | 0,49                   |
| 20/08/2022 | 484,32  | 5,44                   | 488,93  | 8,12                   | 3,26             | 1,90                   |
| 21/09/2022 | 486,26  | 6,62                   | 488,65  | 8,09                   | 1,69             | 1,04                   |
| 31/10/2022 | 486,26  | 6,62                   | 488,47  | 8,09                   | 1,56             | 1,04                   |

Fonte: Os autores (2023).

Na análise da curva Área versus Volume, a equação polinomial de quarto grau surgiu como a mais adequada, apresentando um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9877. Por meio da aplicação da mesma metodologia previamente mencionada, a

análise resultou em resultados satisfatórios. Isso é particularmente relevante, considerando que se trata de uma curva aproximada de linha de tendência, a qual representa uma linha que se ajusta melhor a um conjunto de dados.

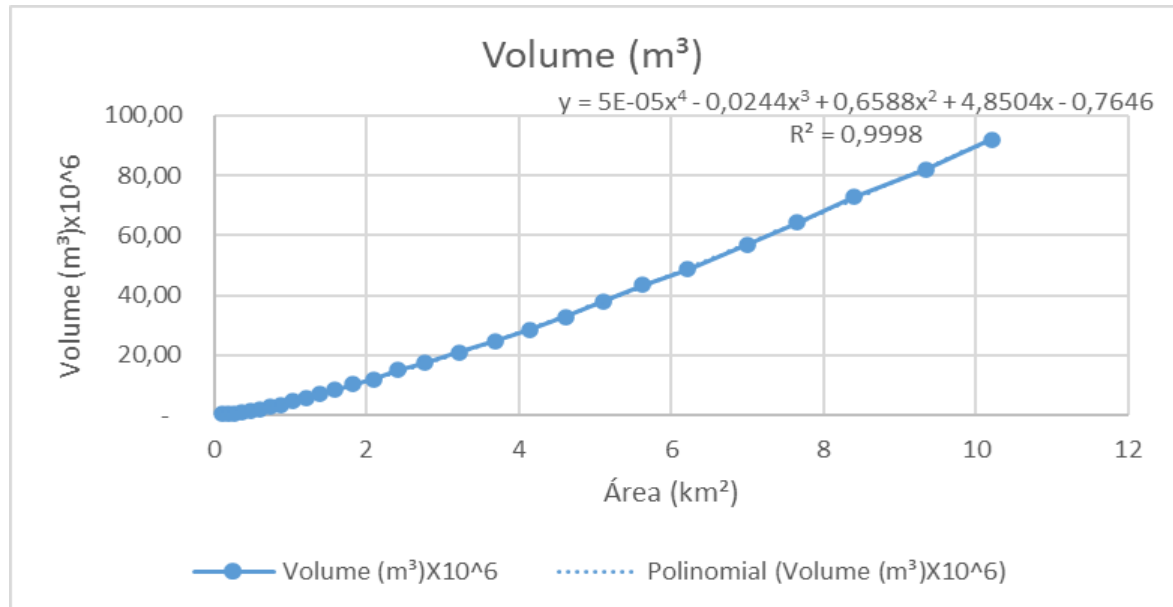


Figura 8. Curva área-volume.

Por meio das equações polinomiais obtidas, ao se inserir o valor da área do espelho de água obtido pelo NDVI, é possível obter a cota e o volume do reservatório na data monitorada, e verificar se os

valores encontrados pelo método de sensoriamento remoto e pelos dados disponibilizados pelo MIDR possuem uma coerência dentro do esperado.

Tabela 3: Valores de área-volume obtidos.

| Data       | NDVI            |                                | MIDR            |                                | Desvio Padrão(%) |                                |
|------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|
|            | Área ( $km^2$ ) | Volume ( $m^3$ ) $\times 10^6$ | Área ( $km^2$ ) | Volume ( $m^3$ ) $\times 10^6$ | Área ( $km^2$ )  | Volume ( $m^3$ ) $\times 10^6$ |
| 22/04/2019 | 1,82            | 10,12                          | *               | *                              | *                | *                              |
| 15/10/2019 | 1,47            | 7,69                           | *               | *                              | *                | *                              |
| 27/06/2020 | 7,99            | 67,81                          | 7,95            | 69,33                          | 0,03             | 1,08                           |
| 17/10/2020 | 7,75            | 65,26                          | 7,82            | 65,50                          | 0,05             | 0,17                           |
| 29/05/2021 | 7,34            | 60,83                          | 7,59            | 64,08                          | 0,18             | 2,30                           |
| 02/09/2021 | 7,75            | 65,17                          | 7,95            | 69,25                          | 0,14             | 2,88                           |
| 04/10/2021 | 7,86            | 66,37                          | 8,10            | 71,46                          | 0,18             | 3,60                           |
| 21/11/2021 | 7,43            | 61,81                          | 8,12            | 66,18                          | 0,49             | 3,09                           |
| 20/08/2022 | 5,44            | 41,23                          | 8,12            | 72,23                          | 1,90             | 21,92                          |
| 21/09/2022 | 6,62            | 53,20                          | 8,09            | 69,84                          | 1,04             | 11,77                          |
| 31/10/2022 | 6,62            | 53,20                          | 8,09            | 68,31                          | 1,04             | 10,68                          |

Por meio dos valores de áreas encontradas no NDVI para estes intervalos, usa-se as equações polinomiais para se obter os valores de cota e volume no período analisado utilizando sensoriamento remoto, assim é possível se obter o valor da área para

o MIDR, uma vez que as informações disponíveis são de Cota e Volume, e foi utilizado o desvio padrão entre os valores para verificar a coerência entre os dados estudados (Tabela 4).

**Tabela 4.** Verificação da coerência dos valores de cota-área-volume pelo desvio padrão.

| Data       | NDVI     |                         |                                            | MIDR     |                         |                                            | Desvio Padrão(%) |                         |                                            |
|------------|----------|-------------------------|--------------------------------------------|----------|-------------------------|--------------------------------------------|------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
|            | Cota (m) | Área (km <sup>2</sup> ) | Volume (m <sup>3</sup> ) x 10 <sup>6</sup> | Cota (m) | Área (km <sup>2</sup> ) | Volume (m <sup>3</sup> ) x 10 <sup>6</sup> | Cota (m)         | Área (km <sup>2</sup> ) | Volume (m <sup>3</sup> ) x 10 <sup>6</sup> |
| 22/04/2019 | 475,96   | 1,82                    | 10,12                                      | *        | *                       | *                                          | *                | *                       | *                                          |
| 15/10/2019 | 474,27   | 1,47                    | 7,69                                       | *        | *                       | *                                          | *                | *                       | *                                          |
| 27/06/2020 | 488,65   | 7,99                    | 67,81                                      | 488,59   | 7,95                    | 69,33                                      | 0,04             | 0,03                    | 1,08                                       |
| 17/10/2020 | 488,25   | 7,75                    | 65,26                                      | 488,14   | 7,82                    | 65,50                                      | 0,08             | 0,05                    | 0,17                                       |
| 29/05/2021 | 487,53   | 7,34                    | 60,83                                      | 487,97   | 7,59                    | 64,08                                      | 0,31             | 0,18                    | 2,30                                       |
| 02/09/2021 | 488,23   | 7,75                    | 65,17                                      | 488,58   | 7,95                    | 69,25                                      | 0,24             | 0,14                    | 2,88                                       |
| 04/10/2021 | 488,42   | 7,86                    | 66,37                                      | 488,84   | 8,10                    | 71,46                                      | 0,29             | 0,18                    | 3,60                                       |
| 21/11/2021 | 487,69   | 7,43                    | 61,81                                      | 488,22   | 8,12                    | 66,18                                      | 0,38             | 0,49                    | 3,09                                       |
| 12/08/2022 | 484,72   | 5,69                    | 43,73                                      | 488,93   | 8,12                    | 72,23                                      | 2,97             | 1,72                    | 20,15                                      |
| 21/09/2022 | 486,26   | 6,62                    | 53,20                                      | 488,65   | 8,09                    | 69,84                                      | 1,69             | 1,04                    | 11,77                                      |
| 31/10/2022 | 486,26   | 6,62                    | 53,20                                      | 488,47   | 8,09                    | 68,31                                      | 1,56             | 1,04                    | 10,68                                      |

A partir da comparação dos valores conforme a Tabela 4, é possível observar, que mesmo não sendo totalmente iguais, possuem coerência estatística, demonstrando que o método aplicado para o monitoramento do reservatório do PISF, podem ser uma ótima ferramenta de gestão e controle para o estado de Pernambuco, o desvio entre alguns dos valores são aceitáveis, tendo em vista que quanto mais próximo de 0, o valor é mais homogêneo e possui uma relação estatística aceitável (Silva, 2020).

Os valores encontrados para Cota e Área, quando comparados os resultados para o NDVI e os disponibilizados pelo MIDR são os mais aceitáveis, já os valores para Volume se destoam entre si, possuindo um desvio elevado e estatisticamente distantes, ocasionando uma necessidade de uma verificação mais aprofundada dos métodos utilizados e do monitoramento do MIDR em relação aos dados disponibilizados no portal do PISF para uma gestão mais eficiente.

Vale destacar que o método de monitoramento do espelho de água do reservatório por imagens de satélites também possui algumas limitações, uma vez

que para se obter a área desejada, o cálculo utiliza os pixels com a classificação referente ao espelho de água, para mais e para menos, tornando o resultado nem sempre perfeito, além de que, o valor desse pixel pode destoar muito os valores analisados, como no caso do Landsat 8, que possuem resolução de 30 metros por cada quadrado de pixel estudado.

Além disso, é necessário observar o uso das terras nos arredores dos reservatórios do PISF, uma vez que as atividades agrícolas nas regiões, podem interferir nos avanços e recuos de áreas alagadas nos entornos, a depender do tipo de prática de irrigação, causando cenários diferentes a serem analisados e pela sua formação geológica, o reservatório inevitavelmente ficará assoreado, o que torna medidas preventivas e corretivas deste processo na região estudada (Barros et al., 2020).

Para uma avaliação coerente dos dados obtidos, deve-se considerar diversos fatores do meio, trópicos e antrópicos da região, e também, a presença de flora aquática na superfície ou em seu arredor, comprometendo uma análise mais detalhada, além disso, devido o tempo em que o reservatório foi

construído, deve-se realizar batimetrias para se obter os valores atualizados do reservatório, uma vez que se encontra no leito do Riacho Milagres, ele possui disposição de solos no leito, interferindo na cota, e possivelmente, perda de volume (Silva et al., 2017).

#### 4. Conclusões

Os resultados iniciais obtidos no presente estudo, se apresentam de forma a possibilitar um monitoramento remoto do volume do Reservatório Milagres do PISF, porém, podendo ser aperfeiçoado de forma a ser replicado em demais reservatórios ao longo dos eixos do PISF.

Outras pesquisas são necessárias de modo a evoluir na construção das técnicas para aplicações que atendam à necessidade de gestão dos recursos hídricos. Como possíveis investigações, de forma a aprofundar o sensoriamento remoto utilizando de índices espectrais, sugere-se por exemplo, a experimentação com imagens de outros satélites que possuam resoluções distintas, bem como correlações com outros índices espectrais distinto relacionados a água.

Além destas experimentações, é necessário do ponto de vista da gestão que haja revisões periódicas na batimetria do reservatório, tendo em vista que podem haver movimentações de terra no entorno ou atividades antrópicas nos arredores, além de se tratar de um grande curso de água, muito sedimento pode se depor no fundo do reservatório, modificando todo o seu formato, e o valor de cota lido na régua do reservatório, não corresponder ao valor verdadeiro de cota, área e volume respectivamente.

Além das análises e experimentações já realizadas, há a possibilidade de ocorrência de alterações no entorno, como movimentações de terra devido a atividades antropogênicas ou outras intervenções nas proximidades do reservatório. Além disso, dado o caráter dinâmico de grandes corpos d'água, é crucial considerar que a sedimentação ao longo do tempo pode afetar significativamente a morfologia do reservatório, levando a mudanças substanciais em sua topografia.

Essas alterações podem resultar em divergências entre os valores de cota registrados na régua do reservatório e os valores reais de cota, área e volume correspondentes. Portanto, a manutenção de um programa de monitoramento e revisão periódica da batimetria se torna uma prática fundamental para assegurar a precisão e a confiabilidade dos dados e informações relacionadas ao reservatório, bem como para subsidiar uma gestão eficaz dos recursos hídricos.

O monitoramento da água no Reservatório Milagres tem uma relação direta entre os dados vistos no mapa de NDVI, com o volume de água

disponibilizado pelo MIDR, ou seja, são valores que possuem correlação justa e aceitável estatisticamente.

Recomenda-se, adicionalmente, a consideração da utilização de outros satélite de observação, o que pode potencialmente aprimorar ainda mais a qualidade dos resultados obtidos. Pode-se explorar imagens do satélite Sentinel-2A, que oferece uma resolução espacial de 10 metros e uma resolução temporal de 5 dias, ou do satélite CBERS 4A, que proporciona uma resolução espacial de 8 metros e uma resolução temporal de 31 dias. Além disso, a fusão de dados com a banda pancromática desses satélites pode resultar em uma resolução ainda mais elevada, ampliando as possibilidades de análise e interpretação dos dados.

Vale destacar que a metodologia aplicada neste estudo, pode ser também feita com o NDWI para enriquecer a análise, proporcionando uma visão mais abrangente da distribuição e da dinâmica dos recursos hídricos na área de estudo. Portanto, sua incorporação pode ser altamente benéfica para o alcance de resultados mais completos e precisos.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional - MIDR, por fornecer os dados secundários de observação do reservatório Milagres; à Agência Pernambucana de Águas e Clima - Apac por informações relativas à gestão do PISF no estado de Pernambuco; e ao Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento da Universidade Federal de Pernambuco - Sergio/UFPE e ao CNPq pelas bolsas PQ da quinta e sextas autoras. Ao CNPq pelo financiamento dos projetos Proc. 431980/2018-7 e Proc. 406919/2022-4.

#### Referências

- Alvarenga, A.S., Moraes, M.F., 2014. Processamento digital de imagens LANDSAT-8 para obtenção dos índices de vegetação NDVI e SAVI visando a caracterização da cobertura vegetal no município de Nova Lima-MG. Portal MUNDOGEO.
- ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>
- APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima), 2023. Projeto de Integração do Rio São Francisco. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/pisf>
- Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L.M., Martins, V.S., 2019. Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações. 1 edição. INEP, São José dos Campos.
- Barros, A.S., Farias, L.M., Marinho, J.L.A., 2020. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na Caracterização da

- Cobertura Vegetativa de Juazeiro do Norte–CE. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 2885-2895.
- Carmo, M.V.N.S., Lima, C.H.R., 2020. Caracterização Espaço-Temporal das Secas no Nordeste a partir da Análise do índice SPI. *Revista Brasileira de Meteorologia* 35, 233-242.
- Falco, J.G., 2008. *Estatística Aplicada*. EduUFMT, Cuiabá. UFPR, Curitiba.
- Gondim, J., Fioreze, A.P., Alves, R.F.F., Souza, W.G., 2017. A seca atual no Semiárido nordestino – Impactos sobre os recursos hídricos. *Parcerias Estratégicas* 22, 277-300.
- Leonardo, H.R.A.L., Salgueiro, C.O.B., Almeida, D.N.O., Santos, S.M., Oliveira, L.M.M., 2021. Sensoriamento Remoto Aplicado na Geoespacialização do Reservatório Poço da Cruz-PE e seu Entorno. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14, 3592-3607.
- McFeeters, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17, 1425-1432.
- Menezes, R.B.G.G., 2021. Análise do espelho d'água do reservatório de Sobradinho utilizando o sensoriamento remoto. Recife: A Autora.
- MIDR (Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional). Portal do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional: Institucional.
- PERNAMBUCO (Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos), 2022. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco: tomo I: diagnósticos. / Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos. Secretaria Executiva de Recursos Hídricos (Seinfra), Recife.
- QGIS Development Team, 2022. QGIS Geographic Information System. Versão 3.16: Hannover. [s.l.]: Open-Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.
- Rani, N., Mandla, V.R., Singh, T., 2017. Evaluation of atmospheric corrections on hyperspectral data with special reference to mineral mapping. *Geoscience Frontiers* 8, 797-808.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Earth Resources Technology Satellite Symposium* 1, 309-317.
- Santos, D.N., Silva, V.P.R., Sousa, F.A.S., Silva, R.A., 2010. Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14, 492-500.
- Silva, C.A.S., 2020. Contabilidade de Custos Análise teórica para a relação volume versus custo de produção por análise de regressão. *Augusto Guzzo Revista Acadêmica* 1, p. 13-32.
- Silva, E.J., Coelho, F., Silva, W.P., 2017. Sensoriamento remoto no monitoramento da qualidade dos recursos hídricos. *Cadernos UniFOA* 12, 121-130.
- Soares, D.R., 2023. Dinâmica espaço-temporal de coberturas hídrica e vegetal por sensoriamento remoto na bacia do rio Brígida. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Souza, D.F., Gonzalez, G.D.D., Teixeira Filho, J., 2019. Variação temporal do índice de vegetação normalizada como ferramenta de identificação dos açudes na bacia hidrográfica do Ribeirão das Cabras. *Revista Cerrados (Unimontes)* 17, 222-239.
- United States Geological Survey (USGS), 2023. Landsat 8/9 Products, accessed 2023 at URL <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vasconcellos, R.C., Beltrão, N.E.S., Firmino, F.A.B., Silva, S.M.A., Farias, M.H.C.S., 2016. Potencialidades da aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em políticas de regularização ambiental: um estudo em Paragominas, Pará, Brasil. *Anais do Congresso Amazônico de Meio Ambiente & Energias Renováveis*. Belém, Pará, Brasil. v. 2.
- World Water Council, 2018. *Strategy: Water Security, Sustainability and Resilience*. Marseille.
- Zanotta, D., Zortea, M., Ferreira, M. P., 2019. *Processamento de imagens de satélite*. Oficina de Textos: São Paulo.