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

REBECCA BORJA GONÇALVES GOMES DE MENEZES

ANÁLISE DO ESPELHO D'ÁGUA DO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO UTILIZANDO O SENSORIAMENTO REMOTO

Recife
2021

REBECCA BORJA GONÇALVES GOMES DE MENEZES

ANÁLISE DO ESPELHO D'ÁGUA DO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO UTILIZANDO O SENSORIAMENTO REMOTO

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

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

Recife

2021

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

M543a Menezes, Rebecca Borja Gonçalves Gomes de.

Análise do espelho d'água do reservatório de Sobradinho utilizando o sensoriamento remoto / Rebecca Borja Gonçalves Gomes de Menezes. – Recife: A Autora, 2021.

47 folhas, il., gráfs., tabs.

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

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2020.

Inclui Referências.

1. Engenharia civil. 2. Índices espectrais. 3. Sensoriamento remoto. 4. LANDSAT-8. 5. Recurso hídrico. I. Oliveira, Leidjane Maria Maciel de (Orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2021-171

REBECCA BORJA GONÇALVES GOMES DE MENEZES

ANÁLISE DO ESPELHO D'ÁGUA DO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO UTILIZANDO O SENSORIAMENTO REMOTO

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

Aprovado em: 06/05/2021.

BANCA EXAMINADORA

_____

Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Orientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

_____

M.Sc. Débora Natália Oliveira de Almeida (Examinadora Externa)

Universidade Federal de Pernambuco

Esse trabalho é dedicado aos meus familiares que permaneceram comigo durante a jornada, aos professores deste curso que fizeram a diferença na minha formação, aos meus amigos e a todos que contribuíram diretamente para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao chegar no fim dessa grande jornada que foi o bacharelado em Engenharia Civil, gostaria primeiramente de agradecer a Deus, pela minha vida e das pessoas que eu amo em tempos de pandemia tão difíceis, por ter me dado forças, perseverança e saúde principalmente para concluir esse trabalho que simboliza o fim da minha graduação.

Agradeço a toda minha família, sei que nunca estarei sozinha enquanto tiver vocês por perto.

Agradeço especialmente aos meus pais Cristianeide e Ronaldo por estarem sempre comigo, me dando amor e apoio incondicionais, me incentivando a dar o meu melhor e ser a minha melhor versão.

Agradeço aos meus amigos pela companhia nos bons e maus momentos da vida. Aos amigos que estão longe, a distância e o tempo não diminuem o carinho que eu sinto por todos vocês. Aos meus amigos do CTG/UFPE pela força e companheirismo durante esses semestres juntos na caminhada acadêmica, que acabaram por tornar mais leve a minha jornada.

Agradeço muito a professora Leidjane, por ter aceitado ser minha orientadora, por toda confiança e tempo dedicado a mim, pela atenção, cuidado e amor colocado em todos os seus ensinamentos transmitidos nessa etapa da minha vida.

Também agradeço a todos os professores do curso que colaboraram com minha formação e aos membros da banca, por participarem desta defesa, contribuindo com a minha formação acadêmica.

RESUMO

O reservatório de Sobradinho, na Bahia, é um dos maiores do país e o mais importante para diversas atividades antrópicas da região Nordeste. Estudos hidrológicos de grandes áreas como esssa são de suma importância para o auxílio na tomada de decisões e planejamento do uso do recurso hídrico. As técnicas de sensoriamento remoto se mostram como uma alternativa para monitoramento e análise espaço-temporal dos mais diversos recursos naturais e artificiais. Algumas das vantagens do uso de imagens de satélite são o baixo custo, agilidade e facilidade de acesso às imagens orbitais que permitem análises mais precisas e um maior detalhamento das feições naturais através dos índices espectrais. Considerando estes aspectos, o presente trabalho tem como finalidade analisar a distribuição espaço-temporal do espelho d'água do reservatório de Sobradinho, localizado na bacia hidrográfica do rio São Francisco, nos anos de 2017 e 2020. Neste estudo, os parâmetros biofísicos processados foram o Índice de Água por Diferença Normalizado (NDWI) e o Índice de Água por Diferença Normalizado Modificado (MNDWI) que foram desenvolvidos para realçar e delinear corpos d'água em imagens de satélite. Todas as etapas do processamento digital e elaboração de mapas temáticos foram feitas utilizando o software de livre acesso QGIS versão 2.18.22 - Las Palmas e cenas do satélite LANDSAT-8 sensor OLI. A comparação dos dois métodos aplicados a mesma região mostram que ambos apresentam resultados satisfatórios, porém a aplicação do MNDWI proporciona resultados melhores sendo mais fiel a representação da superfície hídrica mapeada. Os resultados obtidos detectaram um aumento expressivo do espelho d'água entre os anos estudados, confirmado pelos dados de volume útil e pluviometria da região. Em 2017, a precipitação anual foi de 291,9 mm e em 2020 foi de 910,2 mm. Para o NDWI, a área superficial da lâmina d'água variou de 66.549 ha para 197.282 ha e para o MNDWI a variação foi de 68.308 ha para 205.422 ha. Neste sentido, é possível inferir que o sensoriamento remoto pode atuar como ferramenta para o monitoramento da dinâmica do ambiente físico através das alterações do comportamento espectral.

Palavras-chave**:** índices espectrais; sensoriamento remoto; LANDSAT-8; recurso hídrico.

ABSTRACT

The Sobradinho reservoir, in Bahia, is one of the largest in the country and the most important for various human activities in the Northeast region. Hydrological studies of large areas such as this one are of paramount importance to aid decision-making and planning of the use of water resources. Remote sensing techniques are an alternative for monitoring and spatiotemporal analysis of the most diverse natural and artificial resources. Some of the advantages of using satellite images are the low cost, agility and ease of access to orbital images that allow for more accurate analysis and greater detailing of natural features through spectral indices. Considering these aspects, the present work aims to analyze the spatiotemporal distribution of the water mirror of the Sobradinho reservoir, located in the hydrographic basin of the São Francisco River, in 2017 and 2020. In this study, the processed biophysical parameters were the Normalized Difference Water Index (NDWI) and the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) which were developed to highlight and delineate bodies of water in satellite imagery. All steps of digital processing and elaboration of thematic maps were carried out using the open access software QGIS version 2.18.22 - Las Palmas and scenes from the LANDSAT-8 satellite sensor OLI. Comparison of the two methods applied to the same region show that both present satisfactory results, but the application of MNDWI provides better results, with the representation of the mapped water surface being more faithful. The results obtained detected a significant increase in the water surface between the years studied, confirmed by the useful volume and rainfall data of the region. In 2017, the annual precipitation was 291.9 mm and in 2020 it was 910.2 mm. For the NDWI, the surface area of the water depth varied from 66,549 ha to 197,282 ha and for the MNDWI the variation was from 68,308 ha to 205,422 ha. In this sense, it is possible to infer that remote sensing can act as a tool for monitoring the dynamics of the physical environment through changes in spectral behavior.

Keywords: spectral indices; remote sensing; LANDSAT-8; water resource.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Série de satélites Landsat e suas datas de lançamento. 16
Figura 2 – Ilustração do satélite LANDSAT-8. 17
Figura 3 – Bacia hidrográfica do rio São Francisco. 20
Figura 4 – Subdivisão das quatros regiões da Bacia do São Francisco. 22
Figura 5 – Diagrama esquemático das usinas hidrelétricas a jusante de Sobradinho. 23
Figura 6 – Evolução do armazenamento de Sobradinho. 24
Figura 7 – Órbitas e ponto das cenas do satélite LANDSAT-8 abrangendo o reservatório de Sobradinho. 25
Figura 8 – Mapa de localização da área de estudo. 26
Figura 9 – Localização do posto de Remanso no reservatório de Sobradinho. 27
Figura 10 – Precipitação pluviométrica mensal (mm) dos anos de 2017 e 2020 no posto de Remanso. 28
Figura 11 – Dados de volume útil do reservatório de Sobradinho. 29
Figura 12 – Fluxograma das etapas metodológicas. 30
Figura 13 – Interface da ferramenta Calculadora Raster. 32
Figura 14 – Distribuição espacial e temporal do índice NDWI nos anos 2017 e 2020. 33
Figura 15 – Distribuição espacial e temporal do índice MNDWI nos anos 2017 e 2020. 35
Figura 16 – Perfil Longitudinal georreferenciado do NDWI e MNDWI no ano de 2020. 36
Figura 17 – Localização dos pontos amostrais nas imagens do Google Earth, NDWI e MNDWI de 2020. 37
Figura 18 – Cenários para quantificação do espelho d'água. 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do satélite LANDSAT 8. 17
Tabela 2 – Bandas do satélite LANDSAT 8. 18
Tabela 3 – Coordenadas geográficas do posto. 27
Tabela 4 – Dados estatísticos do parâmetro NDWI dos anos 2017 e 2020. 34
Tabela 5 – Dados estatísticos dos parâmetros NDWI e MNDWI dos anos 2017 e 2020. 36
Tabela 6 – Valores de refletância para cada ponto de acordo com a metodologia aplicada para o índice. 38
Tabela 7 – Comparação entre as áreas superficiais para o NDWI e MNDWI. 39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CODEBA	Companhia Docas do Estado da Bahia
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
ERTS	*Earth Resources Technology Satellite*
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LANDSAT	*Land Remote Sensing Satellite*
MNDWI	Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NDWI	Índice de Água por Diferença Normalizada
OLI	*Operational Land Imager*
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SR	Sensoriamento Remoto
TIROS	*Television IR Operational Satellite*
TIRS	*Thermal Infrared Sensor*
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USGS	*United States Geological Survey*
UTM	Universal Transverso de Mercator
VU	Volume Útil

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO 13
1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS 14
2 REFERENCIAL TEÓRICO 15
2.1 SENSORIAMENTO REMOTO 15
2.1.1 Satélite LANDSAT 8 16
2.1.2 Os índices espectrais NDWI e MNDWI 19
2.2 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO 20
2.2.1 Reservatório de Sobradinho 22
3 MATERIAIS E MÉTODOS 25
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 25
3.2 OBTENÇÃO DOS DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS 26
3.2.1 Distribuição pluviométrica para os anos 2017 e 2020 26
3.2.2 Volume útil anual 29
3.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS 29
3.3.1 Pré-processamento 30
3.3.2 Processamento das imagens 31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 33
5 CONCLUSÕES 41
REFERÊNCIAS 42

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o ser humano vem modificando os recursos naturais em busca de suprir suas necessidades, como a geração de energia elétrica, a irrigação, o abastecimento de água, entre outros. O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas, isso porque o país é rico em rios com grandes extensões, caudalosos e que correm sobre planaltos e depressões. A esse sistema de produção e transmissão de energia elétrica dá-se o nome de SIN (Sistema Interligado Nacional) que é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte (ONS, 2021).

A interconexão dos sistemas elétricos, por meio de malhas de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade (ONS, 2021).

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. A principal usina do subsistema Nordeste está localizada no reservatório de Sobradinho na Bahia e pertence a bacia hidrográfica do São Francisco (ONS, 2021).

O reservatório de Sobradinho tem cerca de 320 km de extensão, tornando-se um dos maiores lagos artificiais do mundo. Além da função de geração de energia elétrica, é a principal fonte de regularização dos recursos hídricos da região, sendo usado tanto para controle de cheias quanto em períodos de estiagem, permitindo a operação de todas as usinas da CHESF situadas ao longo da cascata do rio São Francisco (CHESF, 2021).

Atualmente o monitoramento do comportamento hídrico associado a variação da cobertura vegetal a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) encontra-se cada vez mais recorrente no cenário mundial (FARIAS *et al.*, 2017). Várias aplicações têm sido feitas para o Sertão nordestino, que é caracterizado por longos períodos de estiagem, provocando um cenário de grande estresse hídrico e, consequentemente vegetal, na região, segundo Gordon *et al.* (2005).

O uso de ferramentas de Sistema de Informações Geográficas (SIGs) e Sensoriamento Remoto facilitam a obtenção de dados de modo mais eficiente e econômico para estudos mais completos nesse âmbito (ARAÚJO *et al.*, 2015).

É importante o estudo da variação espaço-temporal de áreas específicas, pois pode

auxiliar em diversos projetos para planejamento e tomada de decisões. Nos casos dos reservatórios de água essas informações se mostram de extrema importância para a gestão de recursos hídricos, visto que eles desempenham funções importantes para a sociedade, como controle de enchentes e abastecimento de água (SILVA *et al.*, 2009).

Estudos de diagnósticos em grandes áreas localizadas em bacias hidrográficas são importantes para possibilitar o monitoramento dos recursos naturais e fornecer dados e parâmetros biofísicos dando suporte na definição de ações mitigadoras na gestão ambiental.

Baseados em dados orbitais e software específicos, a exemplo do satélite LANDSAT-8 e o software de livre acesso QGIS, são processados índices espectrais que configuram o mosaico terrestre georreferenciado, delimitando em especial os corpos hídricos. Dentre os índices espectrais processados com a utilização de imagens orbitais, destacam-se o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) que analisa a variabilidade espacial do ambiente hídrico na paisagem terrestre e o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI) que geoespacializa com mais detalhes as bordas de corpos hídricos, delimitando as áreas em intervalos temporais.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A água é um recurso natural essencial para a economia de qualquer território nacional. É o insumo importantíssimo para a sobrevivência humana e dos animais, e para produção agrícola. A distribuição de água é dada de forma não homogênea tanto em termos espaciais e em questões de periodicidade. No Nordeste brasileiro, onde a evaporação é consideravelmente elevada, ocorre esvaziamento de açudes (MELO, 2011).

É necessário que o comportamento de reservatórios de grande porte e importância para atividades antrópicas como Sobradinho seja constantemente observado, monitorado e estudado para que possa ter uma visão ampla do reservatório em diferentes espaços de tempo.

Tendo em vista a relevância de empreendimentos como esse, o sensoriamento remoto surge como grande alternativa tecnológica e economicamente mais viável para estudo e diagnósticos da variabilidade de grandes áreas da superfície terrestre.

A utilização de parâmetros biofísicos como o NDWI e o MNDWI possibilitam a constatação e magnitude das mudanças no ambiente hídrico da paisagem. Baixos índices desses parâmetros indicam ausência de água, caracterizando estresse hídrico na bacia hidrográfica e a perda de vigor vegetativo indicando déficit de precipitação gerando risco de

desertificação da área.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo deste estudo foi determinar e comparar as mudanças dos índices NDWI e MNDWI ocorridas nos anos 2020 (chuvoso) e 2017 (seco), no reservatório de Sobradinho, para detectar a variação da lâmina d'água do corpo hídrico, pertencente a bacia hidrográfica do rio São Francisco, localizado no estado da Bahia, juntamente com o auxílio de dados hidrometeorológicos da região que confirmem a veracidade dos resultados obtidos.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

a) Avaliar a importância do uso de técnicas de SR para a gestão de recursos hídricos de grandes reservatórios;
b) Processar os parâmetros biofísicos de Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) e o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI) utilizando imagens de satélite;
c) Comparar os resultados obtidos de NDWI e MNDWI para os anos de 2020 e 2017;
d) Processar a variação da área superficial;
e) Verificar a eficiência dos resultados com o auxílio de dados hidrometeorológicos da região do lago de Sobradinho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico foram relacionados os conceitos e as teorias básicas da pesquisa, possibilitando assim a contextualização científica dos resultados e conclusões sobre a análise do espelho d'água do reservatório de Sobradinho utilizando o sensoriamento remoto.

2.1 SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto é a arte e a ciência de obter informação sobre um objeto, área ou fenômeno sem a necessidade de ter contato físico direto com o mesmo objeto (JENSEN, 2009).

A origem do sensoriamento remoto nos anos 60 do século 20 deve-se ao espetacular desenvolvimento da área espacial nesses anos, que ficou conhecida como a década da corrida espacial. Foi nesse período que se viu o mais rápido desenvolvimento de foguetes lançadores de satélites, que possibilitou colocar no espaço satélites artificiais para várias finalidades. Os satélites meteorológicos foram os pioneiros e, por meio deles, quase que de uma maneira acidental é que o sensoriamento remoto deu os seus primeiros passos. O primeiro desses satélites meteorológicos foi o TIROS-1 (*Television IR Operational Satellite*), lançado em 1960 pelos Estados Unidos. Além dos padrões de cobertura de nuvens, as imagens do TIROS mostravam, embora com pouca nitidez, algumas feições da superfície da Terra, que pela primeira vez demonstraram ser possíveis de serem vistas do espaço. Melhoramentos dos subsequentes sensores dos satélites meteorológicos deram a oportunidade para iniciar os primeiros estudos mais detalhados de feições terrestres de áreas de coberturas de neves, gelos polares, águas oceânicas e cadeias de montanhas (MENESES e ALMEIDA, 2012, p.1).

Os dados do sensoriamento remoto podem ser usados para estimar variáveis geofísicas e biofísicas. Algumas das aplicações mais utilizadas para os dados de sensoriamento remoto são a modelagem de processos naturais (mudanças climáticas, eutrofização, desertificação, desastres naturais, etc) ou causados pelo homem (desflorestamento, poluição, expansão urbana, deslizamentos, etc) (MORAES, 1999).

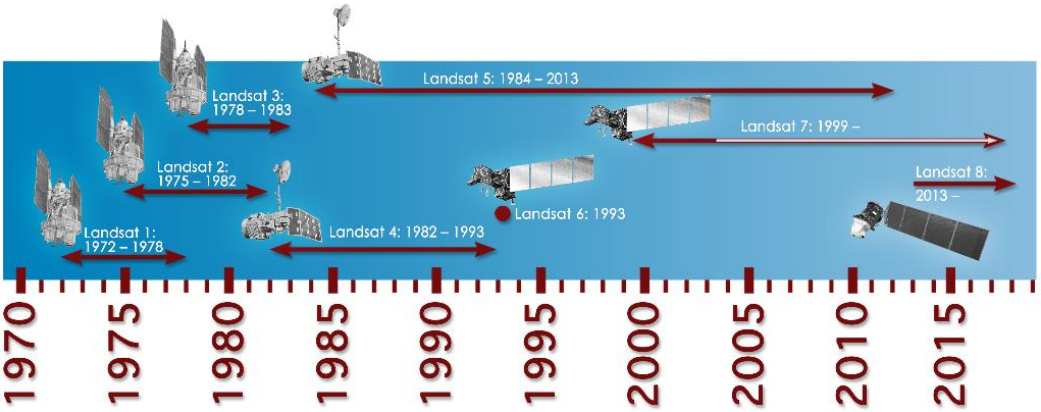
O desenvolvimento de novas tecnologias e de novos sensores, capazes de coletar informações em diferentes porções do espectro eletromagnético, tem fornecido subsídios importantes para o avanço da pesquisa científica (KNUST, 2007).

Os satélites estão entre os mais importantes elementos do sensoriamento remoto.

Graças a eles, são possíveis as confecções de mapas temáticos com as mais variadas escalas de abrangência. Entre os mais importantes e utilizados para a observação e registro de informações da superfície está a série de satélites LANDSAT.

O primeiro satélite da série lançado em 1972 foi inicialmente denominado ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*) e em 1975 passou a se denominar LANDSAT-1 (Figura 1). Até a produção deste trabalho, foram lançados 8 satélites da série e mesmo sendo a primeira série de satélites de sensoriamento remoto do mundo, mantém sua importância junto a comunidade de usuários pelo seu acervo histórico e a contínua atualização tecnológica mantendo características importantes como a altitude e a faixa imageada (INPE, 2021).

Figura 1 – Série de satélites Landsat e suas datas de lançamento



Fonte: INPE (2021).

2.1.1 Satélite LANDSAT 8

A série de satélites LANDSAT teve início na segunda metade da década de 60, a partir de um projeto desenvolvido pela Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), sendo dedicado exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres. O LANDSAT-1, primeiro a ser lançado, levou dois instrumentos a bordo, as câmeras RBV e MSS. Operou por um período de cinco anos adquirindo mais de 300.000 imagens, com repetidas coberturas da superfície da Terra (INPE, 2021).

Todos os 8 satélites da série lançados possuem imagens multiespectrais. As imagens do LANDSAT-8, o mais recente da série, utilizam os sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) com resolução de 15 a 30 metros de dados multiespectrais, são ortoretificadas e todos os produtos do catálogo estão em formato GeoTIFF são disponibilizados de forma gratuita via internet. A Figura 2 e Tabela 1 detalham

as características do satélite LANDSAT-8.

Figura 2 – Ilustração do satélite LANDSAT-8

Fonte: United States Geological Survey (2021).

Tabela 1 – Dados do satélite LANDSAT 8

Instrumento/Sensor	**OLI e TIRS**
Operadora/Instituição Responsável	NASA (*National Aeronautics and Space Administration*)
País	Estados Unidos
Situação Atual	Ativo
Lançamento	02/11/2013
Altitude	705 Km
Inclinação	98,2°
Órbita	Circular, Polar, Heliossíncrona
Faixa Imageada	185 Km
Tempo de Duração da Órbita	99 min.
Horário da Passagem	10h / 12h
Período de Revisita	16 dias
Resolução Espacial	Pancromático: 15 m | Multiespectral: 30 m | Termal: 100 m reamostrada para 30 m

Fonte: INPE (2021).

A plataforma LANDSAT-8 opera com dois instrumentos imageadores, sendo o primeiro, *Operational Land Imager* (OLI), com nove bandas espectrais incluindo a banda pancromática e o segundo é o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) com duas bandas de pixel de 100 metros, processadas e disponibilizadas em 30 metros, para coincidir com a maioria das bandas multiespectrais do sistema imageador OLI (USGS, 2013). As bandas estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Bandas do satélite LANDSAT 8

Banda	**Comprimento de Onda (µm)**	**Resolução Espacial (m)**
Banda 1 - Visível Ultra-Azul	0.43 - 0.45	30
Banda 2 - Visível Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3 - Visível Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4 - Visível Vermelho	0.64 - 0.67	30
Banda 5 - Infravermelho Próximo	0.85 - 0.88	30
Banda 6 - Infravermelho Médio/SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Banda 7 - Infravermelho Médio/SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Banda 8 - Pancromática (PAN)	0.50 - 0.68	15
Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Banda 10 - Infravermelho Termal/TIRS 1	10.60 - 11.19	Adquiridas com 100m de resolução e reamostradas para 30m.
Banda 11 - Infravermelho Termal/TIRS 2	11.50 - 12.51	Adquiridas com 100m de resolução e reamostradas para 30m.

Fonte: United States Geological Survey (2021).

2.1.2 Os índices espectrais NDWI e MNDWI

O índice espectral é resultado de operações matemáticas entre valores numéricos de pixels das bandas de uma imagem. Existem os índices de vegetação que realçam o comportamento espectral da vegetação e se correlacionam com os parâmetros biofísicos da vegetação (EPIPHANIO *et al.*, 1996), como também existem índices de água que se relacionam com a identificação de superfícies hídricas.

O Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), concebido por (MCFEETERS, 1996) tem por objetivo realçar e delinear automaticamente as águas abertas através da operação de bandas multiespectrais. O método é uma variação do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), e combina as bandas verde e infravermelho próximo.

O NDWI gera uma imagem, cujos valores dos pixels variam de -1 a 1, sendo 0 o limiar entre os alvos que são água e o que não são água. Ou seja: todos os pixels com valor igual ou menor que zero não são água (NDWI ≤ 0), e todos os pixels que possuírem valor maior que 0 são água (NDWI > 0). Assim, na imagem gerada pelo NDWI, os corpos d'água são evidenciados, conferindo maior valor de brilho, enquanto as feições de solo e vegetação são minimizadas (GIL *et al.*, 2019).

A fim de obter melhores resultados em regiões que possuem áreas construídas, Xu (2006) propôs uma modificação na equação do método do NDWI, criando o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI) que substitui a banda do infravermelho próximo para o infravermelho médio, visto que no NDWI as construções muitas vezes se misturam com os corpos d'água.

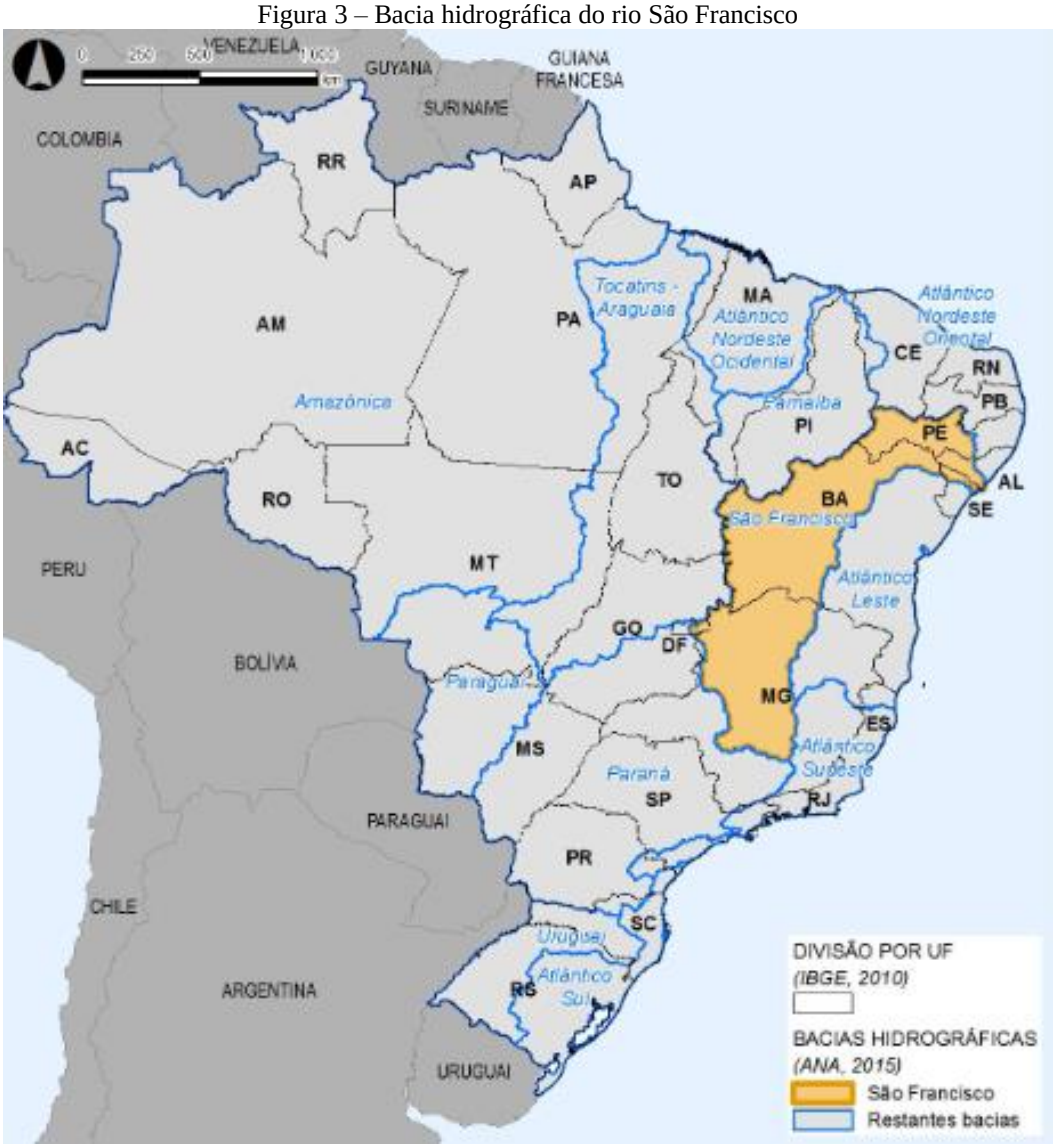
De acordo com Xu (2006), o MNDWI consegue atribuir à água valores ainda mais positivos, visto que a banda do infravermelho médio absorve mais energia nos corpos d'água que a banda do infravermelho próximo. É possível distinguir a água das áreas construídas, pois o uso da banda do infravermelho médio atribui, no índice, valores negativos às áreas construídas. Também pode promover maior contraste com as áreas de solo, que possuem maior refletância na banda do infravermelho médio do que no infravermelho próximo. Sendo assim, o MNDWI revela maiores detalhes dos corpos d'água do que o NDWI, promovendo uma melhoria considerável na separação dos alvos "água" e "não-água".

2.2 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

O conceito de bacia hidrográfica refere-se a uma área de captação geográfica natural delimitada por divisores de água que converge os escoamentos para único ponto fixo. Sendo este ponto denominado exutório. Este compartimento é drenado superficialmente por um curso d'água principal e seus afluentes (SILVA, 1995).

A bacia hidrográfica do rio São Francisco (Figura 3) tem grande importância para o país não apenas pelo volume de água transportado em uma região semiárida, mas, também, pelo potencial hídrico passível de aproveitamento e por sua contribuição histórica e econômica para a região.

Figura 3 – Bacia hidrográfica do rio São Francisco

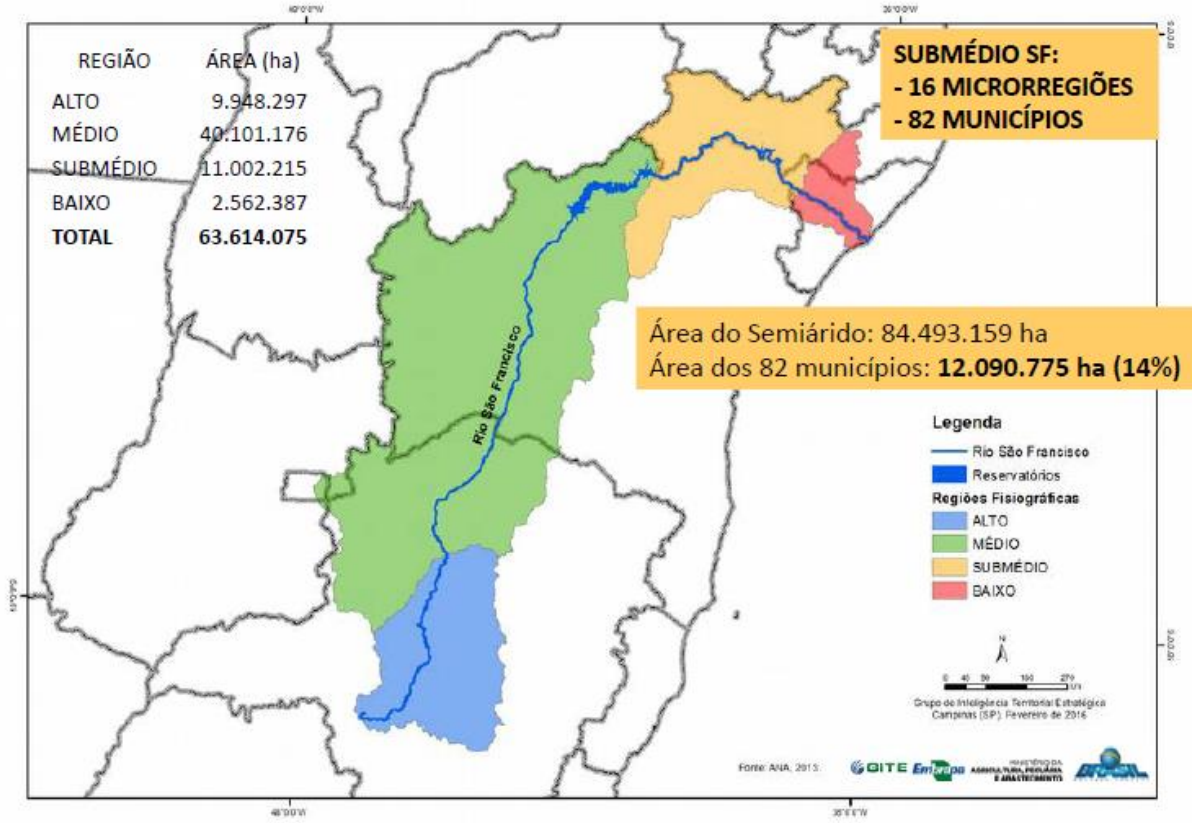


Fonte: Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco (2016).

Segundo dados do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF, 2020), a bacia abrange 639.219 km² de área de drenagem (aproximadamente 7,5% do país) e vazão média de 2.850 m³/s (2% do total do país). O rio principal que dá nome à bacia tem 2.700 km de extensão e nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais, escoando no sentido sul-norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para este, chegando ao Oceano Atlântico através da divisa entre Alagoas e Sergipe. A Bacia possui sete unidades da federação – Bahia (48,2%), Minas Gerais (36,8%), Pernambuco (10,9%), Alagoas (2,2%), Sergipe (1,2%), Goiás (0,5%), e Distrito Federal (0,2%) – e 505 municípios (cerca de 9% do total de municípios do país). É subdividida em quatro regiões: Alto São Francisco (da Serra da Canastra a Pirapora), Médio (de Pirapora a Remanso), Sub-médio (de Remanso a Paulo Afonso) e Baixo (de Paulo Afonso ao Oceano Atlântico), representadas na Figura 4.

O clima na região apresenta uma variabilidade associada à transição do úmido para o árido, com temperatura média anual variando de 18 a 27 ºC, baixo índice de nebulosidade e grande incidência de radiação solar. A pluviosidade apresenta média anual de 1.036 mm, sendo que os mais altos valores de precipitação, da ordem de 1.400 mm, ocorrem nas nascentes do rio na região do Alto São Francisco e, os mais baixos, cerca de 350 mm, entre Sento Sé e Paulo Afonso, na Bahia abrangendo as regiões do Médio e Sub-médio São Francisco. O trimestre mais chuvoso é de novembro a janeiro, contribuindo com 55 a 60% da precipitação anual, enquanto o mais seco é de junho a agosto. A evapotranspiração média é de 896 mm/ano, apresentando valores elevados entre 1.400 mm (sul) a 840 mm (norte), em função das elevadas temperaturas, da localização geográfica intertropical e da reduzida nebulosidade na maior parte do ano (CBHSF, 2020).

Figura 4 – Subdivisão das quatros regiões da Bacia do São Francisco



Fonte: CODEVASF (2019).

O Rio constitui a base para o suprimento de energia elétrica da região Nordeste do país. Os represamentos construídos nas últimas décadas correspondem atualmente a nove usinas hidrelétricas em operação. O São Francisco representa ainda um extraordinário potencial para o desenvolvimento do transporte hidroviário e a irrigação. Estima-se em 1.670 km a extensão navegável na calha. Destacam-se dois trechos principais: 1.312 km entre Pirapora (MG) e Juazeiro (BA) e 208 km entre Piranhas (AL) e a foz.

2.2.1 Reservatório de Sobradinho

A construção do reservatório inundou cerca de 4.214 km², obrigando a realocar em torno de 12.000 famílias dos municípios atingidos, como Remanso, Sento Sé, Casa Nova e Pilão Arcado.

O objetivo inicial da construção de Sobradinho era a regularização plurianual do curso do rio São Francisco, elevando a vazão mínima de 700 m³/s para cerca de 2060 m³/s, garantindo assim, o funcionamento contínuo das usinas a jusante, particularmente o complexo das usinas de Paulo Afonso. Entretanto, com a ocorrência de uma grande cheia no rio São

Francisco nos primeiros meses de 1979, foi constatada a necessidade de locar uma parcela do volume útil do reservatório para controle de enchentes, conhecido como volume de espera que é variável de acordo com a época do ano, uma vez que a probabilidade de ocorrência de precipitações intensas varia ao longo do período hidrológico (LOPES e SANTOS, 2002, p.6).

Tendo sido construída com o objetivo prioritário de gerar energia elétrica, ao adquirir também a função de controlar cheias, a usina de Sobradinho passou a operar com finalidades tecnicamente conflitantes. Além de fornecer água para irrigação, no controle de cheias é necessário deixar disponíveis volumes vazios e ter o reservatório com seu nível mínimo no início da fase de vazões afluentes altas, usando essa disponibilidade para limitação das descargas. Tendo por finalidade gerar energia elétrica, o reservatório deve ser mantido bem próximo de sua cota máxima operativa, com capacidade total de armazenamento, o que é alcançado através da liberação da descarga mínima estritamente necessária ao funcionamento das usinas a jusante (Figura 5).

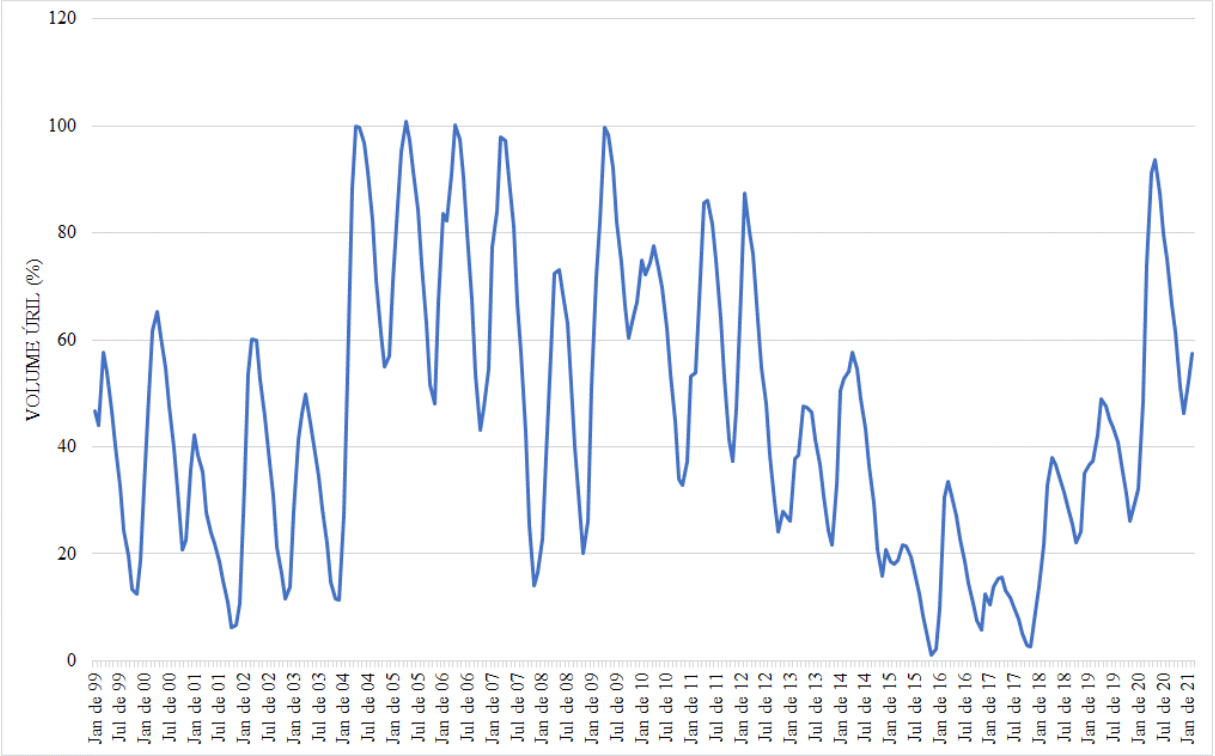
Figura 5 – Diagrama esquemático das usinas hidrelétricas a jusante de Sobradinho

Fonte: ONS (2021).

Incorpora-se a esse aproveitamento de grande porte uma eclusa, de propriedade da CODEBA - Companhia Docas do Estado da Bahia, cuja câmara tem 120 m de comprimento por 17 de largura permitindo às embarcações vencerem o desnível de 32,5 metros criados pela barragem, garantido assim a continuidade da tradicional navegação entre o trecho do Rio São Francisco compreendido entre as cidades de Pirapora/MG e Juazeiro/BA - Petrolina/PE (CHESF, 2021).

Desde 2013 o Brasil vem enfrentando uma grave crise hídrica no nordeste do país, com chuvas muito abaixo do normal, o que diminui a vazão natural dos rios e consequentemente o volume dos reservatórios. Conforme a Figura 6 mostra a evolução do armazenamento de Sobradinho de janeiro de 1999 até fevereiro de 2021. Observa-se os momentos críticos enfrentados principalmente nos anos de 2015 e 2017, onde o reservatório chegou muito próximo ao volume morto e a boa recuperação apresentada até o ano de 2020 atingindo mais de 90% de sua capacidade.

Figura 6 – Evolução do armazenamento de Sobradinho



Fonte: ONS (2021).

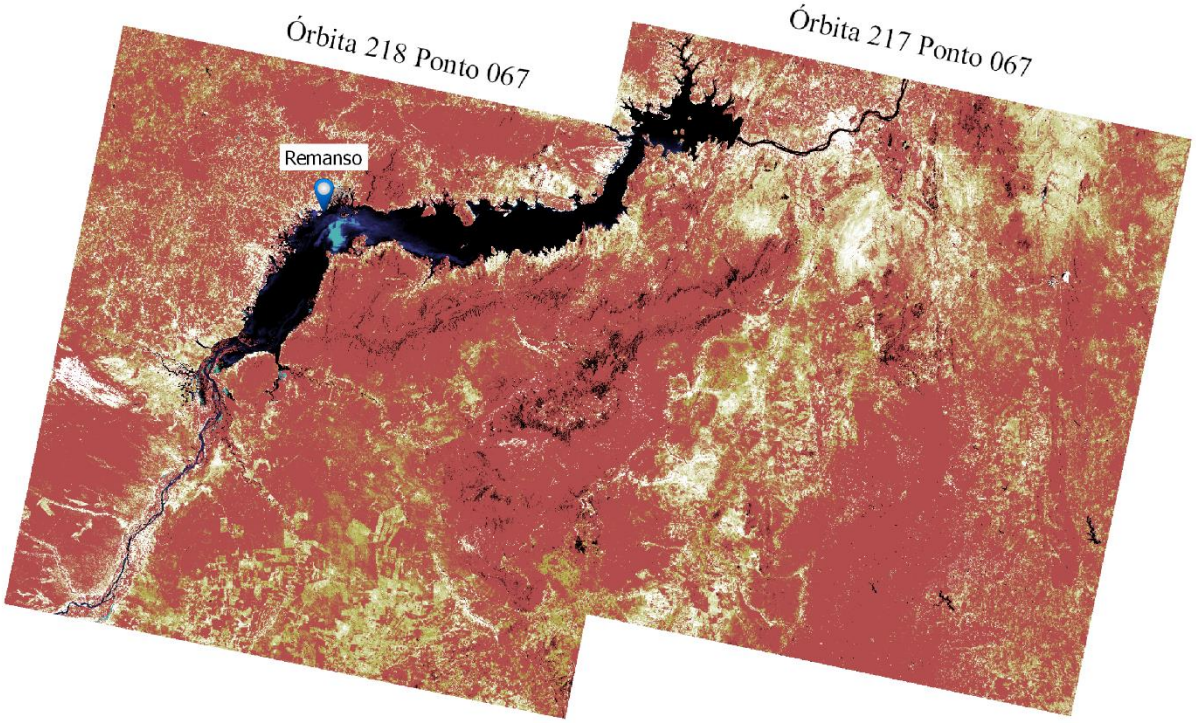
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os itens a seguir detalham os procedimentos metodológicos utilizados para obtenção dos resultados deste trabalho.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região geográfica do lago de Sobradinho é abrangida por duas órbitas e um ponto no sistema de mapeamento do satélite LANDSAT-8 (Figura 7). Para este estudo, optou-se por um recorte na órbita 218 em virtude da localização de posto de Remanso estar contida nela.

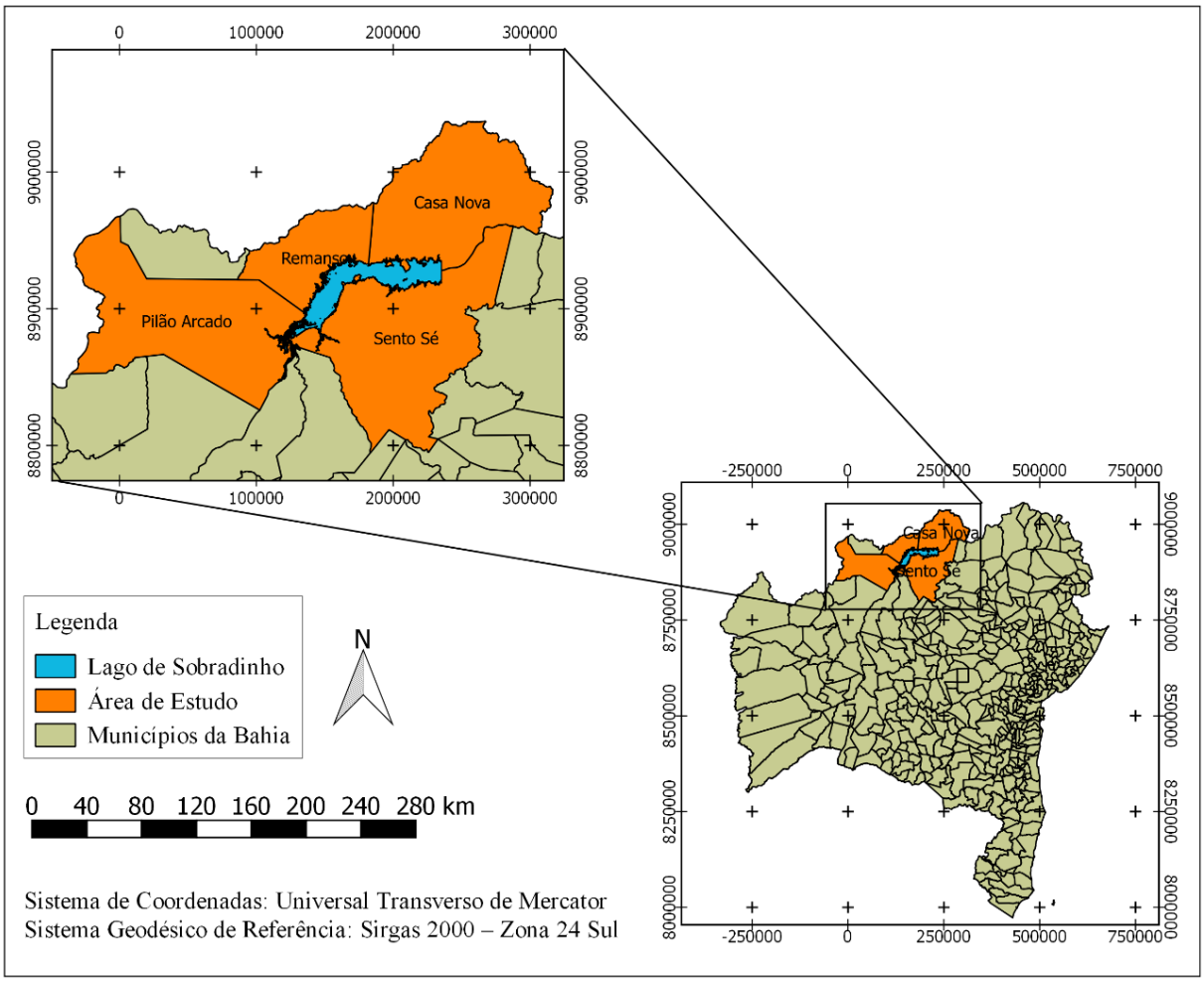
Figura 7 – Órbitas e ponto das cenas do satélite LANDSAT-8 abrangendo o reservatório de Sobradinho



Fonte: A Autora (2021).

O lago de Sobradinho (Figura 8) está situado na região do Submédio do rio São Francisco, a cerca de 40 km da cidade de Petrolina, PE. A represa em sua cota máxima (máxima operativa normal) de 392,50 m, forma um lago de aproximadamente 4214,31 km², com 280 km de comprimento e largura que varia entre 5 e 50 km. Tem capacidade de armazenar 34 bilhões de m^3 de água. A cota mínima de operação é de 380,50 m (CORREIA, 2003).

Figura 8 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: A Autora (2021).

3.2 OBTENÇÃO DOS DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Nos tópicos a seguir, será explanado detalhadamente como se deu a obtenção dos parâmetros utilizados neste trabalho.

3.2.1 Distribuição pluviométrica para os anos 2017 e 2020

Para conhecimento dos índices pluviométricos da área estudada, utilizou-se o banco de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Foi escolhido o posto pluviométrico de Remanso em razão da localização próxima ao lago do reservatório de Sobradinho. A Figura 9 mostra a localização do posto.

Figura 9 – Localização do posto de Remanso no reservatório de Sobradinho

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (2021).

Na Tabela 3, tem-se as coordenadas geográficas do posto.

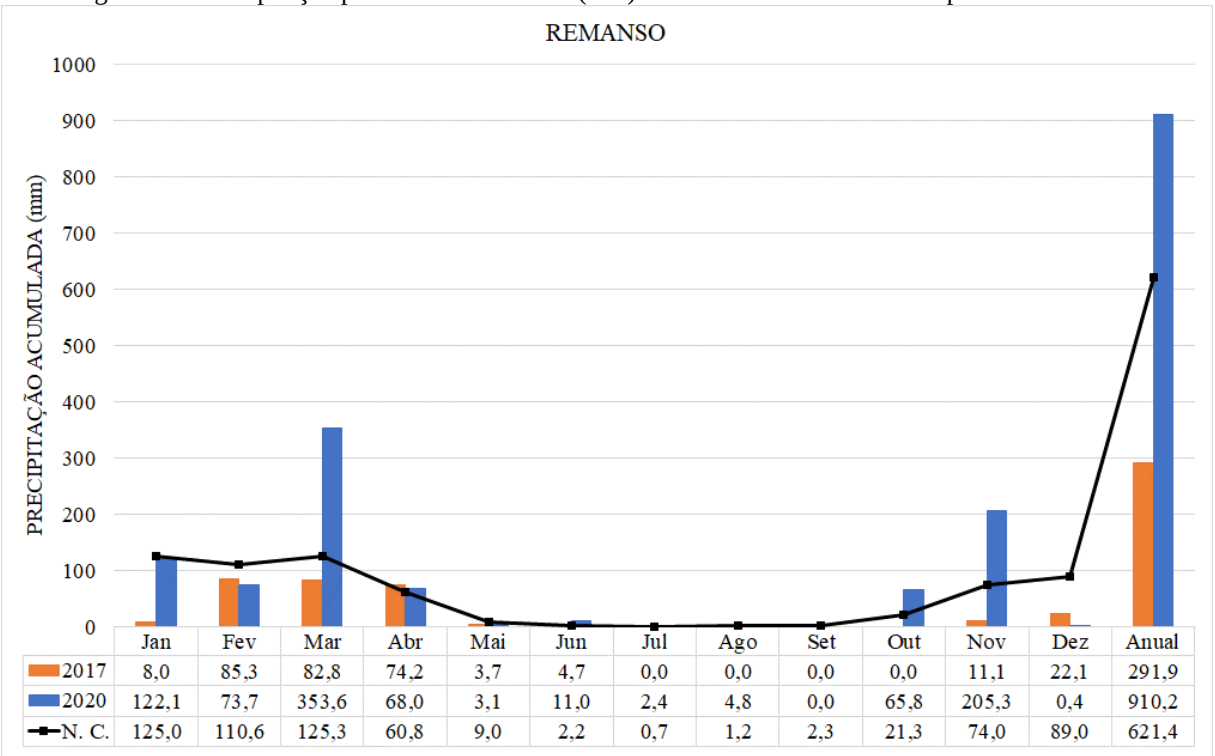
Tabela 3 – Coordenadas geográficas do posto

Posto	Latitude	Longitude	Código
Remanso	-9,649167	-42,078889	942030

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (2021).

O estudo foi executado com base em dados mensais para os anos referentes as imagens do LANDAST-8 utilizadas nesta pesquisa, 2017 e 2020. A Figura 10 detalha a representação gráfica.

Figura 10 – Precipitação pluviométrica mensal (mm) dos anos de 2017 e 2020 no posto de Remanso



	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
2017	8,0	85,3	82,8	74,2	3,7	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	11,1	22,1	291,9
2020	122,1	73,7	353,6	68,0	3,1	11,0	2,4	4,8	0,0	65,8	205,3	0,4	910,2
N. C.	125,0	110,6	125,3	60,8	9,0	2,2	0,7	1,2	2,3	21,3	74,0	89,0	621,4

Fonte: ONS (2021).

Observando a Normal Climatológica (1981-2010) do posto obtida pelo site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), identificamos que o período seco ocorre nos meses de maio a setembro e o período chuvoso vai de novembro a março, com abril e outubro sendo meses de transição entre os períodos.

Constatou-se que os anos de 2017 e 2020 totalizaram 291,9 mm e 910,2 mm, respectivamente. O ano de 2020 teve um aumento de aproximadamente 212% em relação a 2017, apresentando em torno de sete meses do ano com chuvas acima da média, com destaque para o mês de março que choveu 353,6 mm, mais do que o acumulado em todo o ano de 2017.

Em 2017, com exceção dos meses de abril e junho, todos os meses apresentaram chuvas abaixo do esperado. Não houve registro de precipitação entre os meses de julho a outubro. O começo do período úmido foi bastante fraco com poucas chuvas nos primeiros meses de novembro a janeiro, seguido de uma leve melhora entre fevereiro e abril.

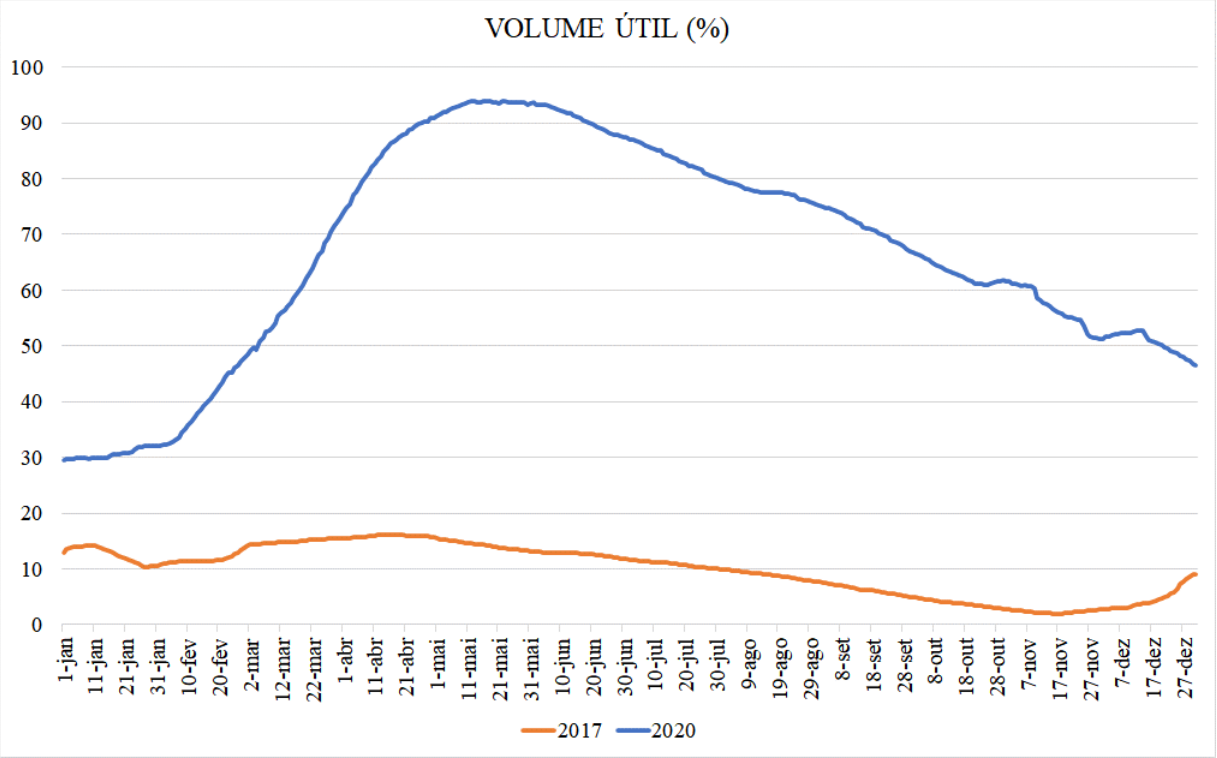
Para uma análise mais detalhada conforme as datas de imageamento que foram 22 de outubro de 2017 e 14 de outubro de 2020, os dados pluviométricos também foram analisados numa escala diária nesse mês. Para 2017, não houve ocorrência de evento chuvoso durante todo o mês de outubro. Em 2020, o maior índice de precipitação no mês analisado ocorreu no dia 27 de outubro, 13 dias após a data da imagem, quantificando cerca de 51,2 mm. Nos dias

anteriores a este evento não houve precipitação significativa para o mês.

3.2.2 Volume útil anual

Os dados de volume útil (VU) do reservatório de Sobradinho obtidos para comparação e análise dos resultados foram coletados do site do ONS, para os anos de 2017 e 2020 (Figura 11).

Figura 11 – Dados de volume útil do reservatório de Sobradinho



Fonte: ONS (2021).

No início do mês de maio de 2020, final do período úmido, o VU ultrapassou 90% da capacidade mostrando que o reservatório conseguiu responder consideravelmente em termos de armazenamento às chuvas acima do esperado ocorridas no período úmido.

O mês de novembro de 2017, final do período seco, apresenta um cenário crítico com o reservatório chegando a beirar o volume morto, sendo reflexo de uma escassez de quatro meses seguidos sem chuva.

3.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Os próximos itens consistem nas etapas do processamento digital das imagens utilizadas para as análises temporais na área de estudo.

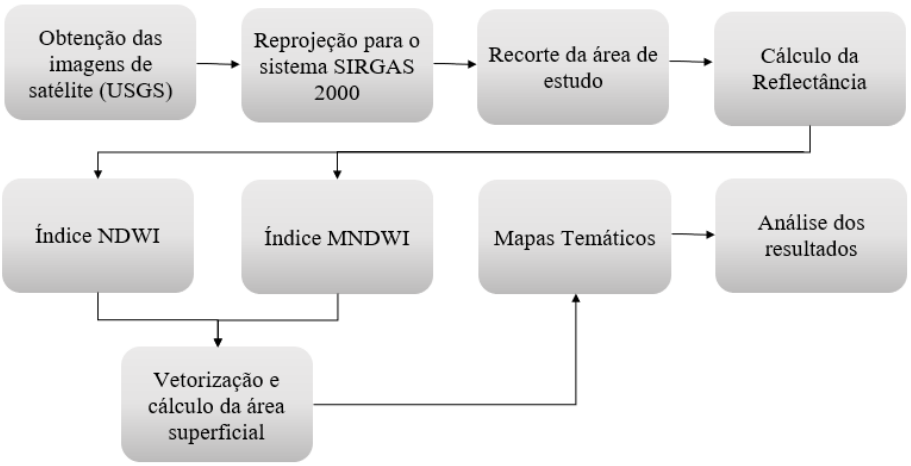
3.3.1 Pré-processamento

A escolha do período para a coleta da imagem foi influenciada por dois fatores: data e cobertura de nuvens. Os anos foram os dois mais recentes que apresentaram cenários extremos de chuva e escassez e o mês do ano deveria ser preferencialmente o mesmo para cada imagem. O mês de outubro foi escolhido por ter cenas que apresentaram menor cobertura de nuvens sobre a área de estudo para os dois anos escolhidos.

Utilizaram-se imagens referentes aos dias 22 de outubro de 2017 e 14 de outubro de 2020, do satélite *Land Remote Sensing Satellite* (LANDSAT-8), sensor *Operational Lander Imager* (OLI), órbita 218 e ponto 067, composta por bandas espectrais adquiridas gratuitamente através do site do *United States Geological Survey* (USGS). As imagens orbitais e os arquivos vetoriais foram reprojetados para o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), UTM fuso 24 Sul.

Após a aquisição das imagens, foi realizado o processamento considerando o recorte da cena de acordo com a área de interesse. Para aquisição dos parâmetros biofísicos NDWI e MNDWI utilizou-se a ferramenta "Calculadora Raster" do software gratuito de livre acesso QGIS versão 2.18.22 – Las Palmas. Na Figura 12, foram descritas as etapas para o processamento digital da imagem e criação dos mapas temáticos contendo o resultado dos parâmetros biofísicos.

Figura 12 – Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: A Autora (2021).

3.3.2 Processamento das imagens

O processamento das imagens do LANDSAT-8 sensor OLI foi executado de acordo com Silva *et al.* (2016), para conversão dos valores em nível de cinza (ND) para reflectância espectral, utilizou-se os coeficientes radiométricos aditivos e multiplicativos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens e informações de características das bandas do sensor que constam na Tabela 2.

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

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

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

onde: $\rho_{\lambda i}$ (adimensional) é a reflectância planetária no topo da atmosfera de cada banda i; Aρi é o fator aditivo de redimensionamento de cada banda (disponível no arquivo metadados da imagem); Mρi é o fator multiplicativo de redimensionamento de cada banda (disponível no arquivo metadados da imagem); NDi é o número digital correspondente a intensidade do pixel de cada banda; Z é o ângulo zenital solar obtido com base no ângulo de elevação do Sol (E) disponível no arquivo metadados da imagem, uma vez que Z = 90 – E.

O cálculo do NDWI se deu conforme o proposto por McFeeters (1996), utilizando a reflectância corrigida e as bandas verde que corresponde a banda 3 (ρ_3) e infravermelho próximo representada pela banda 5 (ρ_5) de acordo com a Equação 3.

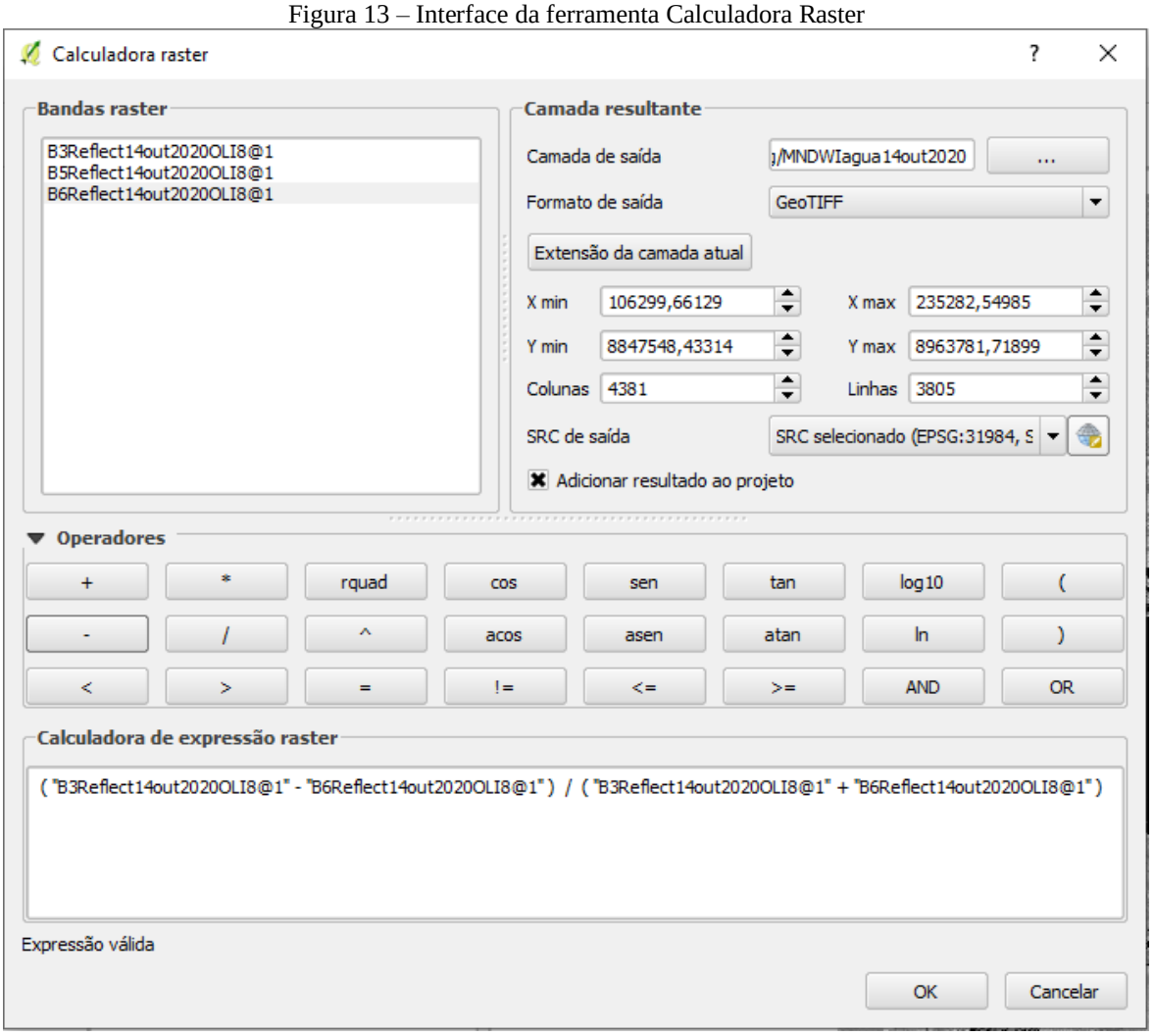
$$NDWI = \frac{\rho_3 - \rho_5}{\rho_3 + \rho_5} \quad (3)$$

Para o cálculo do MNDWI, proposto por Xu (2006), foram utilizadas as bandas verde (ρ_3) e do infravermelho médio que corresponde a banda 6 (ρ_6) em vez de uma banda do infravermelho próximo como acontece no NDWI. O processamento se deu pela Equação 4.

$$MNDWI = \frac{\rho_3 - \rho_6}{\rho_3 + \rho_6} \quad (4)$$

Após a obtenção das imagens do índice, o raster foi transformado em vetor para o cálculo das áreas identificadas nas duas épocas e a variação entre elas. O procedimento consistiu em obter uma imagem binária (recursos hídricos e não-hídricos) através da Calculadora Raster (Figura 13) do QGIS com o MNDWI eliminando todos os pixels com valores maiores que 0 (zero), restando assim apenas o que corresponde ao corpo hídrico. Em seguida, ainda no QGIS o raster binário foi convertido para vetor e a feição principal do rio foi selecionada para se obter o valor da área superficial.

Figura 13 – Interface da ferramenta Calculadora Raster



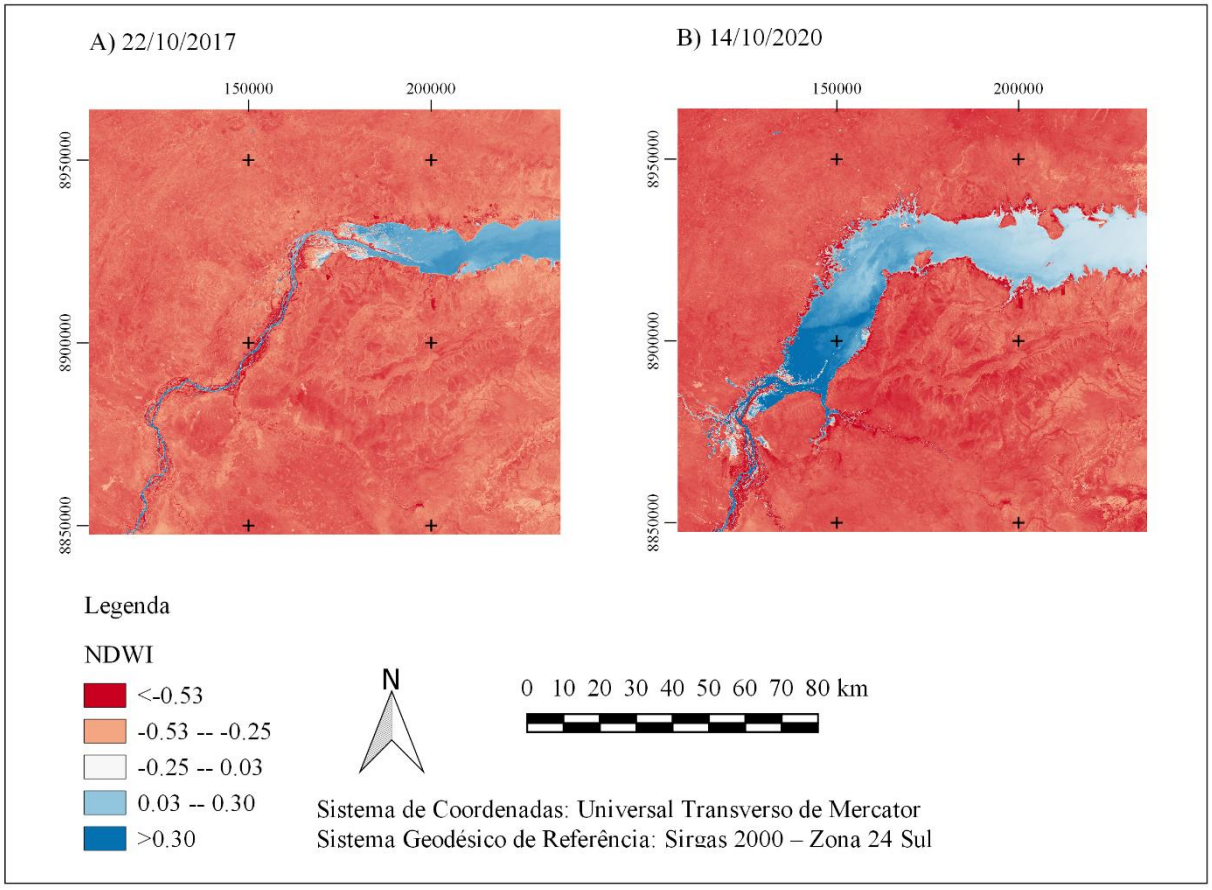
Fonte: A Autora (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item foram discutidos os resultados obtidos com o processamanto dos índices espectrais e a área do espelho d'água do reservatório de Sobradinho.

A Figura 14 detalha a carta georreferenciada da distribuição espacial e temporal do índice NDWI nos anos 2017 e 2020.

Figura 14 – Distribuição espacial e temporal do índice NDWI nos anos 2017 e 2020



Fonte: A Autora (2021).

A presença prioritária de números negativos nos valores médios indica que há maior predominância de regiões que correspondem a um baixo valor de umidade na área de estudo, representado prioritariamente pelos tons avermelhados na Figura 14. Nos estudos de Gonzaga *et al.* (2011) também se destacaram valores prioritariamente negativos, o que valida os resultados desta presente análise.

Os mapas temáticos para o índice NDWI demonstraram que a área de estudo compreende a presença de regiões secas e corpos hídricos. Ferreira *et al.* (2012) investigaram que para valores de NDWI negativos existe uma correspondência com vegetação seca, solo

exposto e áreas urbanas, e valores acima de 0,1 identifica áreas irrigadas com cursos hídricos. Segundo Almeida *et al.* (2018), as regiões com NDWI (> 0,08) foram representadas por áreas com maior presença de água.

Embora o ano de 2020 tenha registrado altos volumes de chuva, a data do imageamento é do mês de outubro, final do período seco, sendo assim, nos meses anteriores a ele não há incidência de chuvas fortes e por isso a vegetação apresenta baixa umidade.

Leivas *et al.* (2013), contribuindo para o monitoramento da seca na Bahia por meio do índice NDWI, apresentaram predominância de valores inferiores a zero (-0,2 a -0,6), indicando condição de baixa umidade na vegetação, comprovando a veracidade nos valores obtidos neste trabalho.

A partir do processamento do índice NDWI para os 2017 e 2020, obtiveram-se os dados estatísticos descritivos (Tabela 4): valores máximos, mínimos, médios e desvios padrões.

Tabela 4 – Dados estatísticos do parâmetro NDWI dos anos 2017 e 2020

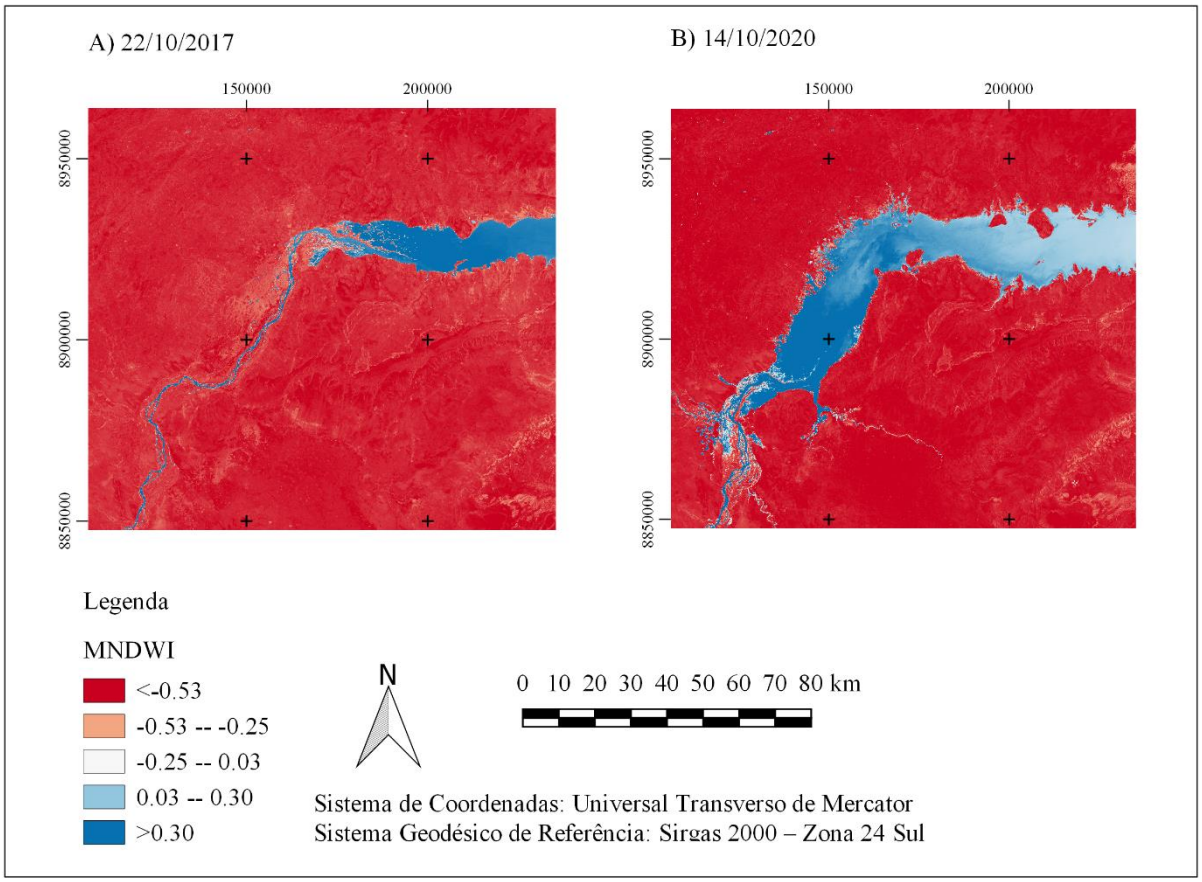
Imagem	**Máximo**	**Média**	**Mínimo**	**Desvio Padrão**
22/10/2017	0,733	-0,306	-0,747	0,157
14/10/2020	0,827	-0,279	-0,701	0,253

Fonte: A Autora (2021).

Conforme a Tabela 4, evidenciou-se que ocorreu um acréscimo nos valores obtidos de NDWI no ano de 2020. Observando os valores de precipitação pluviométrica na região, visualizou-se no posto de Remanso um total anual de 910,2 mm para o ano de 2020 e 291,9 mm para o ano de 2017. O aumento dos valores é causado pelo maior volume de precipitação em 2020, aumentando a área do corpo hídrico e consequentemente diminuindo as áreas secas.

Para o índice MNDWI, na Figura 15 apresenta-se a carta georreferenciada da distribuição espacial e temporal nos anos 2017 e 2020.

Figura 15 – Distribuição espacial e temporal do índice MNDWI nos anos 2017 e 2020



Fonte: A Autora (2021).

A comparação temporal do índice modificado, evidenciou um aumento do valor obtido na zona referente ao corpo hídrico para o ano de 2020, sendo este fato concluído anteriormente como consequência dos eventos chuvosos ocorridos nos anos de estudo.

Nas imagens, observa-se a predominância das cores azul e vermelho com maior intensidade em relação ao NDWI, indicando a melhor identificação das feições. A Tabela 5 expõe os valores estatísticos para comparação com o NDWI. Notou-se que o índice modificado consegue atingir valores máximos maiores que a versão de McFeeters (1996) para o corpos hídricos. Gil *et al.* (2019) constataram que o valores de pixels correspondentes à água atingiram limites mais altos para o MNDWI. Os resultados mostram que o MNDWI produz uma melhor distinção entre as feições água e não água.

Tabela 5 – Dados estatísticos dos parâmetros NDWI e MNDWI dos anos 2017 e 2020

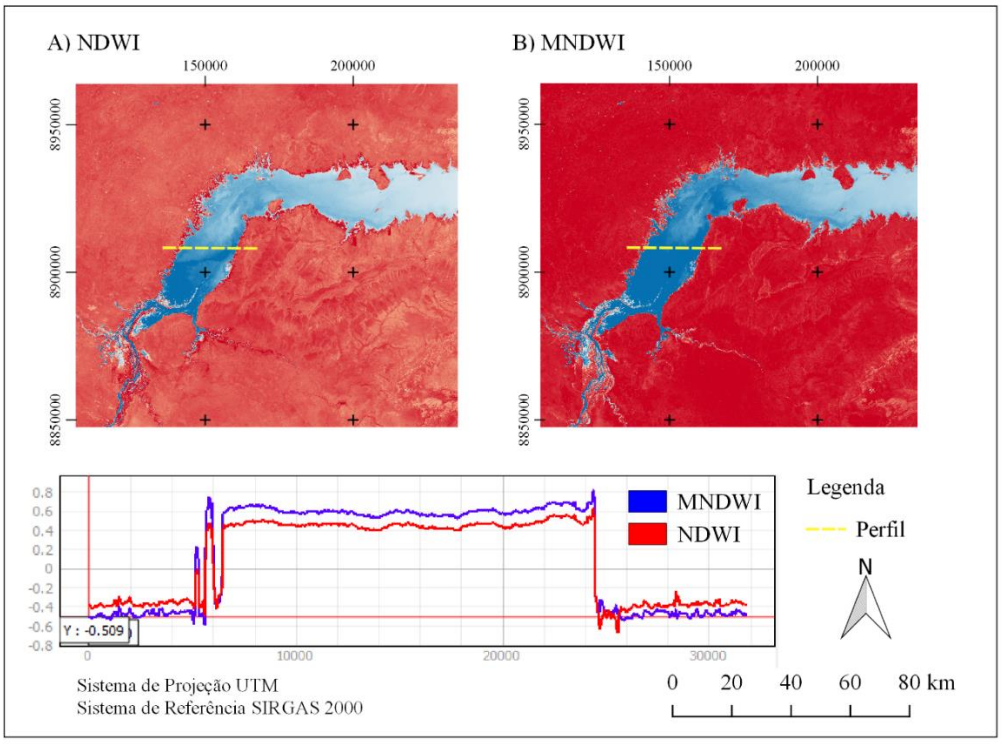
Imagem	Índices	Máximo	Média	Mínimo	Desvio Padrão
22/10/2017	NDWI	0,733	-0,306	-0,747	0,157
	MNDWI	0,883	-0,412	-0,677	0,219
14/10/2020	NDWI	0,827	-0,279	-0,701	0,253
	MNDWI	0,939	-0,358	-0,667	0,341

Fonte: A Autora (2021).

Observou-se um comportamento semelhante ao ocorrido com o NDWI, apresentando em ambos os métodos a tendência de aumento para o ano de 2020, com exceção dos valores médios que ficaram mais negativos quando se compara os dois métodos para o mesmo ano, evidenciando melhor as áreas secas. Nos estudos de identificação de corpos hídricos, Nascimento *et al.* (2019) também encontraram na imagem do NDWI e do MNDWI valores médios negativos.

A Figura 16 detalha o perfil longitudinal do NDWI e MNDWI para o ano de 2020, de modo a destacar a variabilidade no valor do índice na região de estudo e no corpo hídrico identificado.

Figura 16 – Perfil Longitudinal georreferenciado do NDWI e MNDWI no ano de 2020

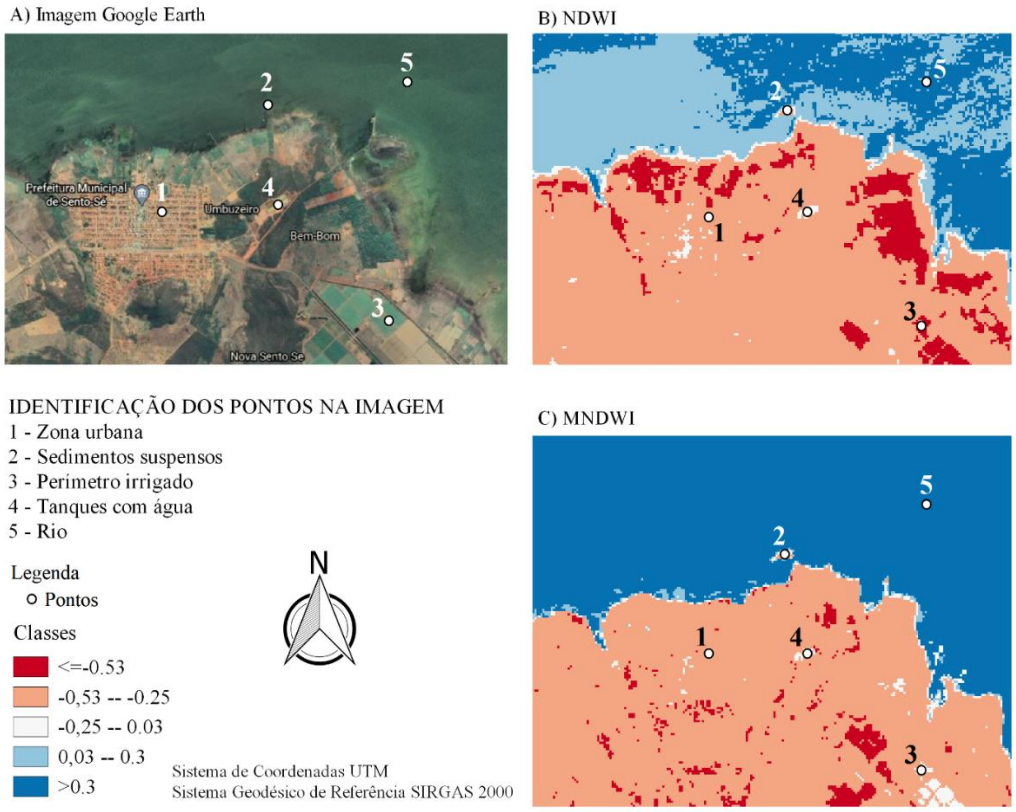


Fonte: A Autora (2021).

Observa-se o destaque maior dos valores dos pixel do MNDWI em relação ao NDWI. O índice MNDWI apresentou valores mais positivos nas regiões onde há presença de corpos hídricos, e mais negativos nas regiões onde não foi detectada a presença de água, compatível com os resultados obtidos por Xu (2006). Nascimento *et al.* (2019), estudando o perfil longitudinal do rio Pajeú, constataram valores de máximo do MNDWI mais positivo em relação ao NDWI e valor de mínimo mais negativo, isto deve-se ao fato do MNDWI se destacar pela resposta espectral dos alvos na banda do infravermelho médio.

Para uma análise mais detalhada dos parâmetros, foram escolhidos cinco pontos amostrais dentro de um recorte da área de estudo e coletados valores de refletância para cada ponto de acordo com o método do índice utilizado para comparar os valores atribuídos a cada pixel. Os elementos escolhidos foram identificados como zona urbana (P1), sedimentos suspensos (P2), perímetro irrigado (P3), tanques com água (P4) e rio (P5). A Figura 17 apresenta os pontos onde os dados foram coletados identificando os elementos por meio da imagem do Google Earth (2021) e comparando visualmente com as imagens geradas para o NDWI e MNDWI. A imagem processada escolhida foi a de 2020 por ser a data mais próxima à do Google Earth.

Figura 17 – Localização dos pontos amostrais nas imagens do Google Earth, NDWI e MNDWI de 2020



Fonte: A Autora (2021).

A Tabela 6, mostra os pontos classificados de acordo com a categorização das classes dos índices estudados.

Tabela 6 – Valores de refletância para cada ponto de acordo com a metodologia aplicada para o índice

PONTOS	Classes	Reflectância NDWI	Reflectância MNDWI
P1 (Zona urbana)	<= -0,53	P3 (-0,542)	-
P2 (Sedimentos Suspensos)	-0,53 -- -0,25	P1 (-0,376) P2 (-0,291)	P1 (-0,476) P2 (-0,405)
P3 (Perímetro irrigado)	-0,25 – 0,03	P4 (-0,137)	P3 (-0,225)
P4 (Tanques com água)	0,03 – 0,3	-	P4 (0,160)
P5 (Rio)	>0,3	P5 (0,311)	P5 (0,416)

Fonte: A Autora (2021).

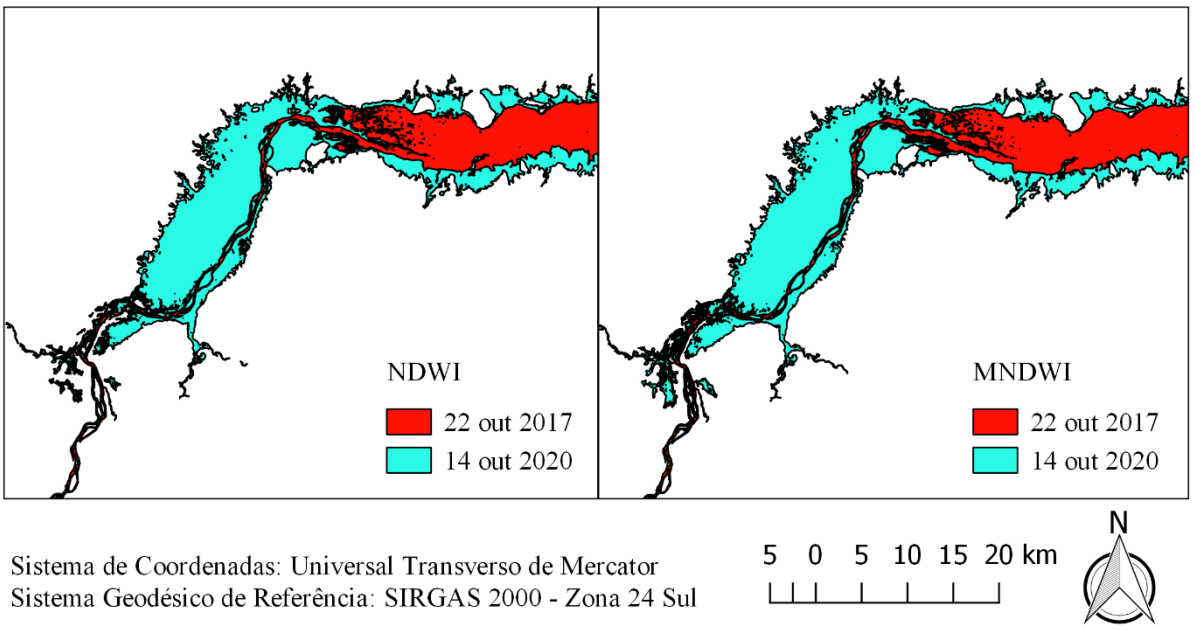
Nota-se que o MNDWI consegue identificar melhor as feições com água (pontos quatro e cinco), já o NDWI subestima esses valores e no caso dos tanques com água que possuem área menor de corpo hídrico ele não consegue fazer essa distinção resultando em um não delineamento preciso. Sendo assim, o índice modificado se torna mais eficiente para delimitação de superfícies aquáticas, enfatizando melhor as bordas do recurso hídrico. Em relação às áreas irrigáveis (pontos três), a vegetação pertencente a essas áreas possui bom teor de água na estrutura interna e consegue ser melhor identificada pelo MNDWI, entretanto existem métodos mais satisfatórios na literatura voltados para a identificação dessas áreas.

Ao aplicar a metodologia de geração dos valores para o índice NDWI observou-se que a classes mais negativas prevalecem em relação ao número de pontos, observa-se uma homogeneidade de cores (cor vermelha), não permitindo a identificação precisa das áreas territoriais irrigáveis. Apenas o ponto cinco possui altos valores de refletância, devido ao ponto amostral analisado estar no rio, destacando assim o corpo d'água.

Os resultados de NDWI e MNDWI gerados, que são produtos em formato raster, foram transformados em arquivos vetoriais, possibilitando a quantificação das áreas do espelho d’água do reservatório de Sobradinho para os anos estudados e a variação entre eles. De acordo com Ali *et al.* (2019), MNDWI e NDWI são os métodos mais precisos para detectar, medir e monitorar os corpos d'água superficiais urbanos porque eles podem se aglomerar em duas classes compostas por áreas com água e sem água. A Figura 16 apresenta

a vetorização para as áreas com água nos cenários estudados mostrando a variação espacial e temporal do reservatório.

Figura 18 – Cenários para quantificação do espelho d'água



Fonte: A Autora (2021).

A Tabela 7 mostra a diferença em valores para as áreas de espelho d'água entre os dois índices.

Tabela 7 – Comparação entre as áreas superficiais para o NDWI e MNDWI

Imagem	**NDWI (Ha)**	**MNDWI (Ha)**
22/10/2017	66.549	68.308
14/10/2020	197.282	205.422

Fonte: A Autora (2021).

Os resultados confirmam que o MNDWI se mostra mais eficaz que a versão original apresentando maiores valores para as áreas devido a sua melhor delimitação dos corpos hídricos. Ali *et al.* (2019) analisando corpos d'água superficiais urbanos em distritos da Indonésia, também constataram que o método desenvolvido por Xu (2006) obteve melhor desempenho na quantificação dos corpos hídricos que o de McFeeters (1996), corroborando com os resultados encontrados.

Diante dos números da Tabela 7, observou-se um expressivo acréscimo de área da lâmina d'água do reservatório entre os anos selecionados para a presente pesquisa. É notável o

contraste entre as áreas do espelho d’água em outubro de 2017 e 2020, apresentando aproximadamente 68.308 ha e 205.422 ha, respectivamente para o melhor índice. De forma estimada da vetorização realizada pelo software QGIS, houve um aumento expressivo de cerca de 200% na área da lâmina d’água do reservatório entre as datas estudadas. Comparando com os dados de precipitação e volume útil do reservatório, este incremento da água pode ser comprovado.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo apresentou-se a análise e o mapeamento dos índices espectrais NDWI e MNDWI para a quantificação do espelho d'água do reservatório de Sobradinho na Bahia, nos períodos de 2017 e 2020, utilizando imagens do satélite LANDSAT-8.

Os índices espectrais mostraram-se satisfatórios para a detecção de superfícies hídricas. Entretanto, o MNDWI apresentou resultados melhores que o NDWI no que tange à delimitação das superfícies aquáticas possibilitando o melhor delineamento da lâmina d'água e proporcionando uma melhor estimativa para o cálculo da área superficial.

A análise do espelho d'água entre os anos de 2017 e 2020 constatou a variação positiva da área ocupada pelo corpo hídrico no reservatório de Sobradinho. O NDWI apresentou aumento de cerca de 196% da área em 2020, indo de 66.549 ha para 197.282 ha. Já o MNDWI apresentou aumento de cerca de 200% da área em 2020, indo de 68.308 ha para 205.422 ha. Este fato é explicado pelo aumento de precipitação pluviométrica e do volume útil no ano de 2020 possibilitando a mudança no cenário do corpo hídrico.

A metodologia estudada se mostrou de baixo custo e eficiente na detecção de variação de massa d'água em reservatórios, podendo ser replicada para a atualização de espelhos d'água de outros corpos hídricos.

O uso do sensoriamento remoto se mostra de grande valia para o monitoramento espaço-temporal de reservatórios de grande porte e importância para atividades antrópicas como Sobradinho. Conclui-se que os resultados obtidos do mapeamento constataram a eficácia das técnicas de SR por sua rapidez, praticidade e aplicabilidade para áreas de diferentes dimensões visando auxiliar na tomada de decisões para gestão e planejamento do uso do recurso hídrico.

REFERÊNCIAS

ALI, M. I.; DIRAWAN, G.D.; HASIM, A.H.; ABIDIN, M.R. Detection of changes in surface water bodies urban area with NDWI and MNDWI methods, 2019. **International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology**, v. 9, n. 3, p. 946-951, jun. 2019.

ALMEIDA, D. N. O. **Mapeamento temático dos parâmetros físicos a partir de sensoriamento remoto em bacia hidrográfica.** 2018. TCC (Bacharelado em Engenharia Cartográfica e Agrimensura) – Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

ALMEIDA, D. N. O.; OLIVEIRA, L. M. M.; CANDEIAS, A. L. B.; NASCIMENTO, E. F.; LEITE, A. C. S. Sensoriamento remoto do ambiente hídrico: índice de umidade (NDWI) no açude poço da cruz – PE. *In*: MEIO AMBIENTE EM FOCO, 9., 2018. Recife. **Resumos** […]. Recife: MAF. 2018.

ALMEIDA, D. N. O.; SANTOS, M. B.; SOUZA, A. M. P.; BARROS, J. P. M.; OLIVEIRA, L. M. M. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) aplicado no mapeamento de corpo hídrico e vegetação. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 15., 2020. Caruaru. **Anais** […]. Caruaru: ABRHIDRO, 2020. p. 1-10.

ANDRADE, A. B. S. **Utilização dos índices NDWI e MNDWI na detecção de corpos hídricos em imagens Sentinel-2 na bacia hidrográfica do rio Traipu – Alagoas**. 2019. TCC (Bacharelado em Engenharia de Agrimensura) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2019.

ARAÚJO, F.E.; ANJOS, R.D.; CANDEIAS, A.L.B.; FILHO, G.B.R. Levantamento de áreas verdes no campus da UFPE com uso de geoprocessamento. 2015. *In:* WORKSHOP DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **Anais** [...]. Recife, 2015.

BACALHAU, J. R; NETO, A. R; OLIVEIRA, L. M. M. Aplicação de índice de vegetação no monitoramento da seca: açude Algodões no Sertão de Pernambuco. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 283-293, 2017.

CBHSF. **A Bacia.** Disponível em: https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/. Acesso em: 15 dez. 20.

CHESF. **Descrição do Aproveitamento de Sobradinho.** Disponível em: https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Sobradinho.aspx. Acesso em: 25 set. 2020.

CODEVASF. **Propostas e respostas em inteligência, gestão e monitoramento territorial - desenvolver a agricultura ou os agricultores na bacia do Rio São Francisco -** Palestra 4.1 - Evaristo Eduardo de Miranda. Disponível em: https://www.codevasf.gov.br/acesso-a-informacao/participacao-social/eventos/seminario-solo-e-agua-no-contexto-de-desenvolvimento-em-bacias-hidrograficas/ii-ssa/programacao-1/Palestra4.1PropostaseRespostasemInteligenciaGestoeMonitoramentoTerritorialDesenvolveraAgriculturaouosAgricultoresnabaciadoRioSoFranciscoEvaristoEduardodeMiranda.pdf/view. Acesso em: 1 mai. 2021.

COELHO, A.L.N.; CORREA, W.S.C. Temperatura de superfície Celsius do sensor TIRS/LANDSAT-8: metodologia e aplicações, 2013. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, n.1 (xii.), p. 31-45. 2013.

CONCEIÇÃO, L. A. B. S. **Diagnóstico ambiental através do uso de técnicas de sensoriamento remoto como apoio para o planejamento de unidades administrativas: o caso de Osório, RS.** 2004. Dissertação, (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CORREIA, M. F.; DIAS, M. A. F. S. Variação do nível do reservatório de Sobradinho e seu impacto sobre o clima da região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.1, p. 157–168, 2003.

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

FARIAS, M. O.; CANDEIAS, A. L. B.; OLIVEIRA, L. M. M.; ALMEIDA, D. N. O., TAVARES JUNIOR, J. R., 2017. Variabilidade espaço-temporal da cobertura do solo por índices de vegetação e água no agreste Pernambucano. **Revista Brasileira de Agrotecnologia** v. 7, n. 3, 91-99.

FERREIRA, J. M. S.; FERREIRA, H. dos S.; SILVA, H. A. da; SANTOS, A. M. dos; GALVÍNCIO, J. D. Análise Espaço-Temporal da Dinâmica da Vegetação da Caatinga no Município de Petrolina- PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 4, p. 904-922, 2012.

GIL, A.P. *et al.* Comparação entre NDWI e MNDWI para o mapeamento de áreas inundadas no pantanal do Taquari. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais** […] São José dos Campos: Galoá, 2019. Disponível em: https:// www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1110126/1/galoaproceedingsSBSR20 1996525COMPARACAOENTRENDWIEMNDWI.pdf. Acesso em: 15 dez. 20.

GONZAGA, E.P.; SANTOS, V.V.; NICÁCIO, R.M. Análise do comportamento do NDVI e NDWI em períodos de diferentes intensidades pluviométricas no Sertão alagoano. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011. **Anais** […] São Paulo: INPE, 2011. p.1736-1743.

GORDON, L.J.; STEFFEN, W.; JÖNSSON, B.F.; FOLKE, C.; FALKENMARK, M.; JOHANNESEN, Å. Human modification of global water vapor flows from the land surface, 2005. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,** v. 102, n. 21, p. 7612-7617.

PROJETO Lago de Sobradinho: histórico. 2020. Disponível em: http:// projetolagodesobradinho.blogspot.com/p/historico.html. Acesso em: 9 abr. 2021.

INMET. **Normais climatológicas.** Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/normais. Acesso em: 16 abr. 2021.

INPE. **LANDSAT.** Disponível em: http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/landsat. Acesso em: 15 dez. 20.

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

KNUST, S. S. A. **Avaliação das imagens RADARSAT-1 sob diferentes geometrias de observação em aplicação geológica no Vale do Rio Curuçá (Bahia).** 2007. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

LEITE, A. C. S.; OLIVEIRA, L. M. M; BEZERRA, U. A.; ALMEIDA, D. N. O.; CANDEIAS, A. L. B.; TAVARES JUNIOR, J. R. Comparison of methods of Humidity Index processing in the Irrigated Perimeter Nilo Coelho, Northeast of Brazil. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.7, n.6, p. 315-323, 2017.

LAMAS, B.V. **Modelo hidrodinâmico computacional do reservatório de Sobradinho**. 2018. TCC (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICENTE, L. E.; TORRESAN, F. E.; VICTORIA, D. C.; BOLFE, E. L. Monitoramento da seca de 2011/12 a partir do NDWI e NDVI padronizado do SPOT-Vegetation. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais** […]. São José dos Campos: INPE, 2013. p.364-370.

LEONARDO, H. R. A. L.; OLIVEIRA, L.M.M.; OLIVEIRA, E. F.; ALMEIDA, D.N.O.; PAIVA, A.L.R. Geotecnologia na análise do comportamento espectral dos recursos naturais no Semiárido pernambucano. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, n. 4, p. 191-203. 2019.

LOPES, J.E.G.; SANTOS, R.C.P. **Capacidade de reservatórios.** São Paulo: Escola Politécnica, 2002.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing,** v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MELO, C. R. **Análise do eixo leste da transposição do Rio São Francisco face aos cenários de uso previstos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T.(org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** Brasília: Universidade de Brasília, 2012.

MORAES, R. M. **Processamento de imagens de sensoriamento remoto.** João Pessoa: UFPB, 1999. Disponível em: http://www.de.ufpb.br/~ronei/procimagem/. Acesso em: 02 abr 2021.

NASCIMENTO, E.F. *et al.* Comparação de índices de água na identificação de corpo hídrico

por sensoriamento remoto. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais** […]. São José dos Campos: INPE, 2019. p. 2686-2689.

NASCIMENTO, E. F.; OLIVEIRA. L. M. M.; BEZERRA, U. A.; ALMEIDA, D. M. O.; E. F.; AZEVEDO, L. S. Variabilidade temporal do espelho d'água do reservatório Entremontes - Pernambuco utilizando sensoriamento remoto. *In:* MEIO AMBIENTE EM FOCO, 9., 2018, Recife. **Resumos** […]. Recife: MAF, 2018.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto – princípios e aplicações.** São Paulo: Edgard Blucher, 1989.

OLIVEIRA, C. G. B. **Análise espaço-temporal da vulnerabilidade às mudanças climáticas da bacia hidrográfica do Rio Moxotó – PE, utilizando o sensoriamento remoto**. 2018. TCC (Bacharelado em Tecnologia em Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2018.

OLIVEIRA, J.S.S. **Índices de vegetação (NDVI, IVAS, IAF, NDWI) como subsídio à gestão do uso e ocupação do solo na zona de amortecimento da reserva biológica de Saltinho, Pernambuco.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

ONS. **O sistema interligado nacional.** Disponível em: http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin. Acesso em: 25 set. 2020.

ONS. **Dados hidrológicos/volumes.** Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas /resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados_hidrologicos_volumes.aspx. Acesso em: 16 abr. 2021.

PENA, R.F.A. **Sensoriamento remoto.** Disponível em: https://brasilescola. uol.com.br/geografia/sensoriamento-remoto.htm. Acesso em: 3 abr. 2021.

SILVA, A. M. **Princípios básicos de hidrologia**. Lavras, MG: Univeridade Federal de Lavras, 1995.

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 Ciência Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 3-8, 2016.

SILVA, B.C.; CLARKE, R.T. Análise estatística de chuvas intensas na bacia do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 3, p.265-272, 2004. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31602095/11-2003-bcs-final.pdf. Acesso em: 04 nov. 2020.

SILVA, C. A. V.; SILVA, H. A.; OLIVEIRA, T. H.; GALVINCIO, J. D**.** Uso do Sensoriamento Remoto através de Índices de Vegetação NDVI, SAVI e IAF na microrregião de Itamaracá – PE. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO,14., 2009, Natal. **Anais** […] São José dos Campos; INPE, 2009. p. 3079-3085.

SNIRH. **Rede Hidrometeorológica Nacional.** Disponível em: https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=e1abba60063d4c13a5594c5c8b4cba51. Acesso em: 15 abr. 2021.

SUASUNA, J. Represa de Sobradinho: um reservatório estratégico e desconhecido. **Repórter Brasil,** 2008. Disponível em: https://reporterbrasil.org.br/2008/05/represa-de-sobradinho-um-reservatorio-estrategico-e-desconhecido/. Acesso em: 16 abr. 2021.

USGS. **Catálogo USGS.** Disponível em: https://earthexplorer.usgs.gov/ Acesso em: 11 mar. 2021.

USGS. **Landsat 8**. Disponível em: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con. Acesso em: 3 abr. 2021.

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