



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS
DA GEOINFORMAÇÃO

DEBORA NATÁLIA OLIVEIRA DE ALMEIDA

**GEOTECNOLOGIA COMO FERRAMENTA PARA DELIMITAÇÃO DE CORPOS
HÍDRICOS NO SEMIÁRIDO DO BRASIL**

Recife

2021

DEBORA NATÁLIA OLIVEIRA DE ALMEIDA

**GEOTECNOLOGIA COMO FERRAMENTA PARA DELIMITAÇÃO DE CORPOS
HÍDRICOS NO SEMIÁRIDO DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Área de concentração: Geociências

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

Recife

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

- A498g Almeida, Débora Natália Oliveira de.
Geotecnologia como ferramenta para delimitação de corpos hídricos no semiárido do Brasil / Débora Natália Oliveira de Almeida.
72 f.; il.
- Orientadora: Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e tecnologias da Geoinformação, Recife, 2021.
Inclui referências.
1. Ciências Geodésicas. 2. Geoprocessamento. 3. Recursos hídricos. 4. Sensoriamento remoto. I. Oliveira, Leidjane Maria Maciel de (Orientadora). II. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022 - 127

DEBORA NATÁLIA OLIVEIRA DE ALMEIDA

**GEOTECNOLOGIA COMO FERRAMENTA PARA DELIMITAÇÃO DE CORPOS
HÍDRICOS NO SEMIÁRIDO DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Aprovada em: 24 de fevereiro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a. Sylvana Melo dos Santos
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Diego Cezar dos Santos Araújo
Pós- Doutorando em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Deus, pelas oportunidades e conquistas em todas as áreas que têm proporcionado em minha vida.

Aos meus pais Cida e Gerson pelo amor demonstrado através da dedicação, educação, apoio e palavras de perseverança. Ao meu irmão Jefferson e cunhada Rauanny e aos demais familiares pela torcida que sempre tiveram por mim durante minha jornada.

A minha orientadora Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira, pelo amor demonstrado durante todo período do PIBIC em 2016 até agora, pela confiança, orientação, paciência e principalmente pelo conhecimento e carinho transmitidos durante esta etapa da minha vida. Tornou-se a querida amiga que sempre esteve torcendo por mim e dando oportunidades de agregar mais conhecimento, ciência, trabalho em equipe e amor ao próximo.

Aos meus professores da Pós-Graduação em Ciência Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação que contribuíram para minha formação acadêmica.

Aos professores que participaram da banca examinadora que desde a Defesa do Projeto até a Defesa Final contribuíram para a melhoria deste trabalho.

As minhas amigas Carla Barbosa, Mirelly Farias e Cláudia Oliveira pela ajuda durante a jornada na UFPE. Aos meus queridos amigos que intercedem por mim através de orações, apoio e carinho.

RESUMO

Com a necessidade de monitoramento e análises dos recursos hídricos, as técnicas de Sensoriamento Remoto são de fundamental importância para investigar as alterações ocorridas ao longo dos anos a fim de contribuir nas tomadas de decisões para melhor gestão ambiental e hídrica nas esferas: municipal, estadual e federal. Neste contexto, o presente trabalho tem como finalidade avaliar a distribuição espacial do reservatório Poço da Cruz, pertencente a bacia hidrográfica do rio Moxotó, situado no município de Ibimirim-PE. Neste estudo foram processados os índices espectrais de água: o *Normalized Difference Water Index- (NDWI)*, o Índice de Água por Diferença Normalizada, proposto por McFeeters (1996) e o *Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)*, o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado, desenvolvido por XU (2006), com a utilização de imagens de satélite Landsat 8 sensor OLI e Sentinel-2 sensor MSI. Utilizou-se o software QGIS 2.18.16 para todas as etapas de processamento digital de imagens, conexão com bancos de dados complementares para elaboração dos mapas temáticos e o processo de análise dos dados. A estrutura da presente dissertação seguiu o modelo de artigo, com os seguintes trabalhos: a) Geotecnologia como ferramenta para extração de máscara de água a partir de imagens do Sentinel-2 no semiárido do Brasil; b) Delimitação de áreas hídricas na região semiárida no período 2015-2020 a partir de geoprocessamento. Os resultados evidenciaram que o MNDWI contemplou valores mais satisfatório que o NDWI, tanto para imagens do OLI/Landsat-8 como para o Sentinel-2, denotando melhor representação de pixels detectados com a representação de água, pois segundo o estudo o NDWI expressa algumas inconsistências, como exemplo, mistura espectral que permite superestimar os valores encontrados. As análises realizadas contribuem para melhor interpretação acerca da distribuição espaço-temporal da área superficial do reservatório.

Palavras-chave: Geoprocessamento. Recursos hídricos. Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

In view of the need for monitoring and analysis of water resources, Remote Sensing techniques are of fundamental importance to investigate changes that have occurred over the years in order to contribute to decision making for better environmental and water management in the spheres: municipal, state and federal. In this context, the present work aims to evaluate the spatial distribution of the Poço da Cruz reservoir, belonging to the hydrographic basin of the Moxotó river, located in the municipality of Ibimirim-PE. In this study, the spectral water indices were processed: the Normalized Difference Water Index- (NDWI), the Water Index for Normalized Difference, proposed by McFeeters (1996) and the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), the Water Index for Modified Normalized Difference, developed by XU (2006), using Landsat 8 satellite images OLI sensor and Sentinel-2 MSI sensor. The QGIS 2.18.16 software was used for all stages of digital image processing, connection with complementary databases for the preparation of thematic maps and the data analysis process. The structure of this dissertation followed the article model, with the following works: a) Geotechnology as a tool for extracting water masks from Sentinel-2 images in the semiarid region of Brazil; b) Delimitation of water areas in the semiarid region in the period 2015-2020 based on geoprocessing. The results showed that the MNDWI contemplated more satisfactory values than the NDWI, both for images from OLI / Landsat-8 and Sentinel-2, showing a better representation of pixels detected with the representation of water, because according to the study, NDWI expresses some inconsistencies, as an example, spectral mixture that allows overestimating the values found. The analyzes performed contribute to a better interpretation of the spatio-temporal distribution of the reservoir's surface area.

Keywords: Geoprocessing. Water resources. Remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Biomass brasileiros com destaque na Região Semiárida e incidência de seca.....	12
Figura 2 –	Volume equivalente (%) do reservatório Poço da Cruz-PE.....	14
Figura 3 –	Satélite Landsat 8.....	16
Figura 4 –	Satélite Sentinel-2.....	18
Figura 5 –	Localização da área de estudo.....	21
Figura 6 –	Fluxograma do procedimento metodológico.....	22

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	OBJETIVOS	10
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos.....	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO SEMIÁRIDA.....	12
2.2	RESERVATÓRIOS NA REGIÃO SEMIÁRIDA.....	13
2.3	SENSORIAMENTO REMOTO.....	14
2.3.1	Satélite Landsat-8.....	15
2.3.2	Satélite Sentinel-2.....	17
2.3.3	Imagens CHIRPS.....	19
2.4	TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA CORPOS HÍDRICOS..	20
3	METODOLOGIA	21
3.1	ÁREA DE ESTUDO	21
3.2	DADOS DE PRECIPITAÇÃO.....	22
3.3	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM.....	23
4	RESULTADOS	26
4.1	ARTIGO 1 – GEOTECNOLOGIA COMO FERRAMENTA PARA DELIMITAÇÃO DE CORPOS HÍDRICOS A PARTIR DE IMAGENS DO SENTINEL-2 NO SEMIÁRIDO DO BRASIL.....	26
4.2	ARTIGO 2 – DELIMITAÇÃO DE ÁREAS HÍDRICAS NO PERÍODO 2015- 2020 UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO NA REGIÃO SEMIÁRIDA.....	45
5	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

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, causa esvaziamento de açudes e viabilidade do processo de salinização (MELO, 2011). Com o crescimento de atividades humanas e avanços tecnológicos, há uma tendência para o aumento dos consumos de água. Desta maneira, é necessária permanecer a disponibilidade de água em qualidade e quantidades adequadas, com condições para produção agrícola, abastecimento humano e geração de energia (BISWAS, 2008).

Na região semiárida, maior parte do volume de água superficial está armazenado em açudes ou reservatórios. O monitoramento desses reservatórios é essencial para a gestão da água na região. Uma das características do Semiárido é a deficiência de retenção de água no solo, de pouca profundidade, assim como o clima, caracterizado por alta evaporação, baixa precipitação média, alta variabilidade interanual da precipitação e concentração das chuvas em curtos períodos (TOLEDO; ARAÚJO; ALMEIDA, 2014; COSTA, 2019).

Dentre os reservatórios existentes no território pernambucano, a área de estudo compreende o maior reservatório de Pernambuco, denominado Engenheiro Francisco Saboia, conhecido comumente como Açude Poço da Cruz que traz como relevância o abastecimento humano e irrigação na região. O açude público Engenheiro Francisco Saboia, também é a principal fonte hídrica para a irrigação do Perímetro Irrigado Moxotó-PIMOX. Ele está inserido como um dos reservatórios contemplados no Projeto de Integração do Rio São Francisco (ANA, 2018).

Em regiões como o Semiárido Nordeste, o uso de imagens de satélites tornou-se uma das principais ferramentas para análise e estudos avançados sobre a configuração da superfície terrestre, os quais são pertinentes para a detecção e monitoramento de mudanças, proporcionando uma melhor avaliação, manejo e gerenciamento dos recursos naturais, como o solo, vegetação e corpos hídricos. Com isso, é possível pontuar as principais causas de degradação dos recursos naturais, que, em sua maioria, são ocasionados por ações antrópicas, tais como: queimadas, desmatamento, uso e ocupação do solo, atividades agrícolas e de pecuária; trazendo assim, impactos diretos às bacias hidrográficas, que sofrem com secas periódicas (FERREIRA JÚNIOR & DANTAS, 2018).

No contexto hídrico, diversas pesquisas apontam que para o mapeamento de corpos hídricos, vários métodos foram desenvolvidos tendo como base imagens multiespectrais (DU *et al.*, 2016). Dentre os métodos mais utilizados, Jiang *et al.* (2014) evidenciaram os classificadores supervisionados, não supervisionados e os índices espectrais de água. Os índices espectrais de água têm sido amplamente aplicados devido à precisão na detecção de corpos hídricos a baixo custo computacional (JIANG *et al.*, 2014; DU *et al.*, 2016; PENHA *et al.*, 2017).

Dentre diversos índices espectrais capazes de detecção de água, tem-se o Índice de Água por Diferença Normalizada – NDWI (do inglês, *Normalized Difference Water Index*), proposto por McFeeters (1996), onde são aplicadas as bandas do verde e do infravermelho próximo, permitindo detectar remotamente o delineamento de corpos hídricos na paisagem georreferenciada. A delimitação e o monitoramento de corpos hídricos são aplicações fundamentais presentes no sensoriamento remoto McFeeters (1996), uma vez que as informações extraídas pelo índice podem subsidiar a avaliação e a análise de recursos hídricos, incluindo inventários e mapeamentos de áreas úmidas e enchentes, dando suporte assim ao gerenciamento de águas superficiais (ROKNI *et al.*, 2014).

Outro índice espectral de água que vem contribuindo em pesquisas acadêmicas é o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado - MNDWI (do inglês, *Modified Normalized Difference Water Index*), desenvolvido por Xu (2006), que utiliza as bandas do verde e do infravermelho médio (MIR). De acordo com Xu (2006), o cálculo do MNDWI permite constatar que a água terá maiores valores positivos do que no NDWI, uma vez que absorve mais luz MIR do que a luz NIR. Como também denotar que as áreas construídas terão valores negativos, e ressaltar que o solo e a vegetação ainda terão valores negativos, uma vez que o solo reflete a luz MIR mais do que a luz NIR e, a vegetação reflete a luz MIR ainda mais que a luz verde.

Assim, o objetivo geral e os específicos a serem desenvolvidos para a análise da distribuição espaço e temporal da área superficial da água do reservatório Poço da Cruz foram definidos na seção a seguir.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção foram apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto é avaliar a distribuição espacial de índices espectrais de água no reservatório Poço da Cruz, pertencente a bacia hidrográfica do rio Moxotó, situado no município de Ibimirim-PE, a partir dos índices espectrais de água: NDWI e MNDWI em diferentes sensores.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a distribuição espacial e temporal dos índices espectral de água através de imagens multiespectrais em diferentes anos para investigação das alterações ocorridas na área superficial do reservatório Poço da Cruz;
- Comparar as potencialidades dos índices NDWI e MNDWI definidos pelos sensores do Sentinel-2 e Landsat-8.
- Mapear e as alterações ocorridas entre os anos de estudo a fim de obter dados quantitativos das variações.

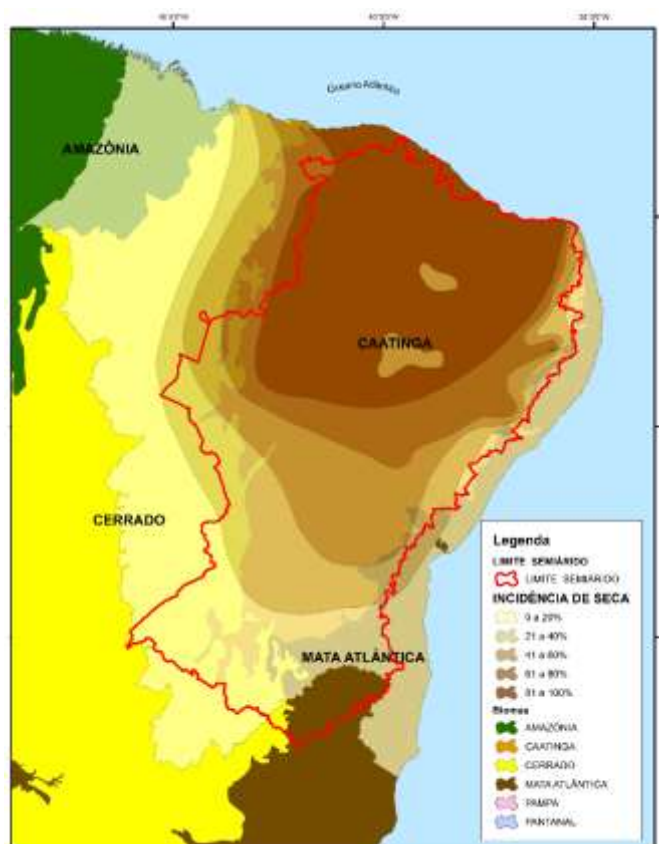
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será realizada uma revisão de literatura que descreve as características básicas da região afetada pelo fenômeno da seca, a alternativa de implantação de açudes, adotada para enfrentar a problemática, a definição de Sensoriamento Remoto e as características básicas dos satélites utilizados no estudo e o uso de imagens orbitais para estimar área superficial de reservatórios para gestão dos recursos hídricos.

2.1 CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO SEMIÁRIDA

A Região Semiárida compreende 877.565.831 dos 969.589,4 km² do Polígono da Seca, delimitada de acordo com a Lei N° 175, de 5 de janeiro de 1936, para uma política de monitoramento com finalidade de neutralizar os efeitos das estiagens que afetam a área do Nordeste e mais 102.567,248 km² da Região Sudeste (Figura 1).

Figura 1- Biomas brasileiros com destaque na Região Semiárida e incidência de seca



Fonte: Autora (2021).

Dados fornecidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Ministério de Integração Nacional (MI).

Na Região Semiárida predominam os rios considerados intermitentes e condicionados ao período chuvoso. A constituição geológica não contribui muito na existência de rios perenes, pois é dominada por terrenos cristalinos com solos rasos ou pouco profundos; tais condições possibilitam o escoamento superficial e com dificuldade de infiltração, já que aí se formam solos pouco permeáveis, e a ação do homem é responsável pela degradação da cobertura vegetal e sua erradicação, o que favorece a aceleração dos processos naturais erosivos.

Em termos gerais, observa-se que diversas localidades na Região do Semiárido brasileiro apresentam precipitações entre 280 a 800 mm de médias anuais. Na maior parte da região as precipitações médias anuais não ultrapassar os 800 mm, embora nos chamados brejos e serras úmidas possam exceder esse total; na verdade predomina na região áreas com precipitações entre os 400 e 600 mm (ARAÚJO, 2011; RAMALHO, 2013; COSTA, 2019).

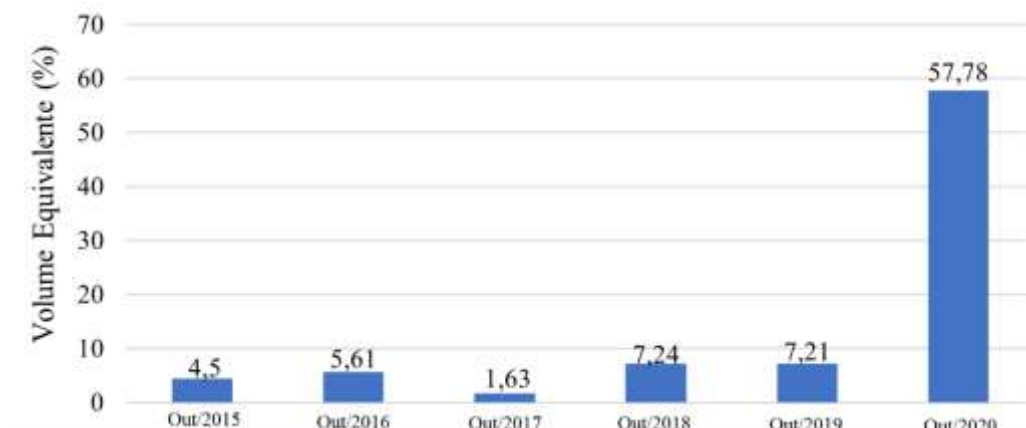
Geralmente o balanço hídrico dessa região apresenta deficiência hídrica, porque o potencial de evapotranspiração é maior do que as precipitações. As características esboçadas acima permitem aferir o clima predominante como sendo do tipo quente e seco ou BSh de Köppen. Ou seja, quente e seco de estepe, com temperatura média anual superior a 18°C, havendo variações como o BShw, com chuvas de verão, entre outros (ARAÚJO, 2011).

2.2 RESERVATÓRIOS NA REGIÃO SEMIÁRIDA

Como alternativa de garantir a distribuição de água na região, a implantação de reservatórios é de suma relevância, pois traz como papel de gestão de recursos hídricos a capacidade de armazenar e atender aos diversos usos da água. Além da atividade de armazenamento de água nos períodos úmidos, possibilitam liberar parte do volume armazenado nos períodos de estiagem, cooperando para a garantia da oferta de água destinada a usos múltiplos (abastecimento humano, dessedentação animal, irrigação e indústria, entre outros).

Estudos revelam que para o monitoramento e a avaliação da situação do conjunto de reservatórios, é utilizado o conceito de Reservatório Equivalente, que tem como definição o volume total armazenado nesses espaços, numa dada época, dividido por sua capacidade total de armazenamento, expresso em porcentagem. Para a determinação destes valores, são considerados apenas os reservatórios com capacidade igual ou superior a 10 hm³. Para a presente pesquisa, o volume equivalente foi calculado especificamente para o reservatório Engenheiro Francisco Saboia, como detalha a Figura 2.

Figura 2- Volume equivalente (%) do reservatório Poço da Cruz- PE



Fonte: ANA (2021)

A Figura 2 demonstra a evolução do volume do reservatório Poço da Cruz, no mês de outubro, para o período de 2015 a 2020. Assim, em outubro de 2015, o percentual de armazenamento no Volume Equivalente de Poço da Cruz era de 4,5%. Em outubro de 2016, esse percentual atingiu 5,61% e posteriormente diminuiu, registrando 1,63% em 2017. Em 2018 alcançou 7,24 % permaneceu com valor próximo em 2019 com 7,21%. De acordo com os dados, entre os últimos seis anos o maior percentual foi registrado em 2020. Essa dinâmica de redução acentuada no volume de água armazenado nos reservatórios entre 2015 e 2017 é verificada, principalmente, nos Estados do Ceará, da Paraíba, de Pernambuco e do Rio Grande do Norte.

2.3 SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto (SR) consiste na arte e ciência de obtenção de informações sobre determinados objetos na superfície terrestre sem contato físico direto com eles (JENSEN, 2009). A aquisição dos dados ocorre através dos sensores acoplados em satélites orbitais, que atuam no registro das interações da radiação eletromagnética (REM) dos objetos sobre a superfície terrestre. A energia conduzida pela onda eletromagnética é transformada em pulso eletrônico ou valor digital, que é proporcional a esta energia (FIGUEIREDO, 2005).

Jensen (1999) afirma que os sensores remotos são formados por detectores que atuam no registro do comprimento de onda específico para cada alvo no espectro- eletromagnético. Os objetos que estão na superfície terrestre apresentam propriedades físico-químicas específicas e, conseqüentemente, o fluxo de REM que incide nos objetos apresenta comportamento espectral distinto.

As diferenças entre interações permitem a distinção e conhecimento dos objetos na superfície terrestre detectados pelos sensores remotos, pois são reconhecidos em função da variação da porcentagem de energia refletida em cada comprimento de onda (MORAES, 2008). Para determinados alvos apresentam maior absorção enquanto outros podem refletir ou transmitir a energia. Este comportamento dos alvos é denominado por assinatura espectral (ABREU & COUTINHO, 2014).

Em especial, o SR, vem adquirindo nas últimas décadas grande aceitação no meio acadêmico em função do acesso a hardware, software e produtos gratuitos como as imagens de satélites, entre outros, complementando as análises e aplicações (COELHO & CORREA, 2013). O SR é uma tecnologia que permite, a partir de sensores, monitorar água, solo e vegetação sobre extensas áreas. No caso da vegetação da Caatinga na região do semiárido de Pernambuco, o SR possibilita o mapeamento atualizado da área e pode auxiliar em sua Gestão Ambiental (MATOS. CANDEIAS & TAVARES JÚNIOR, 2013). Os métodos utilizados em SR permitem através do processamento digital das imagens obter informações de uso e ocupação do solo pela análise pixel a pixel, de forma que cada um forneça sua identificação e descrição.

O processamento digital de imagens faz com que as informações radiométricas sejam mais facilmente discrimináveis pelo analista, consequentemente, simplifica a extração de informações da imagem sobre os fenômenos ou outros objetos do mundo real, originando as cartas temáticas com variações espacial e temporal. Através de imagens de satélites e algoritmos tem-se a estimativa de elementos da superfície terrestre como albedo, temperatura da superfície, emissividades, evapotranspiração e índices espectrais com elevado grau de acurácia dependendo dos dados disponibilizados (BEZERRA *et al.*, 2014).

2.3.1 Satélite Landsat-8

Landsat é o programa de satélites de observação da Terra de origem norte-americana. O programa teve início na segunda metade da década de 1960, com origem a partir de um projeto desenvolvido pela Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), sendo direcionado exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres. O programa inicialmente foi denominado EARTS (*Earth Resources Technology Satellite*) e em 1975 passou a se denominar Landsat.

O programa foi gerenciado pela NASA e pela USGS (*United States Geological Survey*) e envolveu o lançamento de 8 satélites. Dentre os satélites da família Landsat, o Landsat-8 foi

lançado em 11 de fevereiro de 2013 e originalmente chamado de *Landsat Data Continuity Mission*, recebendo a denominação de Landsat-8 em 30 de maio de 2013 com controle do USGS (Figura 3).

Figura 3 - Ilustração do Satélite Landsat 8



Fonte: USGS (2021).

Conforme o USGS (2021), o Landsat-8 transporta os instrumentos *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). As bandas espectrais do sensor OLI apresentam aprimoramento de instrumentos em relação aos satélites anteriores, adicionando duas bandas espectrais: um canal visível azul profundo (banda 1) projetado para pesquisa de recursos hídricos e zonas costeiras, e um novo canal infravermelho de ondas curtas, para detecção de nuvens cirros. O instrumento TIRS coleta duas bandas espectrais que eram cobertas por apenas uma banda nos sensores TM e ETM+ anteriores (USGS,2021). A Tabela 1 mostra a especificações do Landsat 8 quanto as bandas, resolução espacial e comprimento de onda correspondentes a banda.

Tabela 1- Banda, resolução e comprimento de onda do satélite Landsat 8

Banda	Resolução (m)	Comprimento de onda (nm)
1 (Visível)	30	430-450
2 (Visível)	30	450-510
3 (Visível)	30	530-590
4 (Vermelho)	30	640-670
5 Infravermelho (NIR)	30	850-880
6 (SWIR-1)	30	1570-1650
7 (SWIR-2)	30	2110-2290
8 Pancromática (PAN)	15	500-680
9 (Cirrus)	30	1360-1380

Fonte: USGS (2021).

Os sensores acoplados no LANDSAT 8 fornecem desempenho radiométrico do sinal-ruído 9 (SNR), quantificado em uma faixa dinâmica de 12 bits (4096 níveis de cinza em potencial em uma imagem), enquanto na de 8 bits há apenas 256 níveis de cinza. Esse sinal melhorado de ruído permite caracterizar melhor o estado e condição da cobertura da terra. Os produtos são entregues como imagens dimensionadas para 55.000 níveis de cinza (USGS, 2013).

2.3.2 Satélite Sentinel-2

De acordo com a Agência Espacial Europeia (ESA), a missão *Copernicus Sentinel-2* compreende uma constelação de dois satélites em órbita polar colocados na mesma órbita sincronizada com o sol, com fases a 180 entre si (Figura 4). Tem como finalidade o monitoramento da variabilidade nas condições da superfície da terra, e sua ampla largura de faixa (290 km) e alto tempo de revisita (10 dias no equador com um satélite e 5 dias com 2 satélites em condições sem nuvens, o que resulta em 2-3 dias em latitudes médias) permite a avaliação das mudanças na superfície da Terra.

A órbita da missão Sentinel-2 é sincronizada com o sol. As órbitas sincronizadas com o Sol são usadas para garantir que o ângulo da luz solar na superfície da Terra seja mantido de forma consistente. Além de pequenas variações sazonais, a ancoragem da órbita dos satélites ao ângulo do sol minimiza o impacto potencial de sombras e níveis de iluminação no solo. Isso garante consistência ao longo do tempo e é fundamental para avaliar dados de séries temporais ESA (2021).

Figura 4- Satélite Sentinel-2



Fonte: ESA (2021).

Sentinel-2A e Sentinel-2B ocupam a mesma órbita, porém separados por 180 graus. A altitude orbital média é de 786 km. A inclinação da órbita é 98,62 e o Tempo Solar Local Médio (MLST) no nó descendente é 10:30h. Este valor de MLST foi escolhido como um compromisso entre um nível adequado de iluminação solar e a minimização do potencial de cobertura de nuvens. O valor de MLST é próximo ao tempo de viaduto local do LANDSAT e quase idêntico ao do SPOT-5, permitindo a integração dos dados do SENTINEL-2 com as missões existentes e históricas e contribuindo para a coleta de dados de séries temporais de longo prazo (ESA, 2021).

Conforme o ESA (2021), o instrumento MultiSpectral (MSI) usa um conceito de varredura. Um sensor de varredura funciona coletando fileiras de dados de imagem ao longo da faixa orbital e utiliza o movimento da espaçonave ao longo do caminho da órbita para fornecer novas fileiras para aquisição. O período médio de observação em áreas terrestres e costeiras é de aproximadamente 17 minutos e o período máximo de observação é de 32 minutos.

A luz refletida da Terra até o instrumento MSI e sua atmosfera é coletada por um telescópio de três espelhos (M1, M2 e M3) e focada, por meio de um divisor de feixe, em dois conjuntos de plano focal (FPAs): um para os dez Comprimentos de onda VNIR e um para os três comprimentos de onda SWIR (ESA, 2021).

Com 13 bandas espectrais, 290 km de largura de faixa e alta frequência de revisita, o instrumento MSI do SENTINEL-2 oferece suporte a uma ampla gama de estudos e programas de terra e reduz o tempo necessário para construir um arquivo de imagens europeu livre de nuvens. As bandas espectrais do Sentinel-2 permitem fornecer dados para classificação de

cobertura, mudança do solo, correção atmosférica e separação de nuvem / neve (Tabela 2) (ESA, 2021).

Tabela 2 - Banda, resolução e comprimento de onda do satélite Sentinel-2

Banda	Resolução (m)	Comprimento de onda (nm)
2 (azul)	10	458-523
3 (verde)	10	543-578
4 (vermelho)	10	650-680
8 (NIR)	10	785-900
8A (NIR)	20	855-875
11 (SWIR-1)	20	1565-1655
12 (SWIR-2)	20	2100-2280

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

2.3.3 Imagens CHIRPS

O produto proveniente do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) foi lançado em 1981 através de uma parceria conjunta entre a USGS e a EROS. O CHIRPS estima as variações de precipitação no espaço e no tempo fornecendo dados confiáveis, atualizados e mais completos para o monitoramento do regime hidrológico (FUNK, 2015; COSTA *et al.*, 2019).

As informações coletadas pelo satélite CHIRPS abrangem uma vasta área, compreendida entre 50° N e 50° S. Os dados são fornecidos nos formatos NetCDF, GeoTiff e Esri BIL. As unidades são em milímetros (mm) por período, por exemplo, mm por dia ou mm por mês. A resolução espacial é de 0,05° x 0,05° (~5 km).

O CHIRPS emprega o produto TMPA 3B42 do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) para calibrar as estimativas de precipitação através dos dados de nuvens (*Cold Cloud Duration* – CCD), além disso, o produto incorpora dados de precipitação de satélites geoestacionários quase-globais do CPC e do Sistema Nacional de Previsão Climática versão 2 (CFSv2) e observações de precipitação *in situ* (FUNK, 2015; BAYISSA *et al.*, 2017; COSTA *et al.*, 2019).

2.4 TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA CORPOS HÍDRICOS

Dentre as técnicas de SR destacam-se os índices espectrais que fornecem informações aderentes ao monitoramento e mudanças ocorridas em alvos naturais e artificiais na superfície terrestre. No que concerne ao comportamento de corpos hídricos, tem-se o Índice de Água por Diferença Normalizada – NDWI (do inglês, *Normalized Difference Water Index*), proposto por McFeeters (1996), onde são aplicadas as bandas do verde e do infravermelho próximo (NIR), permite detectar remotamente o delineamento de corpos hídricos na paisagem georreferenciada. O NDWI compreende a razão entre a diferença e a soma da faixa verde e da banda NIR. As características da água terão valores maiores que zero, que é o limiar a ser usado no método, uma vez que a diferença de refletância da água é maior que a diferença de solos e vegetação (NAMIKAWA, KORTING & CASTEJON, 2016).

Para McFeeters (1996), a delimitação e o monitoramento de corpos hídricos são aplicações fundamentais presentes no SR. As informações extraídas por índices espectrais de água podem subsidiar a avaliação e a análise de recursos hídricos, incluindo inventários e mapeamentos de áreas úmidas e enchentes, dando suporte assim ao gerenciamento de águas superficiais (ROKNI *et al.*, 2014).

Além disso, destacou-se o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado - MNDWI (do inglês, *Modified Normalized Difference Water Index*), desenvolvido por Xu (2006), utilizando as bandas do verde e do infravermelho médio (MIR). De acordo com Xu (2006), o cálculo do MNDWI permite constatar que a água terá maiores valores positivos do que no NDWI, uma vez que absorve mais luz MIR do que a luz NIR. Como também denotar que as áreas construídas terão valores negativos, e ressaltou que o solo e a vegetação ainda terão valores negativos, uma vez que o solo reflete a luz MIR mais do que a luz NIR e, a vegetação reflete a luz MIR ainda mais que a luz verde.

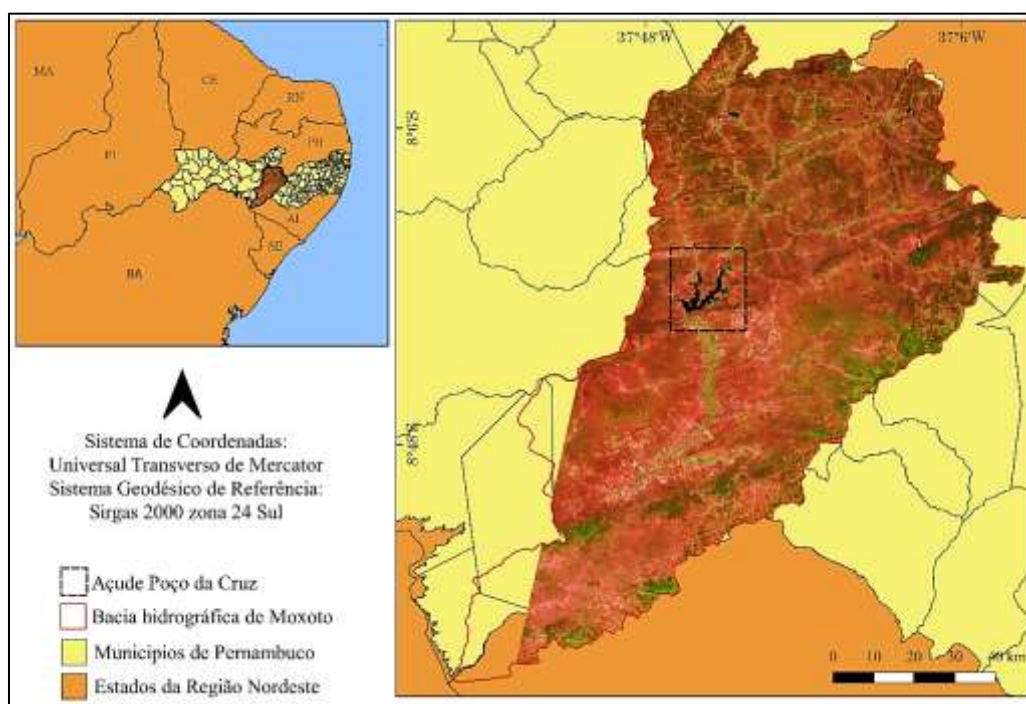
3 METODOLOGIA

Nesta seção será realizada a descrição da área de estudo, análise de banco de dados pluviométricos referente a região estudada e os métodos utilizados para obtenção dos produtos cartográficos.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo que compreende o município de Ibimirim-Pernambuco, como detalhado na Figura 5, está localizado na área central da bacia hidrográfica do Rio Moxotó. Esta bacia possui área total de 9.752,71 km², que em maior extensão encontra-se no Estado de Pernambuco. Sua parte em Pernambuco está inserida na Unidade de Planejamento Hídrico UP8 e tem sua localização entre 07° 52' 21" e 09° 19' 03" de latitude sul, e entre 36° 57' 49" e 38° 14' 41" de longitude oeste (APAC, 2020).

Figura 5- Localização da área de estudo



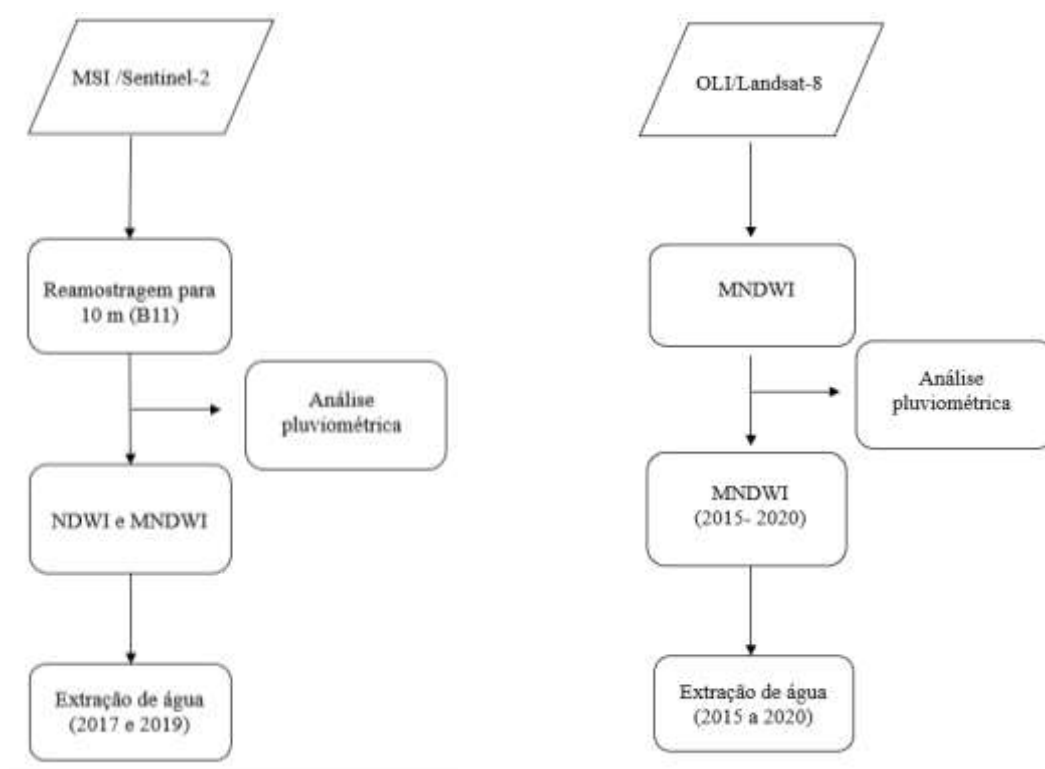
Fonte: Autora.

O açude público Engenheiro Francisco Saboia, comumente chamado por Poço da Cruz, é o maior reservatório do estado de Pernambuco e a principal fonte hídrica para a irrigação do

Perímetro Irrigado Moxotó - PIMOX. Ele está inserido como um dos reservatórios contemplados no Projeto de Integração do Rio São Francisco (ANA, 2020).

A Figura 6 apresenta-se o fluxograma com as etapas realizadas para os resultados desta pesquisa. Os resultados alcançados foram divididos em duas etapas: 1) análise espaço-temporal a partir de imagens do Sentinel-2 para delimitação da área superficial do açude Poço da Cruz nos anos 2017 e 2019 e 2) distribuição espacial do Poço da Cruz nos anos 2015 a 2020 com imagens do Landsat 8.

Figura 6- Fluxograma do procedimento metodológico



Fonte: Autora.

3.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Como método de descrever o comportamento da distribuição da precipitação pluvial e seus efeitos no armazenamento de água, foram pesquisados bancos de postos pluviométricos mais próximos possível do reservatório Poço da Cruz concordando com os períodos analisados nos artigos elaborados provenientes da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) utilizadas para a análise referentes ao artigo 01.

Como também imagens CHIRPS que após o *download* de todos os dados, estes foram inseridos no *software* acesso livre QGIS 3.12.1., onde foi usada para facilitar o acesso, manipular e visualizar os dados climatológicos, possibilitando a análise das anomalias climáticas e a elaboração de diversos dados sobre a precipitação para os anos de 2015 a 2020 correspondente ao artigo 02.

3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS E PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS

Para a escolha das imagens a serem processadas foi necessário procurar por imagens sem a presença de nuvens que coincidisse o mês e ano para os dois satélites, com a finalidade de possibilitar a comparação entre os dados obtidos. Após detalhada pesquisa selecionou-se imagens referentes ao satélite Landsat, compostas por sete bandas espectrais e adquiridas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o *United States Geological Survey* (USGS) e imagens do satélite Sentinel – 2A, uma missão imageadora multispectral do Programa *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES), conjuntamente administrada pela Comunidade Europeia e a Agência Espacial Europeia (ESA). As imagens orbitais e os arquivos vetoriais foram reprojatados para o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), UTM fuso 24 Sul.

Para as imagens do sensor OLI/Landsat-8 se faz o cálculo a reflectância monocromática das bandas correspondentes utilizadas no estudo, convertendo para reflectância planetária a partir do coeficiente de reescalonamento de reflectância informado no arquivo metadados da imagem (MTL file), utilizando a Equação 1 (USGS, 2020).

$$\rho'_{\lambda} = M_{\rho} * Q_{cal} + A_{\rho} \quad (1)$$

em que: ρ'_{λ} é a reflectância planetária sem a correção do ângulo solar; M_{ρ} é o fator de escala multiplicativa de cada banda; Q_{cal} é o produto padrão quantificado e calibrado para valores de pixel (DN), se referindo esses valores a cada uma das bandas da imagem.

Para o sistema sensor OLI Landsat 8, o processamento das imagens se deu em conformidade com Silva *et al.* (2016), para conversão dos valores em nível de cinza (ND) para reflectância espectral, utilizou-se coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens USGS (2020). Para tanto, os números digitais de cada pixel e banda, foram convertidos para reflectância planetária a partir de fatores aditivo e multiplicativo,

reportados no ficheiro de metadados da imagem. No entanto, é necessário corrigir a refletância de acordo com o ângulo zenital solar - Z e o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol na data da obtenção da imagem orbital - d_r (obtido com base na distância Terra-Sol - d_{TS} , disponível no arquivo metadados da imagem, em unidade astronômica), de acordo com as Equações 2 e 3 (ARIZZA, 2013; SILVA *et al.*, 2016; USGS, 2016).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{(A_{pi} + M_{pi} \cdot ND_i)}{\cos Z \cdot d_r} \quad (2)$$

$$d_r = \left(\frac{1}{d_{TS}} \right)^2 \quad (3)$$

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

O processamento das imagens do Sentinel 2A se deu em conformidade com Zhang *et al.* (2018). Para a refletância planetária (ρ_{λ}) foi usada a Equação 4.

$$\rho_{\lambda} = \frac{ND}{\text{Quantification_Value}} \quad (4)$$

Em que ρ_{λ} corresponde a refletância planetária no topo da atmosfera corrigida, ND aos números digitais correspondentes a cada banda, e ρ_{λ} , é o coeficiente presente no arquivo metadados.

O NDWI (Equação 5), proposto por McFeeters (1996), foi concebido visando maximizar a refletância da água na banda do verde e minimizar a refletância na banda infravermelho próximo, onde: ρ_3 é a refletância da banda 3 (ρ_{GREEN}) e ρ_8 é a refletância da banda 8 (ρ_{NIR}) da imagem Sentinel-2 MSI (DU *et al.*, 2016).

$$NDWI = \frac{(\rho_{GREEN} - \rho_{NIR})}{(\rho_{GREEN} + \rho_{NIR})} \quad (5)$$

Enquanto o MNDWI é calculado para (1) maximizar a refletância da água usando comprimentos de onda verdes; (2) minimizar a baixa refletância do NIR pelas características da água; e (3) aproveitar a alta refletância do NIR pelas características da vegetação e do solo. Como resultado, as características da água têm valores positivos e, portanto, são melhoradas, enquanto a vegetação e o solo geralmente têm valores zero ou negativos e, portanto, são suprimidos. O *Modified Normalized Water Difference Index (MNDWI)* foi expresso da seguinte forma:

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \quad (6)$$

onde ρ_{SWIR1} é a refletância em uma banda de infravermelho médio. O cálculo do MNDWI produzirá três resultados: (1) a água terá maiores valores positivos do que no NDWI, uma vez que absorve mais luz MIR do que a luz NIR; (2) terrenos construídos terão valores negativos como mencionado acima; e (3) o solo e a vegetação ainda terão valores negativos, uma vez que o solo reflete a luz MIR mais do que a luz NIR (JENSEN, 2004) e a vegetação reflete a luz MIR ainda mais que a luz verde.

Para as imagens do Sentinel-2, conforme as características das bandas, foi preciso reamostrar a banda 11 (SWIR) do sensor MSI, uma vez que esta possui resolução espacial de 20 m enquanto as bandas 3 (verde) e 8 (vermelho) possuem 10 m.

4 RESULTADOS

Nesta seção foram apresentados os dois artigos, resultados inseridos na Dissertação.

4.1 ARTIGO 1 - GEOTECNOLOGIAS COMO FERRAMENTA PARA DELIMITAÇÃO DE CORPO HÍDRICO A PARTIR DE IMAGENS SENTINEL-2 NO SEMIÁRIDO DO BRASIL

Autores: Débora Natália Oliveira de Almeida ¹, Leijdane Maria Maciel de Oliveira ²

- ¹ Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geinformação - Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
- ² Professora do Departamento Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geinformação - Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

GEOTECNOLOGIAS COMO FERRAMENTA PARA DELIMITAÇÃO DE CORPO HÍDRICO A PARTIR DE IMAGENS SENTINEL-2 NO SEMIÁRIDO DO BRASIL

Débora Natália Oliveira de Almeida ¹, Leijdane Maria Maciel de Oliveira ²

Resumo: A utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto tornou-se comum nos últimos anos no que compete às pesquisas ambientais, como também a acessibilidade de imagens de satélites de forma gratuita impulsionou esse crescimento. O uso de imagens orbitais para realização destes estudos permite uma redução dos custos envolvidos, maior agilidade e constância no acesso aos dados, permitindo assim, análises com maior precisão e detalhamento em diversas componentes ambientais corroborando principalmente em regiões semiáridas. O estudo de corpos hídricos através de uso de geotecnologias é de grande relevância, pois permite avaliar e quantificar estas feições naturais a partir de índices espectrais. Este estudo objetivou-se em avaliar e comparar dois índices espectrais, o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) e o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificada (MNDWI), no Açude Poço da Cruz, município de Ibimirim - PE. Foram adquiridas as imagens do sensor MSI Sentinel-2A obtidas pelo site do USGS (*United States Geological Survey*) para modelagem georreferenciada destes índices em 27/12/2017 e 07/12/2019. Com o processamento dessas imagens através do software livre acesso QGIS, para o ano 2017 encontraram-se valores de NDWI entre -0,478 a 0,364 e, para o índice MNDWI foram descritos no intervalo entre -0,362 a valores próximos de 0,572, obtendo-se a visualização da variação do corpo hídrico, tanto para o índice NDWI como para MNDWI. Em 2019, o NDWI teve a variação entre 0,255 a 0,483 e MDNWI atingiu os valores 0,451 e 0,684. Diante disso, foi possível identificar as diferenças entre os índices e quantificar área superficial proveniente da vetorização de ambos os índices nos anos pesquisados. O sensor MSI - Sentinel-2A permitiu um delineamento dos alvos devido à sua melhor resolução espacial, principalmente pelo MNDWI, possibilitando maior efetividade para monitoramento e gestão de recursos hídricos.

Palavras-chave: Índices espectrais. MSI. Precipitação.

Abstract: The use of sensing techniques has become common in recent years in what competes in environmental research, and the accessibility of satellite images for free has driven this growth. The use of orbital images to carry out these studies allows a reduction in the costs involved, greater agility and consistency in accessing the data, thus allowing analyzes with greater precision and detail in several environmental components, corroborating mainly in semiarid regions. The study of water bodies using geotechnologies is of great relevance, as it allows to evaluate and quantify these natural features from spectral indexes. This study aimed to evaluate and compare different spectral indices such as: Normalized Difference Water Index (NDWI) and the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), in the Poço da Cruz reservoir, municipality of Ibimirim-PE. Images of the MSI Sentinel-2 8 sensor obtained from the USGS (United States Geological Survey) website were acquired to determine these indices dated 12/27/2017 and 12/7/2019. With the processing of these images through the free software QGIS, for the year 2017 NDWI values were found between -0.478 to 0.364, and for the MNDWI index, they were described in the range between -0.362 to values close to 0.572, obtaining the visualization variation of the water body for both the NDWI and MNDWI indexes. In 2019, the NDWI ranged from 0.255 to 0.483 and MDNWI reached 0.451 and 0.684. Therefore, it was possible to identify the differences between the indexes and to quantify the surface area resulting from the vectorization of both indexes. The MSI - Sentinel-2 sensor allowed the targets to be delineated due to their greater spatial resolution, mainly by the MNDWI method, allowing greater confidence for monitoring and managing water resources.

Keywords: Spectral indexes. MSI. Precipitation.

INTRODUÇÃO

O uso de satélites, como advento que vem crescendo proporcionalmente na área de tecnologias, tornou-se uma das principais ferramentas para análise e estudos avançados sobre a configuração da superfície terrestre, os quais são pertinentes para a detecção e monitoramento de mudanças, proporcionando uma melhor avaliação, manejo e gerenciamento dos recursos naturais, como o solo, vegetação e corpos hídricos pontuando as principais causas de degradação dos recursos naturais. No que concerne em áreas de clima Semiárido nordestino, são bastante importantes para o equilíbrio natural do ambiente, que sofre com secas periódicas (FERREIRA JÚNIOR & DANTAS, 2018).

De acordo com Padovani *et al.* (2018), as mudanças ocorridas no uso do solo e cobertura vegetal interferem no balanço de energia, temperatura do ar, precipitação, umidade do ar e circulação regional e global, por isso, os estudos sobre o uso e cobertura da terra devem ser considerados como um fator fundamental na análise do tempo e clima. Sendo assim, as tecnologias de estudos espaciais podem contribuir para compreensão das alterações climáticas em escala regional e para a previsão de possíveis impactos ao meio ambiente. Além disso, as pesquisas realizadas com uso de satélite e técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) podem apoiar diversas aplicações, a exemplo, os estudos das dinâmicas de uso e cobertura do solo,

monitoramento ecológico, avaliação de parâmetros do solo e desastres ambientais (ZHU *et al.*, 2019; OLIVEIRA; NEGRI; SANTOS, 2020).

Neste contexto tecnológico, o satélite Sentinel-2, lançado em 2015, apresenta como alternativa evolutiva de tecnologia, equipado com um sensor multiespectral de resolução espacial média/alta produzido pela Agência Espacial Europeia (ESA). O sensor *MultiSpectral Instrument (MSI)*, apresenta uma larga faixa imageada (290 km), boa resolução temporal (cinco dias, com dois satélites), resolução espacial alta e média (10, 20 e 60 m) e possui treze bandas espectrais abrangendo comprimentos de onda de 0,4 a 2,2 μm (DRUSCH *et al.*, 2012; SOTHE *et al.*, 2017; BEZERRA *et al.*, 2018).

Os sistemas aquáticos continentais desempenham um papel fundamental na manutenção da biodiversidade, na regulação biogeoquímica, na sobrevivência dos seres vivos e ciclo hidrológico (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). Nesse campo de pesquisa, uma das abordagens mais comuns é a localização georreferenciada da máscara de água, baseada principalmente no cálculo de índices de água usando diferentes informações espectrais de imagens ópticas (SCHWATKE; SCHERER e DETTMERING, 2019).

Diversas pesquisas apontaram que para extração de máscara de água foram desenvolvidos vários métodos tendo como base imagens multiespectrais (DU *et al.*, 2016). Dentre os métodos mais utilizados, Jiang *et al.* (2014) evidenciaram os índices espectrais de água bem como os classificadores supervisionados e não supervisionados. Os índices espectrais de água têm sido amplamente aplicados devido à precisão na detecção de corpos hídricos a baixo custo computacional (DU *et al.*, 2016; PENHA *et al.*, 2017), a exemplo do Índice de Água por Diferença Normalizada – NDWI (do inglês, *Normalized Difference Water Index*) por McFeeters (1996) e; o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado - MNDWI (do inglês, *Modified Normalized Difference Water Index*) por XU (2006).

O Índice de Água por Diferença Normalizada - NDWI, proposto por McFeeters (1996), onde são aplicadas as bandas do verde e do infravermelho próximo (NIR), permite detectar remotamente o delineamento de corpos hídricos na paisagem georreferenciada. O NDWI compreende a razão entre a diferença e a soma da faixa verde e da banda NIR. As características da água terão valores maiores que zero, que é o limiar a ser usado no método, uma vez que a diferença de refletância da água é maior que a diferença de solos e vegetação (NAMIKAWA, KORTING e CASTEJON, 2016).

Para McFeeters (1996), a delimitação e o monitoramento de corpos hídricos são aplicações fundamentais presentes no SR. As informações extraídas por índices espectrais de água podem subsidiar a avaliação e a análise de recursos hídricos, incluindo inventários e

mapeamentos de áreas úmidas e enchentes, dando suporte assim ao gerenciamento de águas superficiais (ROKNI *et al.*, 2014).

Além disso, destacou-se o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado – MNDWI, desenvolvido por Xu (2006), utilizando as bandas do verde e do infravermelho médio (MIR). De acordo com Xu (2006), o cálculo do MNDWI permite constatar que a água terá maiores valores positivos do que no NDWI, uma vez que absorve mais luz MIR do que a luz NIR. Como também denotar que as áreas construídas terão valores negativos, e ressaltou que o solo e a vegetação ainda terão valores negativos, uma vez que o solo reflete a luz MIR mais do que a luz NIR e, a vegetação reflete a luz MIR ainda mais que a luz verde.

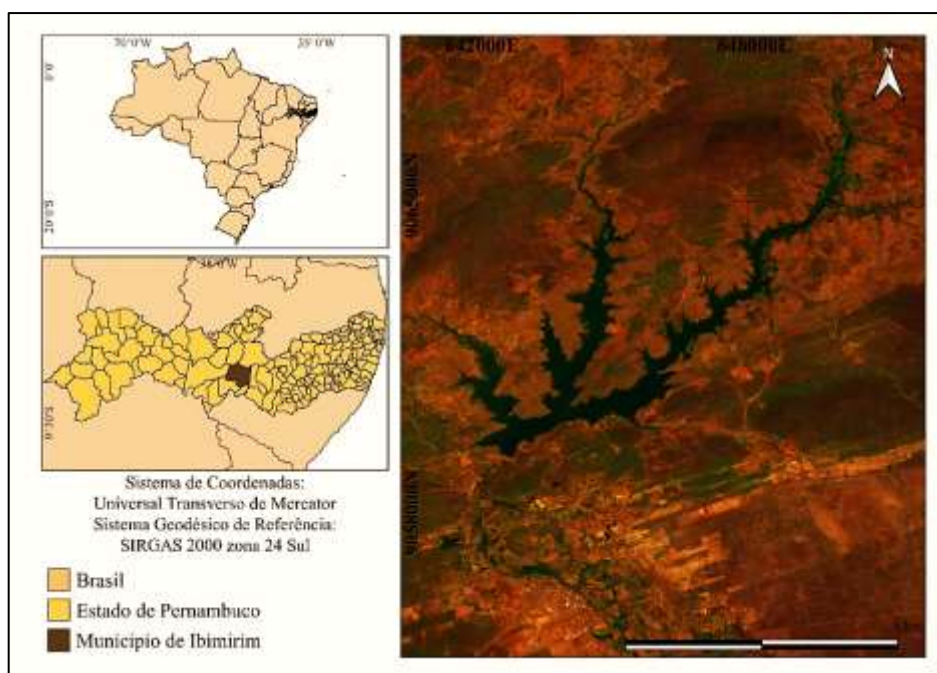
A bacia hidrográfica do rio Moxotó é de grande relevância para estudos ambientais, principalmente aos recursos hídricos com utilização de técnicas de SR. Uma das regiões importantes nesta bacia é o açude Engenheiro Francisco Saboya, mais conhecido como Açude Poço da Cruz, que é o maior reservatório do Estado de Pernambuco – Brasil e considerado como a principal fonte hídrica para abastecimento do Perímetro Irrigado do Moxotó (PIMOX). O açude tem capacidade de aproximadamente 504 milhões de metros cúbicos de água (APAC, 2020).

Neste artigo, foi apresentada uma abordagem para o uso de índices espectrais NDWI e MNDWI para análise espacial de reservatório do Semiárido brasileiro, com a finalidade de demonstrar o uso das geotecnologias como ferramenta para extração de máscaras de água, tornando possível o cálculo de área superficial e, avaliação espectral dos índices do trecho da bacia hidrográfica do Rio Moxotó, especificamente no Açude Poço da Cruz, através de imagens ópticas do Sensor MSI a bordo do Satélite Sentinel-2.

METODOLOGIA

A área de estudo compreende o Açude Engenheiro Francisco Saboya mais conhecido como Açude Poço da Cruz, pertencente ao município de Ibimirim - PE, que está inserido na bacia hidrográfica do rio Moxotó (Figura 7). Esta bacia compreende uma área de 9.752,71 km², com 90% nos territórios de Pernambuco e acrescentando-se o restante de sua área ao estado de Alagoas. A bacia hidrográfica localiza-se entre as coordenadas 07°52'21" e 09°19'03" de latitude Sul, e 36°57'49" e 38°14'41" de longitude Oeste, e está inserida na Unidade de Planejamento Hídrico UP8.

Figura 1 – Localização da área de estudo - Açude Poço da Cruz – Ibimirim – PE - Brasil



Fonte: Autores.

Para a escolha das imagens a serem processadas foi necessário a observação de ausência de nuvens que coincidisse o mês entre os dois anos estudados, possibilitando assim, a comparação entre os dados obtidos. Após detalhada pesquisa, selecionaram-se imagens referentes aos dias 27 de dezembro de 2017 e 07 de dezembro de 2019, como produto *Top-Of-Atmosphere* (TOA) *Level1C* (L1C) com correção radiométrica e geométrica do satélite Sentinel – 2A, uma missão imageadora multispectral do Programa *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES), conjuntamente administrada pela Comunidade Europeia e a Agência Espacial Europeia (ESA).

A metodologia consistiu com a reprojeção ao Sistema Geodésico de Referência (SGR) adotado oficialmente no Brasil, o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), UTM fuso 24 Sul, posteriormente o processamento da reflectância monocromática e modelagem dos índices espectrais (NDWI e MNDWI) e, logo após a análise dos resultados obtidos através dos índices e cálculo da área do reservatório, sendo possível compreender, através da resposta espectral, a variabilidade da máscara de água do reservatório.

O processamento das imagens do Sentinel 2A se deu em conformidade com Zhang *et al.* (2018). Para a reflectância planetária (ρ_λ) foi usada a Equação 7.

$$\rho_{\lambda} = \frac{ND}{\text{Quantification_Value}} \quad (7)$$

em que, ρ_{λ} corresponde a reflectância planetária no topo da atmosfera corrigida, ND aos números digitais correspondentes a cada banda, e Quantification_Value é o coeficiente presente no arquivo metadados.

O NDWI (Equação 8) proposto por McFeeters (1996), foi concebido visando maximizar a reflectância da água na banda do verde e minimizar a reflectância na banda infravermelho próximo, onde: ρ_3 é a reflectância da banda 3 (ρ_{GREEN}) e ρ_8 é a reflectância da banda 8 (ρ_{NIR}) da imagem Sentinel-2 MSI (DU *et al.*, 2016).

$$NDWI = \frac{(\rho_{GREEN} - \rho_{NIR})}{(\rho_{GREEN} + \rho_{NIR})} \quad (8)$$

O Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI) foi expresso pela razão entre a diferença das bandas verde e ρ_{MIR} e a soma delas, conforme Equação 8 (XU, 2006):

$$MNDWI = \frac{(\rho_{GREEN} - \rho_{MIR})}{(\rho_{GREEN} + \rho_{MIR})} \quad (9)$$

em que, ρ_{MIR} é a reflectância em uma banda de infravermelho médio. Neste trabalho, valores positivos ($>0,0$) em ambos os índices foram considerados como corpos hídricos (MCFEETERS, 1996; XU, 2006).

Foram evidenciadas (Tabela 3) as especificações das bandas do sensor Sentinel-2A com a resolução e o comprimento de onda de cada banda.

Tabela 1 - Banda, resolução e comprimento de onda do sensor do Sentinel.

Banda	Resolução (m)	Comprimento de onda (nm)
2 (azul)	10	458-523
3 (verde)	10	543-578
4 (vermelho)	10	650-680
8 (NIR)	10	785-900
8A (NIR)	20	855-875
11 (SWIR-1)	20	1565-1655
12 (SWIR-2)	20	2100-2280

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

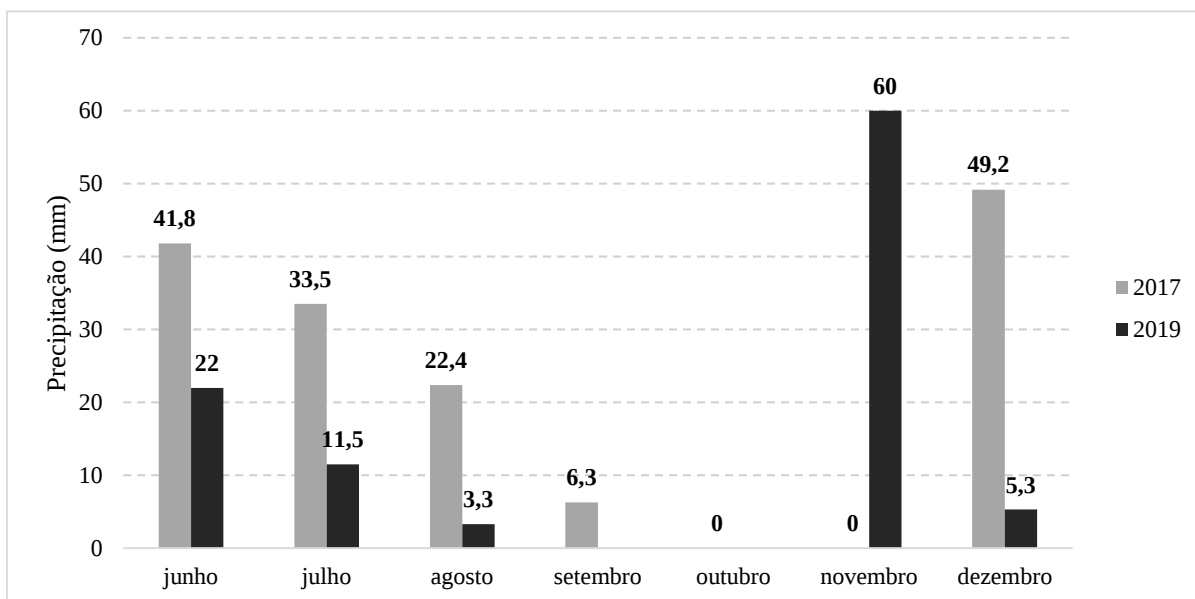
Conforme as características das bandas (Tabela 3) foi preciso reamostrar a banda 11 (SWIR) do sensor MSI, uma vez que esta possui resolução espacial de 20 m enquanto as bandas 3 (verde) e 8 (vermelho) possuem 10 m. Logo, realizou-se a compatibilização das resoluções espaciais das bandas do Sentinel-2 por processo de reamostragem (vizinho mais próximo) para o cálculo dos índices espectrais de água.

Após a obtenção das imagens dos respectivos índices de água, o arquivo *raster* foi transformado em vetor para cálculo das áreas identificadas como feição água, e assim, interpretar a variação entre os índices NDWI e MNDWI. O procedimento consistiu em obter uma imagem binária através da ferramenta *Calculadora Raster* para o índice NDWI e posteriormente uma imagem binária do índice MNWI eliminando todos os *pixels* com valores menores que zero, restando apenas o que corresponde a máscara de água, convertendo-se posteriormente em formato vetorial.

A avaliação do desempenho da aplicação dos índices NDWI e MNDWI foi realizada com base nos parâmetros estatísticos: mínimo, máximo, média, desvio padrão, coeficiente de correlação (r), e interpretação visual das imagens. Para o processamento das imagens, obtenção dos índices NDWI e MNDWI, cartas georreferenciadas, extração dos momentos estatísticos dos índices e coleta de pontos amostrais para análise foi utilizado o software de livre acesso QGIS versão 3.12.1.

Como método de descrever o comportamento da distribuição da precipitação pluvial e seus efeitos no armazenamento de água, a Figura 8 detalhou a distribuição mensal da precipitação nos meses de junho a dezembro.

Figura 2 - Dados pluviométricos mensais na área de estudo.



Fonte: APAC (2020)

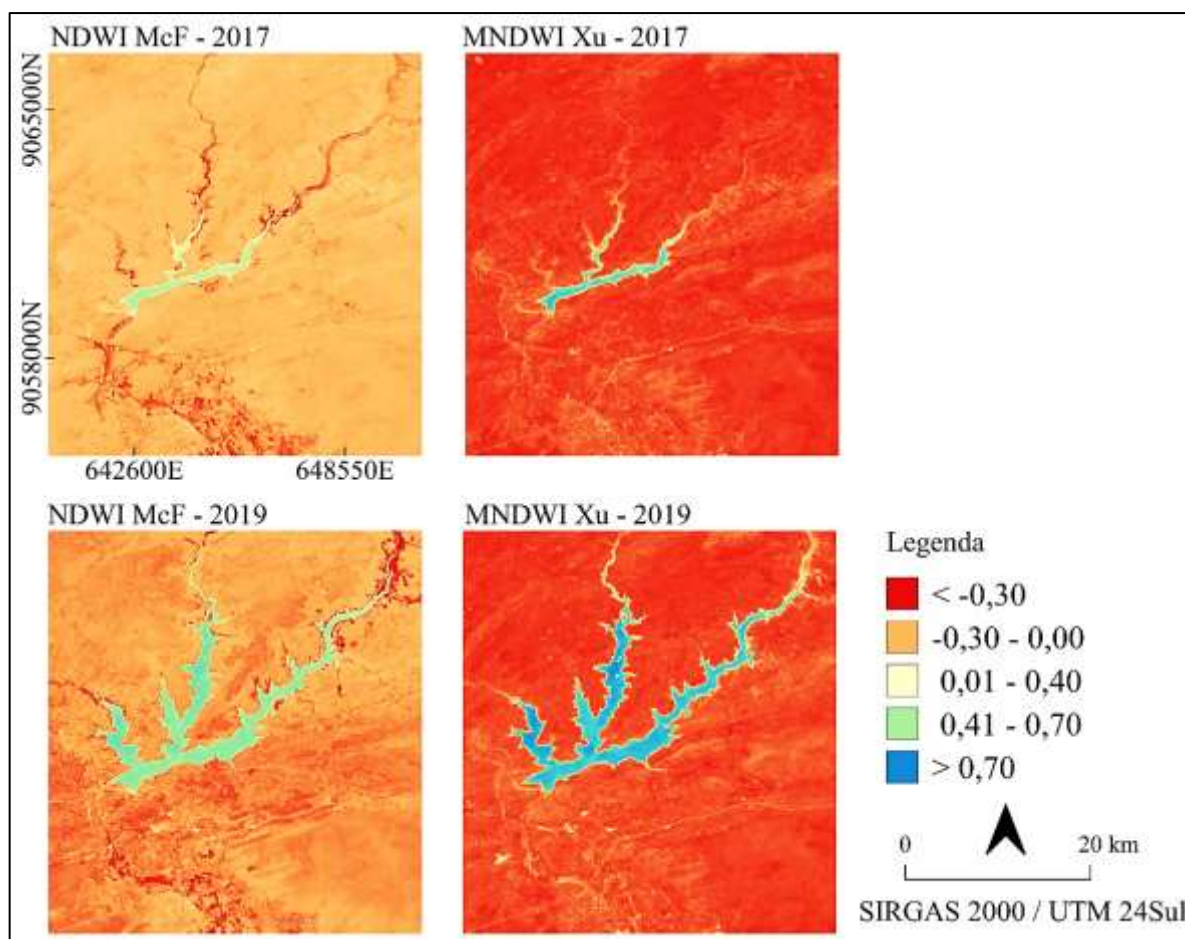
No que concerne as precipitações diárias, foram registradas apenas nos dias 23 e 24/12/2017 totalizando 49,2 mm evidenciados na Figura 8. A análise realizada para o ano 2017, demonstrou que ao longo dos meses (junho a dezembro) houve um decréscimo nos valores pluviométricos, constatando baixo índice de precipitação em Ibimirim – PE – Brasil.

De acordo com os dados explícitos de 2019, foi verificada uma diminuição ao longo dos meses, exceto no mês de novembro que conforme os dados pluviométricos diários foi registrado o total de 60 mm apenas no dia 26/11/2019. Vale salientar que tais informações refere-se a dias antes da passagem do imageamento na área de estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela visualização geoespacializada dos índices NDWI e MNDWI (Figura 9) foi possível evidenciar as feições hídricas do Açude Poço da Cruz, pois apresentaram maior realce em relação a outras feições, sendo geralmente os únicos alvos representados pelos maiores valores positivos dos pixels.

Figura 3 - NDWI e MNDWI no Açude Poço da Cruz Ibimirim-PE.



Fonte: Autores.

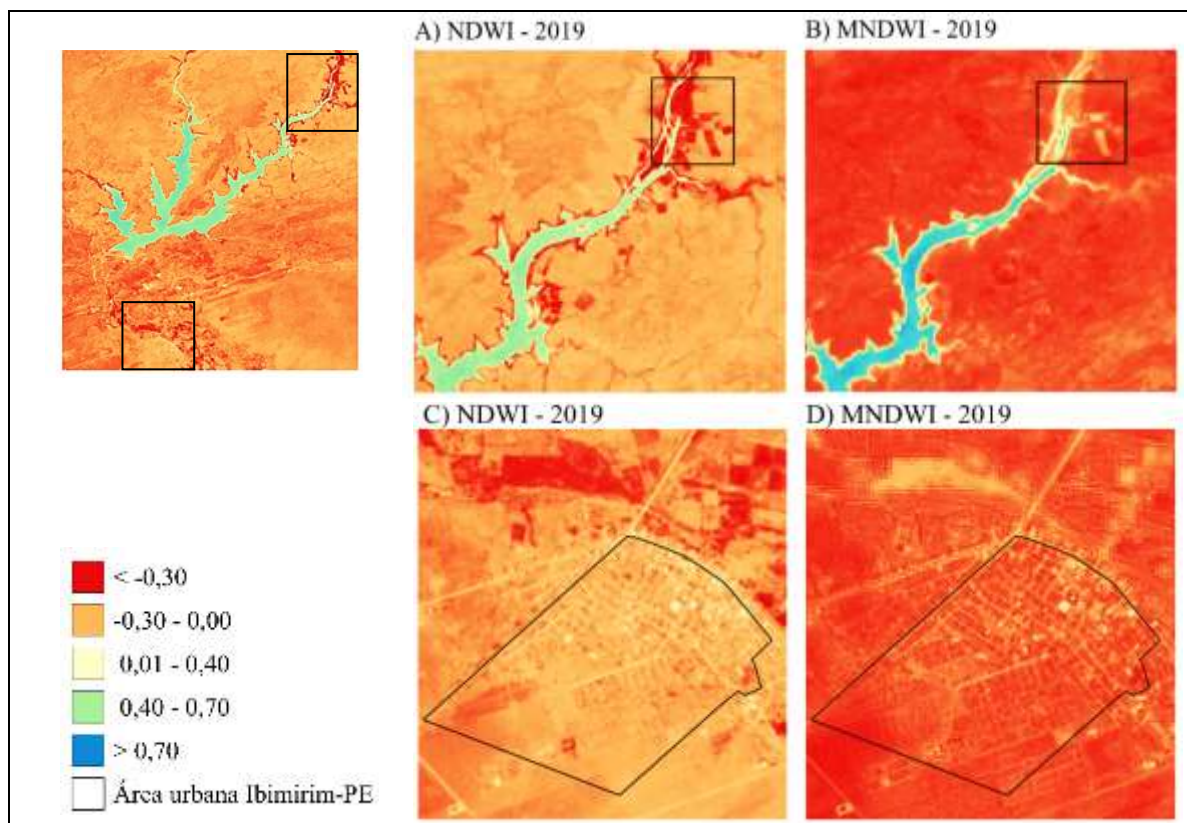
Ao analisar o comportamento entre os índices espectrais de água, foi constatado que a maioria dos valores de NDWI detectados no açude Poço da Cruz foi maior que 0,40. Enquanto para o MNDWI, o corpo hídrico foi representado por pixels com valores maiores que 0,70. Pesquisas realizadas por Du *et al.* (2016), demonstraram comportamento semelhante quando encontraram os valores de NDWI e MNDWI no trecho do litoral de Veneza - Itália. De acordo com os autores, a pesquisa constatou que a maioria dos valores de NDWI dos corpos d'água foi maior que 0,50, enquanto o MNDWI, a maioria dos valores foi superior a 0,80.

Para melhor interpretação visual da vegetação na área estudada, recortou-se um trecho de transição água-vegetação (lado superior direito da Figura 9) tomando como base a imagem referente ao ano 2019, como detalhou a Figura 10. Ficou evidenciado que o NDWI, a vegetação detectada no entorno do açude (cor vermelha) compreendeu valores abaixo de -0,30 (Figura 10A).

Corroborando com o presente estudo, Pereira *et al.* (2018) investigando o comportamento do NDWI pelo método McFeeters em áreas continentais brasileiras, concluíram que áreas com

presença de vegetação atingiram valores que variaram nas classes de -1,00 a -0,50. Os autores constataram ainda que a vegetação, assim como a água, foi o único alvo, dentro desta faixa de valores, que não exibiu confusão espectral em relação a outros alvos.

Figura 4 - Recorte em trecho de transição água-vegetação no Açude Poço da Cruz Ibimirim.



Fonte: Autores.

Os valores MNDWI (Figura 10B) foram mais positivos (tons mais claros) para as características da mata ciliar no entorno do açude, onde evidenciaram-se pixels de vegetação mesclada com água, isso decorre ao fato de que a banda do infravermelho próximo (NIR) não é utilizada para processamento do MNDWI, constatando que o NDWI melhor identifica o alvo vegetação.

Esses resultados demonstraram que MNDWI é mais sensível às características da água mesclada com vegetação (mata ciliar) do que NDWI. Análises semelhantes foram encontradas no estudo desenvolvido por Singh *et al.* (2015) quando avaliaram os índices NDWI e MNDWI em áreas alagadas em Punjab - Índia.

A respeito do NDWI para detecção de área sem presença de água deve-se analisar com mais detalhes acerca dos valores encontrados, pois alvos que não correspondem à água como solo úmido, solo exposto, área construída e vegetação rasteira, apresentam confusão espectral,

sendo registrados casos em que um mesmo valor digital corresponde aos diferentes alvos citados (PEREIRA *et al.*, 2018).

Na Figura 10C notou-se que o perímetro da área urbana está inserido principalmente no intervalo de 0,01 - 0,40 denotando que o NDWI > 0 pode representar outras feições. Este comportamento corrobora com diversos estudos que constataram que o NDWI é sensível às áreas construídas e frequentemente pode ocasionar em corpos d'água superestimados (DU *et al.*, 2016).

Quando se compararam os *pixels* das áreas construídas (Figura 10 – Ibimirim - PE) observou-se que os valores de MNDWI são menores do que os valores de NDWI, pois os valores de refletância na banda infravermelho médio são maiores que os valores de reflectância na banda do infravermelho próximo (DU *et al.*, 2016). Diversas pesquisas demonstraram que o MNDWI é mais adequado para aprimorar as informações da água e pode extrair corpos de água com maior precisão do que o NDWI (XU, 2006; LI *et al.*, 2013; DU *et al.*, 2014; SINGH *et al.*, 2015).

Outro importante detalhe foi que o MNDWI apresentou valores negativos (tom de vermelho) nos alvos terrestres diferentes de água, indicando que a confusão espectral evidenciada na imagem NDWI foi suprimida ou mesmo removida na imagem MNDWI. Isso decorre do fato de que a imagem do MNDWI evidenciou os recursos hídricos e removeu o ruído de áreas construídas misturados com água, pois a mesma absorve mais luz na região SWIR do que no NIR e isso resultará em maiores valores positivos (maior valor da banda 2 e menor valor da banda 5) de MNDWI para recursos hídricos (SINGH *et al.*, 2015). Por isso, o MNDWI é pertinente em pesquisas conjuntas ao NDWI, pois no âmbito científico, o MNDWI supera as deficiências do NDWI.

No que concerne as diferenças encontradas em relação a avaliação espaço-temporal entre os índices (Tabela 4), foram descritos resultados dos parâmetros estatísticos do NDWI e MNDWI.

Tabela 2 - Valores estatísticos do NDWI e MNDWI das imagens estudadas.

Imagem	Índice	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	Coeficiente Correlação (r)
27/12/2017	NDWI	-0,478	0,155	0,364	0,182	0,81
	MNDWI	-0,362	0,153	0,572	0,274	
07/12/2019	NDWI	0,255	0,408	0,483	0,027	0,87
	MNDWI	0,451	0,580	0,684	0,036	

Fonte: Autores.

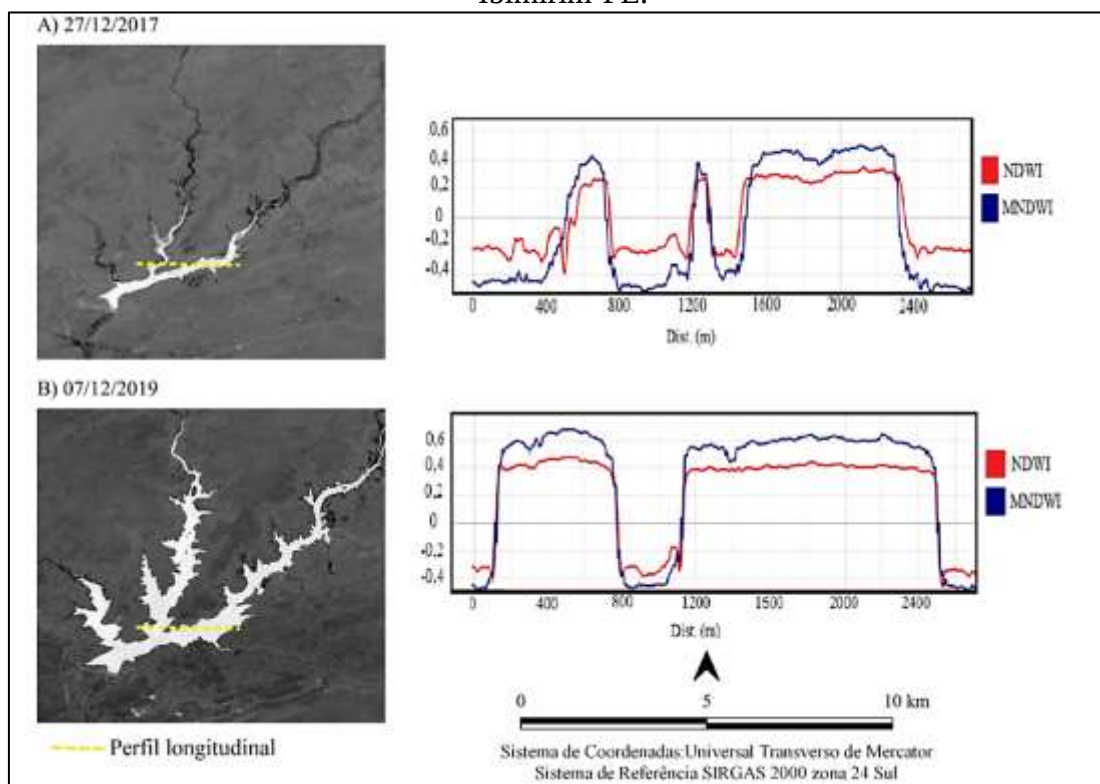
Observou-se que os valores de NDWI variaram -0,478 a 0,364 e, -0,362 a 0,572 para o MNDWI no mês de dezembro/2017. Já para dezembro/2019, os valores variaram 0,255 a 0,483 para o NDWI e MNDWI atingiram intervalos de 0,451 a 0,684.

Também, foi gerada uma matriz de correlação entre as respectivas imagens dos índices de água obtidas, permitindo a análise comparativa entre os métodos NDWI e MNDWI através do coeficiente de correlação de Pearson (r). Este parâmetro estatístico é utilizado para avaliar o grau de correspondência linear entre o NDWI e o MNDWI, variando de -1 (correlação negativa perfeita) a +1 (correlação positiva perfeita), como mostrado na Tabela 4.

Ao observar o comportamento do coeficiente de correlação (r) entre os índices NDWI e MNDWI (Tabela 4), ficou explícito que ambos obtiveram valores de “r” superiores a 0,80, onde foi possível afirmar que os dados comparados possuem uma forte correlação.

Para auxiliar na análise entre os índices espectrais para o delineamento das máscaras de água, foi elaborado o perfil longitudinal georreferenciado (Figura 11), no trecho do açude estudado, onde se observou o destaque maior dos valores dos pixels do MNDWI (linha azul) em relação ao NDWI (linha vermelha) na representação gráfica.

Figura 5 - Perfis transversais dos índices em trecho que corta o Açude Poço da Cruz, Ibirimir-PE.



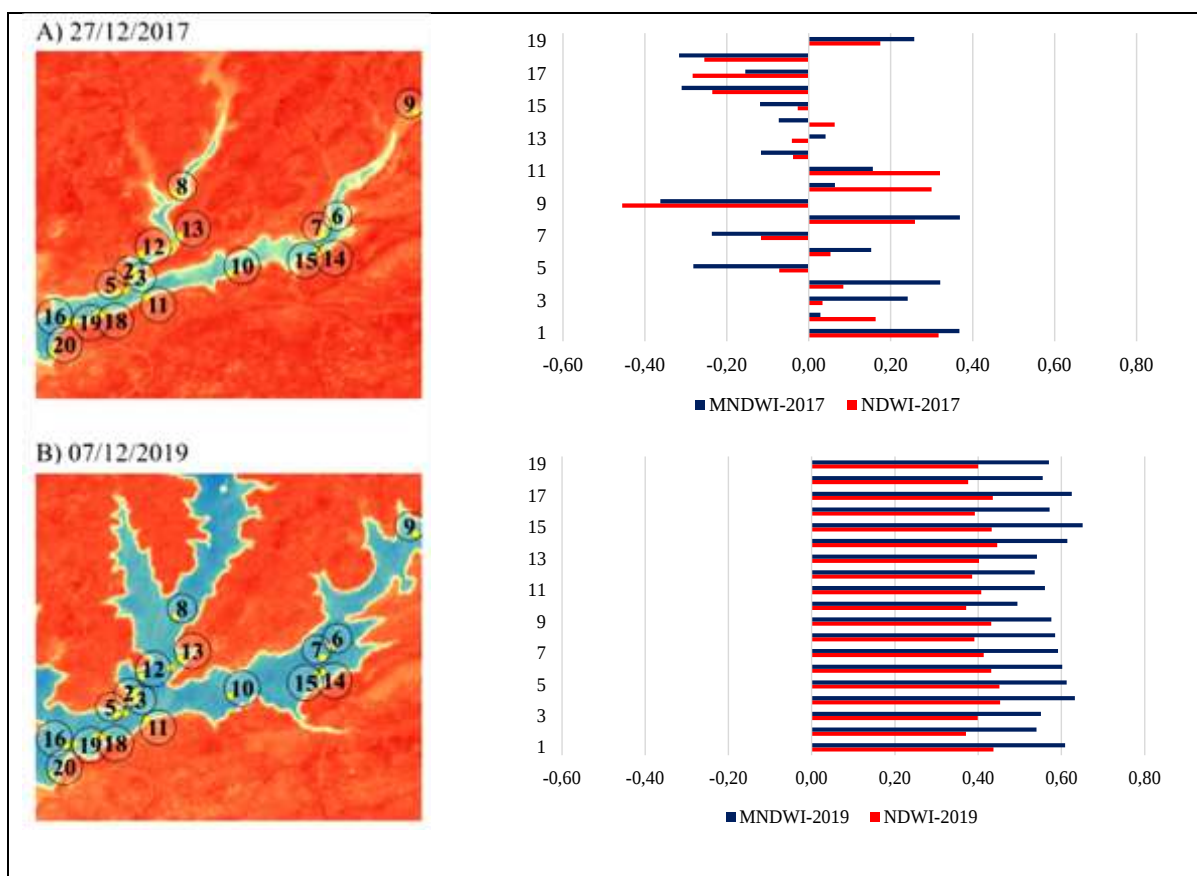
Fonte: Autores.

Em 2017, a região correspondente aos primeiros 800 metros, na linha representativa do perfil longitudinal que secciona o açude, atingiu valores de NDWI que variaram de -0,30 a 0,30; enquanto o MNDWI evidenciou *pixels* com valores -0,40 a 0,50.

Para o ano 2019, observou-se que neste mesmo trecho (0 a 800 metros), os valores aumentaram. No NDWI, este intervalo alcançou valores de -0,30 a 0,40; enquanto para o MNDWI, seus valores representaram a variação de -0,40 a 0,70. Pode-se afirmar que os valores maiores que 0 (zero) permaneceram constante, diferente de 2017 que oscilou para valores negativos na mesma localização. Logo, essa análise de *pixels* corrobora sobre a evidência que em 2019 contém mais área representando água (> 0,00) que em 2017.

Tomaram-se, para fins de avaliação mais detalhada dos índices espectrais na extração da máscara de água, 20 (vinte) alvos amostrais distintos e aleatórios, inseridos no açude Poço da Cruz e seu entorno (Figura 12). Vale ressaltar que as imagens de 2017 e 2019 estão com escalas iguais e alvos amostrais georreferenciados.

Figura 6 – Aquisição de coleta de pontos de amostragem no reservatório e seu entorno.



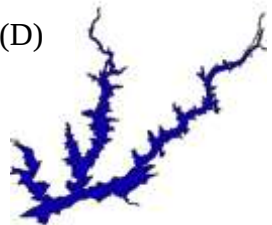
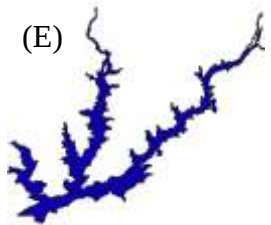
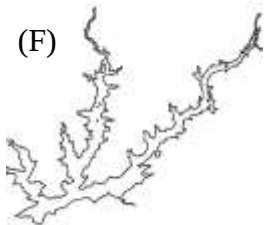
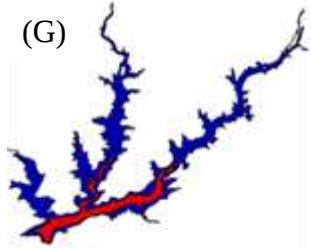
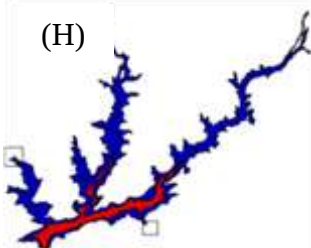
Fonte: Autores.

Na imagem que corresponde a data 27/12/2017 foram detectados pixels com valores positivos e negativos dos índices, ou seja, dentre os 20 *pixels*, 11 representaram valores de NDWI e MNDWI negativos (< 0), evidenciando que neste ano áreas alagadas estavam atingindo valores que representam vegetação e solo exposto, assim constatando menor área superficial do açude (Figura 12A).

No que concerne a data 07/12/2019, todos os pixels enumerados de 1 a 20 detectaram ($\text{NDWI} > 0$) e ($\text{MNDWI} > 0$), ou seja, maior área com presença de água no Açude Poço da Cruz que o ano anteriormente citado (Figura 12B). Um dos fatores que contribuíram para este aumento foi o quantitativo precipitado na região. Conforme os dados pluviométricos, foi registrado o total de 60 mm apenas no dia 26/11/2019, data esta que antecede o dia do imageamento realizado em dezembro.

Com a extração dos pixels representativos com $\text{NDWI} > 0$ e $\text{MNDWI} > 0$ foi possível, em termos de valor quantitativo, estimar a área superficial do Açude Poço da Cruz em distintos anos para ambos os índices espectrais de água (Figura 13).

Figura 7 – Máscara de água do reservatório Poço da Cruz - PE derivados dos índices NDWI e MNDWI.

Período	NDWI	MNDWI	Diferença entre áreas
27/12/2017	(A) 	(B) 	(C) 
Área (ha)	130,06	121,11	8,95 = 6,9%
07/12/2019	(D) 	(E) 	(F) 
Área (ha)	708,89	691,19	17,70 = 2,5%
	(G) 	(H) 	 Poço da Cruz (27/12/2017) Poço da Cruz (07/12/2019)

Fonte: Autores.

De acordo com os dados apresentados, a área estimada a partir do NDWI (13A) em 2017 atingiu 130,06 hectares, enquanto o MNDWI (13B) detectou como água apenas 121,11 hectares, isto é, o MNDWI melhor separou o alvo água de outros alvos presentes no entorno. Em 2019, a área detectada pelo NDWI (13D) do Poço da Cruz foi 708,89 hectares, já o MNDWI (13E) identificou apenas 691,19 hectares.

Também foi observado que o valor representado para a diferença entre as áreas atingiu 8,45 hectares para o ano 2017 (13C), representando 6,9% de diferença de área um método para outro. Enquanto em 2019 (13F) apresentou maior área superficial atingindo 17,70 hectares (2,5%). Conforme a configuração dada pela sobreposição da extração de água a partir dos índices nos anos estudados, constatou-se visualmente um acréscimo do espelho d'água do açude de 2017 para 2019. Corroborando com estudos realizados por Ariza *et al.* (2014), que

comprovaram a potencialidade do índice MNDWI comparado ao NDWI, quando investigaram aplicação do MNDWI na extração da lâmina de água de regiões afetadas por inundações.

CONCLUSÕES

Os índices espectrais NDWI e MNDWI mostraram-se com efetiva ferramenta para extração da máscara de água do Açude Poço da Cruz em Ibimirim – PE – Brasil, evidenciando a distribuição espacial dinâmica hídrica entre 2017 e 2019, podendo auxiliar em tomadas de decisões voltadas ao monitoramento ambiental.

A análise do mapeamento dos índices estudados com a exclusão dos valores abaixo de zero e, observando o contexto geral da área, tornou-se um resultado de rápida interpretação da máscara de água e ficou evidenciado que o índice MNDWI melhor representou o delineamento do corpo hídrico em relação ao índice NDWI.

A partir destes índices utilizados, foi possível detectar a diferença da delimitação do açude Poço da Cruz nos dois anos estudados e explicitar a importância das geotecnologias como ferramenta técnica que pode auxiliar o monitoramento de feições hídricas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo a pesquisa e concessão de bolsa de Pós-Graduação da primeira autora, ao Projeto de Pesquisa intitulado "Coberturas vegetal e hídrica de bacias hidrográficas utilizando imagens orbitais no estado de Pernambuco", aprovado na Chamada Universal MCTIC/CNPq 2018 - FAIXA A, processo nº 433914/2018-1, da segunda autora. Ao *United States Geological Survey (USGS)* pela aquisição da imagem de satélite; a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) pelo banco de dados hidrológicos.

REFERÊNCIAS

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Climas. Sistema de Informação Geográfica. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/>>. Acesso: novembro de 2020.

ARAÚJO, S.M.S. A Região Semiárida do Nordeste do Brasil: Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos. **Revista Rios Eletrônica**. Ano 5, n.5, pp. 90-98, 2011.

ARIZA, A. Descripción y Corrección de Productos LandSat 8 LDCM (LandSat Data Continuity Mission), versión 1.0. **Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF)**: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Colombia, 2013.

BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M.; MARTINS, V.S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações**. 1ª edição. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 161p., 2019.

BEZERRA, U.A; OLIVEIRA, L.M.M.; CANDEIAS, A.L.B.; SILVA, B.B.; LEITE, A.C.S; SILVA, L.T.M.S; Comparativo do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) entre os Sensores OLI - Satélite Landsat-8 e MSI – Satélite Sentinel-2 em Região Semiárida. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. Vol. 41 – 3, p. 167-177, 2018.

DRUSCH, M.; BELLO, U.D.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.; MEYGRETC, A.; SPOTOA, A.F.; SYA O.; MARCHESED F. & BARGELLINID P.. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. **Remote Sensing of Environment**, 120: 25–36, 2012.

DU, Z.Q.; LI, W.B.; ZHOU, D.B.; TIAN, L.Q.; LING, F.; WANG, H.L.; GUI, Y.M.; SUN, B.Y. Analysis of Landsat-8 OLI imagery for land surface water mapping. **Remote Sensing Lett.**, 5, 672–681, 2014.

DU, Y., ZHANG, Y., LING, F., WANG, Q., LI, W., LI, X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. **Remote Sensing**, 8(4). <https://doi.org/10.3390/rs8040354>, 2016.

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

JIANG, H., FENG, M., ZHU, Y., LU, N., HUANG, J., XIAO, T. An automated method for extracting rivers and lakes from Landsat imagery. **Remote Sensing**, 6(6), p. 5067–5089. <https://doi.org/10.3390/rs6065067>, 2014.

LI, W.B.; DU, Z.Q.; LING, F.; ZHOU, D.B.; WANG, H.L.; GUI, Y.M.; SUN, B.Y.; ZHANG, X.M. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM plus and ALI. **Remote Sensing**, 5, 5530–5549, 2013.

MCFEETERS, S. K. . The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, 17(7), p. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>, 1996.

MCFEETERS, S.K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. Journal Remote Sensing*, 17, 1425–1432, 1996.

NAMIKAWA, L. M., KÖRTING, T. S., CASTEJON, E. F. Water body extraction from Rapideye images: an automated methodology based on hue component of color transformation from RGB to HSV model. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(6), 1097–1111, 2016.

OLIVEIRA, L.V; NEGRI, R.G.; SANTOS, L.B. Análise de técnicas de detecção de mudança para mapeamento de desastres com uso de dados de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Cartografia*. Vol. 72, n. 1. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72n1-51447>, 2020.

PADOVANI, N.G.; LOPES, E.R.; SOUZA, J.C.; MORAIS, M.C.M.; LOURENÇO, R.W. Análise Espacial da Temperatura e Albedo de Superfície na Bacia Hidrográfica do rio Una – Ibiúna/São Paulo, a partir de imagens MODIS. *Revista Brasileira de Geografia Física* v. 11 n. 5. pp. 1832-1845, 2018.

PENHA, T.V.; PLETSCH, M. A.S.; SILVA JUNIOR, C.H.L.; KÖRTING, T.S.; FONSECA, L.M.G.; Detecção e delimitação automática de corpos hídricos em imagens Sentinel-2: uma proposta de integração do algoritmo Fmask aos índices espectrais NDWI e MNDWI. XVIII **GEOINFO**, p340-345, Salvador, BA, 2017.

PEREIRA, L.E.; AMORIM, G.; GRIGIO, A.M.; PARALHOS, A.C. Análise Comparativa entre Métodos de Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) em Área Úmida Continental. **Anuário do Instituto de Geociências**, pp. 654-662, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_654_662.

ROKNI, K., AHMAD, A., SELAMAT, A., HAZINI, S. water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery. *Remote Sensing*, 6(5), 4173–4189. [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/RS6054173](https://doi.org/10.3390/RS6054173), 2014.

SINGH, K.V.; SETIA, R.; SAHOO, S.; PRASAD, A.; PATERIYA, B. Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level. *Geocarto* ,v.30, 650–661, 2015.

SOTHE, C.; ALMEIDA, C.; LIESENBERG, V.; SCHIMALSKI, M. Evaluating Sentinel-2 and Landsat-8 Data to Map Sucessional Forest Stages in a Subtropical Forest in Southern Brazil. *Remote Sensing*, 9(8): 838, 2017.

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

XU, Y.B.; LAI, X.J.; ZHOU, C.G. Water surface change detection and analysis of bottomland submersion-emersion of wetlands in Poyang Lake reserve using ENVISAT ASAR data. *China Environ. Science*. 2010, 30, 57–63, 2010.

ZHANG, H. K.; ROY, D. P.; YAN, L.; LI, Z.; HUANG, H.; VERMOTE, E.; SKAKUN, S.; ROGER, J. C. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. **Remote Sensing of Environment**, 215: 482-494, 2018.

ZHU, L.; WALKER, J. P.; YE, N.; RÜDIGER, C. Roughness and vegetation change detection: A preprocessing for soil moisture retrieval from multi-temporal SAR imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 225, p. 93–106. Elsevier Inc. DOI:10.1016/j.rse.2019.02.027, 2019.

4.2 ARTIGO 2 - DELIMITAÇÃO DE ÁREAS HÍDRICAS NO PERÍODO 2015-2020 UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO NA REGIÃO SEMIÁRIDA

Autores: Débora Natália Oliveira de Almeida ¹, Leidjane Maria Maciel de Oliveira ²

- ¹ Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geinformação - Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
- ² Professora do Departamento Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geinformação - Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

DELIMITAÇÃO DE ÁREAS HÍDRICAS NO PERÍODO 2015-2020 UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO EM REGIÃO SEMIÁRIDA

Débora Natália Oliveira de Almeida ¹, Leidjane Maria Maciel de Oliveira ²

Resumo: As técnicas de Sensoriamento Remoto são de fundamental importância para investigar as alterações ocorridas ao longo dos anos a fim de contribuir nas tomadas de decisões para melhor gestão ambiental e hídrica. Foi neste contexto que sucedeu a elaboração da presente pesquisa com índice espectral de água. Foram utilizadas imagens multiespectrais do satélite Landsat 8/OLI do reservatório Poço da Cruz, localizado no município de Ibimirim-PE referente ao mês de outubro dos seis anos citados (2015 – 2020). O objetivo deste trabalho foi detectar, delimitar e quantificar a área ocupada do Poço da Cruz nos últimos seis anos (2015 – 2020). Para tanto foi calculado o índice MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index). A partir do mapeamento do MNDWI gerados, foi extraído apenas os pixels representados por valores positivos, onde é detectado alvo água. Posteriormente, a imagem formato raster do MNDWI foi convertido em arquivo vetorial para quantificar área superficial do corpo hídrico. Utilizou-se o software QGIS 2.18.16 para todas as etapas de processamento digital de imagens e conexão com bancos de dados complementares para elaboração dos mapas temáticos. Diante disso, foram observadas as mudanças na distribuição espacial do Poço da Cruz e analisadas com utilização de dados de precipitação a partir do produto CHIRPS que permitiu melhor compreensão do comportamento da pluviometria na região e sua influência. As áreas calculadas constataram que o ano mais crítico do reservatório foi 2017, evidenciando a diminuição hídrica, enquanto em outubro de 2020 foi verificado com maior área em relação aos seis anos estudados. No contexto geral, pode afirmar que o índice de água permitiu o delineamento do corpo hídrico de modo satisfatório. Sendo esse conjunto de dados de área superficial do Poço da Cruz pode contribuir no monitoramento ambiental da região.

Palavras-chave: Delimitação de área. Imagens multiespectrais. MNDWI.

Abstract: Remote Sensing techniques are of fundamental importance to investigate the changes that have occurred over the years in order to contribute to decision making for better environmental and water management. It was in this context that the development of this research with a spectral index of water succeeded. Multispectral images from the Landsat 8 / OLI satellite of the Poço da Cruz reservoir, located in the municipality of Ibimirim-PE, for the month of October of the six years mentioned above were used. The objective of this work was to detect, delimit and quantify the area occupied by Poço da Cruz in the last six years (2015 - 2020). For this purpose, the MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) was calculated. From the generated MNDWI mapping, only the pixels represented by positive values were extracted, where water target is detected. Subsequently, the MNDWI raster image was converted into a vector file to quantify the surface area of the water body. The QGIS 2.18.16 software was used for all stages of digital image processing and connection with complementary databases for the preparation of thematic maps. Therefore, changes in the spatial distribution of Poço da Cruz were observed and analyzed using precipitation data from the CHIRPS product that allowed a better understanding of the behavior of rainfall in the region and its influence. The calculated areas found that the most critical year of the reservoir was 2017, showing the water decrease, while in October 2020 it was verified with a larger area in relation to the six years studied. In the general context, it can be said that the water index allowed the water body to be delineated in a satisfactory way. This set of data from the Poço da Cruz surface area can contribute to the environmental monitoring of the region.

Keywords: Area delimitation. Multispectral images. MNDWI.

INTRODUÇÃO

A água de superfície é fundamental para abastecimento humano e conservação ecológica, tornando um componente chave do ciclo hidrológico e o fator que afeta o desenvolvimento sustentável da sociedade humana e do ecossistema. Tanto a mudança climática quanto as atividades humanas têm um papel em afetar a disponibilidade de água de superfície em uma determinada área e época (LU *et al.*, 2019).

Segundo Freire (2000), a avaliação da modificação no tempo-espaço, só será possível por meio de programas sistemáticos de monitoramento que resultem em séries históricas que futuramente possam ser analisadas, para que se possam projetar cenários e definir políticas públicas que garantam o uso sustentável dos recursos hídricos. Para tanto, tornam-se necessárias adoção de ferramentas que permitam agrupar um número de informações decorrentes de estudos da variação qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos, de uma forma que possibilite a interpretação e o reconhecimento das tendências ao longo do tempo e do espaço.

A aplicação de técnicas de SR tem apresentado um grande potencial na superação da limitação espaço-temporal dos métodos tradicionais de monitoramento da água *in situ*, pois permite a aquisição de informações em diferentes escalas espaciais e temporais, favorecendo a análise estrutural dos ecossistemas aquáticos (VALÉRIO, 2009; LOPES, 2013).

Com a utilização das técnicas de SR é possível avaliar as respostas decorrentes de perturbações introduzidas pela atividade humana, de modo a prever o impacto dessas ações sobre suas condições de sustentabilidade em médio e longo prazo (NOVO, 2005). Essas técnicas são eficientes para prevenir, constatar e monitorar mudanças ocorridas no sistema aquático. Logo, o conhecimento destas alterações poderá ser gerenciado e utilizado para subsidiar parâmetros de operação dos reservatórios (NOVO, 2001; LOPES, 2013).

Diversos estudos realizados a partir de dados de SR constataram a pertinência e contribuição no que concerne a geoespacialização e avaliação de mudanças na dinâmica das águas superficiais, sendo eles conjuntos de dados regionais e globais (VERPOORTER *et al.*, 2014; KLEIN *et al.*, 2014; FENG *et al.*, 2015; TULBURE *et al.*, 2016).

Também foi observado que informações confiáveis sobre a distribuição espacial das águas superficiais abertas são extremamente importantes em várias áreas científicas, como a avaliação dos recursos hídricos presentes e futuros, modelos climáticos, adequação da agricultura, dinâmica dos rios, inventário de zonas úmidas, análise de bacias hidrográficas, levantamento e gestão de águas superficiais mapeamento de inundações e monitoramento do ambiente (DESMET e GOVERS, 1996; SUN *et al.*, 2012).

Diante de diversas técnicas, tem-se os métodos multibanda que combinam diferentes bandas reflexivas para melhorar a extração de água de superfície (DU *et al.*, 2012). Por exemplo, o MNDWI que extrai água de superfície enquanto suprime erros de terrenos construídos, bem como vegetação e solo (XU, 2006). A detecção de mudanças na água de superfície geralmente é conduzida pela extração das características da água individualmente das imagens de satélite de várias datas, antes de fazer comparações para detectar suas mudanças (XU, 2006; ALESHEIKH, GHORBANALI e NOURI, 2007; LOPÉZ-CALOCA, TAPIA-SILVA e ESCALANTE-RAMIREZ, 2008; XU, LAI, ZHOU, 2010; EL-ASMAR & HEREHER, 2011; ZHOU, HONG, HUANG, 2011; DU *et al.*, 2012; ROKNI *et al.*, 2014).

Em nível global, tem-se estudos desenvolvidos por Pekel *et al.*, (2016) que quantificaram as mudanças nas águas superficiais globais (GSW) ao longo dos últimos 32 anos (1984- 2015) com resolução de 30 m usando as imagens Landsat. Enquanto Klein *et al.* (2017) estimaram áreas superficiais a partir de um conjunto de dados globais diários de 250 m de corpos d'água interiores com base em uma combinação das classificações diárias MODIS Terra e Aqua.

Taravat *et al.*, (2016) que pesquisaram as alterações ocorridas entre os anos 2000 e 2013 nos lagos Urmia, Sevan e o Van situados respectivamente no Irã, Armênia e Turquia e constataram a eficiência de extração de água a partir de imagens orbitais aplicando índices de

água corroborando para o monitoramento desses corpos hídricos que são relevantes para população que vivem no entorno.

Na China, vários estudos de caso regionais foram realizados e produziram conjuntos de dados de águas superficiais, em áreas piloto (DU *et al.*, 2012; LAI *et al.*, 2013; LUO *et al.*, 2017). Sua pesquisa se concentrou principalmente em lagos no planalto tibetano (LU *et al.*, 2017). Os grupos de pesquisa têm-se concentrado nas mudanças da água do lago nesta região e produziram conjunto de dados em 10 em 10 anos da água da superfície do lago desde 1960 (SONG *et al.*, 2014; WAN *et al.*, 2016; ZHANG, LI, ZHENG, 2017; LU *et al.*, 2019).

No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2020) vem desempenhando projetos que contemplam conjunto de dados acerca de variações de áreas superficiais ocorridas nos reservatórios na região Nordeste do país, por consequência das frequentes incidências de seca sofridas ao longo dos anos.

Também as técnicas de SR vêm se destacando em estudos hidrológicos globais, no monitoramento do clima, em especial no registro da precipitação pluvial (ALMEIDA *et al.*, 2015). Diversos estudos desenvolvidos utilizaram bases de dados provenientes de estações meteorológicas e produtos de satélite para analisar a acurácia das estimativas de precipitação (ERAZO *et al.*, 2018; CORRÊA, 2020).

Em consonância ao monitoramento de águas superficiais, a precipitação é um dos fatores que influenciam as variações ocorridas nesses espaços, principalmente quando se trata da Região Semiárida. Recursos como produtos de sensores orbitais, algoritmos interpoladores e modelos atmosféricos são cada vez mais necessários para a representação da precipitação em áreas onde não se dispõe da observação da precipitação ou é deficitária em estações pluviométricas, se tornando uma opção para estudos climáticos para regiões tropicais e subtropicais do território brasileiro (BAYISSA *et al.*, 2017).

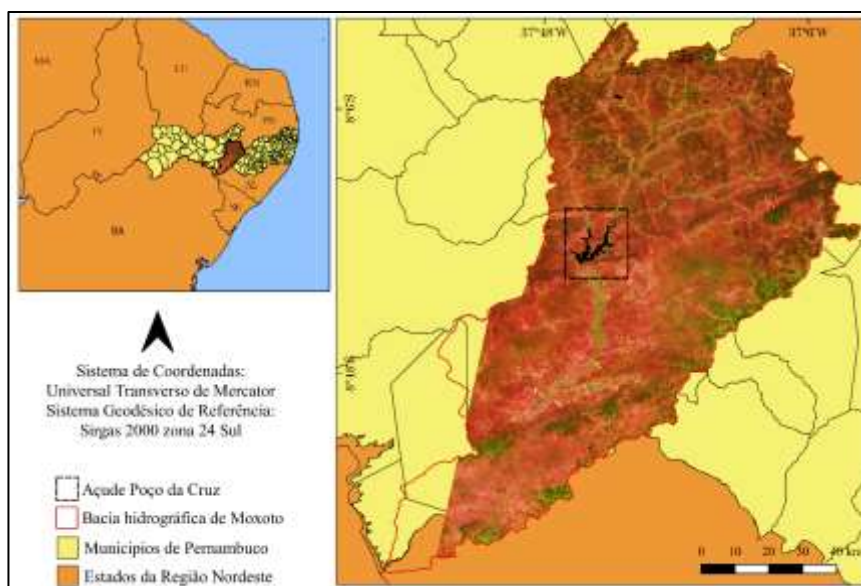
Diante do exposto, o artigo tem como objetivo elaborar o conjunto de dados espaço-temporais de águas superficiais do reservatório Poço da Cruz, situado no município de Ibimirim-PE, durante o período de 2015 a 2020 a partir de imagens do Landsat-8/OLI integrando com medições de precipitação do produto CHIRPS, onde o mapeamento dessas áreas pode contribuir para o melhor gerenciamento de suas atividades.

METODOLOGIA

Área de estudo

A área de estudo que compreende o município de Ibimirim-Pernambuco, como detalha a Figura 14, está localizado na área central da bacia hidrográfica do Rio Moxotó. Esta bacia possui área total de 9.752,71 km², que em maior extensão encontra-se no Estado de Pernambuco. Sua parte em Pernambuco está inserida na Unidade de Planejamento Hídrico UP8 e tem sua localização entre 07° 52' 21" e 09° 19' 03" de latitude sul, e entre 36° 57' 49" e 38° 14' 41" de longitude oeste (APAC, 2020).

Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: Autores.

O açude público Engenheiro Francisco Saboia, comumente chamado por Poço da Cruz, é o maior reservatório do estado de Pernambuco e a principal fonte hídrica para a irrigação do Perímetro Irrigado Moxotó. Ele está inserido como um dos reservatórios contemplados no Projeto de Integração do Rio São Francisco (ANA, 2020).

Programa Landsat 8/OLI

O satélite Landsat 8, foi lançado no dia 11 de fevereiro de 2013 e começou a transmitir imagens no dia 18 de março, sendo que, apenas no dia 12 de abril, atingiu a sua órbita final a 705 km acima da terra. É um satélite dos Estados Unidos da América e tem como objetivo observar a terra. É o oitavo da série de satélites do Programa Landsat e o sétimo a alcançar com sucesso a órbita terrestre. O *United States Geological Survey* (USGS) é o responsável por toda aquisição, armazenamento e processamento das imagens.

Processamento digital de imagens

A imagem de satélite LANDSAT 8/OLI que contempla a área de estudo, foi adquirida através do catálogo de imagens orbitais no *site* do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), da órbita 215, Ponto 66. As bandas utilizadas para obter o MNDWI são as do verde, infravermelho próximo e infravermelho médio, que correspondem no sensor OLI as Bandas 3 e 6, as quais foram processadas no *software* de livre acesso QGIS - versão 2.18.19 com projeção UTM e Sistema Geodésico de referência SIRGAS 2000. As imagens utilizadas correspondem ao período seco (mês de outubro) referentes aos anos 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 e 2020.

O cálculo da reflectância monocromática foi feito com as bandas correspondentes do sensor OLI utilizadas no estudo, as quais foram convertidas para reflectância planetária a partir do coeficiente de reescalonamento de reflectância informado no arquivo metadados da imagem (MTL file), utilizando a Equação 10.

$$\rho'_{\lambda} = M_{\rho} * Q_{cal} + A_{\rho} \quad (10)$$

em que: ρ'_{λ} i é a reflectância planetária sem a correção do ângulo solar; M_{ρ} i é o fator multiplicativo de cada banda, encontrado no arquivo metadados (REFLECTANCE_MULT_BAND_i); A_{ρ} é o coeficiente de adição encontrado no arquivo metadados (REFLECTANCE_ADD_BAND_i); i refere-se ao número da banda; Q_{cal} são os números digitais correspondentes a cada banda da imagem.

Para o sistema sensor OLI Landsat 8, o processamento das imagens se deu em conformidade com Silva *et al.* (2016), para conversão dos valores em nível de cinza (ND) para reflectância espectral, utilizou-se coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens USGS (2020). Para tanto, os números digitais de cada pixel e banda, foram convertidos para reflectância planetária a partir de fatores aditivo e multiplicativo, reportados no ficheiro de metadados da imagem. No entanto, é necessário corrigir a reflectância de acordo com o ângulo zenital solar - Z e o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol na data da obtenção da imagem orbital - dr (obtido com base na distância Terra-Sol - d_{TS} , disponível no arquivo metadados da imagem, em unidade astronômica), de acordo com as Equações 11 e 12 (ARIZZA, 2013; SILVA *et al.*, 2016; USGS, 2016).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{(A_{\rho i} + M_{\rho i} \cdot ND_i)}{\cos Z \cdot d_r} \quad (11)$$

$$d_r = \left(\frac{1}{d_{TS}} \right)^2 \quad (12)$$

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

O *Modified Normalized Water Difference Index (MNDWI)*, Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado, é projetado para (1) maximizar a refletância da água usando comprimentos de onda verdes; (2) minimizar a baixa refletância do NIR pelas características da água; e (3) aproveitar a alta refletância do NIR pelas características da vegetação e do solo. Como resultado, as características da água têm valores positivos e, portanto, são melhoradas, enquanto a vegetação e o solo geralmente têm valores zero ou negativos e, portanto, são suprimidos. Logo, o MNDWI foi expresso da seguinte forma (XU, 2006):

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \quad (13)$$

onde: ρ_{SWIR1} é a refletância em uma banda de infravermelho médio. O cálculo do MNDWI produzirá três resultados: (1) a água terá maiores valores positivos do que no NDWI, uma vez que absorve mais luz MIR do que a luz NIR; (2) terrenos construídos terão valores negativos como mencionado acima; e (3) o solo e a vegetação ainda terão valores negativos, uma vez que o solo reflete a luz MIR mais do que a luz NIR (JENSEN, 2004) e a vegetação reflete a luz MIR ainda mais que a luz verde.

Quantificação das áreas do reservatório Poço da Cruz -PE

O cálculo do índice MNDWI, empregando a Equações 3, resultou em *rasters* cujos valores variam de 1 a -1, sendo que os valores positivos representam *pixels* preenchidos por água, enquanto os valores negativos representam *pixels* não preenchidos por água. Para a

quantificação da área ocupada por corpos d'água, os rasters com valores calculados do MNDWI foram transformados em *shapefile* de pontos.

A quantificação da área ocupada pelos reservatórios de água foi efetuada pela ponderação entre a quantidade de pontos e a área do pixel, sendo 900 m² MNDWI, por causa da resolução espacial do Landsat-8/OLI corresponder a 30 metros. A área total ocupada pelos reservatórios de água foi determinada pela Equação 4:

$$Area = \sum n.Xm^2 \quad (14)$$

Onde $\sum n$ é o número de pontos considerados como água e Xm^2 representa a área do *pixel*, sendo 900 m² para MNDWI em imagens Landsat 8/OLI.

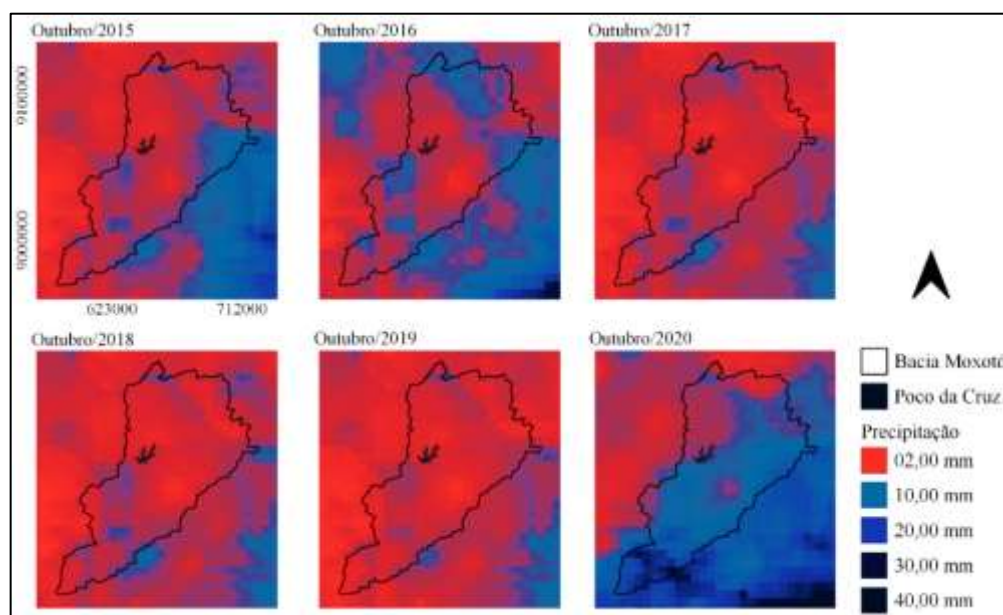
A técnica de extração de características de água a partir do índice MNDWI, foi empregada para modelar as mudanças espaço-temporais do reservatório Poço da Cruz- PE no período de 2015-2020 usando o Landsat-8/OLI. Para tanto, o índice selecionado foi calculado, analisado e classificado de forma independente (usando limiares específicos de imagem) para extrair a área da superfície do reservatório em cada ano. Finalmente, os mapas gerados foram sobrepostos para produzir o mapa de alterações da área da superfície do açude no período de 2015-2020.

Análise de precipitação com produto CHIRPS

Foram utilizados dados mensais, referente ao mês de outubro, de precipitação pluvial média do satélite CHIRPS correspondente a delimitação da bacia do Moxotó, onde está inserido o reservatório Poço da Cruz. O processamento permitiu avaliar o comportamento da precipitação na região no período de 2015 a 2020. Conforme a Figura 15, foi observado que onde está situado o reservatório os valores médios atingiram o intervalo de 2,00 mm (representado pelo tom vermelho) a 10,00 mm (representado pelo tom azul claro) ao longo dos seis anos estudados.

Em paralelo com os registros dos dados do CHIRPS, no Estado de Pernambuco, o mês de outubro é considerado um dos mais secos, sendo que em outubro de 2017 foi inferior a 25,00 mm na Zona da Mata e Litoral, inferior a 10,00 mm no Agreste e não houve registros de precipitação no Sertão. A ausência de precipitação e de também de nuvens acarretou o aumento das temperaturas, e consequentemente, também aumento da evapotranspiração e das áreas de seca em todo estado (ANA, 2021).

Figura 2 - Série temporal dos dados do CHIRPS referente a delimitação da bacia do Rio Moxotó.



Fonte: Autores.

De acordo com os dados estatísticos descritivos, em 2017 a 2019 foram apresentados os menores valores médios (na ordem de 4,00 mm) extraídos do CHIRPS. Enquanto em 2020, foi registrado 10,00 mm, sendo o maior valor médio entre os anos estudados (Tabela 5).

Tabela 1 - Valores estatísticos dos produtos CHIRPS.

Precipitação (mm)	Máximo	Médio	Mínimo	Desvio Padrão
2015	21,00	6,00	1,50	3,30
2016	26,00	7,00	2,00	1,50
2017	11,00	4,50	1,30	1,55
2018	11,00	4,55	1,40	1,55
2019	11,00	4,30	1,20	2,00
2020	34,10	10,00	2,00	2,00

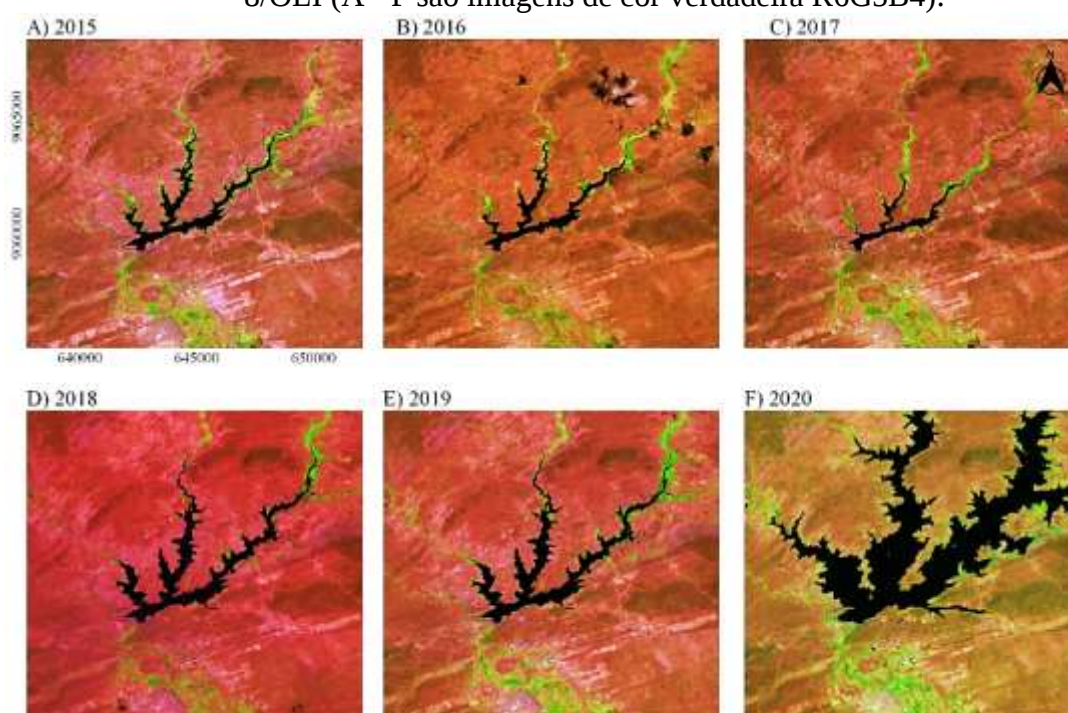
Fonte: Dados fornecidos CHIRPS (2021)

Pesquisas desenvolvidas apontam a avaliação da acurácia do CHIRPS para algumas regiões do globo como África Ocidental, o estado de Minas Gerais, Moçambique, Chile, Bacia do Adige (Itália), e nesses estudos ressaltam a confiabilidade nos dados do produto (TOTÉ *et al.*, 2015; DEMBÉLÉ e ZWART, 2016; ZAMBRANO-BIGIARINI *et al.*, 2017; NOGUEIRA, MOREIRA e VOLPATO, 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma vez que os dados de satélite necessários foram obtidos, as técnicas de pré-processamento de imagem foram realizadas para preparar as imagens para processamento posterior. Para exclusão da interferência de nuvens, foram elaboradas imagens RGB de cor verdadeira (Figura 16), o que permitiu a inspeção manual das imagens e exclusão de pontos que não se referem ao reservatório de água.

Figura 3 - Avaliação temporal do reservatório Poço da Cruz a partir de imagens Landsat-8/OLI (A - F são imagens de cor verdadeira R6G5B4).



Fonte: Autores.

No que concerne da contribuição para avaliação espaço temporal aplicada no reservatório Poço da Cruz - Ibimirim, foi calculado o *Modified Normalized Water Difference Index (MNDWI)* a partir das imagens do satélite Landsat-8/OLI disponíveis para o período. Neste sentido, as variações ocorridas permitiram identificar os anos em que a área do espelho d'água encontrou-se mais acentuado, assim como os anos que evidenciaram diminuição.

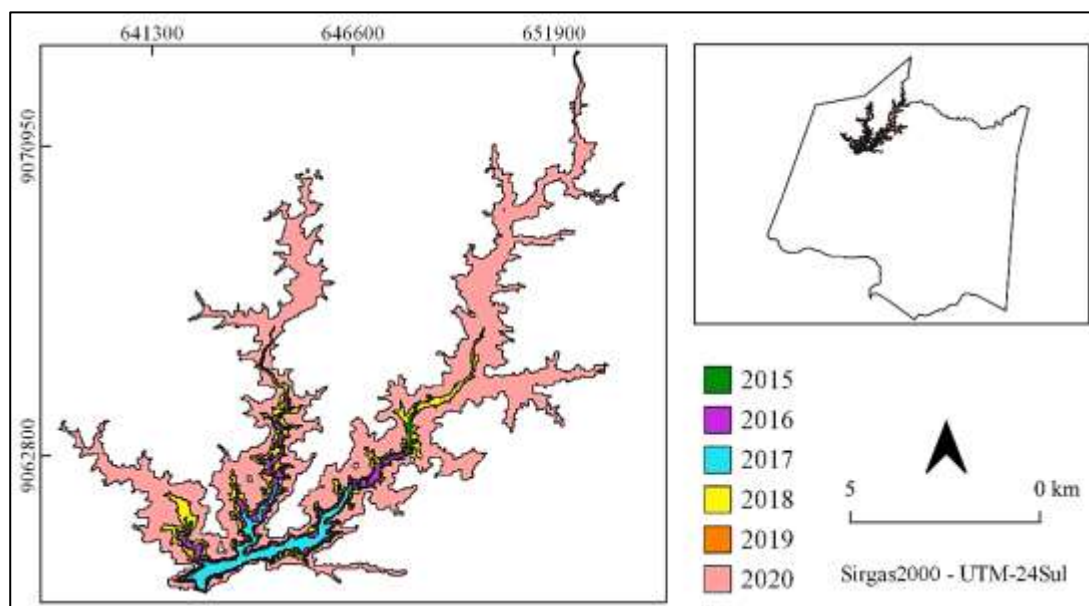
De acordo com diversas pesquisas com aplicação do MNDWI para delimitação de corpos hídricos, pode-se afirmar que este índice permite de forma satisfatória separar alvos que representam Água representados por valores mais próximos de 1. Enquanto alvos não

considerados águas evidenciaram pixels com valores negativos (MNDWI <0) como também Alvos Não-Água.

Andrade (2019) constatou a eficácia do MNWI quando realizou a análise comparativa com o NDWI para detecção de corpos hídricos a partir de imagens orbitais na bacia do rio Traipu-AL. A aplicação do MNDWI é mais adequada para aprimorar as informações da água e pode extrair corpos de água com maior precisão do que o NDWI, corroborando para escolha do índice no presente trabalho (XU, 2006; SINGH *et al.*, 2015).

Com a extração dos *pixels* representativos com MNDWI > 0 foi possível, em termos de valor quantitativo, estimar a área superficial do Açude Poço da Cruz em distintos anos para ambos os índices espectrais de água (Figura 17).

Figura 4 - Extração da máscara água no período de 2015 a 2020



Fonte: Autores.

A área de superfície do reservatório Poço da Cruz diminuiu aproximadamente 0,86 km² entre 2015 e 2016, e 1,4 km² entre 2016 e 2017. As mudanças mais intensas no reservatório Poço da Cruz foram detectadas em 2017 e 2020. Em 2017 houve uma diminuição que atingiu 1,61 km² da sua área superficial total, como detalha a Tabela 6. Em termos percentuais acerca do volume, dados fornecidos pela Agência Nacional de Águas (2020), constataram que o reservatório estava com 1,63% do seu volume útil em 2017, corroborando para o presente estudo. Dados hidrometeorológicos auxiliaram a perceber que os períodos com desvios negativos à pluviometria média climatológica coincidiram com a redução no volume do açude.

Tabela 2 - Resultados da aplicação do índice MNDWI nas imagens do Landsat8/OLI

Data	Nº de pixels de Água	Área Alagada (km²)
29/10/2015	4296	3,87
15/10/2016	3349	3,01
20/10/2017	1799	1,61
21/10/2018	7393	6,65
24/10/2019	7888	7,10
26/10/2020	38362	34,52

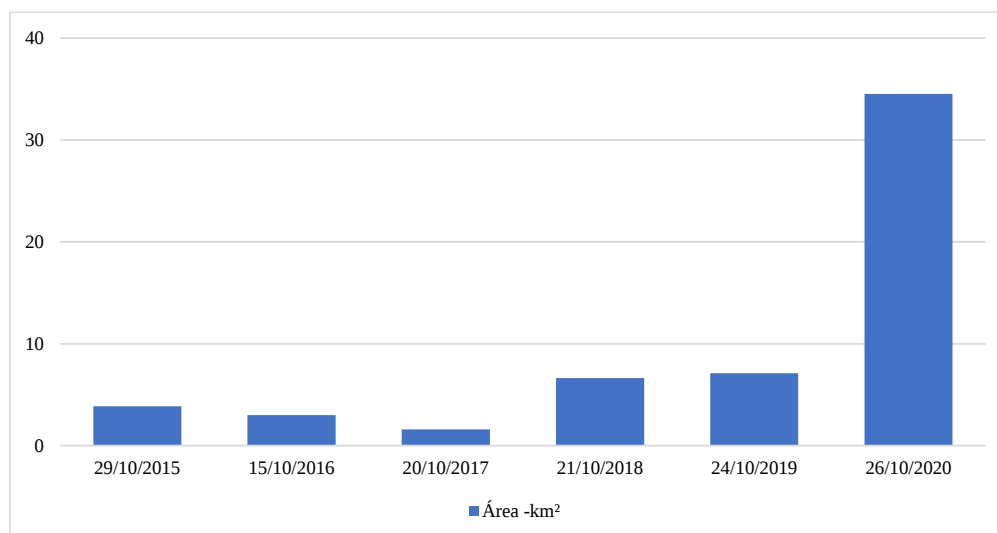
Fonte: Autores.

Diante deste cenário, evidenciou-se que os valores de MNDWI (> 0), encontrados em 2017 são menores em relação aos outros anos devido aos déficits pluviométricos ao longo dos anos (Tabela 6). De acordo com os dados fornecidos pela APAC (2020), o índice pluviométrico em outubro/2017 foi igual a zero (0,0 mm), enquanto os dados do CHIRPS estimaram aproximadamente 3,3 mm na mesma época. Também, conforme o relatório climático da Organização Meteorológica Mundial, desde 2011 a incidência de seca esteve fortemente presente no semiárido nordestino, onde culminou em 2013 a pior seca registrada nos últimos 50 anos (WMO, 2014).

Entre 2017 e 2018, conforme a Tabela 6, houve um aumento de aproximadamente 5 km² da área superficial, evidenciando a expansão de área alagada no corpo hídrico. De 2018 para 2019 não ocorreu expressiva diferença de área na distribuição espacial, mas, em termos quantitativos, foi possível observar um acréscimo de 0, 45km². Em outubro de 2020, como detalha a Figura 18, foi o ano onde a área superficial atingiu os maiores valores em comparação aos outros anos estudados. Como resultado da extração de água a partir do MNDWI, a área superficial foi 34,52km², evidenciando um notável aumento de área alagada do reservatório (Figura 18).

Estes resultados corroboram com a pesquisa desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) quando estimaram a área superficial do Poço da Cruz de 2012 a 2017 a partir de imagens de Landsat-8, em especial em 2017, que apresentou semelhança na configuração do corpo hídrico.

Figura 5 - Área (km²) do reservatório Poço da Cruz – PE nos períodos analisados.



Fonte: Autores.

CONCLUSÕES

O índice MNDWI permitiu detectar às áreas superficiais do reservatório Poço da Cruz, pois detectou as mudanças da água de superfície e proporcionou melhor delineamento do corpo hídrico entre os anos. Em conclusão, o método pode ser útil no estudo de outras águas superficiais no mundo, bem como no monitoramento de enchentes.

As informações geradas poderão ser utilizadas eficientemente como instrumento de análise e previsão junto aos órgãos ambientais competentes, formuladores de políticas e tomadores de decisões para o desenvolvimento de metodologias de preservação ambiental. Como também, fornece fundamentos de estudo para medidas mitigadoras de manejo do solo conforme os recursos hídricos disponíveis no estado de Pernambuco.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo a pesquisa e concessão de bolsa de Pós-Graduação da primeira autora, ao Projeto de Pesquisa intitulado "Coberturas vegetal e hídrica de bacias hidrográficas utilizando imagens orbitais no estado de Pernambuco", aprovado na Chamada Universal MCTIC/CNPq 2018 - FAIXA A, processo nº 433914/2018-1, da segunda autora. Ao *United States Geological Survey (USGS)* pela aquisição da imagem de satélite; a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e Agência Nacional de Água (ANA) pelo banco de dados hidrológicos.

REFERENCIAS

ALESHEIKH, A.A.; GHORBANALI, A.; NOURI, N. Coastline change detection using remote sensing. *Int. Journal Environ. Science. Technol.*, 4, 61–66, 2007.

ALMEIDA, C. T.; DELGADO, R. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; GOIS, G.; CAVALCANTI, A. S.; Avaliação das estimativas de precipitação do produto 3B43-TRMM do Estado de Amazonas. *Floresta e Ambiente*. 22 (3), <https://doi.org/10.1590/2179-8087.112114>, 2015.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso: novembro de 2020.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso: fevereiro de 2021.

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. 37 f. (Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Agrimensura) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Larfo, 2019.

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Climas. Sistema de Informação Geográfica. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/>>. Acesso: novembro de 2020.

ARIZA, A. Descripción y Corrección de Productos LandSat 8 LDCM (LandSat Data Continuity Mission), versión 1.0. **Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF)**: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Colombia, 2013.

BAYISSA, Y.; TADESSE, T.; DEMISSE, G.; SHIFERAW, A. Evaluation of Satellite Based Rainfall Estimates and Application to Monitor Meteorological Drought for the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Remote Sensing*, v. 9, n. 7, p. 669, 2017.

CHIRPS - Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data. Disponível em: <<http://www.chc.ucsb.edu/data/chirps/>>. Acesso: janeiro de 2021.

CÔRREA, K. A. B.. **Estimativa de precipitação pluvial por satélites para o estado de Mato Grosso**. Dissertação de Mestrado da Universidade de São Paulo-USP / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 61 p., Piracicaba, 2020.

DEMBÉLÉ, M.; ZWART, S. J. Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso, West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, v. 37, b. 17, p. 3995-4014, 2016.

DESMET, P.J.J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal Soil Water Conserv**, 51, 427–433, 1996.

DU, Z.; LINGHU, B.; LING, F.; LI, W.; TIAN, W.; WANG, H.; GUI, Y.; SUN, B.; ZHANG, X. Estimating surface water area changes using time-series Landsat data in the qingjiang river basin, China. **Journal Application Remote Sensing**. 2012, 6, doi: 10.1117/1.JRS.6.063609.

EL-ASMAR, H.M.; HEREHER, M.E. Change detection of the coastal zone east of the Nile Delta using remote sensing. **Environ. Earth Science**. 2011, 62, 769–777, 2011.

ERAZO, B.; BOURREL, L.; FRAPPART, F.; CHIMBORAZO, O.; LABAT, D., DOMINGUEZ-GRANDA, L.; MATAMOROS, D.; MEJIA, R. Validation of Satellite Estimates (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) for Rainfall Variability over the Pacific Slope and Coast of Ecuador. **Water**, v. 10, n. 2, p. 213, 2018.

FENG, M., SEXTON, J. O., CHANNAN, S., TOWNSHEND, J. R.: A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: first results of a topographic–spectral classification algorithm, **Int. Journal Dig. Earth**, 9, 113–133, <https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1026420>, 2015.

FREIRE, R. H. F. **Aspectos Limnológicos de três reservatórios que abastecem a Região Metropolitana- Fortaleza – Açudes Pacajus, Pacoti e Gavião**. Fortaleza, Ceara. 308 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil área de concentração Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Ceará, 2000.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S; HUSAK, G.; ROWLAND, .; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extreme. **Scientific Data**, n. 150066, p-1-21, 2015.

JENSEN, J.R., **Introductory digital image processing: “A remote sensing perspective”**, 3rd edition (NJ: Prentice Hall Logicon Geodynamics, Inc), 2004.

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em http://geopro.crn.inpe.br/RH_reser_PE_eng.franciscosaboia.htm. Acesso: novembro /2020.

KLEIN, I., DIETZ, A. J., GESSNER, U., GALAYEVA, A., MYRZAKHMETOV, A., KUENZER, C.: Evaluation of seasonal water body extents in Central Asia over the past 27 years derived from medium-resolution remote sensing data, **Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinfo.**, 26, 335–349, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.08.004>, 2014.

KLEIN, I., GESSNER, U., DIETZ, A. J., KUENZER, C.: Global WaterPack – A 250 m resolution dataset revealing the daily dynamics of global inland water bodies, **Remote Sensing. Environ.**, 198, 345– 362, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.045>, 2017.

LAI, Y., QIU, Y., FU, W., SHI, L.: Monitoring and analysis of surface water in Kashgar region based on TM imagery in last 10 years, **Remote Sensing. Info.**, 28, 50–57, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3177.2013.03.009>, 2013.

LOPÉZ-CALOCA, A.; TAPIA-SILVA, F.O.; ESCALANTE-RAMIREZ, B. Lake Chapala change detection using time series. **Remote Sensing. Agric. Ecosyst. Hydrol.**, 7104, 1–11, 2008.

LOPES, F.B. **Uso de sensoriamento remoto como suporte ao monitoramento da qualidade das águas superficiais da região semiárida do Brasil**. Ceará. 2013. 202 f. Tese de Doutorado (Pós-graduação em Engenharia Agrícola)— Universidade Federal do Ceará. Fortaleza/CE, 2013.

LU, S.; MA, J.; MA, X.; TANG, H.; ZHAO, H.; ALI BAIG HASAN, M.; **Time series of the Inland Surface Water Dataset in China (ISWDC) for 2000–2016 derived from MODIS archives**. The ISWDC data are available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2616035>, 2019.

LUO, C., XU, C., CAO, Y., TONG, L.: Monitoring of water surface area in Lake Qinghai from 1974 to 2016, **J. Lake Science.**, 29, 1245– 1253, <https://doi.org/10.18307/2017.0523>, 2017.

NOGUEIRA, S. M. C.; MOREIRA, M. A.; VOLPATO, M. M. L. Evaluating Precipitation Estimates from Eta, TRMM and CHRIPS Data in the SouthSoutheast Region of Minas Gerais State—Brazil. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 313, 2018.

NOVO, E. M. L. M. **Comportamento Espectral da Água**. In: Sensoriamento Remoto – Reflectância dos Alvos Naturais. Organizadores: Paulo Roberto Meneses e José da Silva Madeira Netto. Brasília, Editora UnB, 262 p. 203-222, 2001.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto aplicado à ecologia aquática** In: ROLAND, F.; CÉSAR, D.; MARINHO, M. (Ed.). Lições de limnologia. São Carlos: RiMa, cap.5, p.417-432, 2005.

PEKEL, J. F., COTTAM, A., GORELICK, N., BELWARD, A. S.: High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, **Nature**, 540, 418–422, <https://doi.org/10.1038/nature20584>, 2016.

ROKNI, K., AHMAD, A., SELAMAT, A., HAZINI, S. water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery. **Remote Sensing**, 6(5), 4173–4189.

[HTTPS://DOI.ORG/10.3390/RS6054173](https://doi.org/10.3390/RS6054173), 2014.

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

SINGH, K.V.; SETIA, R.; SAHOO, S.; PRASAD, A.; PATERIYA, B. Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level. **Geocarto** ,v.30, 650–661, 2015.

SONG, C., HUANG, B., KE, L., RICHARDS, K. S.: Remote sensing of alpine lake water environment changes on the Tibetan Plateau and surroundings: A review, ISPRS J. Photogramm. **Remote Sensing**, 92, 26–37, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.001>, 2014.

SUN, F.; SUN, W.; CHEN, J.; GONG, P. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery. Int. **Journal Remote Sensing**. 33, 6854–6875, 2012.

TARAVAT, A.; RAJAEI, M.; EMADODIN, I.; HASHEMINEJAD, H.; MOUSAVIAN, R.; BINIYAZ, E. A Spaceborne Multisensory, Multitemporal Approach to Monitor Water Level and Storage Variations of Lakes. **Water**. 8, 478; doi:10.3390/w8110478, 2016.

TOTÉ, C.; PATRICIO, D.; BOOGAARD, H.; VAN DER WIJNGAART, R.; TARNAVSKY, E.; FUNK, C. (2015). Evaluation of satellite rainfall estimates for drought and flood monitoring in Mozambique. **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1758-1776, 2015.

TULBURE, M. G., BROICH, M., STEHMAN, S. V., KOMMAREDDY, A.: Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi-arid region, **Remote Sens. Environ.**, 178, 142–157, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.034>, 2016.

USGS. **United States Geologic Survey**. Catálogo USGS. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso em: novembro de 2016.

USG **United States Geologic Survey**. Catálogo USGS. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso em: janeiro de 2020.

VALÉRIO, A. M. **O uso do sensoriamento remoto orbital e de superfície para o estudo do comportamento do corpo de água do reservatório de Manso, MT, Brasil**. 119 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009.

VERPOORTER, C., KUTSER, T., SEEKELL, D. A., TRANVIK, L. J.: A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery, **Geophys. Res. Lett.**, 41, 6396–6402, <https://doi.org/10.1002/2014GL060641>, 2014.

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

XU, Y.B.; LAI, X.J.; ZHOU, C.G. Water surface change detection and analysis of bottomland submersion-emersion of wetlands in Poyang Lake reserve using ENVISAT ASAR data. **China Environ. Science**. 2010, 30, 57–63, 2010.

WAN, W., LONG, D., HONG, Y., MA, Y., YUAN, Y., XIAO, P., DUAN, H., HAN, Z., and GU, X.: A lake dataset for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014, **Science Data**, 3, 160039, <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.39>, 2016.

WMO- World Meteorological Organization. **WMO statement on the status of the global climate in 2013**. WMO, n. 1130, 2014.

ZAMBRANO-BIGIARINI, M., NAUDITT, A., BIRKEL, C., VERBIST, K.,; RIBBE, L.: Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile, **Hydrol. Earth System Sciences**, 21, 1295–1320, <https://doi.org/10.5194/hess-21-1295-2017>, 2017.

ZHANG, G., LI, J., ZHENG, G.: Lake-area mapping in the Tibetan Plateau: an evaluation of data and methods, **Int. J. Remote Sensing**, 38, 742–772, <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1271478>, 2017.

ZHOU, H.; HONG, J.; HUANG, Q. Landscape and water quality change detection in urban wetland: A post-classification comparison method with IKONOS data. **Procedia Environ. Science**, 10, 1726–1731, 2011.

5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos a partir dos artigos, observou-se que os índices espectrais NDWI e MNDWI mostraram-se com efetiva ferramenta para extração da máscara de água do Açude Poço da Cruz em Ibimirim – PE – Brasil, evidenciando a distribuição espacial dinâmica hídrica entre 2017 e 2019, podendo auxiliar em tomadas de decisões voltadas ao monitoramento ambiental.

A análise do mapeamento dos índices estudados com a exclusão dos valores abaixo de zero e, observando o contexto geral da área, tornou-se um resultado de rápida interpretação da máscara de água e ficou evidenciado que o índice MNDWI melhor representou o delineamento do corpo hídrico em relação ao índice NDWI.

A partir destes índices utilizados, foi possível detectar a diferença da delimitação do açude Poço da Cruz nos dois anos estudados e explicitar a importância das geotecnologias como ferramenta técnica que pode auxiliar o monitoramento de feições hídricas.

Estudos desenvolvidos na área de estudo, a partir de imagens do sensor OLI/Landsat 8 permitiu, a partir do índice MNDWI, detectar às áreas superficiais do reservatório Poço da Cruz, pois detectou as mudanças da água de superfície e proporcionou melhor delineamento do corpo hídrico entre os anos. Em conclusão, o método pode ser útil no estudo de outras águas superficiais no mundo, bem como no monitoramento de enchentes.

As informações geradas poderão ser utilizadas eficientemente como instrumento de análise e previsão junto aos órgãos ambientais competentes, formuladores de políticas e tomadores de decisões para o desenvolvimento de metodologias de preservação ambiental. Como também, fornece fundamentos de estudo para medidas mitigadoras de manejo do solo conforme os recursos hídricos disponíveis no estado de Pernambuco.

REFERÊNCIAS

ABREU, K. M. P de; COUTINHO, L.M. Sensoriamento remoto aplicado no estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes/RJ. v.16, n.1, p. 173-196, 2014.

ALESHEIKH, A.A.; GHORBANALI, A.; NOURI, N. Coastline change detection using remote sensing. Int. **Journal Environ. Science. Technol.**, 4, 61–66, 2007.

ALMEIDA, C. T.; DELGADO, R. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; GOIS, G.; CAVALCANTI, A. S.; Avaliação das estimativas de precipitação do produto 3B43-TRMM do Estado de Amazonas. **Floresta e Ambiente**. 22 (3), <https://doi.org/10.1590/2179-8087.112114>, 2015.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso: dezembro de 2018.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso: novembro de 2020.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso: fevereiro de 2021.

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. 37 f. (Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Agrimensura) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Larfo, 2019.

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Climas. Sistema de Informação Geográfica. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/>>. Acesso: novembro de 2020.

ARAÚJO, S.M.S. A Região Semiárida do Nordeste do Brasil: Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos. **Revista Rios Eletrônica**. Ano 5, n.5, pp. 90-98, 2011.

ARIZA, A. Descripción y Corrección de Productos LandSat 8 LDCM (LandSat Data ContinuityMission), versión 1.0. **Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF)**: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Colombia, 2013.

ARIZA, A.; GARCIA, J.S.; ROJAS, B.S.; RAMIREZ, D.M. 2014. Desarrollo de un modelo de corrección de imágenes de satélite para inundaciones: (CAIN -Corrección Atmosférica e Índices de Inundación). **Instituto Geográfico Agustín Codazzi**. UN-SPIDER Regional Support Office in Colombia. Disponível em: Desarrollo de un modelo de corrección de imágenes de satélite para inundaciones: (CAIN - Corrección Atmosférica e Índices de

Inundación) - PDF Descargar libre (docplayer.es). Acesso em: 20 de novembro de 2020.

BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M.; MARTINS, V.S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações**. 1ª edição. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 161p., 2019.

BAYISSA, Y.; TADESSE, T.; DEMISSE, G.; SHIFERAW, A. Evaluation of Satellite Based Rainfall Estimates and Application to Monitor Meteorological Drought for the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, p. 669, 2017.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; LOPES, P. M. O.; SILVA, E. F. F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 73-84, 2014.

BEZERRA, U.A; OLIVEIRA, L.M.M.; CANDEIAS, A.L.B.; SILVA, B.B.; LEITE, A.C.S; SILVA, L.T.M.S; Comparativo do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) entre os Sensores OLI - Satélite Landsat-8 e MSI – Satélite Sentinel-2 em Região Semiárida. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. Vol. 41 – 3, p. 167-177, 2018.

BISWAS, A. K. Integrated water resources management: is it working?. **International Journal of Water Resources Development**, v. 24, n. 1, p. 5-22, 2008.

CHIRPS - Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data. Disponível em: <<http://www.chc.ucsb.edu/data/chirps/>>. Acesso: janeiro de 2021.

COELHO, A. L. N.; CORREA, W. S. C. Temperatura de Superfície Celsius do Sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, n. 1, p. 31-45, 2013.

CÔRREA, K. A. B.. **Estimativa de precipitação pluvial por satélites para o estado de Mato Grosso**. Dissertação de Mestrado da Universidade de São Paulo-USP / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 61 p., Piracicaba, 2020.

COSTA, F.A. **Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento de reservatório no semiárido do Nordeste: Poço da Cruz (Pernambuco)**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, 109 f., Recife, 2019.

COSTA, J., Pereira, G., SIQUEIRA, M. E., CARDOZO, F.; da Silva, V. V.. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, 24, 228-243, 2019.

DEMBÉLÉ, M.; ZWART, S. J. Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso, West Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, b. 17, p. 3995-4014, 2016.

DESMET, P.J.J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal Soil Water Conserv**, 51, 427–433, 1996.

DRUSCH, M.; BELLO, U.D.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.; MEYGRETC, A.; SPOTOA, A.F.; SYA O.; MARCHESED F. & BARGELLINID P.. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. **Remote Sensing of Environment**, 120: 25–36, 2012.

DU, Z.; LINGHU, B.; LING, F.; LI, W.; TIAN, W.; WANG, H.; GUI, Y.; SUN, B.; ZHANG, X. Estimating surface water area changes using time-series Landsat data in the qingjiang river basin, China. **Journal Application Remote Sensing**. 2012, 6, doi: 10.1117/1.JRS.6.063609.

DU, Z.Q.; LI, W.B.; ZHOU, D.B.; TIAN, L.Q.; LING, F.; WANG, H.L.; GUI, Y.M.; SUN, B.Y. Analysis of Landsat-8 OLI imagery for land surface water mapping. **Remote Sensing Lett.**, 5, 672–681, 2014.

DU, Y., ZHANG, Y., LING, F., WANG, Q., LI, W., LI, X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. **Remote Sensing**, 8(4). <https://doi.org/10.3390/rs8040354>, 2016.

EL-ASMAR, H.M.; HEREHER, M.E. Change detection of the coastal zone east of the Nile Delta using remote sensing. **Environ. Earth Science**. 2011, 62, 769–777, 2011.

ERAZO, B.; BOURREL, L.; FRAPPART, F.; CHIMBORAZO, O.; LABAT, D., DOMINGUEZ-GRANDA, L.; MATAMOROS, D.; MEJIA, R. Validation of Satellite Estimates (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) for Rainfall Variability over the Pacific Slope and Coast of Ecuador. **Water**, v. 10, n. 2, p. 213, 2018.

ESA – European Space Agency. Disponível em: http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2. Acesso: janeiro de 2021.

FENG, M., SEXTON, J. O., CHANNAN, S., TOWNSHEND, J. R.: A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: first results of a topographic–spectral classification algorithm, **Int. Journal Dig. Earth**, 9, 113–133, <https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1026420>, 2015.

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

Tecnologia, 2018.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. Apostila, 2005. Disponível em: http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf> Acesso em: novembro de 2018.

FREIRE, R. H. F. **Aspectos Limnológicos de três reservatórios que abastecem a Região Metropolitana- Fortaleza – Açudes Pacajus, Pacoti e Gavião**. Fortaleza, Ceara. 308 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil área de concentração Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Ceará, 2000.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, .; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extreme. **Scientific Data**, n. 150066, p-1-21, 2015.

JENSEN, J.R., **Introductory digital image processing: “A remote sensing perspective”**, 3rd edition (NJ: Prentice Hall Logicon Geodynamics, Inc), 2004.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução José Carlos Neves Epiphanyo *et. al*. São José dos Campos. SP. Ed. 1, 2009. 244p. ISBN: 97885605070601

JIANG, H., FENG, M., ZHU, Y., LU, N., HUANG, J., XIAO, T. An automated method for extracting rivers and lakes from Landsat imagery. **Remote Sensing**, 6(6), p. 5067–5089. <https://doi.org/10.3390/rs6065067>, 2014.

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em http://geopro.crn.inpe.br/RH_reser_PE_eng.franciscosaboia.htm. Acesso: novembro /2020.

KLEIN, I., DIETZ, A. J., GESSNER, U., GALAYEVA, A., MYRZAKHMETOV, A., KUENZER, C.: Evaluation of seasonal water body extents in Central Asia over the past 27 years derived from medium-resolution remote sensing data, **Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinfo.**, 26, 335–349, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.08.004>, 2014.

KLEIN, I., GESSNER, U., DIETZ, A. J., KUENZER, C.: Global WaterPack – A 250 m resolution dataset revealing the daily dynamics of global inland water bodies, **Remote Sensing. Environ.**, 198, 345– 362, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.045>, 2017.

LAI, Y., QIU, Y., FU, W., SHI, L.: Monitoring and analysis of surface water in Kashgar region based on TM imagery in last 10 years, **Remote Sensing. Info.**, 28, 50–57, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3177.2013.03.009>, 2013.

LI, W.B.; DU, Z.Q.; LING, F.; ZHOU, D.B.; WANG, H.L.; GUI, Y.M.; SUN, B.Y.; ZHANG, X.M. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM plus and ALI. **Remote Sensing**, 5, 5530–5549, 2013.

LOPÉZ-CALOCA, A.; TAPIA-SILVA, F.O.; ESCALANTE-RAMIREZ, B. Lake Chapala change detection using time series. **Remote Sensing. Agric. Ecosyst. Hydrol.**, 7104, 1–11, 2008.

LOPES, F.B. **Uso de sensoriamento remoto como suporte ao monitoramento da qualidade das águas superficiais da região semiárida do Brasil**. Ceará. 2013. 202 f. Tese de Doutorado (Pós-graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza/CE, 2013.

LU, S.; MA, J.; MA, X.; TANG, H.; ZHAO, H.; ALI BAIG HASAN, M.; **Time series of the Inland Surface Water Dataset in China (ISWDC) for 2000–2016 derived from MODIS archives**. The ISWDC data are available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2616035>, 2019.

LUO, C., XU, C., CAO, Y., TONG, L.: Monitoring of water surface area in Lake Qinghai from 1974 to 2016, **J. Lake Science.**, 29, 1245– 1253, <https://doi.org/10.18307/2017.0523>, 2017.

MATOS, R.C.M.; CANDEIAS, A.L.B.; TAVARES JÚNIOR, J. R.; Mapeamento da vegetação, temperatura e albedo da bacia hidrográfica do Pajeú com imagens Modis. **Revista Brasileira de Cartografia** n. 65, pp. 139-160, 2013

MCFEETERS, S. K. . The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, 17(7), p. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>, 1996.

MCFEETERS, S.K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. **Int. Journal Remote Sensing.**, 17, 1425–1432, 1996.

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

MORAES, E. C.; MAIO, A.; RUDORFF B. F. T.; PERREIRA, G.; MOREIRA, M.A.; SAUSEN, T.M.; FLORENZANO, T. G; **Formação Contínua de Professores-Sensoriamento Remoto- INPE**. p. 3, 2008

NAMIKAWA, L. M., KÖRTING, T. S., CASTEJON, E. F. Water body extraction from Rapideye images: an automated methodology based on hue component of color transformation from RGB to HSV model. **Revista Brasileira de Cartografia**, 68(6), 1097–1111, 2016.

NOGUEIRA, S. M. C.; MOREIRA, M. A.; VOLPATO, M. M. L. Evaluating Precipitation Estimates from Eta, TRMM and CHRIPS Data in the SouthSoutheast Region of Minas Gerais State—Brazil. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 313, 2018.

NOVO, E. M. L. M. **Comportamento Espectral da Água**. In: Sensoriamento Remoto – Reflectância dos Alvos Naturais. Organizadores: Paulo Roberto Meneses e José da Silva Madeira Netto. Brasília, Editora UnB, 262 p. 203-222, 2001.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto aplicado à ecologia aquática** In: ROLAND, F.; CÉSAR, D.; MARINHO, M. (Ed.). Lições de limnologia. São Carlos: RiMa, cap.5, p.417-432, 2005.

OLIVEIRA, L.V; NEGRI, R.G.; SANTOS, L.B. Análise de técnicas de detecção de mudança para mapeamento de desastres com uso de dados de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Cartografia**. Vol. 72, n. 1. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72n1-51447>, 2020.

PADOVANI, N.G.; LOPES, E.R.; SOUZA, J.C.; MORAIS, M.C.M.; LOURENÇO, R.W. Análise Espacial da Temperatura e Albedo de Superfície na Bacia Hidrográfica do rio Una – Ibiúna/São Paulo, a partir de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geografia Física** v. 11 n. 5. pp. 1832-1845, 2018.

PEKEL, J. F., COTTAM, A., GORELICK, N., BELWARD, A. S.: High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, **Nature**, 540, 418–422, <https://doi.org/10.1038/nature20584>, 2016.

PENHA, T.V.; PLETSCH, M. A.S.; SILVA JUNIOR, C.H.L.; KÖRTING, T.S.; FONSECA, L.M.G.; Detecção e delimitação automática de corpos hídricos em imagens Sentinel-2: uma proposta de integração do algoritmo Fmask aos índices espectrais NDWI e MNDWI. XVIII **GEOINFO**, p340-345, Salvador, BA, 2017.

PEREIRA, L.E.; AMORIM, G.; GRIGIO, A.M.; PARALHOS, A.C. Análise Comparativa entre Métodos de Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) em Área Úmida Continental. **Anuário do Instituto de Geociências**, pp. 654-662, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_654_662

RAMALHO, M. F. J. L. A fragilidade ambiental do Nordeste brasileiro: o clima semiárido e as imprevisões das grandes estiagens. **Sociedade e Território**. Volume 25, nº2, pp. 104-115, 2013.

RAMALHO, M. F. J. L. A fragilidade ambiental do Nordeste brasileiro: o clima semiárido e as imprevisões das grandes estiagens. **Sociedade e Território**. Volume 25, nº2, pp. 104-115, 2013.

ROKNI, K., AHMAD, A., SELAMAT, A., HAZINI, S. water feature extraction and change

detection using multitemporal landsat imagery. **Remote Sensing**, 6(5), 4173–4189. [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/RS6054173](https://doi.org/10.3390/RS6054173), 2014.

SCHWATKE, C.; SCHERER, D.; DETTMERING, D. Automated Extraction of Consistent Time-Variable Water Surfaces of Lakes and Reservoirs Based on Landsat and Sentinel-2. **Remote Sensing**, 11, 1010. <https://doi.org/10.3390/rs11091010>, 2019

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

SINGH, K.V.; SETIA, R.; SAHOO, S.; PRASAD, A.; PATERIYA, B. Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level. **Geocarto** ,v.30, 650–661, 2015.

SONG, C., HUANG, B., KE, L., RICHARDS, K. S.: Remote sensing of alpine lake water environment changes on the Tibetan Plateau and surroundings: A review, ISPRS J. Photogramm. **Remote Sensing**, 92, 26–37, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.001>, 2014.

SOTHE, C.; ALMEIDA, C.; LIESENBERG, V.; SCHIMALSKI, M. Evaluating Sentinel-2 and Landsat-8 Data to Map Sucessional Forest Stages in a Subtropical Forest in Southern Brazil. **Remote Sensing**, 9(8): 838, 2017.

SUN, F.; SUN, W.; CHEN, J.; GONG, P. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery. **Int. Journal Remote Sensing**. 33, 6854–6875, 2012.

TARAVAT, A.; RAJAEI, M.; EMADODIN, I.; HASHEMINEJAD, H.; MOUSAVIAN, R.; BINIYAZ, E. A Spaceborne Multisensory, Multitemporal Approach to Monitor Water Level and Storage Variations of Lakes. **Water**. 8, 478; doi:10.3390/w8110478, 2016.

TOLEDO, C. E.; ARAÚJO, J. C.; ALMEIDA, C. L. The use of remote-sensing techniques to monitor dense reservoir newtorks in the Brazilian semiarid region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 10, p. 3683-3699, 2014.

TOTÉ, C.; PATRICIO, D.; BOOGAARD, H.; VAN DER WIJNGAART, R.; TARNAVSKY, E.; FUNK, C. (2015). Evaluation of satellite rainfall estimates for drought and flood monitoring in Mozambique. **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1758-1776, 2015.

TULBURE, M. G., BROICH, M., STEHMAN, S. V., KOMMAREDDY, A.: Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at

subcontinental scale in a semi-arid region, **Remote Sens. Environ.**, 178, 142–157, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.034>, 2016.

USGS. **United States Geologic Survey**. Catálogo USGS. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso em: agosto de 2013.

USGS. **United States Geologic Survey**. Catálogo USGS. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso em: novembro de 2016

USGS. **United States Geologic Survey**. Catálogo USGS. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso em: novembro de 2020.

USG **United States Geologic Survey**. Catálogo USGS. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso em: janeiro de 2021.

VALÉRIO, A. M. **O uso do sensoriamento remoto orbital e de superfície para o estudo do comportamento do corpo de água do reservatório de Manso, MT, Brasil**. 119 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009.

VERPOORTER, C., KUTSER, T., SEEKELL, D. A., TRANVIK, L. J.: A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery, **Geophys. Res. Lett.**, 41, 6396–6402, <https://doi.org/10.1002/2014GL060641>, 2014.

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

XU, Y.B.; LAI, X.J.; ZHOU, C.G. Water surface change detection and analysis of bottomland submersion-emersion of wetlands in Poyang Lake reserve using ENVISAT ASAR data. **China Environ. Science**. 2010, 30, 57–63, 2010.

WAN, W., LONG, D., HONG, Y., MA, Y., YUAN, Y., XIAO, P., DUAN, H., HAN, Z., and GU, X.: A lake dataset for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014, **Science Data**, 3, 160039, <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.39>, 2016.

WMO- World Meteorological Organization. **WMO statement on the status of the global climate in 2013**. WMO, n. 1130, 2014.

ZHANG, G., LI, J., ZHENG, G.: Lake-area mapping in the Tibetan Plateau: an evaluation of data and methods, **Int. J. Remote Sensing**, 38, 742–772, <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1271478>, 2017.

ZHANG, H. K.; ROY, D. P.; YAN, L.; LI, Z.; HUANG, H.; VERMOTE, E.; SKAKUN, S.; ROGER, J. C. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. **Remote Sensing of Environment**, 215: 482-494, 2018.

ZHOU, H.; HONG, J.; HUANG, Q. Landscape and water quality change detection in urban wetland: A post-classification comparison method with IKONOS data. **Procedia Environ. Science**, 10, 1726–1731, 2011.

ZHU, L.; WALKER, J. P.; YE, N.; RÜDIGER, C. Roughness and vegetation change detection: A preprocessing for soil moisture retrieval from multi-temporal SAR imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 225, p. 93–106. Elsevier Inc. DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.027, 2019.