



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

JOÃO VICTOR BEZERRA CHAVES

**GEOTECNOLOGIA COMO FERRAMENTA NA ESPACIALIZAÇÃO
SUPERFICIAL DOS AÇUDES DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BRÍGIDA**

Recife

2019

JOÃO VICTOR BEZERRA CHAVES

**GEOTECNOLOGIA COMO FERRAMENTA NA ESPACIALIZAÇÃO
SUPERFICIAL DOS AÇUDES DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BRÍGIDA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

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

Recife

2019

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

C512g Chaves, João Victor Bezerra.
Geotecnologia como ferramenta na espacialização superficial dos açudes da
bacia hidrográfica do Rio Brígida / João Victor Bezerra Chaves. – 2019.
53 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Landsat. 3. MNDWI. 4. Rio Brígida. I.
Oliveira, Leidjane Maria Maciel de (Orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-29



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO(S): 1 – JOÃO VICTOR BEZERRA CHAVES

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Profa^a. Dra. LEIDJANE MARIA MACIEL DE OLIVEIRA

Examinador 1: Prof. DR. JOSÉ ROBERTO GONÇALVES DE AZEVEDO

Examinador 2: Eng^a Cartógrafa DÉBORA NATÁLIA OLIVEIRA DE ALMEIDA

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

GEOTECNOLOGIA COMO FERRAMENTA NA ESPECIALIZAÇÃO SUPERFICIAL DOS AÇUDES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BRÍGIDA

LOCAL: Recife, PE

DATA: 26/12/2019 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 8h30

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: _____(deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) () aprovado(s) (nota > = 7,0), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota <3,0)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 26 de dezembro de 2019

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato 1:

À minha família que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu concluísse esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pela educação intelectual e, principalmente, afetiva. À minha mãe, Mônica Bezerra, pelo carinho e pela preocupação. Ao meu pai, Genival Chaves, pela atenção e por todo o suporte.

À minha professora orientadora Leidjane Maria Maciel de Oliveira pelo entusiasmo em me apoiar nesse desafio, sempre disposto a me atender e assessorar com muito bom humor, carinho e dedicação. Agradeço pela forma humana de tratar todos os seus alunos, seja em suas aulas ou fora delas, sempre interessado no nosso aprendizado. Muito obrigado!

Aos professores incríveis que tive durante toda minha vida, que se esforçavam para repassar o conhecimento e que estavam abertos a aprender com os alunos, nos tratando com humanidade e carinho.

Aos demais amigos, familiares, colegas de trabalho e pessoas com quem convivo e convivi e cujas trocas com certeza me marcaram e fizeram crescer, meu muito obrigado.

RESUMO

Com a necessidade do desenvolvimento de técnicas simplificadoras para monitoramento e análise dos recursos hídricos, as técnicas de Sensoriamento Remoto possuem fundamental importância no levantamento de dados de corpos hídricos ao longo do tempo contribuindo na gestão hídrica e ambiental. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a distribuição espacial e temporal dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Brígida, localizada no Alto Sertão pernambucano, nos anos de 2009 e 2019 através de imagens dos satélites Landsat 5 (sensor TM) e Landsat 8 (sensor OLI), aplicando o *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI). Todas as etapas de processamento digital das imagens e elaboração de mapas temáticos foram realizadas no *software* de livre acesso QGIS 3.4.12. A partir da aplicação do MNDWI foi possível extrair a área dos espelhos d'água nas duas datas estudadas permitindo uma análise quantitativa da variabilidade espacial dos recursos hídricos superficiais disponíveis na região. Os resultados mostraram que houve uma redução de 79,38% na área superficial considerando os 16 principais reservatórios da região hidrográfica entre os anos de 2009 e 2019, redução condizente com a grave seca a qual se encontra o sertão pernambucano nessa década. A partir da análise de resultados obtidos em pesquisas e produtos desenvolvidos na mesma área foi possível confirmar a qualidade dos resultados obtidos no presente trabalho.

Palavras-chave: Landsat. MNDWI. Rio Brígida.

ABSTRACT

With the need to develop simplifying techniques for monitoring and analysis of water resources, Remote Sensing techniques are of fundamental importance in the collection of water bodies data over time contributing to water and environmental management. In this context, the present work aimed to analyze the spatial and temporal distribution of water resources of the Brígida river basin, located in Alto Sertão Pernambucano, in 2009 and 2019 through satellite images Landsat 5 (TM sensor) and Landsat 8 (OLI sensor) by applying the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). All steps of digital image processing and thematic map elaboration were performed using the open access software QGIS 3.4.12. From the application of MNDWI it was possible to extract the area of water mirrors in the two studied dates allowing a quantitative analysis of the spatial variability of surface water resources available in the region. The results showed that there was a 79.38% reduction in surface area considering the 16 main reservoirs of the hydrographic region between 2009 and 2019, a reduction in line with the severe drought in the Pernambuco hinterland in that decade. From the analysis of results obtained in research and products developed in the same area it was possible to confirm the quality of the results obtained in the present work.

Keywords: Landsat. MNDWI. Brígida River.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Extração do espelho d'água a partir do NDVI e do NDWI	17
Figura 2 –	Comparação entre os NDWI de McFeeters, Xu e Gao	18
Figura 3 –	Perfil longitudinal do MNDWI e NDWI no rio Pajeú	19
Figura 4 –	Comparação dos resultados entre Almeida (2018) e ANA (2016)	20
Figura 5 –	Variação do NDWI do Açude Poço da Cruz entre 2009 e 2017 ...	21
Figura 6 –	Vetorização do açude Poço da Cruz nos anos de 2009 e 2017	22
Figura 7 –	Fluxograma das etapas de processamento das imagens	23
Figura 8 –	Área de Estudo	24
Figura 9 –	Pluviometria acumulada anual da bacia hidrográfica do rio Brígida – PE	26
Figura 10 –	Parâmetros de pesquisa para obtenção das imagens no <i>Earthexplorer</i>	29
Figura 11 –	Configurações do QGIS 3.4.12 para o empilhamento das bandas	30
Figura 12 –	Configurações do QGIS 3.4.12 para a construção do mosaico	31
Figura 13 –	Ferramenta de recorte pela máscara	31
Figura 14 –	Reprojeção para o SRC 31984	32
Figura 15 –	Calculadora <i>raster</i> do QGIS 3.4.12	33
Figura 16 –	Ferramenta de conversão <i>raster</i> para vetor	37
Figura 17 –	Massas d'água produzido pela ANA	37
Figura 18 –	Ferramenta utilizada para o cálculo da área dos espelhos d'água	38
Figura 19 –	Resultado da aplicação do MNDWI para o ano de 2009	39
Figura 20 –	Resultado da aplicação do MNDWI para o ano de 2019	40
Figura 21 –	Variação do MNDWI entre os anos de 2009 e 2019	41
Figura 22 –	Variação do MNDWI entre os anos de 2009 e 2019	42
Figura 23 –	Massas d'água e espelhos d'água vetorizados	44
Figura 24 –	Variação espacial dos seis maiores reservatórios da bacia do rio Brígida	47
Figura 25 –	Variação no percentual de volume armazenado	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Reservatórios da bacia hidrográfica do rio Brígida	25
Tabela 2 –	Características das bandas espectrais do Landsat 5 TM	27
Tabela 3 –	Características das bandas espectrais do Landsat 8 OLI	28
Tabela 4 –	Resumo das imagens obtidas	28
Tabela 5 –	Parâmetros para a calibração radiométrica	34
Tabela 6 –	Classificação dos reservatórios da bacia do Brígida por área	45
Tabela 7 –	Variação espacial da área dos principais açudes da bacia do Brígida.....	46

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
EPSG	European Petroleum Survey Group
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Infravermelho próximo
OLI	Operational Land Imager
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SR	Sensoriamento Remoto
SRC	Sistemas de Referência de Coordenadas
SWIR	Infravermelho de Ondas Curtas
TM	Thematic Mapper
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa e motivação	13
1.2	Objetivos gerais e específicos	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Aquisição de dados de corpos hídricos através de Sensoriamento Remoto	15
2.2	Identificação e extração de corpos hídricos através de índices espectrais	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Área de estudo	23
3.2	Escolha e aquisição das imagens	26
3.3	Empilhamento, composição do Mosaico e aplicação do recorte	29
3.4	Processamento das imagens e aplicação do MNDWI	32
3.4.1	Processamento das imagens para o Landsat 5	33
3.4.2	Processamento das imagens para o Landsat 8	34
3.4.3	Cálculo do MNDWI	35
3.5	Extração dos espelhos d'água	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica do Brasil é a maior do planeta, possuindo mais da metade da água da América do Sul e 13,8% do total mundial (CIRILO, 2008). No entanto, as reservas de água não são igualmente distribuídas no Brasil, onde algumas áreas sofrem com recursos hídricos limitados, nesse contexto se enquadra o semiárido nordestino. Esta região possui baixa disponibilidade hídrica e longos períodos de estiagem de modo que os recursos disponíveis não são suficientes para o atendimento das demandas, ocasionando problemas nas esferas social e econômica da região.

Aproximadamente 57% do Nordeste está inserida no semiárido brasileiro, que possui área total de 980.133,079 km², equivalente a 11,53% do território nacional (MEDEIROS *et al.*, 2012). Essa região é caracterizada pela irregularidade de chuvas, com longos períodos de seca, além de temperaturas elevadas, alta taxa de evapotranspiração e características pedológicas e geológicas desfavoráveis à acumulação de água subterrânea (MEDEIROS *et al.*, 2011).

O semiárido apresenta um regime pluviométrico marcado por extrema irregularidade de chuvas, no tempo e no espaço. Nesse cenário, a escassez de água constitui um forte entrave ao desenvolvimento socioeconômico e, até mesmo, à subsistência da população. A ocorrência cíclica das secas e seus efeitos catastróficos são por demais conhecidos e remontam aos primórdios da história do Brasil (FILHO, 2002).

A alternativa mais comum para combater a situação da seca na região do semiárido foi a construção de reservatórios superficiais, conhecidos como açudes. A bacia hidrográfica do rio Brígida atualmente possui 16 açudes monitorados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) para atendimento de demandas diversas (como abastecimento urbano, rural, irrigação, etc.) com capacidade de armazenamento maior que 1 hm³. Dentre esses reservatórios o principal deles é o Açude Entremontes, localizado em Parnamirim, possuindo uma capacidade de 339 hm³, sendo o segundo maior do estado de Pernambuco, também se destacam os açudes do Chapéu, Algodões, Cachimbo, Lopes II e Engenheiro Camacho, sendo os principais responsáveis pelo atendimento às demandas da região (APAC, 2019a).

Informações a respeito dos mananciais superficiais nessa região são de fundamental importância para uma gestão eficiente dos recursos hídricos disponíveis, visto que tais mananciais são a principal fonte de acesso a água para a população.

Uma das ferramentas comumente utilizadas em estudos da problemática em regiões de seca é o Sensoriamento Remoto (SR). Através de índices espectrais, essa tecnologia detecta

alterações no uso do solo, na cobertura vegetal e na presença de corpos hídricos, proporcionando diagnósticos e meios para realização de planejamento socioambiental. (BACALHAU *et al.*, 2017).

Polidorio *et al.* (2005) apontaram como grandes vantagens do uso de imagens para realização de estudos de corpos d'água são a diminuição dos custos envolvidos, a rapidez e constância de acesso aos dados e a possibilidade de uma cobertura espacial mais ampla, permitindo analisar com facilidade e precisão as relações entre corpos d'água e demais elementos presentes na região estudada.

Dentre os índices utilizados no SR, o Índice de Água por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index* – NDWI) recebe destaque na análise da variabilidade espacial e na identificação de corpos hídricos na paisagem terrestre.

Inicialmente proposto por McFeeters (1996), o NDWI é um método que foi desenvolvido com o objetivo primário de delinear e realçar espelhos d'água em imagens digitais obtidas por sensoriamento remoto ao mesmo tempo que elimina as feições do solo e da vegetação, sendo possível estimar a área de espelhos d'água através do uso de *softwares* de processamento de imagens.

Xu (2006) propôs um NDWI modificado (MNDWI) através da substituição da banda do infravermelho próximo (NIR) utilizado por McFeeters (1996) pela banda do infravermelho de ondas curtas (SWIR). Segundo o autor, o MNDWI é mais adequado para o realce de corpos hídricos inseridos numa região dominada por áreas construídas já que consegue reduzir e até mesmo remover o ruído causado pelas áreas construídas, comumente confundidos com água quando se utiliza o NDWI de McFeeters (1996).

1.1 Justificativa e motivação

O estudo da viabilidade da utilização do SR para identificação e monitoramento dos mananciais superficiais se mostra de grande importância devido aos desafios enfrentados durante o gerenciamento dos recursos hídricos de uma determinada região. O desenvolvimento de um sistema eficiente de monitoramento facilitaria a realização de diagnósticos dos mananciais e identificação de possíveis potenciais hídricos.

Devido à situação que se encontra o Semiárido pernambucano, a elaboração de um método relativamente simples, barato e eficiente para identificar, classificar e monitorar possíveis mananciais superficiais para o atendimento de demandas urbanas e rurais é de fundamental importância para a melhoria da qualidade de vida dos habitantes dessa região.

1.2 Objetivos gerais e específicos

Aplicar a técnica de geoprocessamento que utiliza índices espectrais para identificar e analisar as mudanças nas áreas dos espelhos d'água da bacia hidrográfica do rio Brígida entre os anos de 2009 e 2019, em especial, será observada as alterações ocorridas nos principais açudes monitorados pela APAC que pertencem a essa região, dando um enfoque nos açudes Entremontes, Chapéu, Algodões, Cachimbo, Lopes II e Engenheiro Camacho.

Objetivos específicos:

- Analisar as mudanças espaciais ocorridas na bacia hidrográfica do rio Brígida entre os anos de 2009 e 2019 por meio da aplicação do MNDWI;
- Localizar e classificar os espelhos d'água com área maior que 1 ha nos anos de 2009 e 2019 através do MNDWI;
- Determinar a variação da área dos espelhos d'água dos principais reservatórios monitorados pela APAC;
- Comparar os resultados obtidos com os dados disponibilizados pelo Sistema de Acompanhamento de Reservatórios da ANA;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para o melhor entendimento dos aspectos relacionados à aquisição e ao processamento de imagens de satélite, bem como a aplicação de índice espectral para a identificação de corpos hídricos, foi necessário o domínio em diferentes áreas de conhecimento através do estudo de métodos e ferramentas aplicadas pela comunidade científica.

2.1 Aquisição de dados de corpos hídricos através Sensoriamento Remoto

Num país de dimensão continental como o Brasil, com uma grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre a temática relacionada a recursos hídricos, o geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento seja adquirido localmente (CÂMARA, DAVIS e MONTEIRO, 2004).

O Sensoriamento Remoto (SR) vem se consolidando como uma ferramenta eficiente, de baixo custo e que traz resultados rápidos na investigação de corpos hídricos. Segundo Azevedo (2007), a utilização de técnicas de SR para o gerenciamento de recursos naturais é um fato consolidado no mundo das geotecnologias. As imagens orbitais têm se mostrado especialmente úteis no mapeamento de grandes áreas e em sua análise temporal, permitindo o acompanhamento da evolução de cenários ambientais ao longo de um determinado período (CARVALHO *et al.*, 2009).

A forma mais comum de se determinar as características de um reservatório *in loco* é através da batimetria, porém essa técnica vem se tornando onerosa devido à grande quantidade de corpos hídricos, principalmente de médio e pequeno porte. No caso dos pequenos açudes, por exemplo, que em geral são os que ocorrem em maior frequência em uma bacia, a batimetria seria um meio inviável (SANTOS *et al.*, 2009). Então, a técnica de Sensoriamento Remoto aparece como uma solução prática para estimativa das áreas dos espelhos d'água e dos volumes dos reservatórios, conforme aponta o estudo de Liebe (2002), em que foi possível medir com precisão a capacidade de 61 reservatórios através de uma equação generalizada que possui como dados de entrada a área de superfície dos reservatórios, obtidas remotamente.

A falta de conhecimento do número de reservatórios existentes, sua distribuição e seus volumes de armazenamento dificulta a gestão eficiente da água e o planejamento de reservatórios (Liebe *et al.*, 2005). Desta forma, o desenvolvimento e o uso de técnicas simplificadoras para a obtenção de dados sobre os reservatórios, tais quais as técnicas de

Sensoriamento Remoto, visam mitigar essa carência de informações, contribuindo assim para a gestão dos recursos hídricos de uma determinada região.

2.2 Identificação e extração de corpos hídricos através de índices espectrais

A área inundada por um lago ou reservatório é facilmente identificada em imagens de satélite com sensores na banda do infravermelho próximo (entre 0,76 e 0,90 micrômetros), em que os corpos d'água absorvem a maior parte da radiação (COLLISCHONN e CLARKE, 2016). O Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI), proposto primeiramente por McFeeters (1996), é comumente utilizado na delimitação de corpos d'água, valendo-se do fato que a água apresenta baixa reflectância tanto no verde (0,52 a 0,60 micrômetros) quanto no infravermelho próximo, em contraste com outras superfícies como vegetação e solo.

McFeeters (1996) determinou um índice normalizado para identificação de água utilizando uma lógica semelhante ao cálculo usado no NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Observando que o NDVI maximiza características que apresentam alta reflectância de NIR e baixa reflectância de luz vermelha (como a vegetação terrestre, por exemplo), o autor inverteu a ordem das variáveis no numerador, manteve a banda do infravermelho próximo (NIR) e trocou a banda vermelha (R) pela banda verde (G). Devido ao fato de a água apresentar maior reflectância ao verde do que à banda NIR, o cálculo do NDWI, conforme definido por McFeeters (1996), retorna valores positivos para as feições de água, enquanto as feições de solo e vegetação terrestre retornam valores zero ou negativos.

Ainda segundo McFeeters (1996), é possível utilizar *softwares* de processamento de imagens para deletar os valores negativos das imagens resultantes da aplicação do NDWI de modo a excluir o solo e a vegetação terrestre e reter apenas as informações dos corpos hídricos para facilitar a análise dos mesmos.

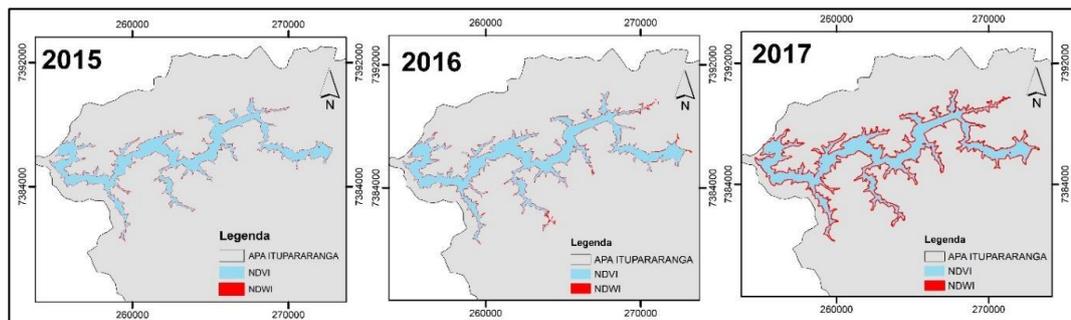
Segundo Xu (2006), a aplicação do índice normalizado desenvolvido por McFeeters (1996) pode confundir terrenos construídos com corpos d'água. Para contornar essa limitação, Xu (2006) propôs a substituição da banda NIR pela banda que representa o infravermelho de onda curta (SWIR) de forma que as feições de terreno construído passem a ter valores negativos. Esse novo índice foi chamado de MNDWI.

Xu (2006), afirma que a computação do MNDWI produz três resultados:

1. A água apresenta valores positivos maiores em relação ao $NDWI_{McFeeters}$, pois a água absorve mais radiação SWIR do que NIR;
2. Terrenos construídos apresentarão valores negativos;
3. Solo exposto e vegetação terrestre continuam apresentando valores negativos;

Silva *et al.* (2019) testaram o NDVI e o NDWI para avaliar qual dos índices apresenta melhor resposta espectral da água, a fim de extrair o contorno do espelho d'água de imagens de satélite Landsat 8 em três datas diferentes. Segundo os autores, a melhor acurácia foi obtida com o NDWI, onde foi possível o delineamento que melhor se ajustou a área do reservatório, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Extração do espelho d'água a partir do NDVI e do NDWI



Fonte: Silva *et al.* (2019)

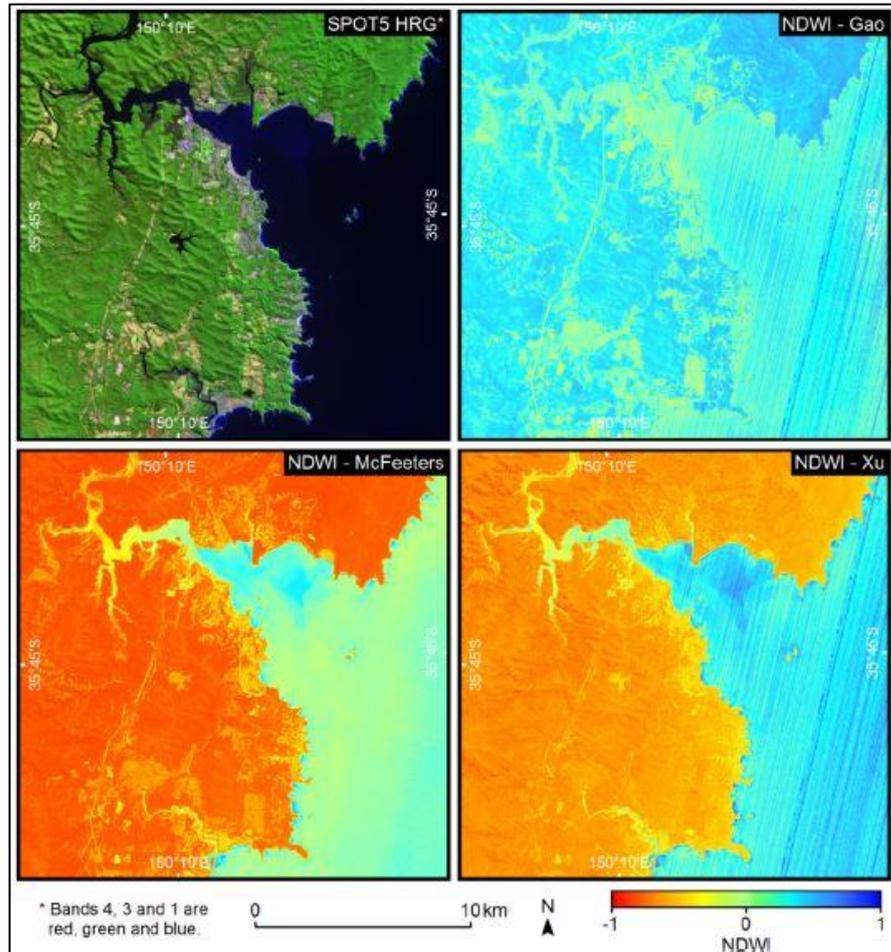
Com o objetivo de desenvolver um método que permita avaliar qual índice normalizado melhor realça a água para imagens do satélite SPOT5 HRG, Fisher *et al.* (2013) testaram os índices normalizados propostos por McFeeters (1996) e Xu (2006), além de também comparar com o índice proposto por Gao (1996), que utiliza as bandas do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas.

Todas as três versões de NDWI possuem valores que variam de -1 a 1, tendo a água valores acima de zero já que ela possui reflectância ao verde maior do que para o NIR e para o SWIR. Para o método de Gao (1996) a água possui valores positivos devido a apresentar maior reflectância a banda NIR do que para a banda SWIR.

Comparando o resultado da aplicação dos três métodos, Fisher *et al.* (2013) observaram que o $NDWI_{McFeeters}$ apresenta boa separação entre água e demais objetos, com a vegetação apresentando fortes valores negativos e a água possuindo valores tipicamente maiores do que zero, o $NDWI_{Xu}$ apresenta valores de água mais próximos de 1, embora a vegetação também apresente valores maiores (menos negativos) e que o $NDWI_{Gao}$ não apresenta uma boa

separação entre água e vegetação, com ambas apresentando valores positivos. Essa diferença pode ser observada na Figura 2.

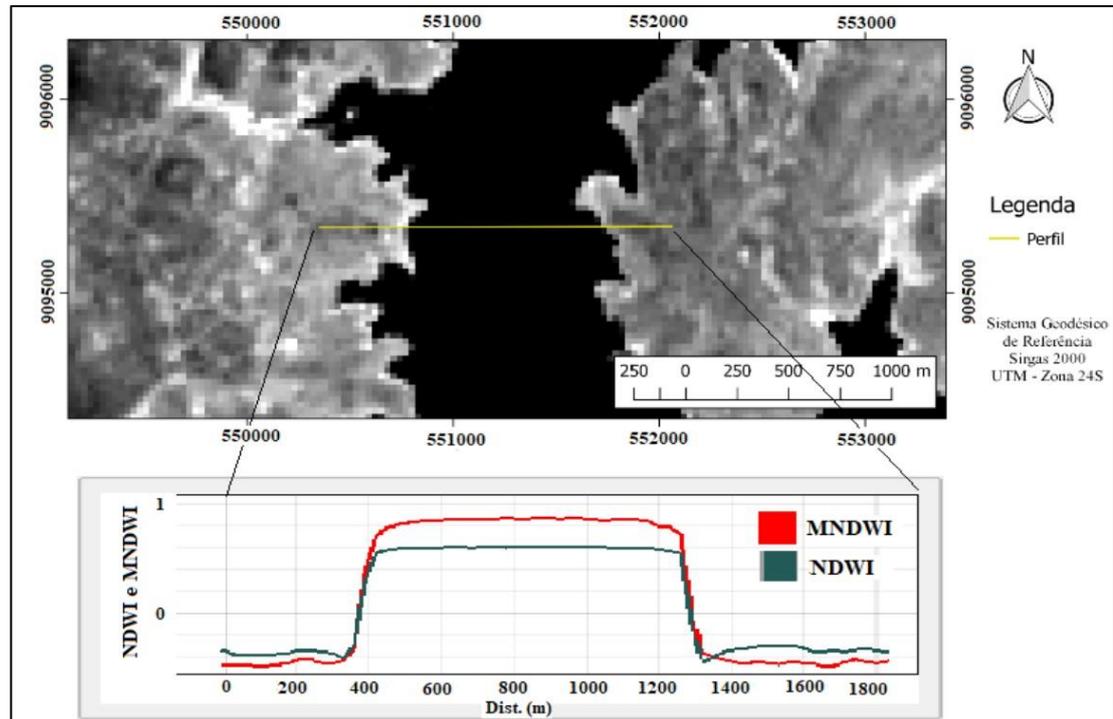
Figura 2 - Comparação entre os NDWI de McFeeters, Xu e Gao



Fonte: Fisher *et al.* (2013)

Nascimento *et al.* (2019) realizaram a comparação entre os índices NDWI de McFeeters (1996) e o MNDWI proposto por Xu (2006) na identificação de corpos hídricos através de sensoriamento remoto. O índice MNDWI apresentou valores mais positivos nas regiões onde há presença de corpos hídricos, e mais negativos nas regiões onde não foi detectada a presença de água (Nascimento *et al.*, 2019). Desse modo, o processamento do MNDWI apresenta um melhor resultado quando o objetivo é destacar corpos hídricos dos demais alvos. Os autores ainda afirmam que o MNDWI pode produzir melhor precisão na extração de água considerando o limiar padrão (zero). O comparativo entre os índices pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Perfil longitudinal do MNDWI e NDWI no rio Pajeú



Fonte: Nascimento *et al.* (2019)

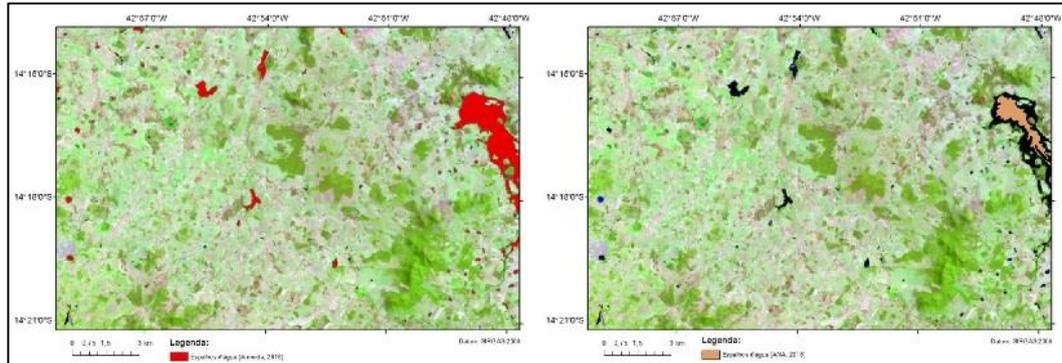
Ji *et al.* (2009) analisaram a variação dos limites dinâmicos de diferentes NDWIs, enfatizando dois aspectos: (I) a influência do solo e da vegetação nos componentes dos *pixels* na variação do limite do índice NDWI, e (II) a performance de todas as diferentes formas de NDWIs baseada na sensibilidade do índice para os componentes dos *pixels*.

Todas as bandas espectrais visíveis, bem como as bandas do NIR e do SWIR, foram utilizadas para a aplicação dos índices nesse estudo. Segundo os autores, foram utilizados os espectros de água, solo e vegetação da biblioteca espectral e, em seguida, foram simuladas as assinaturas espectrais. Desta forma, foi descoberto que o NDWI que apresentou o limite mais estável foi desenvolvido por Xu (2006), de modo que este apresenta um melhor realce dos corpos d'água em relação aos demais elementos da imagem.

Almeida (2018) aplicou técnicas de sensoriamento remoto com a finalidade de identificar e quantificar pequenos reservatórios, bem como avaliar a influência dos mesmos no escoamento superficial da bacia hidrográfica do Rio Carinhanha. Nesse trabalho foi aplicado o NDWI proposto por Xu (2006), que utiliza as bandas espectrais verde e SWIR, nas imagens do satélite Landsat 8 equipado com o sensor OLI (*Operational Land Imager*). O método aplicado por Almeida (2018) mostrou grande eficácia na identificação de pequenos reservatórios, tendo sido capaz de identificar 1.157 pequenos açudes na área de estudo proposta, conforme mostrado na

Figura 4. Os resultados obtidos foram comparados a outros trabalhos de natureza similar, como o produto criado pela Agência Nacional de Águas em 2016, o Mapeamento dos Espelhos D'água do Brasil, onde a eficácia do método proposto pôde ser verificada.

Figura 4 - Comparação dos resultados entre Almeida (2018) e ANA (2016)



Fonte: Almeida (2018)

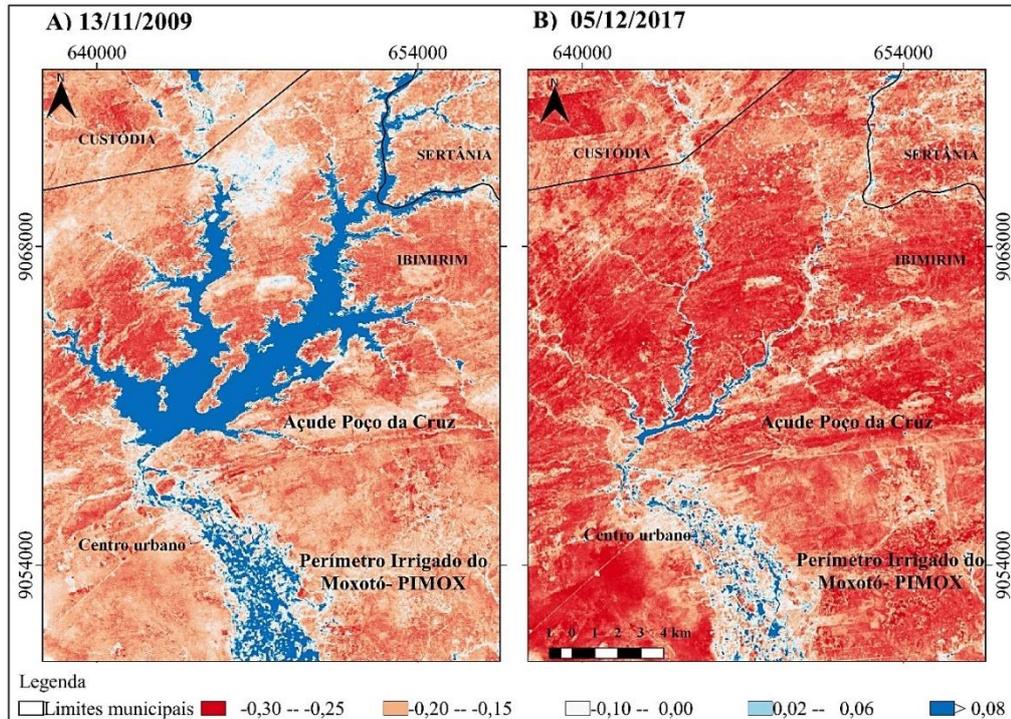
Rocha (2000), define a vetorização de corpos d'água como sendo a individualização das entidades que passaram por um processo de escandimento e pode ser feita de três maneiras: manualmente (*heads-up*), automaticamente ou semiautomaticamente. Segundo o autor, esse processo é necessário para a extração do contorno dos espelhos d'água e para o cálculo de suas respectivas áreas.

Bielenki Júnior *et al.* (2007) utilizaram 157 imagens CCD / CBERS II para mapear os reservatórios do nordeste brasileiro, dando um detalhamento maior para o reservatório de Sobradinho. Utilizou-se ainda imagens TM / Landsat para realizar o georreferenciamento. Nesse trabalho foi realizado a vetorização *heads-up*, onde um grupo de operadores perseguiram cada feição *raster* manualmente, escolhendo as primitivas geométricas que melhor modelem os reservatórios, conforme metodologia descrita por Rocha (2000). Após a vetorização de todos os reservatórios foi feita uma revisão para identificação e correção de possíveis erros e/ou inconsistências. Os autores observaram que devido a vetorização ter sido realizada manualmente, foi necessário bastante tempo e mão de obra para a execução das atividades, logo, a vetorização automática possui grande vantagem nesse sentido em comparação à vetorização *heads-up*.

Almeida *et al.* (2018) utilizaram imagens referentes aos anos de 2009 e 2017, do satélite Landsat 5, sensor *Thematic Mapper* (TM), e do satélite Landsat 8, sensor OLI, respectivamente, para identificar e verificar a variação de cobertura do solo e da área do açude Poço da Cruz, pertencente a parte central da bacia hidrográfica do rio Moxotó. Para tal, foi aplicado o NDWI

proposto por Gao (1996) que utiliza as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Figura 5 - Variação do NDWI do Açude Poço da Cruz entre 2009 e 2017

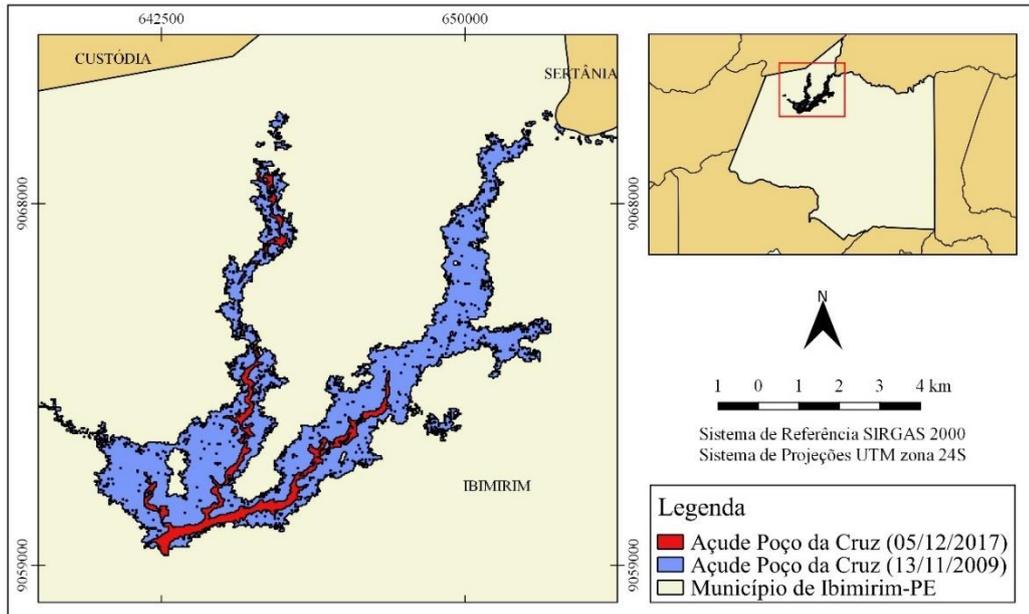


Fonte: Almeida *et al.* (2018)

A abordagem dos autores se mostrou eficiente na caracterização da cobertura do solo, havendo uma clara distinção da água para os demais elementos. As cartas georreferenciadas produzidas pelos autores demonstraram uma expressiva diminuição da lâmina d'água do açude no período estudado, evidenciado pela diminuição dos valores de NDWI (que aparecem em azul na Figura 5) no entorno do açude.

Para a extração do contorno do reservatório nas duas datas foi realizada a vetorização automática das imagens. O vetor foi construído utilizando os *pixels* com valores de NDWI maiores que 0,08. Após a vetorização, obteve-se a Figura 6, onde foi possível observar a variação espacial do açude Poço da Cruz, bem como calcular a área do açude nas duas datas, evidenciando a expressiva redução na área do espelho d'água.

Figura 6 – Vetorização do açude Poço da Cruz nos anos de 2009 e 2017



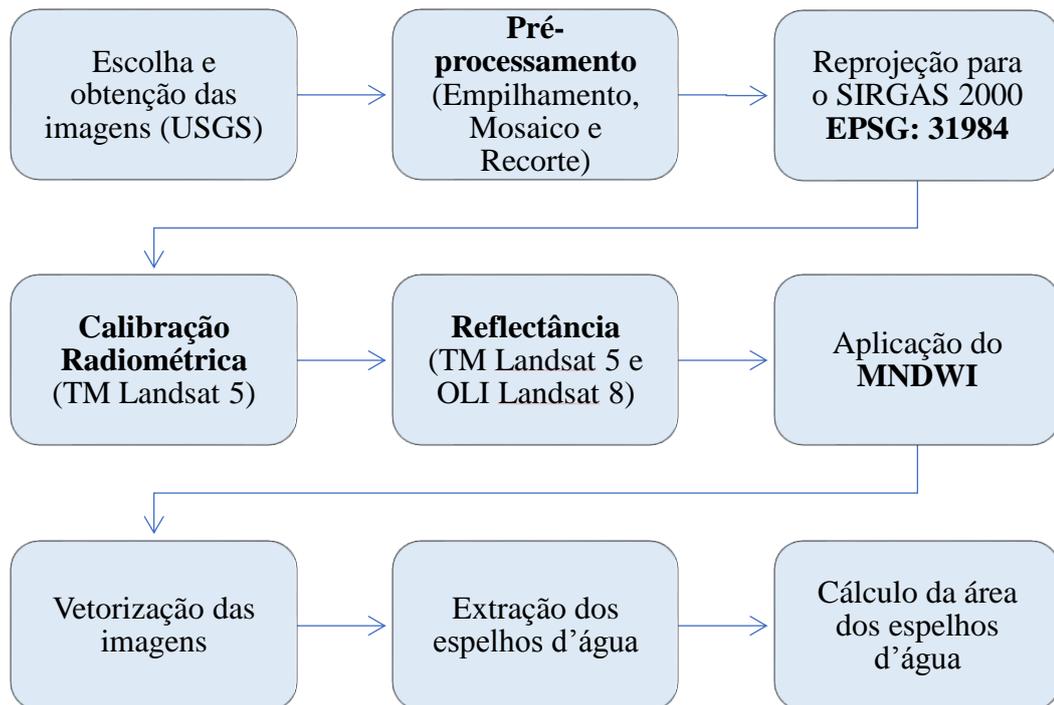
Fonte: Almeida *et al.* (2018)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os itens a seguir detalham as ferramentas e procedimentos metodológicos utilizadas para a obtenção dos resultados desta pesquisa.

Os procedimentos utilizados para a realização desta pesquisa seguem a ordem indicada no fluxograma exibido na Figura 7, a seguir:

Figura 7 - Fluxograma das etapas de processamento das imagens

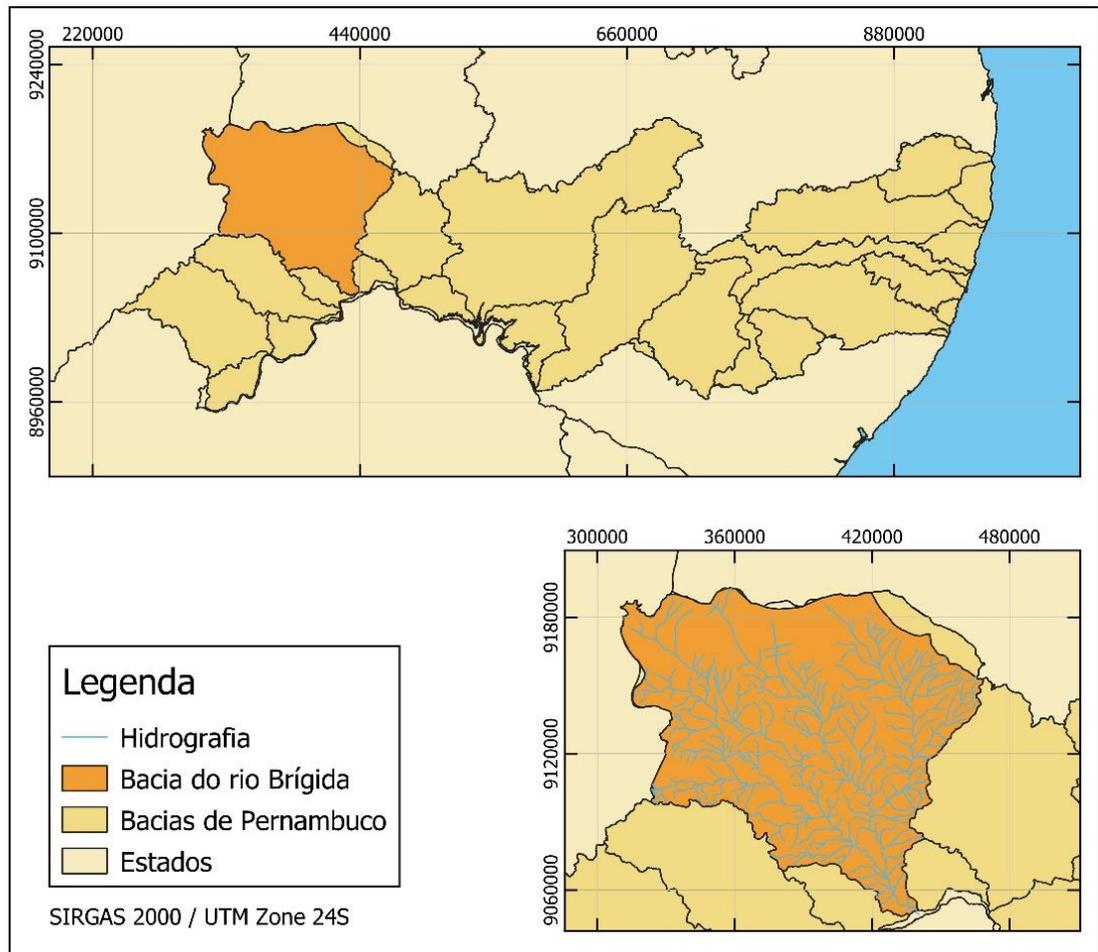


Fonte: Autor (2019)

3.1 Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa compreende toda a bacia hidrográfica do rio Brígida (destacada em laranja na Figura 8). Localizada no alto Sertão de Pernambuco, entre 07° 19' 02" e 08° 36' 32" de latitude Sul, e 39° 17' 33" e 40° 43' 06" de longitude Oeste. A bacia do rio Brígida limita-se ao norte com os Estados do Ceará e Piauí e com o grupo de bacias de pequenos rios interiores 9 - GI9 (UP28), ao sul com a bacia do riacho das Garças (UP12) e com o grupo de bacias de pequenos rios interiores 6 - GI6 (UP25), a leste com a bacia do rio Terra Nova (UP10) e o grupo de bacias de pequenos rios interiores 5 - GI5 (UP24), e a oeste com o Estado do Piauí (APAC, 2019a).

Figura 8 - Área de Estudo



Fonte: Autor (2019)

O rio Brígida nasce ao norte no município de Exú e apresenta uma extensão aproximada de 193 km até desaguar no rio São Francisco. Os principais afluentes são os riachos Tabocas, Alecrim, do Gentil, da Volta e São Pedro, pela margem direita, e os riachos dos Cavalos, Salgueiro, do Cedro e Carnaúba pela margem esquerda (APAC, 2019a). A bacia abrange uma área de 13.495,73 km², o que corresponde a 13,73% da superfície total do Estado, e está inserida na área de 15 municípios, dentre os quais oito estão totalmente inseridos na bacia.

Na bacia do rio Brígida existem 16 reservatórios com capacidade de armazenamento maior do que 1 hm³ e que são constantemente monitorados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e pela Agência Nacional de Águas (ANA), conforme mostra a Tabela 1, a seguir:

Tabela 1 - Reservatórios da bacia hidrográfica do rio Brígida

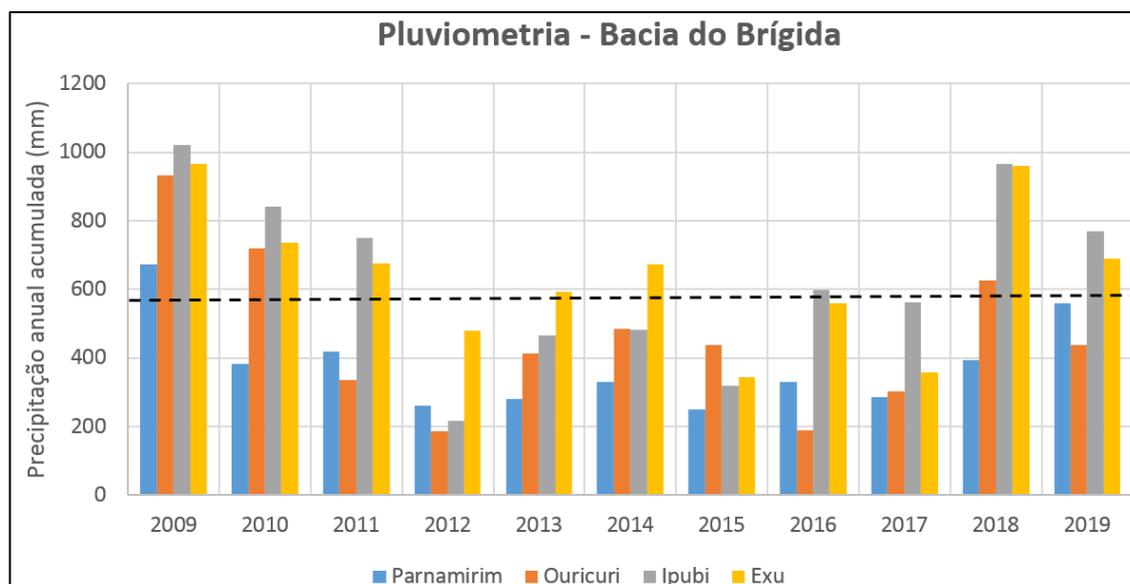
Reservatório	Capacidade (m³)	Município
Algodões	54.481.874	Ouricuri
Araripina	3.702.230	Araripina
Barriguda	1.617.979	Araripina
Cachimbo	31.007.000	Parnamirim
Caiçara	10.500.000	Parnamirim / Santa Maria da Boa Vista
Camará	5.300.000	Bodocó
Chapéu	188.000.000	Parnamirim
Engenheiro Camacho	27.664.500	Ouricuri
Entremontes	339.333.700	Parnamirim
Lagoa do Barro	13.161.975	Araripina
Lopes II	23.935.360	Bodocó / Ouricuri
Manuíno	1.984.117	Ipubi
Parnamirim	5.715.000	Parnamirim
Rancharia	1.042.810	Araripina
Sítio dos Moreiras	2.096.964	Moreilândia
Varzinha	1.127.160	Ouricuri

Fonte: APAC (2019a)

Por se tratar de uma área muito extensa, foi preciso utilizar postos pluviométricos de vários municípios inseridos na região hidrográfica para poder avaliar o comportamento pluviométrico da região, bem como sua tendência temporal. Para esse trabalho foram utilizados os postos de Parnamirim, Ouricuri, Ipubi e Exú. Os dados foram obtidos no site do Sistema de Geoinformação Hidrometeorológico de Pernambuco (SIGHPE) desenvolvido pela APAC (2019b). A pluviometria acumulada anual pode ser observada na Figura 9.

Através da análise dos dados pluviométricos foi possível observar que há uma diminuição na precipitação acumulada ao longo dos anos, tendo sido o período de 2012 a 2017 considerado crítico, devido a precipitação anual acumulada abaixo da média histórica que é de aproximadamente 600mm por ano (representada por uma linha tracejada preta na Figura 9). Há uma tendência de melhora nos anos de 2018 e 2019.

Figura 9 - Pluviometria acumulada anual da bacia hidrográfica do rio Brígida - PE



Fonte: Autor (2019)

3.2 Escolha e aquisição das imagens

Conforme Liebe (2002), as imagens do programa Landsat são utilizadas para detecção de corpos hídricos desde que as primeiras imagens foram disponibilizadas em 1972. Liebe (2002) utilizou as imagens do Landsat 7 (ETM+) para localizar e estimar a área dos espelhos d'água de 61 reservatórios afim de determinar seus volumes e estimar as perdas de água por evaporação na região Nordeste de Gana. Almeida (2018) utilizou imagens do Landsat 8 para identificar e extrair, com sucesso, a área dos espelhos d'água de 1157 reservatórios na bacia hidrográfica do rio Carinhanha afim de montar um modelo para determinar a influência desses açudes no escoamento superficial da região.

A escolha das imagens feitas pelos satélites Landsat foi embasada na utilização com sucesso das mesmas em diversos outros trabalhos de natureza semelhante, como os citados acima, de modo que as experiências obtidas por outros pesquisadores pudessem auxiliar no desenvolvimento das atividades desta pesquisa. Dessa forma, as imagens do Landsat 5 (sensor TM) e Landsat 8 (sensor OLI) foram escolhidas para a realização do presente trabalho.

O Landsat 5 iniciou sua operação em 1984 permanecendo ativo até 2013. Este satélite está equipado com o sensor *Thematic Mapper* (TM), operando com 7 bandas nas regiões do visível, infravermelho, médio e termal. As bandas do visível, do infravermelho próximo e médio possuem resolução geométrica de 30m, enquanto a banda do infravermelho termal possui resolução geométrica de 120m. Uma cena do Landsat 5 representa no solo uma área de

abrangência de 185 x 185 km (USGS, 2019a). A Tabela 2 apresenta as características de cada banda do Landsat 5 TM.

O Landsat 8 foi lançado em 2013 e está em operação até hoje. Este satélite está equipado com o sensor *Operational Land Imager* (OLI) que captura dados com precisão radiométrica de 12 bits (uma melhora em relação ao sinal de 8 bits do Landsat 5). As imagens realizadas pelo sensor OLI possuem 9 bandas na região do visível, infravermelho próximo, infravermelho de ondas curtas, além de uma banda pancromática (USGS, 2019). Cada cena representa uma área de 170 x 185 km, onde cada pixel dessa imagem possui resolução espacial de 30m (com 15m para a banda pancromática). A Tabela 3 apresenta as características de cada banda do Landsat 8 OLI:

Tabela 2 - Características das bandas espectrais do Landsat 5 TM

Bandas	Comprimento de onda (μm)	Resolução (m)
(B1) Azul	0,45 – 0,52	30
(B2) Verde	0,52 – 0,60	30
(B3) Vermelho	0,63 – 0,69	30
(B4) Infravermelho Próximo 1	0,76 – 0,90	30
(B5) Infravermelho Médio	1,55 – 1,75	30
(B6) Infravermelho Termal	10,40 – 12,50	120
(B7) Infravermelho Médio	2,08 – 2,35	30

Fonte: USGS (2019)

O Landsat 8 foi lançado em 2013 e está em operação até hoje. Este satélite está equipado com o sensor *Operational Land Imager* (OLI) que captura dados com precisão radiométrica de 12 bits (uma melhora em relação ao sinal de 8 bits do Landsat 5). As imagens realizadas pelo sensor OLI possuem 9 bandas na região do visível, infravermelho próximo, infravermelho de ondas curtas, além de uma banda pancromática (USGS, 2019). Cada cena representa uma área de 170 x 185 km, onde cada pixel dessa imagem possui resolução espacial de 30m (com 15m para a banda pancromática). A Tabela 3 apresenta as características de cada banda do Landsat 8 OLI:

Tabela 3 - Características das bandas espectrais do Landsat 8 OLI

Bandas	Comprimento de onda (μm)	Resolução (m)
(B1) Costal	0,43 – 0,45	30
(B2) Azul	0,45 – 0,51	30
(B3) Verde	0,53 – 0,59	30
(B4) Vermelho	0,64 – 0,67	30
(B5) Infravermelho Próximo	0,85 – 0,88	30
(B6) Infravermelho de Ondas Curtas 1	1,57 – 1,65	30
(B7) Infravermelho de Ondas Curtas 2	2,11 – 2,29	30
(B8) Pancromática	0,50 – 0,68	15
(B9) Cirrus	1,36 – 1,38	30

Fonte: USGS (2019a)

A data das imagens escolhidas foram 24/09/2009, referente ao Landsat 5, e 20/09/2019, referente ao Landsat 8. Para cobrir toda a região da bacia hidrográfica do rio Brígida foi preciso utilizar duas cenas, ambas pertencentes a órbita 217 e aos pontos 065 e 066. Foi priorizada a escolha de imagens com a menor quantidade de nuvens para evitar interferência dessas nos resultados do trabalho, conforme relatado por Santos *et al.* (2009).

A Tabela 4 apresenta um resumo das imagens obtidas pra a realização deste estudo:

Tabela 4 - Resumo das imagens obtidas

Satélite	Sensor	Órbita/Ponto	Data	% Nuvens
Landsat 5	TM	217/66	24/09/2009	0
Landsat 5	TM	217/65	24/09/2009	3
Landsat 8	OLI	217/66	20/09/2019	0
Landsat 8	OLI	217/65	20/09/2019	0

Fonte: Autor (2019)

As imagens dos satélites Landsat 5 e Landsat 8 foram obtidas gratuitamente no portal do USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). A Figura 10 exibe os parâmetros de pesquisa utilizados no referido portal.

Figura 10 - Parâmetros de pesquisa para obtenção das imagens no *Earthexplorer*

The screenshot displays the Earth Explorer search interface, divided into two main sections: '1. Enter Search Criteria' and '2. Select Your Data Set(s)'. The left panel includes options for geocoding (Path/Row, Point, Polygon) and date ranges (Search from: 01/01/2009 to 12/31/2009). The right panel shows a list of data sets, including Landsat Collection 1 Level-1, with checkboxes for selection.

Fonte: USGS (2019b)

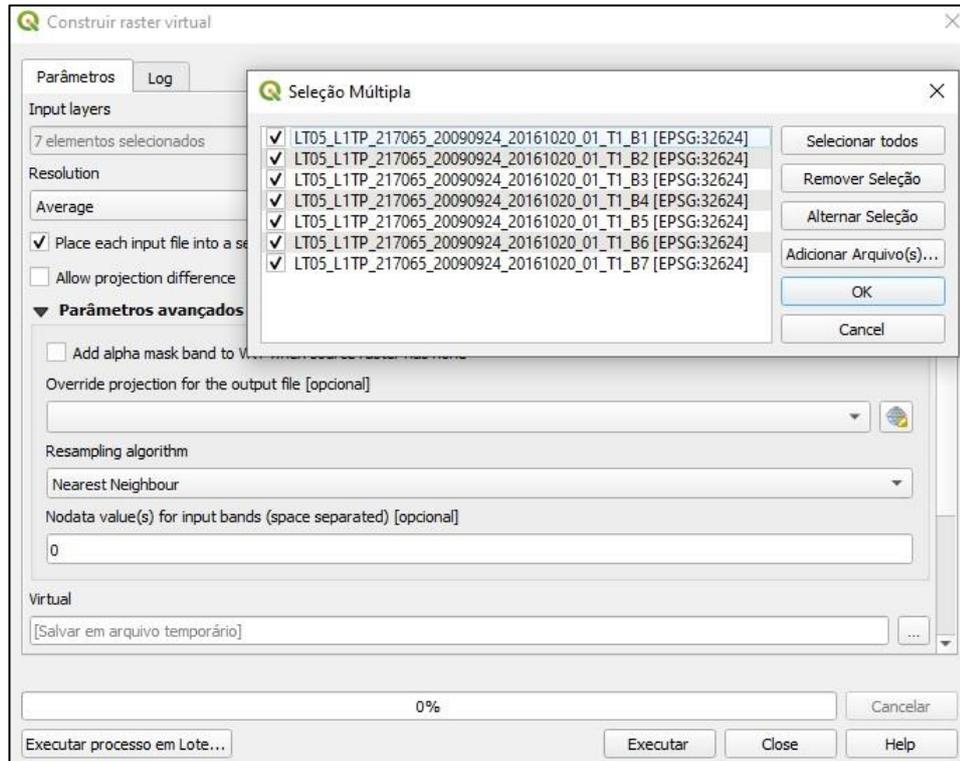
3.3 Empilhamento, composição do Mosaico e aplicação do recorte

Para a aplicação dos métodos de calibração radiométrica e, posteriormente, realização dos cálculos para obtenção dos índices foi necessário que todas as bandas fossem compostas em uma única imagem. Para tal, foi necessário empilhar as imagens das respectivas bandas. Este processo foi realizado com o auxílio do software de livre acesso QGIS 3.4.12 através dos comandos: *Raster / Miscelânea / Construir raster virtual*. As bandas 1 a 7 do satélite Landsat 5 TM e as bandas 1 a 6 do Landsat 8 OLI foram utilizadas para o empilhamento das respectivas bandas. A Figura 11 mostra a tela de configuração para a realização do empilhamento da cena 217/65 do Landsat 5 TM, para as demais cenas o processo foi feito de maneira idêntica.

Como a bacia hidrográfica do rio Brígida apresenta uma grande extensão territorial, foi necessário o uso de mais de uma imagem de cada satélite afim de cobrir toda a área de estudo. Para a aplicação das técnicas de Sensoriamento Remoto é necessário que essas imagens estejam juntas num único arquivo, o processo responsável por juntar duas ou mais cenas é conhecido como “mosaico”. Após serem empilhadas, as cenas 217/65 e 217/66 de cada satélite foram

mosaicadas com o auxílio da ferramenta “Construir *raster* virtual” do QGIS 3.4.12, de maneira semelhante ao processo de empilhamento de imagens mas com o diferencial que a opção “*Place each input file into a separate band*” deve ser desmarcada, conforme indicado na Figura 12.

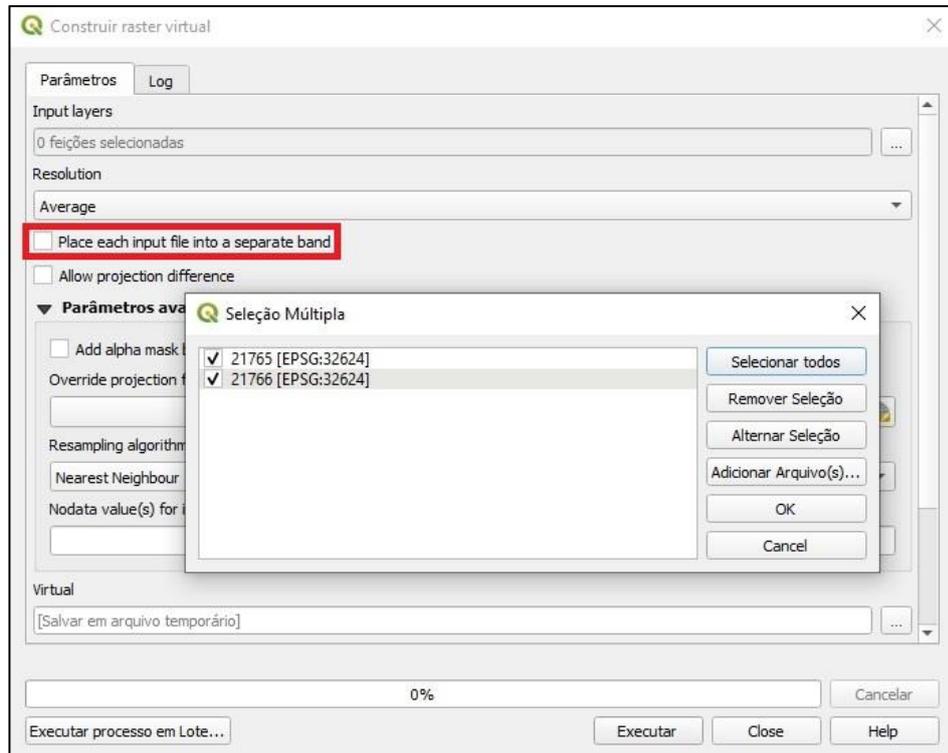
Figura 11 - Configurações do QGIS 3.4.12 para o empilhamento das bandas



Fonte: Adaptado do *software* QGIS 3.4.12

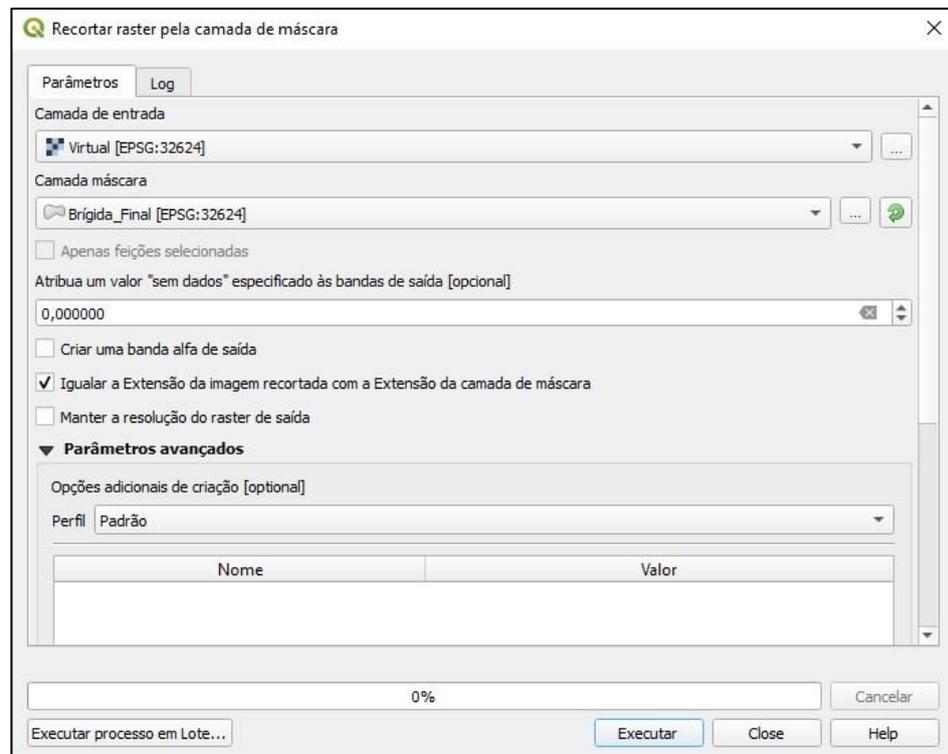
Como o mosaico final é maior do que a área de estudo foi necessário a realização do recorte da área de estudo, deste modo foi feito o recorte da imagem já empilhada e mosaicada para que fique de acordo com os limites geográficos da bacia hidrográfica do rio Brígida. A aplicação do “recorte pela máscara” no QGIS 3.4.12 pode ser utilizada através dos seguintes comandos: *Raster / Extrair / Recortar raster* pela camada de máscara. Nesta ferramenta foi adicionado o arquivo do tipo *raster* que será recortado (arquivo mosaico obtido na etapa anterior) e a máscara a ser aplicada (arquivo que contém o contorno da região hidrográfica que se pretende estudar). A Figura 13 exemplifica a aplicação da ferramenta de recorte.

Figura 12 - Configurações do QGIS 3.4.12 para a construção do mosaico



Fonte: Adaptado do *software* QGIS 3.4.12

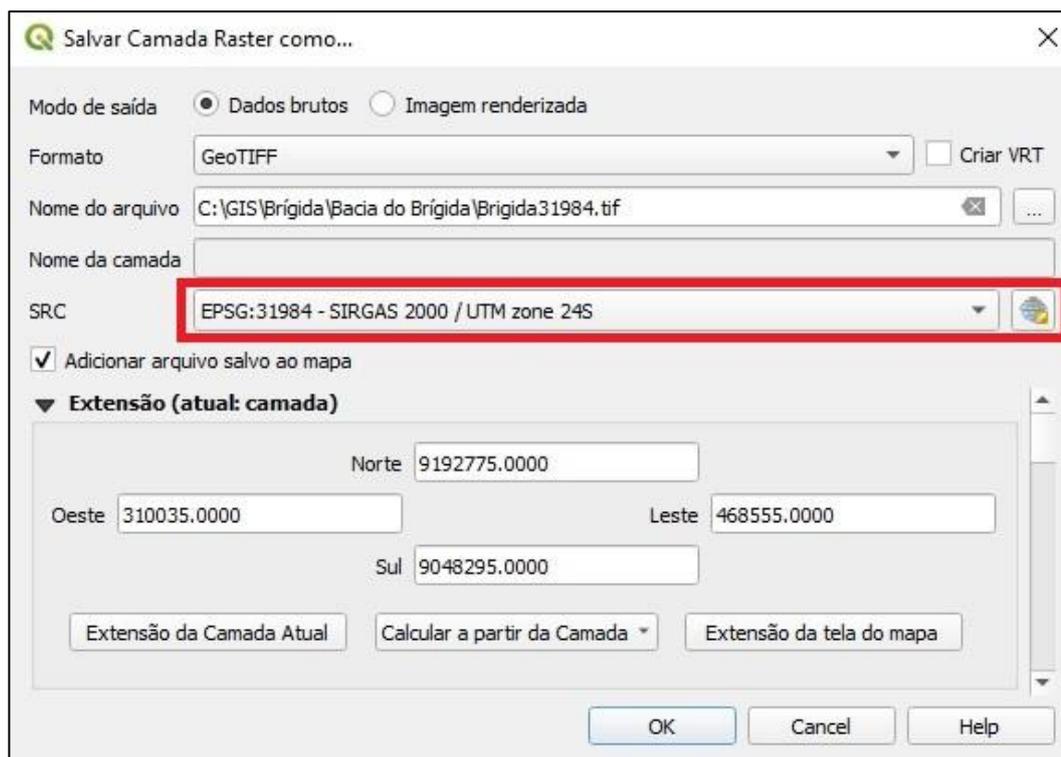
Figura 13 - Ferramenta de recorte pela máscara



Fonte: Adaptado do *software* QGIS 3.4.12

Para o correto georreferenciamento das imagens obtidas, o arquivo *raster* resultante foi reprojetoado para o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) de código EPSG 31984, referente ao SIRGAS 2000 / UTM Zone 24 S. No QGIS 3.4.12 esse processo foi feito através dos seguintes comandos: Camadas / Salvar como... / SRC, conforme ilustrado pela Figura 14.

Figura 14 - Reprojeção para o SRC 31984

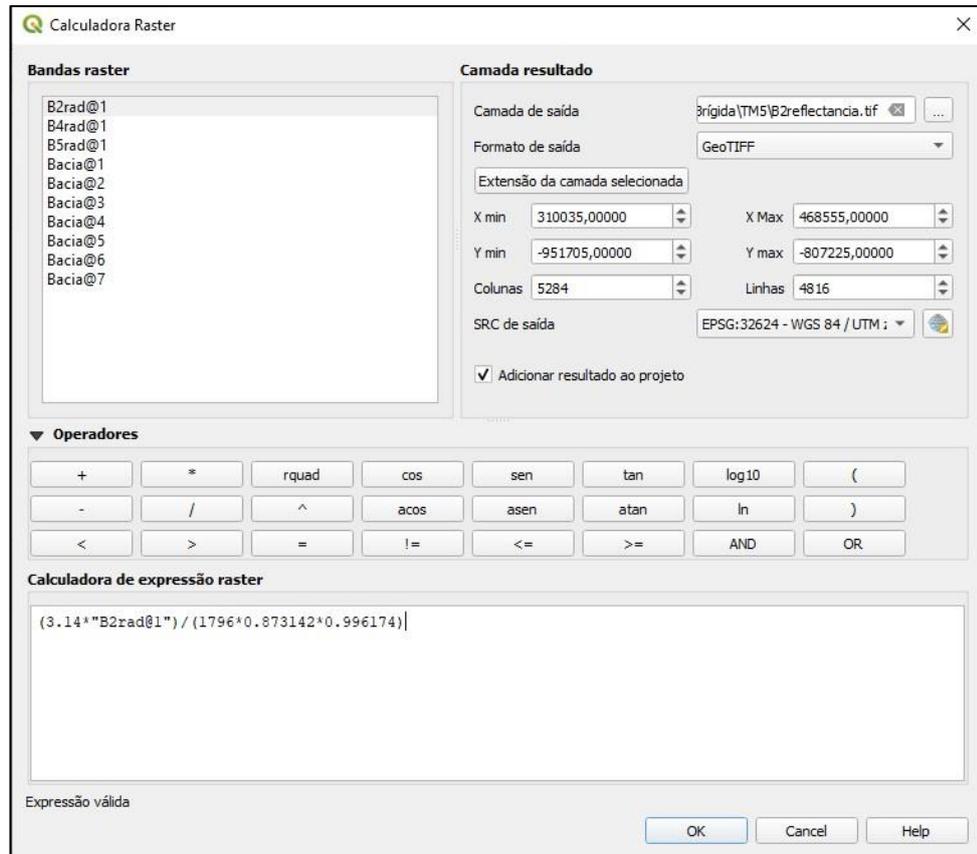


Fonte: Adaptado do *software* QGIS 3.4.12

3.4 Processamento das imagens e aplicação do MNDWI

Antes do cálculo do MNDWI foi necessário o processamento da radiância e da reflectância. Os próximos itens consistem nas etapas do processamento digital das imagens dos satélites Landsat 5 TM e Landsat 8 OLI utilizadas para as análises temporais na área de estudo.

Todos os cálculos que envolvem as bandas espectrais das imagens (para a obtenção da reflectância e do MNDWI, por exemplo) foram realizados com a ferramenta de “calculadora *raster*” do *software* QGIS 3.4.12, através dos comandos: *Raster* / Calculadora *Raster*. A Figura 15 exemplifica o uso dessa ferramenta:

Figura 15 - Calculadora *raster* do QGIS 3.4.12

Fonte: Adaptado do *software* QGIS 3.4.12

3.4.1 Processamento das imagens para o Landsat 5

O primeiro passo para o processamento de imagens Landsat 5 foi a calibração radiométrica. Conforme proposto por Markham & Baker (1987), na calibração radiométrica o número digital (ND) foi convertido em radiância espectral de cada banda ($L_{\lambda i}$) através da Equação 1, a seguir:

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

Onde: $L_{\lambda i}$ = radiância espectral de cada banda ($Wm^{-2} * sr^{-1} * \mu m^{-1}$), a = radiância espectral máxima, b = radiância espectral mínima, i = cada banda do TM Landsat 5 e ND = número digital (intensidade do pixel, corresponde a um valor inteiro entre 0 e 255). Esses valores são exibidos na Tabela 5 desenvolvida por Chander *et al.* (2009).

Tabela 5 - Parâmetros para a calibração radiométrica

Bandas	Comprimento de onda	Coeficientes de Calibração ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)		Irradiância espectral no Topo da Atmosfera k_{λ_i} ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)
		a (desde 1994)	b (depois 02/04/2007)	
1 (Azul)	0,452 – 0,518	-1,52	169,0	1983
2 (Verde)	0,528 – 0,609	-2,84	333,0	1796
3 (Vermelho)	0,626 – 0,693	-1,17	264,0	1536
4 (IV – próximo)	0,776 – 0,904	-1,51	221,0	1031
5 (IV – médio)	1,567 – 1,784	-0,37	30,2	220
6 (IV – Termal)	10,450 – 12,420	1,238	15,303	-
7 (IV – Médio)	2,097 – 2,349	-0,15	16,5	83,44

Fonte: Adaptado de Chander *et al.* (2009)

Em seguida, determinou-se a reflectância espectral monocromática de cada banda (ρ_{λ_i}), para tal, é preciso ter os valores da radiância espectral (L_{λ_i}) e da irradiância solar espectral no topo da atmosfera (k_{λ_i}) para cada banda, além do ângulo zenital (Z) e da distância Terra-Sol (d_r), determinados conforme as Equações 2, 3 e 4, a seguir:

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi * L_{\lambda_i}}{k_{\lambda_i} * \cos Z * d_r} \quad (2)$$

$$\cos Z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) \quad (3)$$

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{DSA * 2\pi}{365}\right) \quad (4)$$

Todos os cálculos foram feitos através da ferramenta “Calculadora *Raster*”, conforme exemplificado na Figura 15.

3.4.2 Processamento das imagens para o Landsat 8

O processamento das imagens do satélite Landsat 8 OLI é feito conforme Silva *et al.* (2016). Os coeficientes radiométricos disponíveis no arquivo de metadados das imagens USGS (2019b) são utilizados para conversão dos valores quantizados e calibrados (ND) do sensor

Landsat 8 OLI para reflectância espectral. A reflectância planetária no topo da atmosfera ($\rho'\lambda$) foi calculada a partir da Equação 5.

$$\rho'\lambda = M_\rho * Q_{cal} + A_\rho \quad (5)$$

Onde $\rho'\lambda$ não apresenta correção para o ângulo solar. M_ρ corresponde ao fator multiplicativo de reescalonamento para cada banda, Q_{cal} ao número digital para cada pixel e A_ρ corresponde ao fator aditivo de reescalonamento para cada banda (todos disponíveis nos metadados da imagem). A Equação 6 é utilizada para corrigir a reflectância em função do ângulo solar e da distância astronômica Terra-Sol (d):

$$\rho\lambda = \frac{\rho'\lambda}{\cos(\theta_{sz}) * \left(\frac{1}{d^2}\right)} = \frac{\rho'\lambda}{\sin(\theta_{se}) * \left(\frac{1}{d^2}\right)} \quad (6)$$

Sendo $\rho\lambda$ a reflectância planetária no topo da atmosfera corrigida, θ_{se} o ângulo de elevação solar (disponível nos metadados da imagem) e θ_{sz} o ângulo zenital solar local (calculado a partir de $\theta_{sz} = 90^\circ - \theta_{se}$).

Da maneira similar ao processamento do Landsat 5, todos os cálculos presentes nessa seção foram feitos como auxílio da ferramenta “Calculadora *Raster*” do QGIS 3.4.12, conforme exemplificado na Figura 15.

3.4.3 Cálculo do MNDWI

A escolha do índice utilizado foi baseada principalmente em trabalhos de outros autores que possuem natureza semelhante ao presente estudo, tal qual os realizados por Ji *et al.* (2009), que analisaram a variação dos limites dinâmicos de diferentes NDWIs e concluíram que o índice que apresentava o melhor realce da área do espelho d’água foi o desenvolvido por Xu (2006), e o feito por Almeida (2018), que mapeou pequenos reservatórios na bacia do rio Carinhanha utilizando os índices propostos por McFeeters (1996) e Xu (2006), também chegando a conclusão que o último apresentou um melhor realce dos corpos hídricos. Diante desses e de vários outros resultados obtidos em pesquisas anteriores, o NDWI escolhido foi o de Xu (2006),

que utiliza as bandas Verde e o Infravermelho de ondas curtas (SWIR), denominado de MNDWI.

Para o Landsat 5, a equação o MNDWI foi calculado através de uma combinação da reflectância espectral monocromática das bandas 2 e 5, conforme mostra a Equação 7:

$$MNDWI_{TM5} = \frac{\rho_{\lambda 2} - \rho_{\lambda 5}}{\rho_{\lambda 2} + \rho_{\lambda 5}} \quad (7)$$

Para o Landsat 8, o MNDWI foi calculado através da combinação da reflectância planetária no topo da atmosfera corrigida das bandas 3 e 6, de acordo com a Equação 8, a seguir:

$$MNDWI_{OLI8} = \frac{\rho_{\lambda 3} - \rho_{\lambda 6}}{\rho_{\lambda 3} + \rho_{\lambda 6}} \quad (8)$$

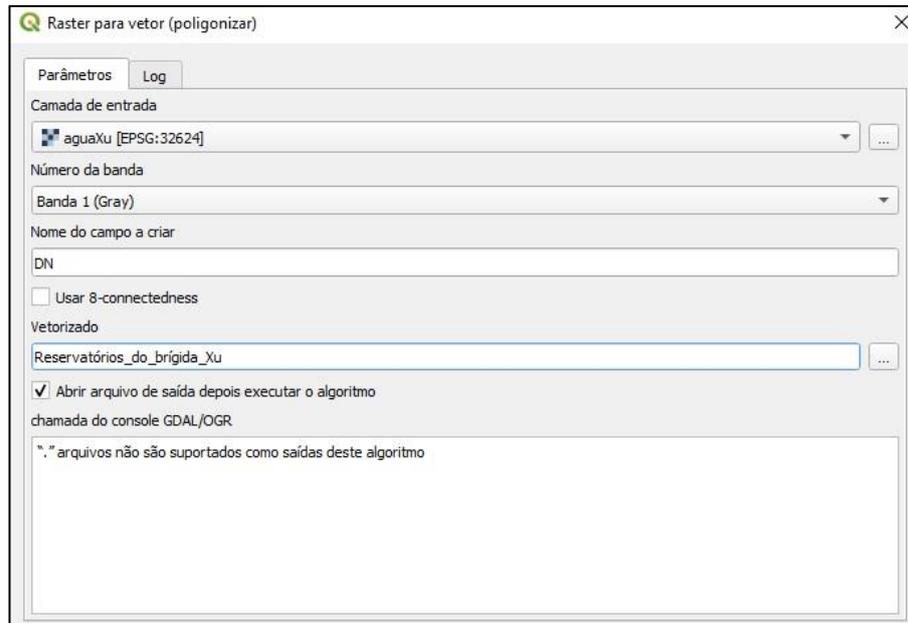
Todos os cálculos foram feitos com o auxílio da ferramenta “Calculadora *Raster*”, conforme exemplificado na Figura 15.

3.5 Extração dos espelhos d’água

A aplicação do MNDWI retorna uma imagem *raster* com valores de *pixels* que variam de -1 a 1, onde os valores positivos informam que naquele *pixel* há a presença de água. Dessa forma, para extração e cálculo da área dos espelhos d’água foi preciso realizar vetorização dos *pixels* com valores maiores que zero. Para tal, a imagem em formato .TIFF gerada após o processamento do MNDWI foi importada na ferramenta “*Raster para vetor*” (acessado através dos comandos: *Raster / Converter / Raster para vetor*) do QGIS 3.4.12, tendo como resultado um arquivo no formato *shapefile* contendo a geometria dos corpos hídricos, como mostrado na Figura 16.

Porém, como relatado por Liebe *et al.* (2005) que através de imagens Landsat com 30 metros de resolução espacial, a probabilidade de classificar elementos de pequeno tamanho indevidamente é alta. Desse modo, para o presente trabalho serão desconsiderados objetos com área menor que 1 ha.

Figura 16 - Ferramenta de conversão *raster* para vetor



Fonte: Adaptado do *software* QGIS 3.4.12

Figura 17 - Massas d'água produzido pela ANA

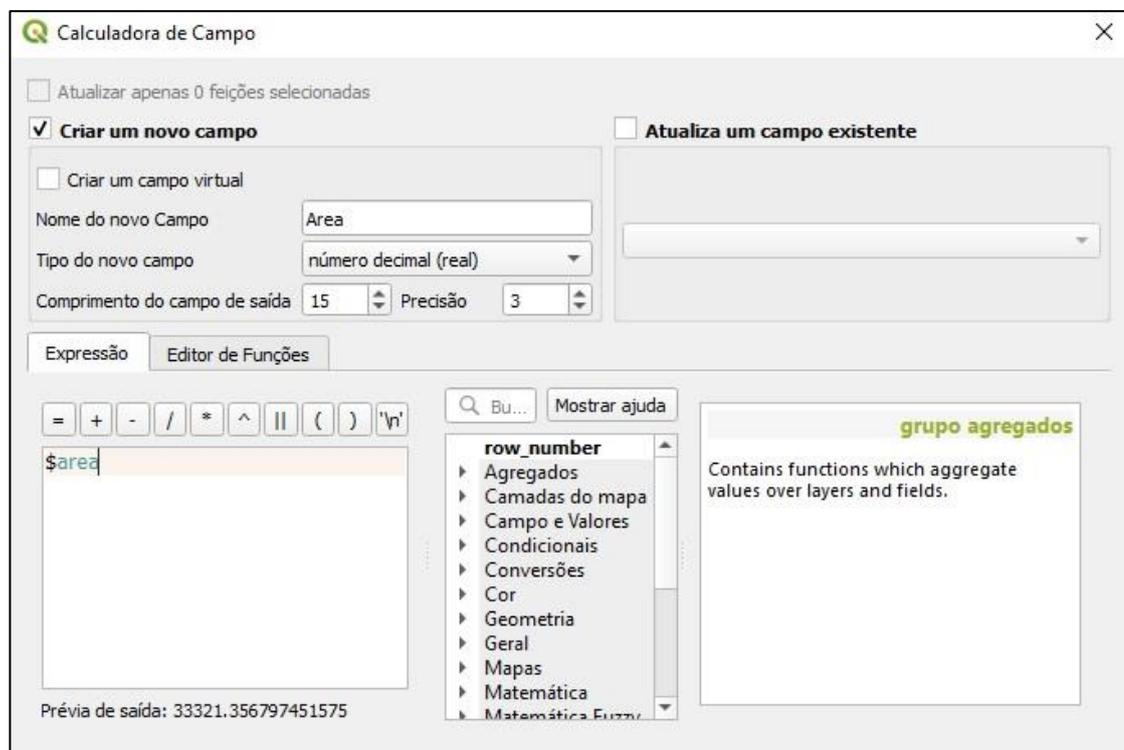


Fonte: Adaptado da ANA (2016)

O *shapefile* contendo os espelhos d'água nas duas datas deste trabalho foram comparados ao Massas d'água, produto desenvolvido pela Agência Nacional de Águas. Nesse trabalho foi feito o mapeamento das massas d'água de todo o Brasil com o propósito de gerar informações para subsidiar o planejamento e gestão do setor de recursos hídricos (ANA, 2016). A Figura 17 mostra o *shapefile* produzido pela ANA, com enfoque em parte da região Nordeste para melhor visualização, que serviu de base para comparar com os espelhos d'água obtidos através do método de vetorização automática no presente trabalho.

Após a extração dos espelhos d'água, foi adicionado um componente de área em metros quadrados na tabela de atributos do arquivo *shapefile* gerado através da ferramenta de “Calculadora de Campo” do QGIS 3.4.12, acessada através dos seguintes comandos: Abrir tabela de atributos / Abrir calculadora de campo. A área foi calculada automaticamente através da função “\$area”, no presente trabalho o campo área foi do tipo “número decimal”, tendo precisão de três casas decimais. A Figura 18 mostra as configurações necessárias para o cálculo da área após a vetorização dos espelhos d'água.

Figura 18 - Ferramenta utilizada para o cálculo da área dos espelhos d'água

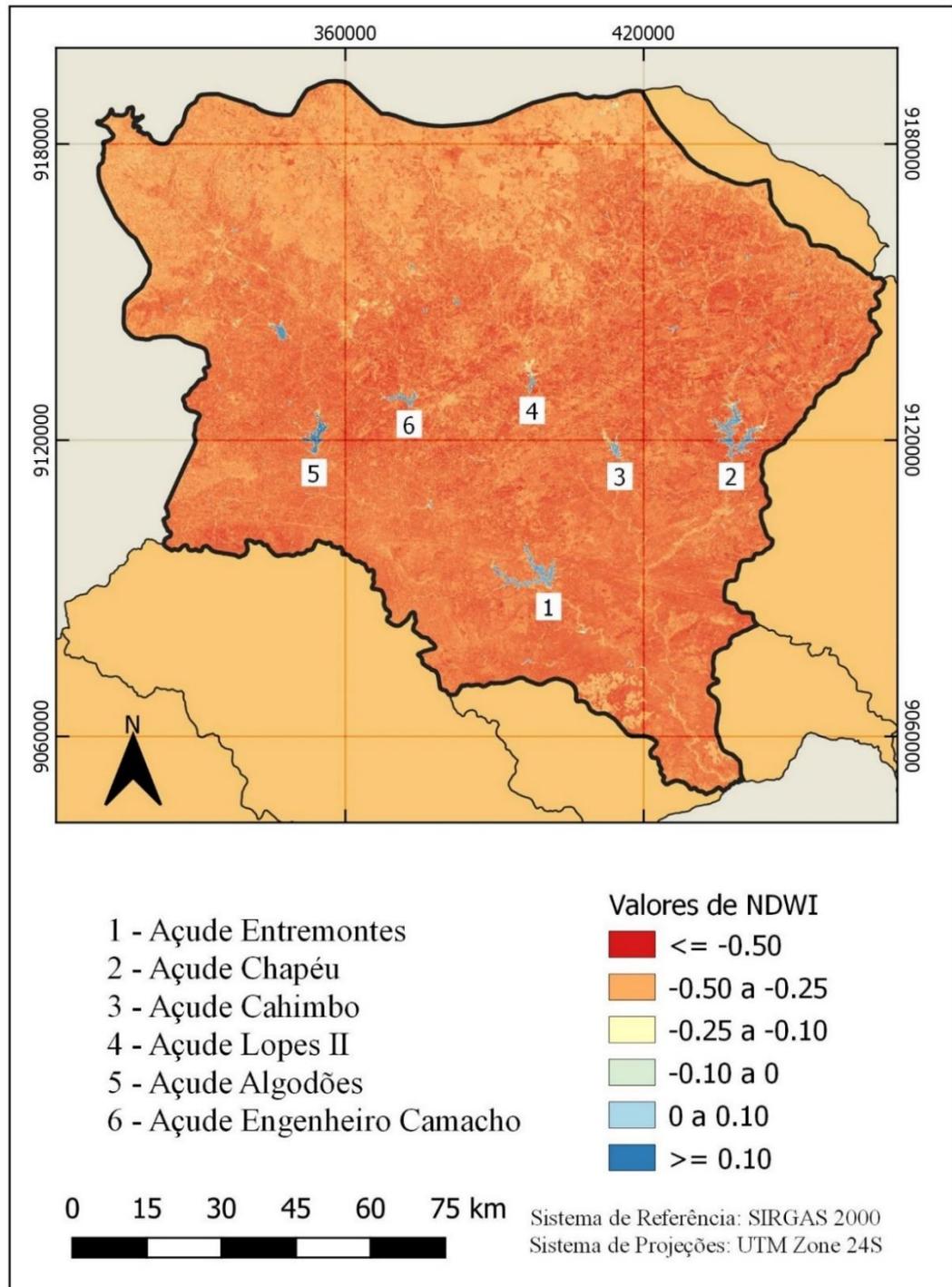


Fonte: Adaptado do *software* QGIS 3.4.12

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do processamento das imagens do TM Landsat 5 através do uso do MNDWI obteve-se o resultado disposto na Figuras 19, referente ao ano de 2009.

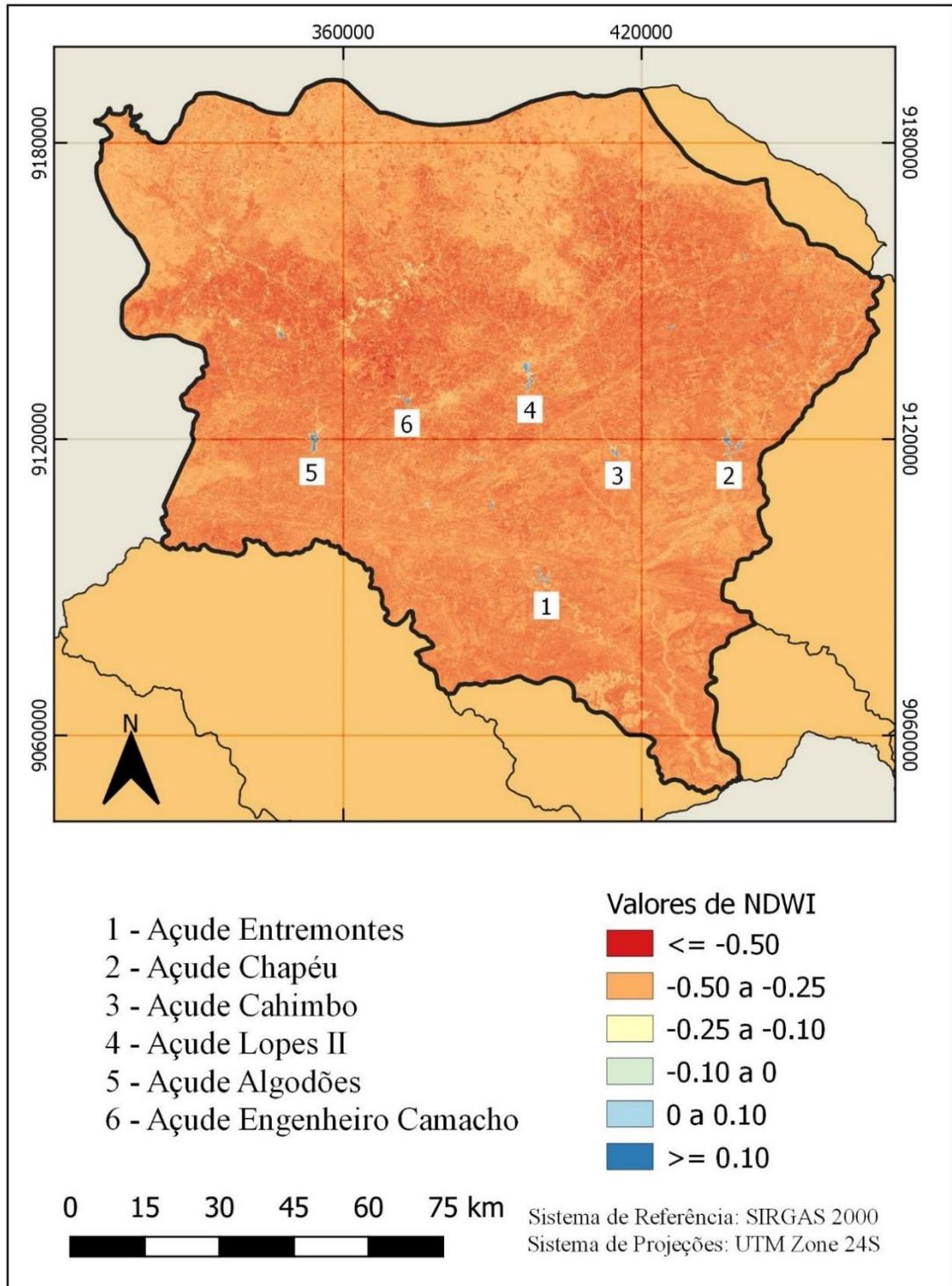
Figura 19 - Resultado da aplicação do MNDWI para o ano de 2009



Fonte: Autor (2019)

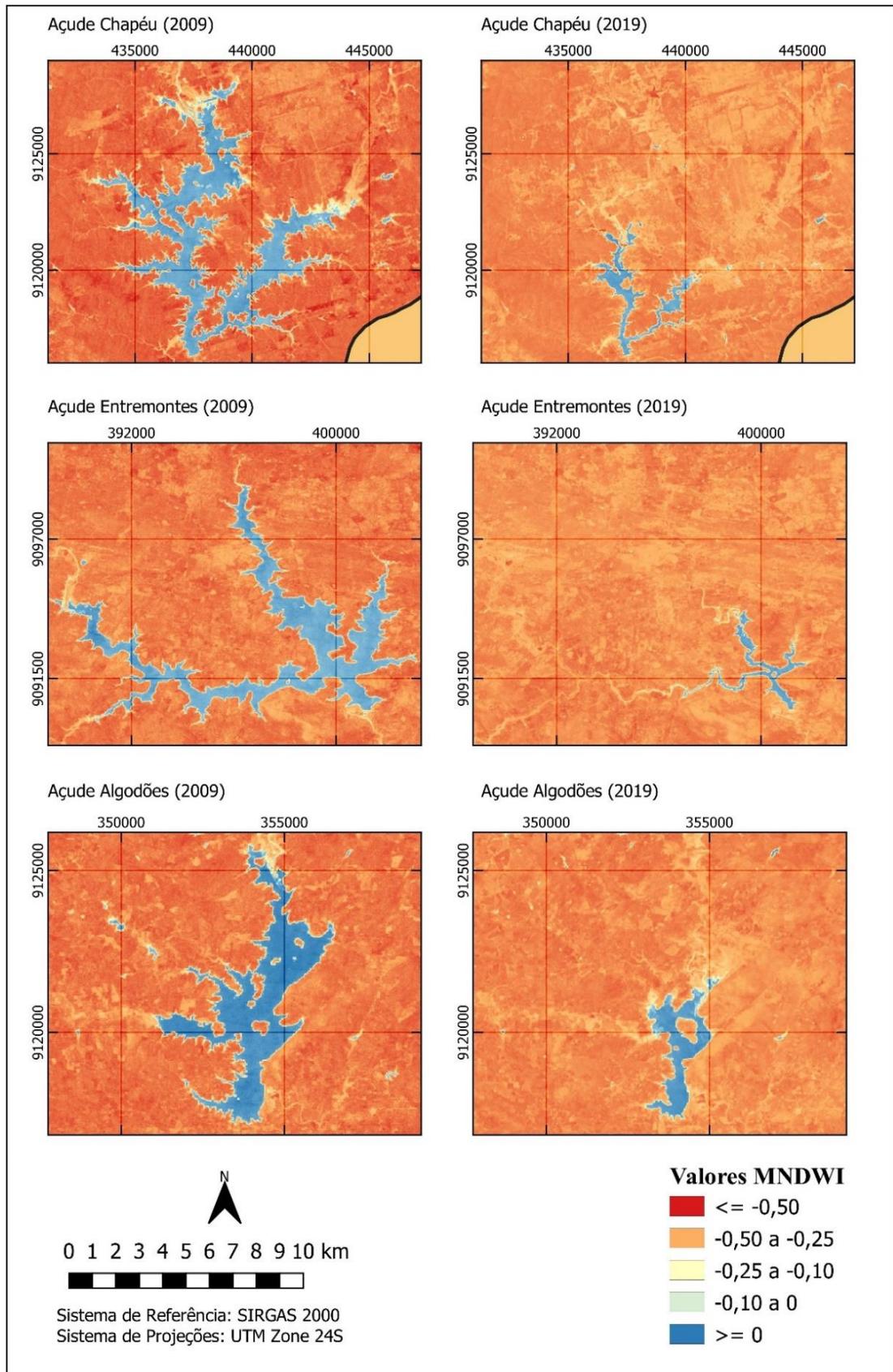
Na sequência, é exibido o resultado obtido através do processamento das imagens do Landsat 8 OLI com o uso do MNDWI na Figura 20, referente ao ano de 2019.

Figura 20 - Resultado da aplicação do MNDWI para o ano de 2019



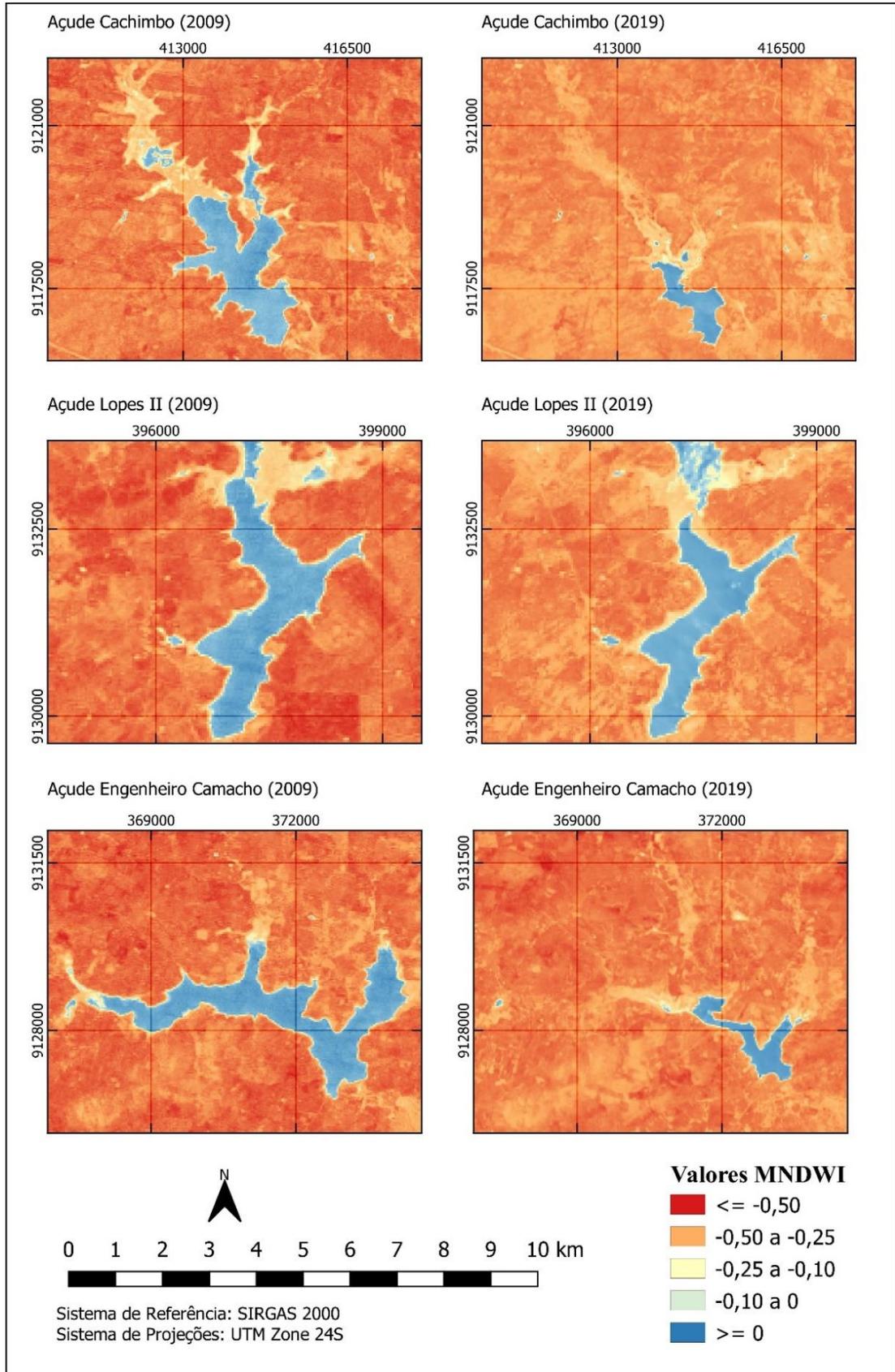
Fonte: Autor (2019)

Figura 21 – Variação do MNDWI entre os anos de 2009 e 2019



Fonte: Autor (2019)

Figura 22 - Variação do MNDWI entre os anos de 2009 e 2019



Fonte: Autor (2019)

É importante destacar a grande presença de valores negativos na região, representados pelos tons de vermelho, laranja e amarelo, o que indica uma baixa disponibilidade hídrica na bacia. Observando em detalhes, há uma diminuição significativa no tamanho dos espelhos d'água (representado em azul). Os baixos valores de MNDWI encontrados na região se devem aos déficits de chuva ao longo da década. Segundo relatório climático divulgado pela *World Meteorological Organization* (WMO, 2014), a região do semiárido nordestino se encontra em déficit pluviométrico desde 2011, onde em 2013 culminou a pior seca registrada nos últimos 50 anos.

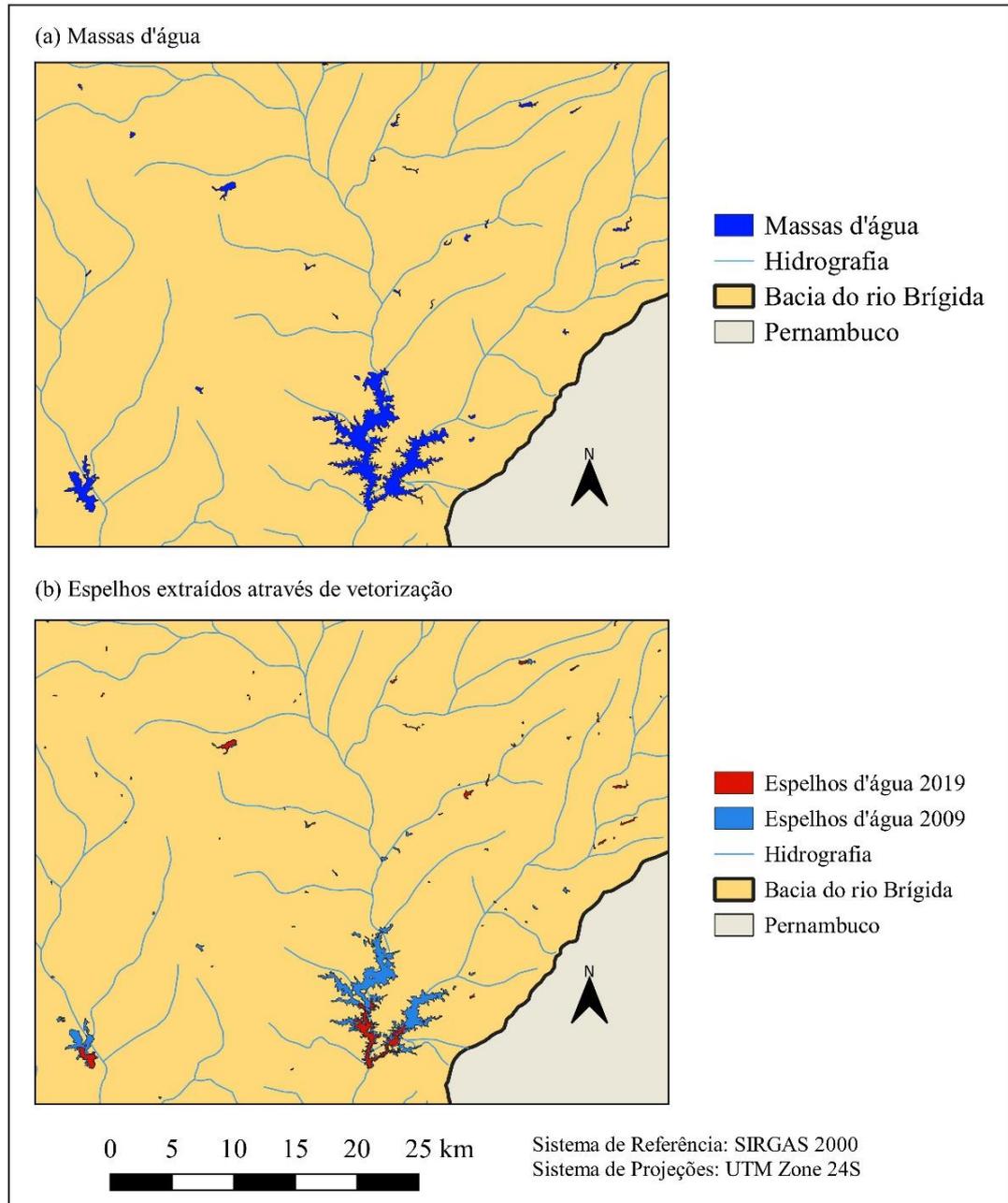
Considerando a escassez de chuva na região que ocorre desde 2012, conforme mostra a Figura 9, esperou-se uma diminuição no volume armazenado dos açudes, visto que a chuva tem forte influência na recarga hídrica dos reservatórios (Bacalhau *et al.*, 2017). A redução da área dos espelhos d'água pertencentes a bacia hidrográfica do rio Brígida, evidenciada pela evolução do MNDWI nas Figuras 19 e 20, corroborou com o comportamento esperado de uma situação de escassez de chuvas.

Conforme relatado por Bacalhau *et al.* (2017), a escassez de chuvas que ocorreu de 2011 em diante teve forte impacto no volume armazenado dos açudes, todos os seis maiores reservatórios da bacia do Brígida sofreram redução em seus volumes armazenados entre os períodos de 2009 e 2019, como pôde ser observado pela significativa redução da área dos espelhos d'água nas Figuras 21 e 22 (em azul).

Para se extrair os espelhos d'água da bacia nas duas datas, foi realizado o procedimento de vetorização conforme previamente detalhado. Considerando apenas os espelhos d'água com área maior que 1 ha, obteve-se um arquivo em formato *shapefile* contendo todas os açudes da bacia devidamente delimitados.

A Figura 23 mostra o comparativo entre os resultados obtidos no presente estudo e o produto disponibilizado pela ANA. Devido a bacia hidrográfica do rio Brígida possuir uma área considerável, a comparação foi realizada em uma escala menor de modo que fosse possível observar um maior detalhamento das feições dos espelhos d'água, facilitando a análise. Sendo assim, a Figura 23 exhibe os açudes presentes numa mesma região inserida na bacia do Brígida, nela é possível observar que a vetorização automática atingiu um resultado satisfatório, tendo conseguido delimitar todos os principais reservatórios da região e ainda vários outros de menor dimensão.

Figura 23 – Massas d'água e espelhos d'água vetorizados



Fonte: Autor (2019)

A extração dos espelhos d'água contabilizou 282 elementos com área maior que 1 ha para o ano de 2009, totalizando uma área 8.253,18 ha, enquanto para o ano de 2019 só foram identificados 211 corpos d'água com área superficial maior que 1 ha, totalizando uma área de 2.433,68 ha. Portanto, entre os anos de 2009 e 2019 houve uma diminuição de 70,51% na área total de espelhos d'água de açudes maiores que 1 ha, demonstrando assim a diminuição da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Rio Brígida. Os resultados encontrados

condizem com a realidade da região que se encontra há anos em situação de seca, conforme relatório da *World Meteorological Organization* (2014).

O método de extração de feições através da vetorização da imagem *raster* se mostrou eficiente, visto que foi possível identificar, extrair a geometria, classificar e estimar a área dos reservatórios da bacia do rio Brígida com boa precisão. A Tabela 6 mostra a distribuição dos espelhos d'água encontrados com relação a área, fazendo uma classificação por intervalos.

Tabela 6 - Classificação dos reservatórios da bacia do Brígida por área

Área (ha)	2009		2019	
	Qtd.	% do total	Qtd.	% do total
Entre 1 e 10	241	85,46	186	88,15
Entre 10 e 20	19	6,74	13	6,16
Entre 20 e 50	13	4,61	4	1,90
Entre 50 e 100	2	0,71	2	0,95
Maior que 100	7	2,48	6	2,84
TOTAL	282		211	

Fonte: Autor (2019)

Bacalhau *et al.* (2017) detectaram a redução do espelho d'água do Açude Algodões entre os anos de 2011 e 2016 devido à escassez de chuvas que ocorre desde o início de 2011. Segundo os autores, a área do açude reduziu de aproximadamente 10.303.380 m² para 422.730 m² durante o período, representando uma diminuição de quase 96%, corroborando com os resultados obtidos nesse trabalho, conforme mostrado na Figura 24 e na Tabela 7.

Almeida *et al.* (2018) estudaram as variações do comportamento espaço-temporal da bacia hidrográfica do rio Moxotó, região inserida no semiárido pernambucano (com características semelhantes a bacia hidrográfica do Rio Brígida), entre os anos de 2009 e 2017. Os pesquisadores observaram que houve uma redução significativa nos valores de NDWI durante o período estudado. Realizando a vetorização da região que envolve o Açude Poço da Cruz foi observado que em 2009 a área do espelho d'água era de 25.183.100 m², enquanto para 2017 a área registrada foi de 2.641.203 m², o que representa uma diminuição de aproximadamente 90%. Os resultados da pesquisa de Almeida *et al.* (2018) corroboram com o que foi encontrado no presente trabalho.

A Tabela 7 apresenta os resultados numéricos da área para os anos de 2009 e 2019 dos espelhos d'água de todos os 16 reservatórios pertencentes a bacia hidrográfica do Rio Brígida

que são monitorados pela APAC, as áreas foram estimadas através da “Calculadora de campo” do QGIS 3.4.12. A Figura 24 ilustra essa variação espacial para os seis maiores reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Brígida, é importante notar que devido ao pequeno tamanho de alguns reservatórios o produto gerado não apresenta resolução suficiente para que seja possível observar com clareza a geometria do espelho d’água.

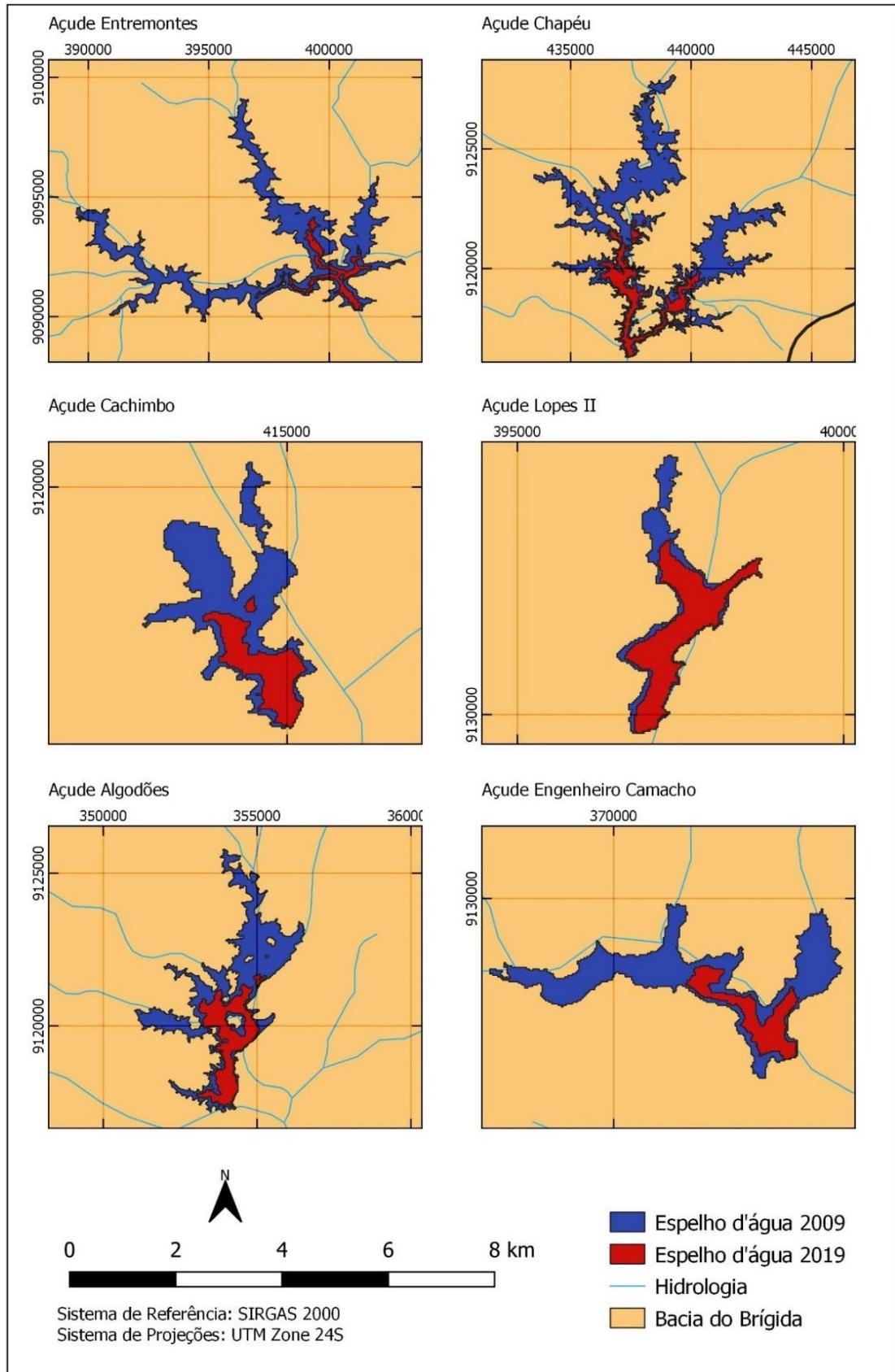
Tabela 7 - Variação espacial da área dos principais açudes da bacia do Brígida

Reservatório	Área 2009 (ha)	Área 2019 (ha)	Redução (%)
Algodões	1093,62	312,75	71,40%
Araripina	24,21	0,00	100,00%
Barriguda	17,46	14,13	19,07%
Cachimbo	359,23	100,59	72,00%
Cacimbão	44,21	21,79	50,71%
Caiçara	10,18	8,55	15,93%
Camará	73,20	11,08	84,87%
Chapéu	2224,57	371,69	83,29%
Engenheiro Camacho	505,82	106,69	78,91%
Entremontes	1848,70	198,47	89,26%
Lagoa do Barro	472,42	97,67	79,33%
Lopes II	237,28	158,22	33,32%
Parnamirim	6,39	5,86	8,36%
Rancharia	20,88	5,76	72,41%
Sítio dos Moreiras	28,37	24,05	15,24%
Varzinha	5,40	0,00	100,00%
TOTAL	6971,95	1437,30	79,38%

Fonte: Autor (2019)

Dentre os seis maiores reservatórios da bacia, os que apresentaram maior redução foram o açude Entremontes e o açude do Chapéu, que perderam 89,26% e 83,29% de sua área, respectivamente. Os açudes Engenheiro Camacho, Algodões e Cachimbo também sofreram redução significativa, 78,91%, 72% e 71,40%, respectivamente. Apenas o Açude Lopes II sofreu uma redução menos expressiva, perdendo apenas 33,32% de sua área de espelho d’água.

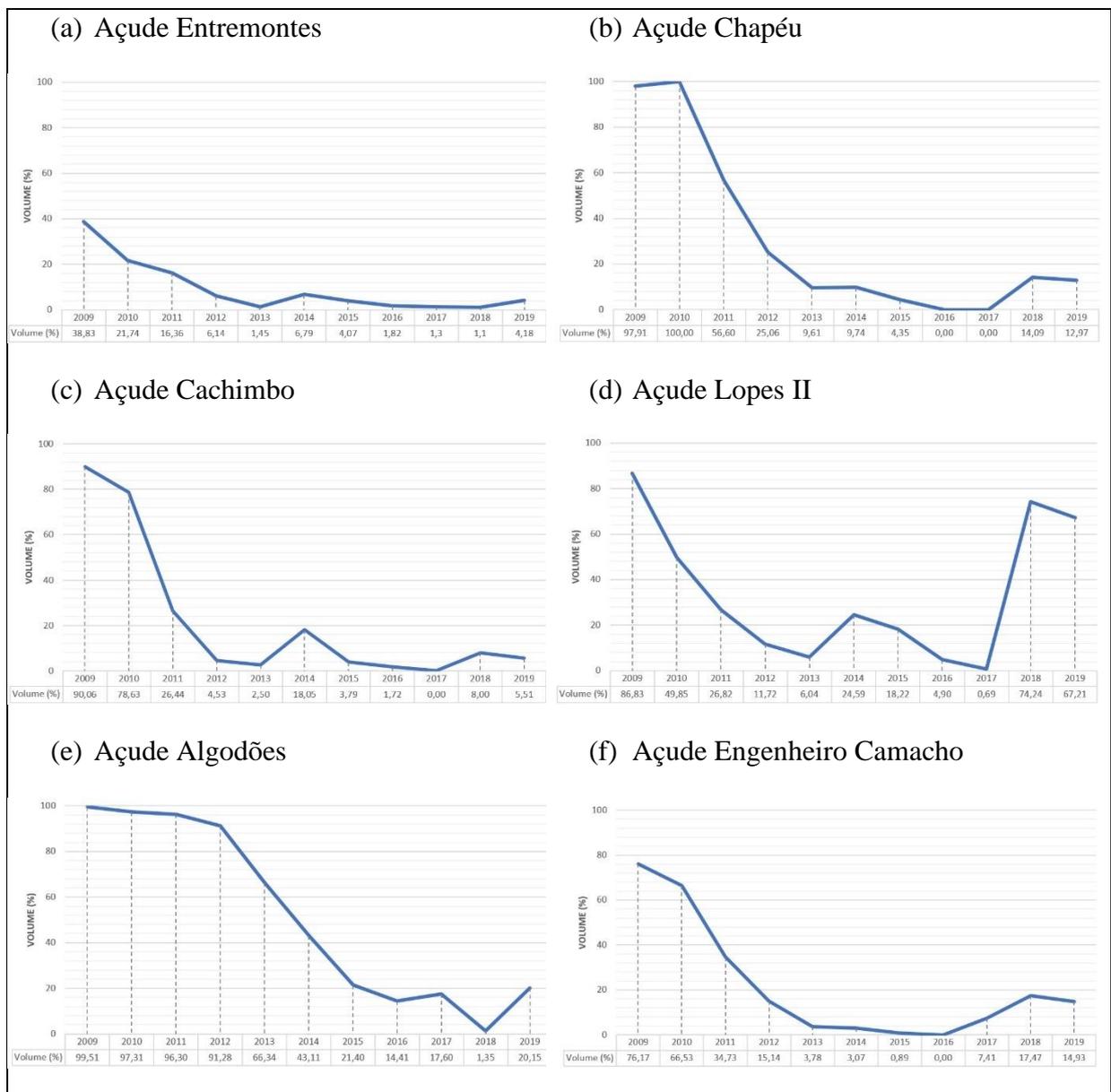
Figura 24 - Variação espacial dos seis maiores reservatórios da bacia do rio Brígida



Fonte: Autor (2019)

Devido a relação existente entre a área do espelho d'água e o volume do açude, foi possível comparar os resultados obtidos neste trabalho com as informações disponíveis no Sistema de Acompanhamento de Reservatórios desenvolvido pela ANA (2019), sistema que armazena os dados históricos de volume de diversos reservatórios do Brasil. A Figura 25 exibe a variação anual do volume dos seis maiores açudes da bacia do Brígida, a redução no percentual de volume armazenado corrobora com os resultados encontrados no presente trabalho.

Figura 25 - Variação no percentual de volume armazenado



Fonte: Adaptado de ANA (2019)

5 CONCLUSÕES

A aplicação do MNDWI de Xu (2006) com o intuito de identificar e quantificar os reservatórios da bacia hidrográfica do Brígida obteve êxito, visto que foi possível identificar 282 reservatórios com área maior que 1 ha para o ano de 2009 e 211 para o ano de 2019, bem como estimar a área dos espelhos d'água com boa precisão, resultados condizentes com os obtidos em outros estudos, como o produto desenvolvido pela ANA (2016).

Os pequenos reservatórios foram que mais sofreram com o período de baixa estiagem, visto que a maior redução percentual ocorreu justamente nos açudes que possuíam área de espelho d'água entre 1 ha e 10 ha.

O objetivo de avaliar as mudanças espaciais dos recursos hídricos com a utilização do MNDWI proposto por Xu (2006) também obteve sucesso. Através dessa análise, foi possível estimar a variação do índice entre os anos de 2009 e 2019, onde observou-se que o período de seca exerceu influência na disponibilidade hídrica da região, apresentando redução no volume armazenado de todos os principais reservatórios monitorados, situação evidenciada pela redução dos valores do MNDWI no contorno dos reservatórios.

Portanto, o uso de métodos simplificadores como os expostos nesse trabalho se mostra de grande valia na gestão dos recursos hídricos, servindo como um excelente mecanismo para a obtenção de informações dos componentes hidrológicos que atuam numa determinada região. É importante incentivar o aperfeiçoamento de tais práticas, buscando sempre a melhor qualidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T. F. S. **Influência de pequenos reservatórios no escoamento superficial da bacia hidrográfica do rio Carinhanha**. 2018. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

ALMEIDA, D.N.O.; OLIVEIRA, L.M.M.; CANDEIAS, A.L.B.; NASCIMENTO, E.F.; LEITE, A.C.S. **Sensoriamento remoto do ambiente hídrico: índice de umidade (NDWI) no açude Poço da Cruz – PE**. 2018.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Massas d'Água (Espelhos d'Água)**, 2016. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home?uuid=0c75f8eb-f5c7-4643-9f91-5bf86a09fb63>. Acesso em: 24 nov. 2019.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**, 2019. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/Medicao>. Acesso em: 24 nov. 2019.

APAC, Agência Pernambucana de Águas e Climas. **Bacias Hidrográficas – Rio Brígida**, 2019a. Disponível em: http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=13. Acesso em: 16 nov. 2019.

APAC, Agência Pernambucana de Águas e Climas. **Sistema de Informação Geográfica**, 2019b. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/>. Acesso: 30 nov. 2019.

AZEVEDO, T. C. Utilização de imagens CBERS-2 para atualização da base cartográfica de recursos hídricos do estado do Rio Grande do Norte. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 13., 2007, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: INPE, 2007. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2007/01.31.19.10/doc/@sumario.htm>>. Acesso em: 27 out. 2019.

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

BIELENKI JÚNIOR, C.; HAUSCHILD, R. M. P. R.; GODINHO, J. M.; SCHERERWARREN, M.; QUIRINO, W. S. Mapeamento de Reservatórios no Nordeste usando imagens CBERS II. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 13., 2007, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: INPE, 2007. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2007/01.31.19.10/doc/@sumario.htm>>. Acesso em: 27 out. 2019.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2004. Disponível em: <http://mtc->

m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf. Acesso em: 20 nov. 2019.

CARVALHO, M. S. B. S.; MARTINS, E. S. P. R.; SOARES, A. M. L.; CHAVES, L. C. G.; OLIVEIRA, F. A. J.; PERINI, D. S. MENESCAL, R. A., SCHERER-WARREN, M. Levantamento dos espelhos d'água acima de 20ha em todo o território brasileiro através de sensoriamento remoto. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14.*, Natal. **Anais** [...]. Natal: INPE, 2009. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2009/03.02.18.19/doc/@sumario.htm?languaobutton=en>. Acesso em 30 out. 2019.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summay of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n.5, p. 893-903, 2009.

CIRILO, A. J. **Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido**. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2008.

COLLISCHONN, B.; CLARKE, R. T. Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto. **RBRH**, v. 21, n. 4, p. 719-727. Porto Alegre, 2016.

FILHO, J. C. M. 2002. A seca de 1993: Crônica de um flagelo anunciado/ José de Castro Moreira Filho, Osmil Torres Galindo Filho, Renato Santos Duarte. - Fortaleza: Banco do Nordeste; Recife: Fundação Joaquim Nabuco, v. 4 138 p.

FISHER, A.; DANAHER, T. *A water index for SPOT5 HRG satellite smagery, New South Wales, Australia, determind by linear discriminant analysis*. **Remote Sensing**. 2013; 5, 5907-5925.

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

JI, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B. *Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index*. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 75, No. 11, 2009. p. 1307-1317.

LIEBE, J. *Estimation of water storage capacity and evaporation losses of small reservoirs in the Upper East Region of Ghana*. Diploma Thesis. Bonn: Geography Department - Bonn University, 2002. 113p.

LIEBE, J.; VAN DE GIESEN, N.; ANDREINI, M. *Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment - A case study in the Upper East Region of Ghana*. **Physics and Chemistry of the Earth**, 30(6-7), 2005. 7p.

MARKHAM, B.L.; BARKER, L.L. (1987). "Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances". **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.3, pp.517-523.

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

MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. S.; GALVÃO, C. O. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Instituto Nacional do Semiárido. Campina Grande, 2011.

MEDEIROS, S. S.; CAVALCANTE, A. M. B.; MARIN, A. M. P.; TINÓCO, L. B. M.; SALCEDO, I. H.; PINTO, T. F. **Sinopse do censo demográfico para o semiárido brasileiro**. Instituto Nacional do Semiárido. Campina Grande, 2012.

NASCIMENTO, E. F.; OLIVEIRA, L. M. M.; LIMA, J. F.; FARIAS, A. A. M.; SILVA, J. G. Comparação de índices de água na identificação de corpo hídrico por sensoriamento remoto. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento*, 19., Campinas. **Anais [...]**. Campinas: GALOÁ, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/comparacao-de-indices-de-agua-na-identificacao-de-corpo-hidrico-por-sensoriamento-remoto?lang=en>. Acesso em: 16 dez. 2019.

POLIDORIO, A. M., IMAI, N. N., TOMMASELLI, A. M. G. E GALO, M. L. T. Correção radiométrica de imagens multiespectrais CBERS e Landsat ETM usando atributos de reflectância e de cor. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 12., Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: INPE, 2005. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2005/02.12.16.31/doc/@sumario.htm>. Acesso em: 28 out. 2019.

ROCHA, C H B. **Geoprocessamento Tecnologia Transdisciplinar**. Juiz de Fora: Ed autor, 2000. 220p.

SANTOS, F. A.; SILANS, A. M. B. P.; PORTO, R. Q.; ALMEIDA, C. N. Estimativa e análise do volume dos pequenos açudes através de imagens de satélite e levantamento de campo na Bacia Hidrográfica do açude Sumé. *In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 18., Campo Grande. **Anais [...]**. Campo Grande: ABRH, 2009. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=110>. Acesso em: 18 nov. 2019.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVERIA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; JUNIOR, B. B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 20, n. 1, p. 3-8, jan. 2016. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662016000100003&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 15 dez. 2019.

SILVA, R C. F.; SOUSA, J. A. P.; AMORIM, A. T.; LOPES, E. R. N.; LOURENÇO, R. W.; FILHO, J. L. A. Análise comparativa de índices espectrais para a extração automática da lâmina d'água em imagem do satélite Landsat 8 OLI. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 19., Campinas. **Anais** [...]. Campinas, GALOÁ, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/analise-comparativa-de-indices-espectrais-para-a-extracao-automatica-da-lamina-d-agua-em-imagem-do-satelite-landsat-8oli?lang=en>> Acesso em: 16 dez. 2019.

USGS, United States Geological Survey. **Landsat Missions**, 2019a. Disponível em: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>. Acesso em: 17 nov. 2019.

USGS, United States Geological Survey. **Earth Explorer**, 2019b. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 12 nov. 2019.

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

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