

Spectral indices in the detection of water bodies using images from the MSI - Sentinel 2 sensor

Débora Natália O. de Almeida^{*}, Camila O. de B. Salgueiro^{**}, João Victor B. Chaves^{***}, Sylvana M. dos Santos^{****},
Leidjane M. M. de Oliveira^{*****}

^{*}Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mails: debora.noalmeida@ufpe.br (Autor correspondente), camila.salgueiro@ufpe.br, joao.victor@ufpe.br, sylvana.santos@ufpe.br, leidjane.oliveira@ufpe.br

Received 20 October 2021; accepted 24 November 2021

Abstract

Spectral indices processed from satellite data have been widely used to assess changes in land use and land cover, mainly focusing on the detection of water bodies in large areas. This article analyzed the spatial distribution of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Water Index (NDWI) using data from the MSI - Sentinel 2 sensor, in the semiarid region that comprises part of the territory of the Moxotó river basin in Pernambuco. When analyzing the dates of the images that covered periods considered rainy and dry in 2019, the dynamics of the spatial behavior of the study area was evidenced. The NDVI presented mean values equal to 0.404; 0.343; 0.179; 0.162; 0.158 and 0.273, referring to June, July, September, October, November and December 2019, respectively. In the visualization of the NDVI through the georeferenced charts, a decrease was evidenced over the months and an increase in the last month studied. A similar behavior was detected in the NDWI, with a decrease over the months, except in December, which reached an average value of -0.260. In addition, from the NDWI it was possible to calculate the surface area of the Poço da Cruz reservoir, which had a slight decrease during the surveyed months. The MSI - Sentinel-2 sensor processed in the open-access software QGIS allowed the delineation of targets due to its greater spatial resolution, mainly in the Poço da Cruz reservoir in the municipality of Ibimirim and the stretch of the São Francisco River integration channel.

Keywords: Spectral analysis, Precipitation, Remote sensing.

Índices espectrais na detecção de corpos hídricos utilizando imagens do sensor MSI - Sentinel 2

Resumo

Índices espectrais processados a partir de dados de satélites têm sido amplamente utilizados para avaliar alterações do uso e cobertura do solo, principalmente com foco na detecção de corpos hídricos em áreas extensas. Este artigo analisou a distribuição espacial do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) utilizando dados do sensor MSI - Sentinel 2, na região semiárida que compreende parte do território da bacia hidrográfica do rio Moxotó em Pernambuco. Ao se analisar as datas das imagens que abrangeram períodos considerados chuvoso e seco em 2019, ficou evidenciado a dinâmica do comportamento espacial da área de estudo. O NDVI apresentou valores médios iguais a 0,404; 0,343; 0,179; 0,162; 0,158 e 0,273, referentes a junho, julho, setembro, outubro, novembro e dezembro de 2019, respectivamente. Na visualização do NDVI pelas cartas georreferenciadas, ficou evidenciado a diminuição ao longo dos meses e o aumento no último mês estudado. Comportamento similar foi detectado no NDWI, com diminuição ao longo dos meses, exceto em dezembro que atingiu valor médio de -0,260. Além disso, a partir do NDWI foi possível calcular a área superficial do Açude Poço da Cruz que teve discreta diminuição durante os meses pesquisado. O sensor MSI - Sentinel-2 processado no software de livre acesso QGIS permitiu o delineamento dos alvos devido à sua maior resolução espacial, principalmente no Açude Poço da Cruz no município de Ibimirim e trecho do Canal de Integração do Rio São Francisco.

Palavras-chave: Análise espectral, Precipitação, Sensoriamento remoto.

1. Introdução

Com o avanço de tecnologias, o uso 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. Desta forma, é possível pontuar as principais causas de degradação dos recursos naturais. No que concerne em áreas de clima semiárido nordestino, são importantes para o equilíbrio natural do ambiente, que sofre com secas periódicas (Ferreira Júnior e Dantas, 2018).

De acordo com Padovani (2018), as mudanças ocorridas no uso do solo e cobertura vegetal interferem no balanço de energia, na

temperatura do ar, na precipitação, na umidade do ar e na 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 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 et al., 2020).

Neste contexto tecnológico, o satélite Sentinel-2, lançado em 2015, apresenta como alternativa evolutiva de tecnologia, que contém o 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).

Índices de vegetação obtidos a partir de dados de satélite têm sido amplamente utilizados para avaliar alterações no estado fisiológico e propriedades biofísicas de vegetação (She et al., 2015; Bezerra et al., 2018). Desta maneira, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), é uma das técnicas mais utilizadas em Sensoriamento Remoto para estimar a quantidade de vegetação (Rouse et al., 1973) e mudanças temporais em florestas, por causa da forte relação com fatores climáticos e ambientais (Kang et al., 2014), que permite a verificação de alterações na fenologia e diminuição de biomassa a partir das variações no comportamento temporal/espectral da vegetação e alteração nos seus valores (Wang e Tenhunen, 2004; Costa e Guasselli, 2017; Kafer e Rex, 2020).

Dentre os índices espectrais, destaca-se também o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), 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). Também, as informações extraídas pelo NDWI 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).

Diversas pesquisas apontam que para o mapeamento de corpos hídricos e diversos métodos foram desenvolvidos tendo como base imagens multiespectrais (Du et al., 2016), possibilitando cada vez mais estudos em áreas extensas, a exemplo de bacias hidrográficas. Dentre os métodos mais utilizados, Jiang et al. (2014) evidenciaram os classificadores supervisionados, não supervisionados e os índices espectrais de água. Estes últimos, 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).

Santos et al. (2021) desenvolveram estudo a partir da aplicação dos índices espectrais NDWI e NDVI nos anos de 1995, 2003 e 2019 na mesma área deste estudo. Ao realizar a análise, foram encontrados baixos valores de NDVI e um declínio ao longo dos anos, tendo como principal causa, segundo os autores, a falta de ocorrência de chuva na área, fato que resulta no estresse da vegetação. Além disso, outro possível fator apontado, como causa do baixo valor desse índice foi a presença de ação antrópica, também resultante da escassez hídrica, assim gerando a exposição do solo. Já sobre o NDWI, em 2003 encontraram valores que evidenciaram a ocorrência de uma intensa estiagem. Em relação a 2019, a análise dos resultados mostrou um valor menor, se comparado com os anos anteriores, com 7,38% de sua capacidade total de acúmulo de água.

Dentre os reservatórios existentes no território pernambucano, a área de estudo compreende o maior reservatório, 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).

Diante do exposto e visando contribuir para o conhecimento da variabilidade do uso e cobertura do solo, esta pesquisa utilizou os índices espectrais NDVI e NDWI para detecção de corpo hídrico utilizando imagens do sensor MSI - Sentinel 2, especificamente na região semiárida que compreende parte do território da bacia hidrográfica do rio Moxotó, entre os municípios de Custódia e Ibimirim em Pernambuco.

2. Material e métodos

Área de estudo

A área do estudo compreende parte do território da bacia hidrográfica do rio Moxotó, entre os municípios de Custódia e Ibimirim em Pernambuco (Figura 1). Esta bacia compreende uma área de 9.752,71 km², com 90% nos territórios em 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.

Além disso, destaca-se o açude Poço da Cruz que é o maior reservatório do Estado situado no município de Ibimirim, sendo 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).

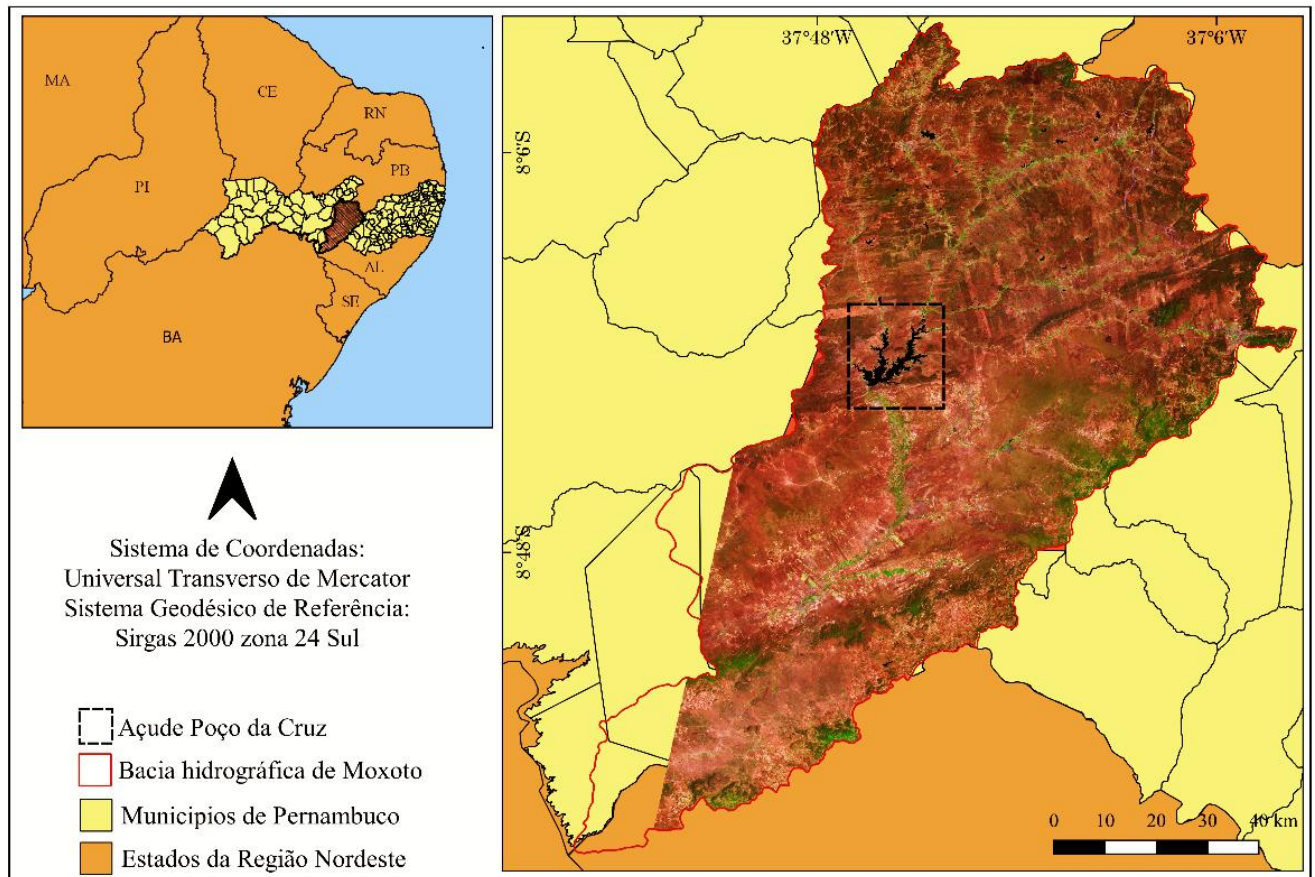


Figura 1 - Localização da área de estudo (Bacia hidrográfica do Rio Moxotó) e Açude Poço da Cruz situado no município de Ibimirim-PE.

Pré-processamento

Após detalhada pesquisa de dados orbitais com ausência de nuvens, selecionaram-se imagens referentes aos dias descritos na Tabela 1, 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 reprojetados para o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência

Geocêntrico para as Américas), UTM fuso 24 Sul.

Tabela 1 – Satélite e datas das imagens.

Satélite	Datas
Sentinel – 2A	06/06/2019
	05/07/2019
	13/09/2019
	03/10/2019
	02/11/2019
	02/12/2019

Fonte: USGS (2020).

Pré-processamento das imagens

O processamento das imagens do Sentinel 2A se deu em conformidade com Zhang et al. (2018). Para a reflectância planetária ($\rho\lambda$) foi utilizada a Equação 1, onde $\rho\lambda$ 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.

$$\rho\lambda = \frac{ND}{\text{Quantification_Value}} \quad (1)$$

O processamento do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) se deu em conformidade com a Equação 2 (Rouse et al., 1973) utilizando as bandas do vermelho (ρ_{RED}) e infravermelho próximo (ρ_{NIR}), resultantes da reflectância corrigida.

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (2)$$

O Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) (Equação 3), 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_{GREEN} é a reflectância do verde e ρ_{NIR} é a reflectância infravermelho próximo da imagem Sentinel-2 MSI (Du et al., 2016).

$$NDWI = \frac{(\rho_{GREEN} - \rho_{NIR})}{(\rho_{GREEN} + \rho_{NIR})} \quad (3)$$

A resolução e o comprimento de onda que caracteriza o sensor em cada banda são demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificação do sensor MSI 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).

Análise dos dados pluviométricos

As informações pluviométricas são importantes para análise e compreensão da distribuição espacial da cobertura vegetal utilizando o NDVI, devido a sua relação direta com a atividade fotossintética e produção de biomassa vegetal no bioma Caatinga. Também é possível compreender o comportamento e dinâmica da vegetação durante este

período, tornando possível comparações da resposta espectral da vegetação entre períodos secos e chuvosos.

Os dados pluviométricos (Figura 2) correspondem ao período final da estação chuvosa (junho e julho) e período da estação seca (setembro a dezembro), com baixo índice de precipitações para a região ao longo dos meses.

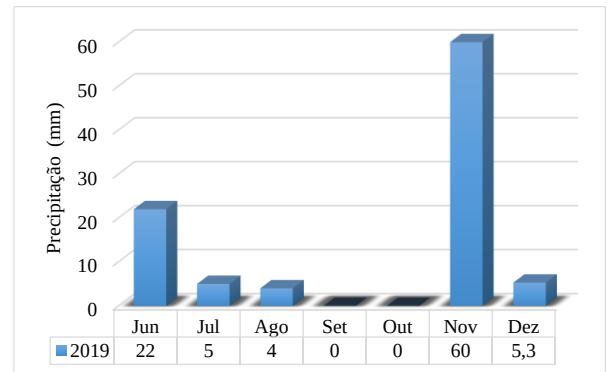


Figura 2 – Dados pluviométricos mensais.

Para o período chuvoso foram averiguados os dados diários referentes aos meses das imagens. O registro referente a precipitação de junho constatou para o dia 17/06 o total de 2mm e 20 mm para 18/06. No mês de julho foi contabilizado o total de 1,5 mm para 25/07, 1 mm para o dia 09/07 e 4 mm referente a 10/07. Enquanto no período seco foi constatado que os meses setembro e outubro não houve incidência de chuva, porém em novembro, especificamente no dia 26/11 foi registrado o total de 60 mm. Por fim, em 17/12 a precipitação atingiu 5,3 mm, conforme dados fornecidos pela APAC (2020).

Análise estatística

Foram aplicadas análises estatísticas do tipo Regressão Linear Simples aliadas ao presente estudo, mostrando a pertinência da relação entre os índices espectrais NDVI e NDWI. A regressão linear, consiste em um modelo matemático que associa uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes, servindo para relacionar linearmente se essas séries de dados estão relacionadas (Alves, 2016).

Posteriormente ao processamento das imagens no software QGIS, foram coletados pixels com armazenamento de informação sobre o valor de NDVI e NDWI atribuído na área do corpo hídrico (Açude Poço da Cruz) e exportados em formato de tabela para realização da Regressão Linear Simples.

3. Resultados e discussão

A Figura 3 apresentou as cartas georreferenciadas de NDVI. Ressalta-se que, de

acordo com estudos realizados por (Chouhan e Rao, 2011; Bezerra et al., 2018), valores negativos de NDVI correspondem aos corpos d'água, valores muito baixos (0,1 e abaixo) correspondem a áreas provenientes de material rochoso ou arenoso. Também, valores moderados representam arbustos e pastagens (0,2 a 0,3), enquanto valores altos indicam florestas ou vegetação mais densa (0,6 a 0,8). Desta forma, a Tabela 3 resultou em separação por classes, conforme o intervalo de valores dos pixels, que melhor identificaram o mosaico terrestre.

Tabela 3 - Valores de reflectância considerando os intervalos para as classes no índice NDVI.

Classe	Valor
Classe 1	< 0,00
Classe 2	0,00 – 0,15
Classe 3	0,16 – 0,30
Classe 4	0,31 – 0,45
Classe 5	0,46 – 0,60
Classe 6	0,61 – 0,75
Classe 7	> 0,75

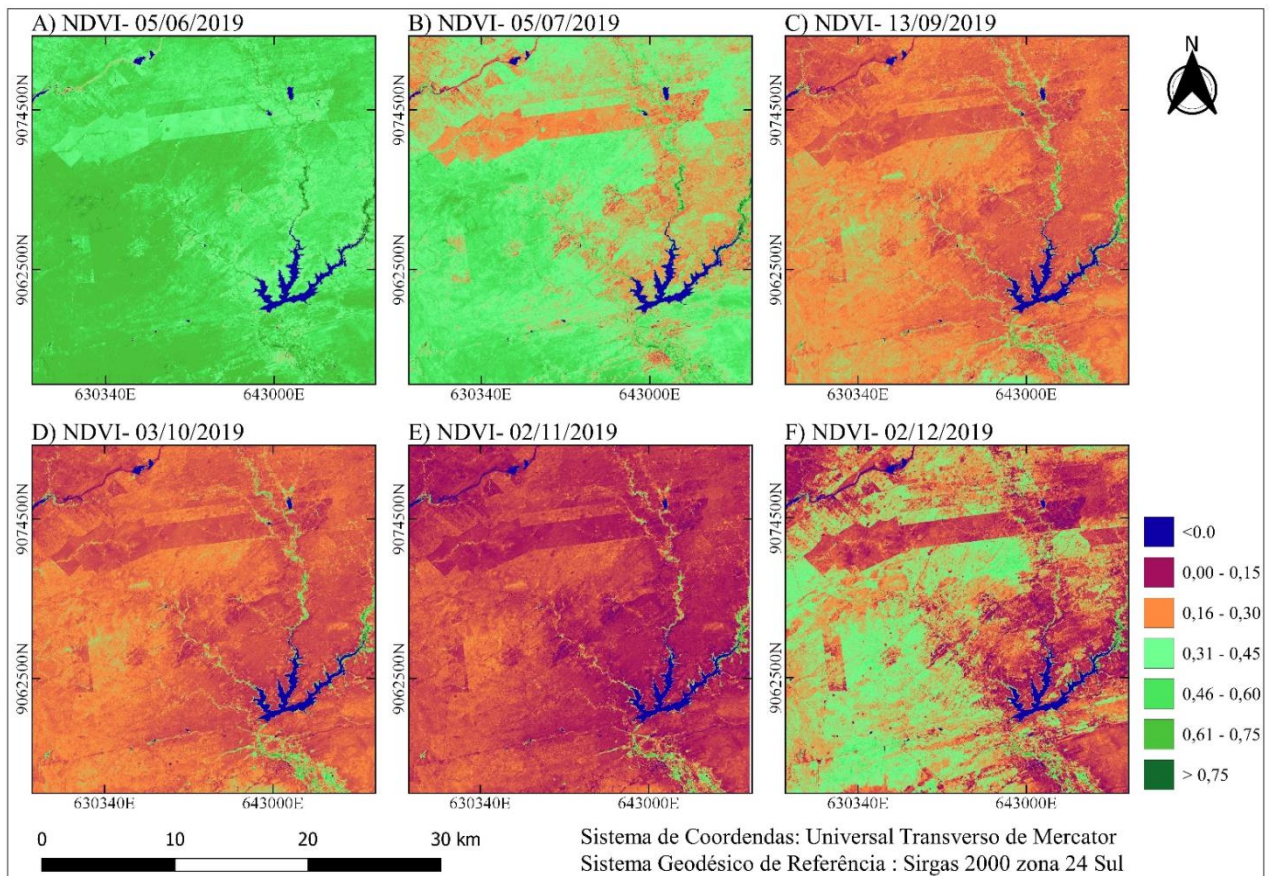


Figura 3 – NDVI da área de estudo utilizando imagens Satélite Sentinel – 2.

O intervalo representado pela Classe 1 apresentou valores de NDVI negativos ($NDVI < 0$), que indicam a presença de corpos hídricos localizados principalmente nas áreas pertencentes aos municípios de Custódia e Ibimirim, especificamente no trecho do Canal da Integração do Rio São Francisco (traçado na parte superior esquerda da Figura 3) e o Açude Poço da Cruz, considerado principal fonte de abastecimento existente em Ibimirim.

Os parâmetros estatísticos para o NDVI (Tabela 4) com base no sensor MSI Sentinel-2, resultaram em valores menores que 0 (zero) e alcançando maiores que 0,75. Esses valores evidenciaram feições na superfície terrestre com

vegetação fotossinteticamente ativa relacionando a biomassa e o teor de clorofila presente (Carvalho Junior et al., 2009).

Como observado na Tabela 4, os valores de NDVI referentes as datas em estudo resultaram na diminuição ao longo dos meses de 2019, iniciando com junho, com valor médio de 0,404 ao mês de novembro com média de 0,158. Já em dezembro observou-se o aumento no comportamento médio do NDVI (0,273), possivelmente influenciado pelo evento chuvoso em 26/11/2019 (60 mm), ou seja, choveu poucos dias antes da passagem do satélite, favorecendo o aumento do vigor vegetativo do mosaico terrestre (Figura 3F).

Tabela 4 - Valores estatísticos do NDVI das imagens estudadas.

Imagem	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
06/06/2019	-0,477	0,404	0,833	0,151
05/07/2019	-0,491	0,343	0,834	0,142
13/09/2019	-0,403	0,179	0,788	0,076
03/10/2019	-0,384	0,162	0,784	0,066
02/11/2019	-0,312	0,158	0,805	0,062
02/12/2019	-0,395	0,273	0,797	0,110

Com comportamento similar a Classe 1, a Classe 2 foi indicativa como superfícies sem vegetação. Os valores variaram entre (0,00 – 0,15), constatando o comportamento espectral correspondente a presença de solos descobertos, rochas, áreas urbanizadas e outras áreas sem vegetação. Esses valores corroboraram com os valores máximos de NDVI encontrados por Bezerra et al. (2018) ao estudarem o comparativo de NDVI na região Semiárida de Pernambuco utilizando imagens MSI Sentinel-2. Ressalta-se ainda que os valores da Classe 2, foram considerados como indicativos da presença de baixa atividade fotossintética, com alvos de superfície onde ocorreram a mistura espectral das áreas sem vegetação com áreas de cobertura vegetal menos densa, conforme Tabela 5 nos meses de junho, julho e setembro com áreas menores que 1%.

Analisou-se na Classe 3, as áreas que

obtiveram intervalos de NDVI (0,16 a 0,30), indicando valores de reflectância com feições de superfície vegetada. Conforme Barbosa, Carvalho e Camacho (2017), a configuração geoespacial desse intervalo igual a Classe 3, permite afirmar que há presença vegetativa de forma dispersa ou agrupada na região.

Entre as Classes 4 e 7 foram obtidos os valores mais altos de NDVI, com valores de reflectância agrupados entre (0,31 a >0,75), indicando locais de alta atividade fotossintética, com presença de vegetação verde de forma mais densa que as Classes anteriores. Foram caracterizadas principalmente nas áreas ao redor de cursos d'água configurando a mata ciliar, bem como na região do Perímetro Irrigado Moxotó – PIMOX em Ibimirim, com melhor visualização na Figura 3E.

Tabela 5 – Data, área e percentual de classes do NDVI em 2019.

Data, área e percentual	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7
06/06/2019 (ha)	180,51	693,76	187,17	13.833,32	34.098,69	24.868,10	1.596,85
%	0,24	0,92	0,25	18,33	45,19	32,95	2,12
05/07/2019 (ha)	406,10	466,96	317,45	25.117,21	37.108,38	11.664,54	377,76
%	0,54	0,62	0,42	33,29	49,18	15,45	0,50
13/09/2019 (ha)	371,59	492,55	2.420,16	68.445,18	3.091,61	503,09	134,22
%	0,49	0,65	3,21	90,71	4,10	0,66	0,18
03/10/2019 (ha)	266,91	609,83	9.979,95	62.811,23	1.291,27	398,02	101,19
%	0,35	0,81	13,23	83,24	1,71	0,53	0,13
02/11/2019 (ha)	301,72	542,00	21.461,23	51.943,15	843,96	303,10	63,24
%	0,40	0,72	28,44	68,84	1,12	0,40	0,08
02/12/2019 (ha)	538,29	291,08	2.131,44	38.180,53	32.697,33	1.528,18	91,55
%	0,71	0,39	2,82	50,60	43,33	2,03	0,12

Área em hectare (ha) e Percentual da área total com 75.458,40 ha (%)

Ainda na Tabela 5, observou-se que os valores da Classe 1 (< 0,00) apresentou o aumento de 0,31% entre os meses de novembro e dezembro durante o período seco, já a Classe 5 (0,46 a 0,60) apresentou a diferença de 42,21% de acréscimo entre os mesmos meses citados, denotando assim a influência da precipitação ocorrida em 26 de novembro de 2019 (Figura 2).

A precipitação é comumente apontada como o fator chave que influencia o crescimento e densidade da vegetação. Contudo, na Caatinga, ambiente de vegetação adaptada à água limitada, outras variáveis como temperatura de superfície, umidade e solo também podem se relacionar ao vigor vegetativo. afetando diretamente, ao alterar as taxas de fotossíntese e transpiração ou, indiretamente, ao

influenciar a disponibilidade de água e a fisiologia das plantas. Reforçando essa afirmativa, os autores Rishmawi, Prince e Xue (2016) estudaram as respostas da vegetação às diversas variáveis meteorológicas na África Subsaariana, e concluíram que, além da precipitação, a umidade e temperatura do solo têm um papel significativo na cobertura vegetal.

Considerando o NDWI geoespacializado na Figura 4, notou-se que grande parte das áreas, em todas as imagens processadas, resultaram em valores do índice de água inferiores ou até 0 (zero), denotando a presença de pixels representativos de solo exposto e, destacando o Açude Poço da Cruz e seu entorno com valores positivos.

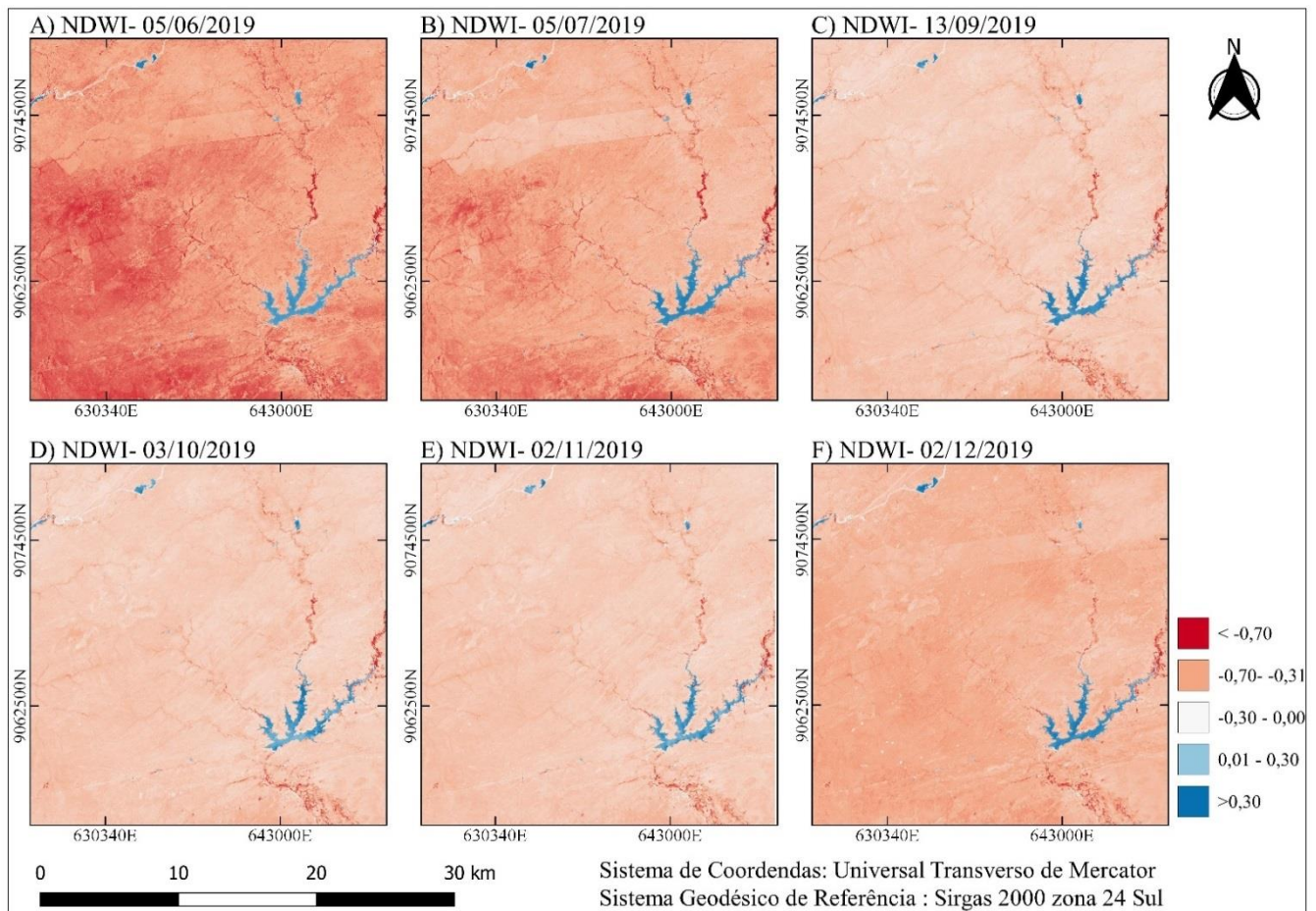


Figura 4 – NDWI da área de estudo utilizando imagens Satélite Sentinel-2.

Observou-se através da visualização das cartas georreferenciadas do índice de vegetação NDVI (Figura 3) e das cartas georreferenciadas NDWI (Figura 4), que as áreas na Classe 1 (valores negativos) do NDVI corresponderam às áreas entre o intervalo de classes com os valores positivos para o NDWI, georreferenciando especificamente o açude Poço da Cruz e o trecho do Canal da Integração do Rio São Francisco (parte superior das cartas). Esses resultados condizem com Bezerra et al. (2019), que fizeram o comparativo com os dados do Sentinel-2 e

Landsat-8 do índice espectral NDWI, e constaram semelhanças entre os valores representativos para corpos hídricos.

Ainda no que concerne ao NDWI pelo método de McFeeters (1996), foi observado que ao longo dos meses analisados houve um aumento, onde os valores médios foram descritos na Tabela 6. Nas imagens referentes aos meses de setembro, outubro e novembro, os valores médios de NDWI foram representados com pouca diferença entre si, denotando -0,253, -0,250 e -0,260, respectivamente.

Tabela 6 - Valores estatísticos do NDWI das imagens estudadas.

Imagem	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	r	R ²
06/06/2019	-0,705	-0,401	0,630	0,119	-0,96	0,92
05/07/2019	-0,709	-0,336	0,618	0,115	-0,93	0,87
13/09/2019	-0,679	-0,253	0,496	0,079	-0,93	0,87
03/10/2019	-0,671	-0,250	0,470	0,072	-0,95	0,89
02/11/2019	-0,680	-0,260	0,461	0,070	-0,39	0,16
02/12/2019	-0,685	-0,309	0,550	0,088	-0,89	0,79

Coeficiente de correlação (r) e Coeficiente de determinação (R²)

Conforme pesquisas desenvolvidas por Shashikant et al. (2021), o NDWI retorna valores que variam de -1 a +1 em cada pixel da imagem processada dependendo da quantidade de água superficial presente naquele pixel. Desse modo, esse índice pode ser usado para avaliar o grau de umidade presente numa região, por exemplo, na agricultura, o NDWI é comumente utilizado para monitorar a umidade presente no solo e na superfície das plantas, a fim de melhorar performance na lavoura. Este comportamento de identificação da presença de água condiz com esta pesquisa, especialmente na identificação do Açude Poço da Cruz.

O NDVI e NDWI identificaram o uso e ocupação do solo utilizando as imagens do MSI Sentinel-2, delimitando áreas verdes e corpos hídricos, obtendo resultados semelhantes aos de Jothimani et al. (2021) quando avaliaram a tendência espaço-temporal na região de Arba Minch e entorno, Etiópia, com o uso de imagens do satélite Landsat-8 OLI entre 2013 e 2020. Através da aplicação dos índices NDVI e NDWI os autores verificaram com sucesso as mudanças no uso e ocupação do solo, identificando uma leve redução na área dos principais mananciais e da vegetação natural da região.

Objetivando uma melhor compreensão analítica da relação do índice espectral NDWI com o Açude Poço da Cruz, obteve-se a partir da transformação do raster em vetor, as áreas do espelho d'água do Açude Poço da Cruz para os meses estudados e as variações entre elas (Tabela 7).

Tabela 7 - Área superficial do Açude Poço da Cruz - PE nos meses analisados.

Poço da Cruz- PE	Área (m ²)
05/06/2019	7.971.942,17
05/07/2019	7.953.135,93
13/09/2019	7.640.248,16
03/10/2019	7.501.809,16
02/11/2019	7.259.241,05
02/12/2019	7.088.393,70

Através do método de poligonização do alvo Água foi quantificada a variação da área de corpo hídrico detectada nos meses de estudo no

Açude Poço da Cruz, conforme detalha a Tabela 7. A partir das áreas obtidas, observou-se uma significância diferença entre a área no mês de junho (7.971.942,17 m²) para a área evidenciada em dezembro (7.088.393,70 m²), denotando aproximadamente 900.000 m² de área do espelho d'água menor no intervalo de seis meses no Açude Poço da Cruz.

Com o processamento do NDWI foi possível mapear (Figura 4) e quantificar (Tabela 7) a área superficial do Açude Poço da Cruz. Resultados semelhantes foram obtidos por Chauhan et al. (2021) quando monitoraram a evolução espaço-temporal do pantanal de Nalsavorar, na Índia, região de grande importância ecológica devido a biodiversidade presente no local, durante os anos de 2002 e 2018. Para tal foram utilizadas imagens multiespectrais dos satélites Landsat-7 TM, Landsat-5 TM e Sentinel-2 resultando no índice espectral NDWI. Os autores concluíram que o índice foi possível mapear e quantificar com clareza as mudanças ocorridas nas áreas de superfície livre e vegetação aquática, bem como as alterações no uso e ocupação do solo.

Procurou-se mostrar com os gráficos de dispersão (Figura 5) a comprovação da relação linear simples do NDWI com o NDVI na área correspondente ao Açude Poço da Cruz e seu entorno. Ficou evidenciado que a série analisada tem significância, mostrando valores do Índice de Correlação (r) próximos a um (1), exceto o gráfico correspondente a data de 02/11/2019, que resultou em valores dispersos e próximos a zero (r = 0,39).

Desse modo, os resultados indicaram que o NDVI permitiu explicar apenas 39% da variabilidade do NDWI entorno ao Açude Poço da Cruz, mostrando que ocorrem outros fatores pertinentes a serem considerados para a análise do comportamento na área de estudo. Dentre os fatores, pode-se apontar que a imagem processada do NDVI (02/11/2019) apresentou maior predominância da Classe 2 que corresponde ao comportamento espectral de alvos como solos descobertos, rochas, áreas urbanizadas e outras áreas sem vegetação (Figura 3E). Este aspecto é explicado pelo fato de o NDVI ser um parâmetro baseado na estimativa de biomassa vegetal, tendo

correlação mais forte com regiões com presença de vegetação. Esta diferença de resultado pode ser ressaltada na data 06/06/2019, onde foi evidenciado maior coeficiente de correlação ($r = 0,96$). Resultados foram consistentes com as pesquisas desenvolvidas por (Kovar et al., 2019; Li et al., 2021) quando estimaram o teor de água da folha a partir de imagens de satélites utilizando índices de absorção espectral em culturas agrícolas e observaram a significância afetada pela estrutura da vegetação e outros fatores

que contribuíram para melhor compreensão do comportamento espectral.

Também, foi possível observar a correlação entre os índices NDVI e NDWI, com exceção de novembro ($r = 0,39$), nos meses de junho a dezembro de 2019 apresentaram correlação negativa forte (acima de $r = 0,89$) em área de corpo hídrico, ou seja, os valores de NDWI apresentaram acima de zero (0), enquanto os valores de NDVI evidenciaram resultados negativos (Tabela 6).

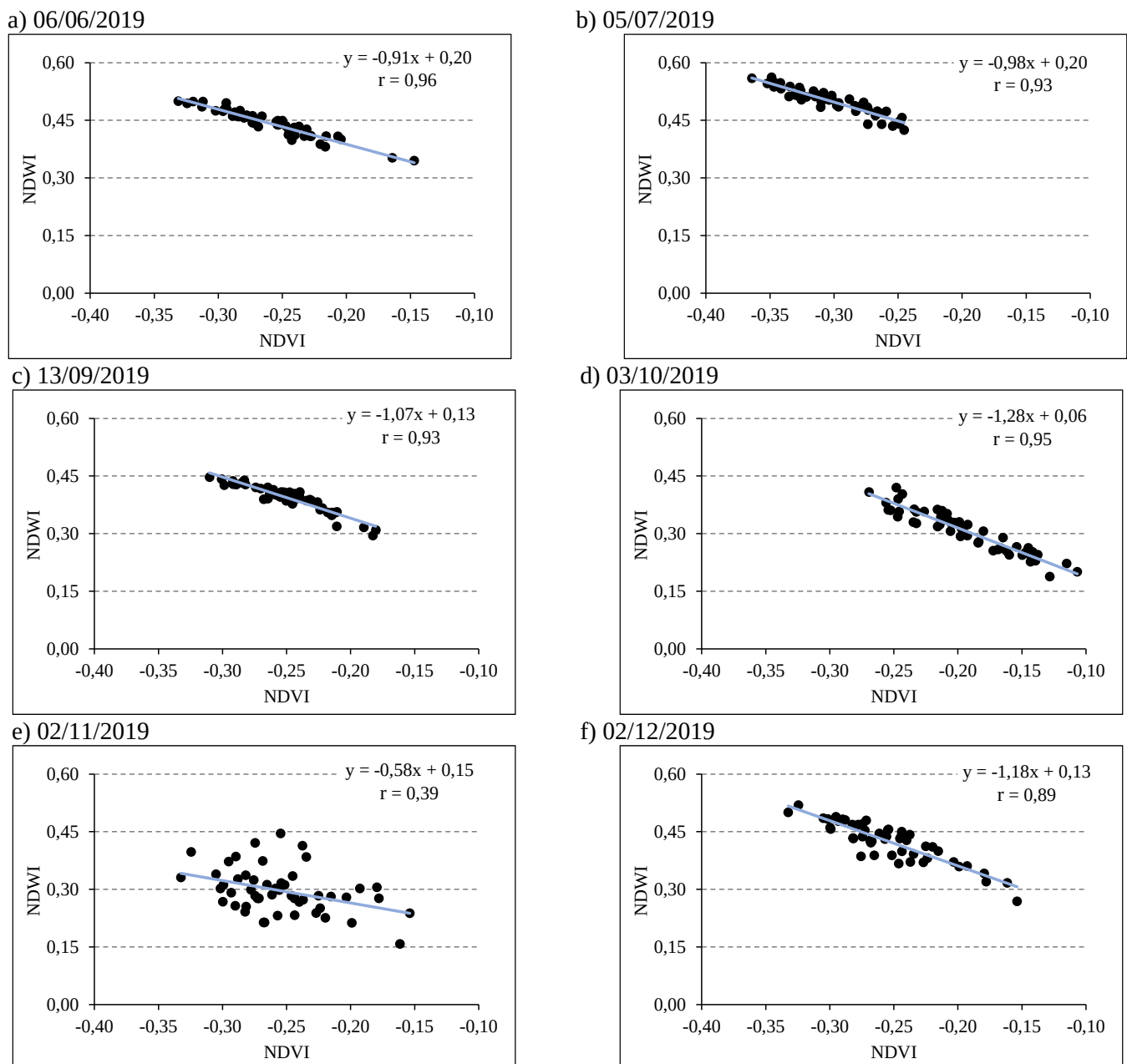


Figura 5 – Comportamento da correlação dos NDVI e NDWI para o Açude Poço da Cruz.

4. Conclusão

O NDVI apresentou uma diminuição nos seus valores médios entre junho a novembro/2019, exceto no mês de dezembro (0,273), evidenciando a

forte correlação com a precipitação ocorrida logo após a passagem do MSI Sentinel-2.

O NDWI apresentou aumento em seus valores, porém em dezembro teve uma diminuição (0,049) de valor médio com o mês anterior.

As informações produzidas pelo processamento dos índices espectrais NDVI e NDWI mostraram-se adequadas para o monitoramento de uso e ocupação do solo em região semiárida, bem como o delineamento de corpo hídrico presente na área, resultando em mapeamentos com detecção de alvos pertinentes com acurácia temática, tendo como fator contribuidor a resolução espacial do sensor MSI Sentinel-2.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo a pesquisa e concessão de bolsa Pós-Graduação do primeiro autor, ao United States Geological Survey (USGS), a Agência Espacial Europeia (ESA), a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e ao Projeto de pesquisa "Coberturas vegetal e hídrica de bacias hidrográficas utilizando imagens orbitais no estado de Pernambuco", aprovado na Chamada Universal MCTIC/CNPq 2018, processo nº 433914/2018-1 da última autora.

Referências

- Alves, E.D.L., 2016. Influência das variáveis naturais e antrópicas nos padrões da temperatura de superfície: Análise por meio de regressão linear múltipla. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise* 38, 345–364.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2018. Disponível: <http://www.ana.gov.br>. Acesso: 10 dez. 2018.
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima, 2020. Sistema de Informação Geográfica. Disponível: <http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/>. Acesso: 5 maio 2020.
- Barbosa, A.H.S., Carvalho, R.G., Camacho, R.G.V., 2017. Aplicação do NDVI para a Análise da Distribuição Espacial da Cobertura Vegetação na Região Serrana de Martins e Portalegre – Estado do Rio Grande do Norte. *Revista do Departamento de Geografia* 33, 128-143. doi: <https://doi.org/10.11606/rdg.v33i0.128171>
- Bezerra, U.A., Oliveira, L.M.M., Candeias, A.L.B., Silva, B.B., Leite, A.C.S., Silva, L.T.M.S., 2018. 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* 41–3, 167-177.
- Bezerra, U.A., Silva, L.T.M.S., Oliveira, L.M.M., Ribeiro Neto, A., Almeida, D.N.O., Andrade, J.M., 2019. Comparativo do Índice NDVI entre os Sensores OLI - Satélite Landsat-8 e MSI – Satélite Sentinel-2 no entorno do Reservatório Poço da Cruz-PE. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Carvalho Junior, O. A., Couto Junior, A. F., Silva, N.C., Martins, E. S., Carvalho, A. P. F., Gomes, R. A. T., 2009. Avaliação dos Classificadores Espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Spectral Correlation Mapper em Séries Temporais NDVI-MODIS no Campo de Instrução Militar de Formosa (GO). *Revista Brasileira de Cartografia* 61, 399-412.
- Chauhan, K. R., Patel, J. J., Shukla, S. H., Kalubarme, M. H., 2021. Monitoring water spread and aquatic vegetation using Spectral Indices in Nalsarovar, Gujarat State-India. *International Journal of Environment and Geoinformatics* 8, 049-056. doi: 10.30897/ijegeo.790839.
- Chouhan, R., Rao, N., 2011. Vegetation detection in multispectral remote sensing images: Protective role analysis of vegetation in 2004 indian ocean tsunami. *Geo-Information for disaster management, Turkey*. Disponível: <http://www.isprs.org/proceedings/2011/Gi4DM/PDF/OP37.pdf>. Acesso: 5 maio de 2020.
- Costa, L.C.B., Guasselli, L.A., 2017. Dinâmica sazonal de remanescentes da mata atlântica, a partir de séries temporais NDVI/MODIS. *Geo UERJ* 30, 214-239.
- Drusch, M.; Bello, U.D.; Carlier, S.; Colin, O.; Fernandez, V.; Gascon, F.; Hoersch, B.; ISOLA, C.; Laberinti, P.; Martimort, P.; Meygret, A.; Spoto, A.F.; Sya O.; Marchesed F. & Bargellinid P., 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment* 120, 25–36.
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., LI, W., Li, X., 2016. 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. doi: <https://doi.org/10.3390/rs8040354>.
- Ferreira Júnior, J.J., Dantas, M. J.F., 2018. Análise do albedo da superfície e de índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Rio Pacoti/CE. *Revista Tecnologia* 39, 1-18. doi: <https://doi.org/10.5020/23180730.2018.8132>
- Jiang, H., Feng, M., Zhu, Y., Lu, N., Huang, J., Xiao, T., 2014. An automated method for extracting rivers and lakes from Landsat imagery. *Remote Sensing* 6, 5067–5089. doi: <https://doi.org/10.3390/rs6065067>.
- Jothimani, M., Gunalan, J., Duraisamy, R., Abebe, A., 2021. Study the relationship between LULC, LST, NDVI, NDWI and NDBI in Greater Arba Minch Area, Rift Valley, Ethiopia. *Atlantis*

- Highlights in Computer Sciences 4, 183-193. doi: 10.2991/ahis.k.210913.023.
- Kafer, P.S., Rex. F.E., 2020. Avaliação espectral e temporal de remanescentes da Mata Atlântica com dados SPOT-VGT e variáveis meteorológicas. *BIOFIX Scientific Journal* 5, 13-22. doi: dx.doi.org/10.5380/biofix. v5i1.67235
- Kang, L., 2014. Use of Geographically Weighted Regression Model for Exploring Spatial Patterns and Local Factors Behind NDVI Precipitation Correlation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7, 4530-4538. doi: 10.1109/JSTARS.2014.2361128.
- Kovar, M., Brestic, M., Sytar, O., Barek, V., Hauptvogrl, P., Zivcak, M., 2019. Evaluation of hyperspectral reflectance parameters to assess the leaf water content in soybean. *Water* 11, 443. doi:10.3390/w11030443.
- Li, H., Yang, W., Lei, J., She, J., Zhou, X., 2021 Estimation of leaf water content from hyperspectral data of different plant species by using three new spectral absorption indices. *Plos One* 16. doi: e0249351. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249351
- 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, 1425-1432. doi: https://doi.org/10.1080/0143116960894871
- Oliveira, L.V, Negri, R.G., Santos, L.B., 2020. Análise de técnicas de detecção de mudança para mapeamento de desastres com uso de dados de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Cartografia* 72, 177-189. doi: http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72n1-51447
- Padovani, N.G., Lopes, E.R., Souza, J.C., Moraes, M.C.M., Lourenço, R.W., 2018. 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* 11, 1832-1845.
- Penha, T.V., Pletsch, M.A.S., Silva Junior, C.H.L., Körting, T.S., Fonseca, L.M.G., 2017. Detecção e delimitação automática de corpos hídricos em imagens Sentinel-2: uma proposta de integração do algoritmo Fmask aos índices espectrais NDWI e MNDWI. *Simpósio Brasileiro de GeoInformática*, Salvador.
- Rishmawi, K., Prince, S. D., Xue, Y., 2016. Vegetation Responses to Climate Variability in the Northern Arid to Sub-Humid Zones of Sub-Saharan Africa. *Remote Sensing* 8, 1-26.
- Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., Hazini, S., 2014. Water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery. *Remote Sensing*, 6, 4173–4189. doi: https://doi.org/10.3390/RS6054173
- Rouse, J.W., Jr., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Washington.
- Santos, P. R., Lima, B.R.C., Carvalho, A. A., Silva, H. P., El-Deir, S.G., Ramos, R.P.S., Alexandre, F.S., Garcia, A.C.S.M., 2021. Gestão de água na irrigação e modificações na cobertura do solo em reservatório artificial em semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Desenvolvimento Territorial Sustentável* 7, 182-212.
- She, X., Zhang, L., Cen, Y., Wu, T., Huang, C., Baig, M.H.A., 2015. Comparison of the continuity of vegetation indices derived from Landsat 8 OLI and Landsat 7 ETM+ data among different vegetation types. *Remote Sensing* 7, 13485-13506. doi: https://doi.org/10.3390/rs71013485.
- Shashikant, V., Mohamed Shariff, A.R., Wavavok, A., Kamal, M.R., Lee, Y.P., 2021. Utilizing TVDI and NDWI to Classify Severity of Agricultural Drought in Chuping, Malaysia. *Agronomy* 11, 1243. doi: https://doi.org/10.3390/agronomy11061243.
- Sothe, C., Almeida, C., Liesenberg, V., Schimalski, M., 2017. Evaluating Sentinel-2 and Landsat-8 Data to Map Successional Forest Stages in a Subtropical Forest in Southern Brazil. *Remote Sensing* 9, 838.
- USGS, 2020. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, 2015, L8DS-1574, version 1.0. Sioux Falls, USA: USGS Eros. Disponível: https://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf. Acesso: 5 mar. 2020.
- Wang, Q., Tenhunen, J.D., 2004. Vegetation mapping with multitemporal NDVI in North Eastern China Transect (NECT). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 6, 17-31. doi:10.1016/j.jag.2004.07.002.
- Zhang, H. K., Roy, D. P., Yan, L., Li, Z., Huang, H., VermotE, E., Skakun, S., Roger, J. C., 2018. 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.
- Zhu, L., Walker, J.P., Ye, N., Rüdiger, C., 2019. Roughness and vegetation change detection: A preprocessing for soil moisture retrieval from multi-temporal SAR imagery. *Remote Sensing of Environment* 225, 93–106. doi:10.1016/j.rse.2019.02.027.