

ANÁLISE DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA MONITORAMENTO REMOTO DAS CAATINGAS

ANALYSIS OF VEGETATION INDEX FOR REMOTE MONITORING OF CAATINGAS

ANÁLISIS DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA EL MONITOREO REMOTO DE CAATINGAS

RESUMO

Nos últimos anos o número de estudos que empregam índices de vegetação como auxílio na identificação e extração de informações da cobertura vegetal das caatingas cresceram, o que desperta atenção quanto ao potencial de cada índice. Nesse contexto, o objetivo deste artigo foi analisar o potencial de índices de vegetação na identificação e caracterização da estrutura da cobertura vegetal das caatingas, tendo como área piloto de estudo o município de Petrolina, Pernambuco. Para desenvolvimento da pesquisa, inicialmente foi desenvolvido um mapeamento padrão com cinco tipologias de uso das terras validado posteriormente com dados de campo. Em seguida, foram processados 18 índices de vegetação sobre uma imagem gerada pelo sensor OLI (*Operational Land Imager*) acoplado ao satélite Landsat 8. Os valores dos índices foram comparados com o mapa de uso e ocupação das terras para verificar a eficiência dos índices. Os resultados indicam que cada índice analisado apresentaram eficácias diferenciadas na identificação dos alvos presentes em campo. Quanto mais densa a cobertura vegetal maiores os acertos dos índices, sendo assim, o principal problema dos índices aplicados as caatingas foram na identificação de áreas com cobertura vegetal esparsa e solo exposto. Nesse contexto, faz-se necessário cuidados na seleção de índices de vegetação para estudos em ambientes semiáridos dando preferência para aqueles que apresentem, em sua estrutura, parâmetros de separação da interferência dos solos sobre a resposta espectral dos ambientes mapeados.

Palavras-chave: resposta espectral; mapeamento da cobertura vegetal; ambientes semiáridos.

ABSTRACT


In recent years, the number of studies that use vegetation indices as an aid in identifying and extracting information from the vegetation cover of the caatingas has grown, which calls attention to the potential of each index. In this context, the objective of this article was to analyze the potential of vegetation indices in the identification and characterization of the structure of the vegetation cover of the caatingas, having as a pilot study area the municipality of Petrolina, Pernambuco. For research development, a standard mapping was initially developed with five land use typologies, later validated with field data. Then, 18 vegetation indices were processed on an image generated by the OLI sensor (*Operational Land Imager*) coupled to the Landsat 8 satellite. The index values were compared with the land use and occupation map to verify the efficiency of the indices. The results indicate that each index analyzed showed different efficiencies in identifying targets present in the field. The denser the vegetation cover, the greater the success of the indices, therefore, the main problem of the indices applied to the caatingas was in identifying areas with sparse vegetation cover and exposed soil. In this context, care is needed in the selection of vegetation indices for studies in semi-arid environments, giving preference to those that present, in their structure, parameters of separation of soil interference on the spectral response of the mapped environments.

Keywords: spectral response; vegetal cover; semi-arid environments

 Rodrigo José de Carvalho

Lopes ^a

 Antonio Marcos dos Santos ^a

 Claudemiro de Lima Júnior ^a

^a Universidade de Pernambuco (UPE),
Recife, Pernambuco, Brasil.

DOI: 10.12957/geouerj.2023.55653

Correspondência: rdg_jose@hotmail.com;
antonio.santos@upe.br;
claudemiro.lima@upe.br

Recebido em: 27 out. 2020

Revisado em: 13 dez. 2022

Aceito em: 11 mai. 2023



RESUMEN

En los últimos años ha crecido el número de estudios que utilizan índices de vegetación como ayuda para identificar y extraer información de la cobertura vegetal de las caatingas, lo que llama la atención sobre el potencial de cada índice. En ese contexto, el objetivo de este artículo fue analizar el potencial de los índices de vegetación en la identificación y caracterización de la estructura de la cobertura vegetal de las caatingas, teniendo como área de estudio piloto el municipio de Petrolina, Pernambuco. Para el desarrollo de la investigación, inicialmente se elaboró un mapeo estándar con cinco tipologías de uso de suelo, posteriormente validado con datos de campo. Luego, se procesaron 18 índices de vegetación sobre una imagen generada por el sensor OLI (Operational Land Imager) acoplado al satélite Landsat 8. Los valores del índice se compararon con el mapa de uso y ocupación del suelo para verificar la eficiencia de los índices. Los resultados indican que cada índice analizado mostró diferentes eficiencias en la identificación de objetivos presentes en el campo. Cuanto más densa sea la cobertura vegetal, mayor será el éxito de los índices, por lo que el principal problema de los índices aplicados a las caatingas fue identificar áreas con escasa cobertura vegetal y suelo expuesto. En este contexto, es necesario tener cuidado en la selección de índices de vegetación para estudios en ambientes semiáridos, dando preferencia a aquellos que presenten, en su estructura, parámetros de separación de la interferencia del suelo sobre la respuesta espectral de los ambientes cartografiados.

Palabras-clave: respuesta espectral; cartografía de la cubierta vegetal; ambientes semiáridos.



INTRODUÇÃO

As Florestas Tropicais Sazonais Secas (FTZS) possuem maior predominância na América do Sul. No Brasil, estão concentradas na região Nordeste e em pequena parte na região Sudeste, ocupando uma área equivalente a 800.000 Km² (SILVA *et al.*, 2018; LIMA & COELHO, 2018). A essa área Ab'Sáber (2003) denominou de Domínio Morfoclimático das Caatingas inserido no semiárido brasileiro.

O clima da região semiárida tem precipitação pluviométrica em torno de 400 a 800mm concentradas entre os meses de janeiro a março com temperaturas médias que variam entre 23 a 27 °C. A umidade relativa do ar é inferior a 50% na maior parte do ano (SILVA *et al.*, 2017; ROCHA, ESPARZA & FERRARI, 2018).

Sua biodiversidade possui riqueza pouco explorada cientificamente, e sobre as áreas correspondentes ao Domínio das Caatingas existem apenas 149 unidades de conservação de proteção integral e de uso sustentável. Essas áreas equivalem, aproximadamente 7,7% do domínio, quantitativo considerado baixo devido aos impactos sobre as caatingas ao longo do tempo promovidos pelas práticas agrícolas que intensificam a segmentação florestal e o desmatamento (BRASIL, 2017).

Os avanços das técnicas de sensoriamento remoto proporcionam monitoramentos com baixo custo, de forma dinâmica, com vasta densidade de dados e análise do comportamento espacial da cobertura vegetal do Domínio das Caatingas. A isto, segundo Semeraro *et al.* (2019), destaca-se o desenvolvimento e aprimoramento dos sensores ópticos que revela, cada vez mais, os impactos ocorridos na cobertura vegetal.

Parte do desenvolvimento das tecnologias do sensoriamento remoto, atualmente, são direcionadas para minimizar a perda da produtividade agrícola, porém bastantes empregados no monitoramento de desmatamento (LOPES *et al.*, 2020). O destaque são os índices de vegetação, os quais são baseados nos valores da refletância de uma ou mais faixas espectrais dos produtos obtidos por sensores remotos (LIU *et al.*, 2019).

Os índices de vegetação, em sua maioria, são modelados em duas faixas espectrais, sendo elas a faixa do visível (Vermelho - Red) e no Infravermelho Próximo (NIR) (KUMAR *et al.* (2018). Segundo Fitz (2008), a faixa espectral do visível (Vermelho) permite diferenciar as características da estrutura da vegetação, visto que é nesta faixa espectral que ocorre absorção da energia eletromagnética pela clorofila. A faixa espectral do Infravermelho Próximo apresenta a rugosidade de vegetação, pela quantidade de energia refletida, onde torna possível verificar as áreas que são submetidas à perturbações. Neste contexto, em levantamento realizado por Silleos *et al.* (2006), os sensores acoplados aos satélites Landsat-5, Landsat-8, NOAA-AVHRR, SPOT e o Terra são os mais empregados nos estudos que envolvem índices de vegetação.

Vários estudos foram desenvolvidos, nos últimos anos, com intuito de analisar a dinâmica da cobertura vegetal das caatingas, tendo como referência os índices de vegetação.



Pode-se destacar o estudo desenvolvido por Tomasella *et al.* (2018), que utilizou o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN) para estimar os dados de biomassa na caatinga e consequentemente, utilizá-los na identificação de área de risco a desertificação.

Os índices de vegetação, também, vêm sendo empregados para estudar a relação entre a precipitação pluviométrica e o comportamento da densidade da cobertura vegetal das caatingas, com o uso do Índice de Vegetação de Diferença Padronizado (IVDP) e do IVDN (BARBOSA & KUMAR, 2016). Incluem-se investigações com objetivos de analisar: a relação entre os padrões pluviométricos e o comportamento das vegetações no Domínio da Caatinga (BARBOSA & KUMAR, 2016); grau de proteção da cobertura dos solos (SILVEIRA *et al.* 2018); aferição do quantitativo de biomassa produzida pela vegetação e indicação para manejo florestal (TIAN *et al.*, 2017) e estudos voltados para estimativa da evapotranspiração da vegetação (SANTOS *et al.*, 2017; MUTTIET *et al.*, 2019).

Apesar do avanço das aplicabilidades dos índices de vegetação, há uma complexidade de índices, que confundem suas funcionalidades nos estudos e mapeamento da cobertura vegetal das terras secas. Neste contexto, o presente artigo visa analisar o potencial de 18 índices de vegetação para mapeamento da cobertura vegetal no Domínio Morfoclimático da Caatinga, tendo como área piloto de estudo o município de Petrolina, estado de Pernambuco.

MATERIAIS E MÉTODOS

Localização e apresentação da área de estudo

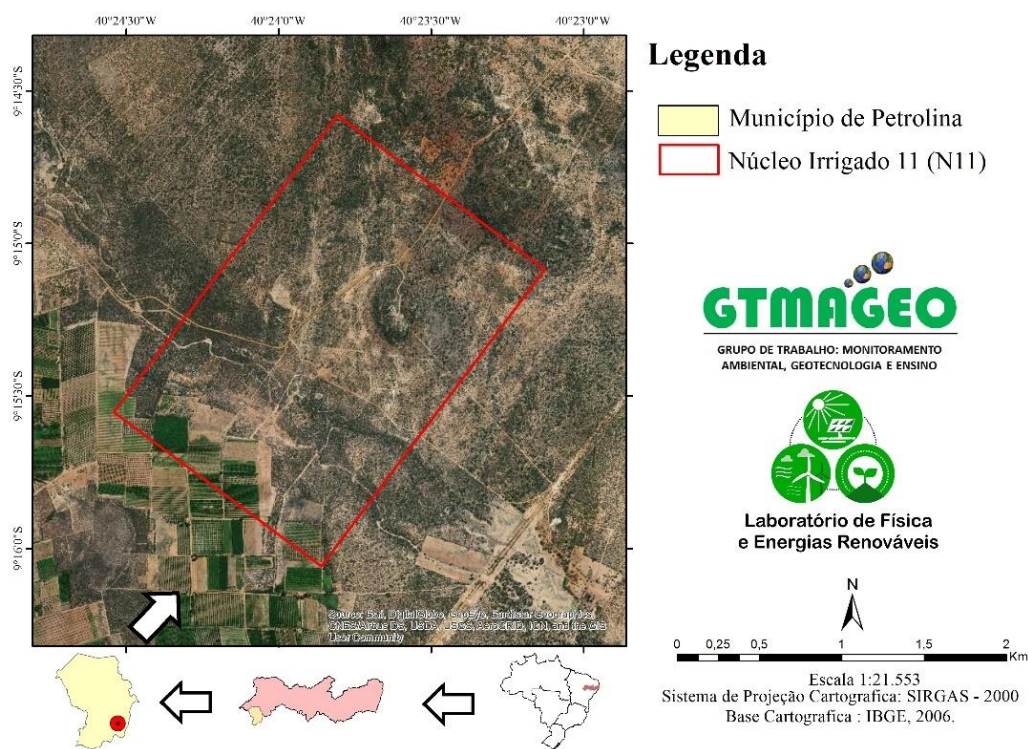
Para desenvolvimento do estudo foi selecionada a área de monitoramento do Grupo de Trabalho em Monitoramento Ambiental, Geotecnologia e Ensino (GTMAGEO), monitorada desde o ano de 2016. Essa área está localizada no Núcleo de Irrigação Senador Nilo Coelho, Núcleo 11 (N11), entre 40°23'49,556" de longitude oeste e 9°15'10,773" de latitude sul, a 19 km de distância da área urbana do município de Petrolina, Pernambuco (Figura 1). O município de Petrolina está localizado no estado de Pernambuco, ocupando 4.561,870 km² com população estimada para o ano de 2021 de 359.372 habitantes, com densidade demográfica de 64,44 hab/km² (IBGE, 2021).

Na área de estudo a cobertura vegetal predominante é a agricultura irrigada, porém, com fragmentos da vegetação de caatinga. Soma-se a esta área, segundo Santos, Souza e Castro (2018), Castro, Lopes e Santos (2019) e Sá *et al.* (2021), problemas relacionados à salinização dos solos em estado avançado que interfere na manutenção da cobertura vegetal.

Quanto a estrutura da cobertura vegetal, segundo Santos e Santos (2019) há predomínio de duas estruturas de caatinga, a aberta e a semiaberta. A primeira é caracterizada pela predominância de espécies

formada por arbusto e as copas das árvores não se tocam. A caatinga semiaberta é uma estrutura transitória entre a caatinga aberta com a fechada, apresentando desde arbustos e espécies arbóreas. As espécies predominantes na área são: jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*); malva-branca (*Melochia tomentosa*); catingueira (*Poincianella pyramidalis*); quipá (*Tacinga inamoena*); juazeiro (*Ziziphus joazeiro*) e a umburana (*Amburana cearenses*).

Figura 1: Localização da área de estudo



Fonte: autores, 2021.

Procedimento metodológico

Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra

Inicialmente, foi desenvolvido o mapeamento de uso e cobertura da terra. Para isto, utilizou-se a técnica de segmentação a partir de uma imagem orbital gerada no dia 12 de março de 2019 pelo sensor OLI acoplado ao satélite Landsat-8 e disponibilizada pelo *United States Geological Survey* (USGS) localizado na órbita 217 e ponto 66. A escolha do produto orbital ocorreu no período em que a vegetação esteve em total vigor após o período de chuva do ano de 2019.

Para o mapeamento foram agrupadas as faixas espectrais do visível, correspondentes as bandas 2, 3, 4 e a faixa espectral do infravermelho próximo corresponde a banda 5 do sensor OLI. Vale destacar que as



imagens do Landsat-8 são disponibilizadas com projeção para o hemisfério norte e para atender aos objetivos desse estudo, as mesmas foram reprojatadas para o hemisfério sul.

Utilizou-se a técnica de segmentação com uso do algoritmo *Mean Shift*, ferramenta de classificação com sistema de delimitação de região com base nos objetos escolhidos no produto orbital, onde as bordas definem os contornos dos segmentos (ERTHAL *et al.*, 1991).

A segmentação foi realizada com auxílio do *software* ArcGis 10.4 (licença disponibilizada durante o GIS DAY de 2020) onde foram inseridos os seguintes parâmetros: detalhe espectral com valor de 18; detalhe espacial com valor de 20 e o tamanho mínimo do segmento em píxeis, correspondente a 8.

A partir da segmentação dos objetos foi possível classificar o uso e cobertura das terras locais em 4 classes, a saber: agricultura irrigada; caatinga aberta; caatinga semiaberta e solo exposto, ambas baseadas no estudo de Santos e Santos (2019).

Para validação do mapeamento, foi empregada a estatística de Kappa (equação 1), a qual tem como propósito estabelecer grau de concordância (quadro 1) entre a realidade de campo e o que foi produzido no mapeamento por meio de uma matriz de confusão. Para isto, foram coletados, de forma aleatória em campo, 62 pontos, representando todas as classes de uso e cobertura das terras mapeadas.

$$Kappa = \frac{p(o) - p(E)}{1 - p(E)} \quad (1).$$

Em que: $P(o)$ representa a concordância observada (soma dos pontos que coincidem entre a realidade de campo com os presentes no mapa e $P(E)$ é a concordância esperada.

Quadro 1: Grau de concordância da estatística de Kappa

Valores do KAPPA	< 0	0 - 19	20 - 39	40 - 59	60 - 79	80 - 100
Interpretação	Ausência de Concordância	Concordância Pobre	Concordância leve	Concordância morderada	Concordância substantiva	Concordância quase perfeita

Fonte: Silva e Paes, 2012.

Extração dos Índices de Vegetação

Foram selecionados 18 índices de vegetação a partir do estudo desenvolvido por Lopes *et al.* (2020), os quais identificaram os índices mais empregados nas pesquisas que envolveram levantamentos e análises das coberturas vegetais nos ambientes de terras secas no âmbito global (quadro 2).

Inicialmente, procedeu-se a seleção das faixas espectrais da imagem de satélite obtida na etapa anterior. Em seguida, foi aplicado o cálculo exposto na Equação 2 para extração da reflectância aparente. Posteriormente, foram aplicadas equações para estimativa de cada índice listado no quadro 2.



$$P = M_p * Q_{CAL} * A_p \quad (2)$$

Em que: M_p corresponde ao fator multiplicativo de reescalonamento para cada faixa espectral; A_p corresponde ao fator aditivo de reescalonamento específico para cada faixa, ambos disponíveis nos metadados da imagem, e Q_{cal} corresponde ao número digital para cada pixel.

Classificação das Imagens pelo Índices de Vegetação

Após o cálculo dos índices, foram aferidas as classes de densidade da cobertura vegetal, levando em consideração os intervalos iguais a partir da amplitude dos valores de cada índice apresentado no quadro 3. Neste contexto, foram divididas 5 classes de densidade, sendo elas: Muito Alta; Alta; Média; Baixa; Muito Baixa e a classe com valores negativos. Esta última, representa os valores correspondentes as superfícies aquáticas. A associação das classes com valores dos índices foi baseada nos estudos de Ponzoni (2012), Raghavendra e Aslam (2017), Kumara *et al.* (2018), Taddeo, Dronova e Depsky (2019), os quais indicam que, quanto maior os valores dos índices, maior densidade da cobertura vegetal em campo, sendo os valores negativos a correspondentes a presença de água.

O desenvolvimento da classificação da vegetação foi baseada no mapeamento do uso da terra validada pela estatística de Kappa (quadro 1), o qual teve como objetivo analisar as classes de densidade dos índices de vegetação com maior concordância com uso e cobertura da terra.

Neste contexto, foi realizada a conversão do uso da terra para pontos, padronizando um ponto para cada pixel das imagens processadas com os índices de vegetação, para a extração dos valores.

Em seguida, foi realizada a contagem de cada classe de uso e cobertura da terra que possui maior número de pontos, com valores dentro das cinco classes de densidades dos índices e, que também, são utilizados para elaboração do mapa conforme cada densidade do índice apresentado na figura 5.

As classes de uso e cobertura da terra foram determinadas com base nas informações coletadas em campo. A quantidade de pontos da área de estudo total foi 8004, distribuídos sobre as 4 classes uso da terra, tendo 808 pontos para Agricultura Irrigada (AG), 3509 pontos para Caatinga Aberta (CA), 2270 pontos na Caatinga Semiaberta (CSA) e 1417 pontos para Solo Exposto.

Para os índices que necessitam de fatores de ajustes aos efeitos dos solos na reflectância da cobertura vegetal, foi empregado o valor correspondente a 1. Segundo Oliveira *et al.*, (2007) esse valor é empregado para área onde a cobertura vegetal apresenta baixa densidade.



A densidade dos índices foi baseada no intervalo de classe, em que quanto mais próximo do valor 1 (um) maior a densidade e quanto mais próximo de 0 menor a densidade da cobertura vegetal da área analisada.

Quadro 2: Índices de vegetação e seus respectivos modelos matemáticos empregados no estudo

ÍNDICES	Equações dos Índices de Vegetação	Origem dos índices	Referências
Índice de Razão Simples (RS)	$RS = \frac{Nir}{Red}$	O índice de Razão Simples (RS) (Equação 4) é o índice que tem objetivo de obter valores de refletância da Faixa vermelha (<i>Red</i>) e infravermelha Próximo (<i>Nir</i>), constatando os valores nos pixels resultantes por conta da banda vermelha, correspondente a absorção da clorofila, e da infravermelha, na obtenção de informações na estrutura do dossel.	BIRTH e MCVEY (1968)
Índice de vegetação da Diferença (IVD)	$IVD = Nir - Red$	Quando falamos do Índice de vegetação da Diferença (IVD) (Equação 5), seus valores vêm da faixa <i>Red</i> e <i>Nir</i> que podem variar de 0 ao infinito, este índice mede a quantidade de vegetação verde e pode sofrer interferências atmosféricas.	LAZAROTE (2007)
O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN)	$IVDN = \frac{Nir - Red}{Nir + Red}$	O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN), criado por Rouse et al. (1974), parte da faixa <i>Nir</i> e <i>Red</i> com os resultados variando de -1 a 1. Quanto mais próximo de 1 maior será a densidade de vegetação. Quanto aos valores próximos de 0, são indicados de pouco vigor da vegetação.	PONZONI (2012)
Índice Vegetação Triangular (IVT)	$IVT = 0,5 \cdot (120 \cdot (Nir - Green)) - 200 \cdot (Red - Green)$	Com objetivo de medir a absorção dos pigmentos com uma função, o Índice Vegetação Triangular (IVT), relativa a banda <i>Nir</i> e <i>Red</i> , evidência a magnitude da região da Banda do verde (<i>Green</i>), onde há absorção da luz pela clorofila.	BROGE e LEBLANC (2000)
Índice de Vegetação Realçado (IVR)	$IVR = G \frac{Nir - Red}{Nir + C_1 Red + C_2 Blue + L} \cdot (1 + L)$	O Índice de Vegetação Realçado (IVR), desenvolvido para aprimorar o IVDN, contém o Fator de ajuste ao solo (<i>L</i>) que varia de 0,25 a 1. Foram considerados os coeficientes de ajuste <i>C1</i> e <i>C2</i> para o ajuste dos efeitos dos aerossóis da atmosfera correspondendo a <i>C1</i> =6 e <i>C2</i> =7,5. Já o fator <i>G</i> corresponde ao algarismo que vai permitir uma melhor verificação sensibilidade da biomassa nessa região.	JENSEN (2009)
Índice Global de Monitoramento Ambiental (IGMA)	$IGMA = \eta(1 - 0,25\eta) - \frac{Red - 0,125}{1 - Red}$ $\eta = \frac{2(Nir^2 - Red^2) + 1,5 Red + 0,5 Nir}{Nir + Red + 0,5}$	o Índice Global de Monitoramento Ambiental (IGMA) (Equação 9) possibilita analisar a influência da atmosfera em valores finais, podendo existir valores entre 0 e 1 sobre áreas continentais	PONZONI (2012)
O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS)	$IVAS = \frac{Nir - Red}{Nir + Red + L} \cdot 1 + L$	O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS) parte da mesma base do IVDN, tendo como diferença o fator <i>L</i> , que é o fator de ajuste do solo.	HUETE e LIU (1997)



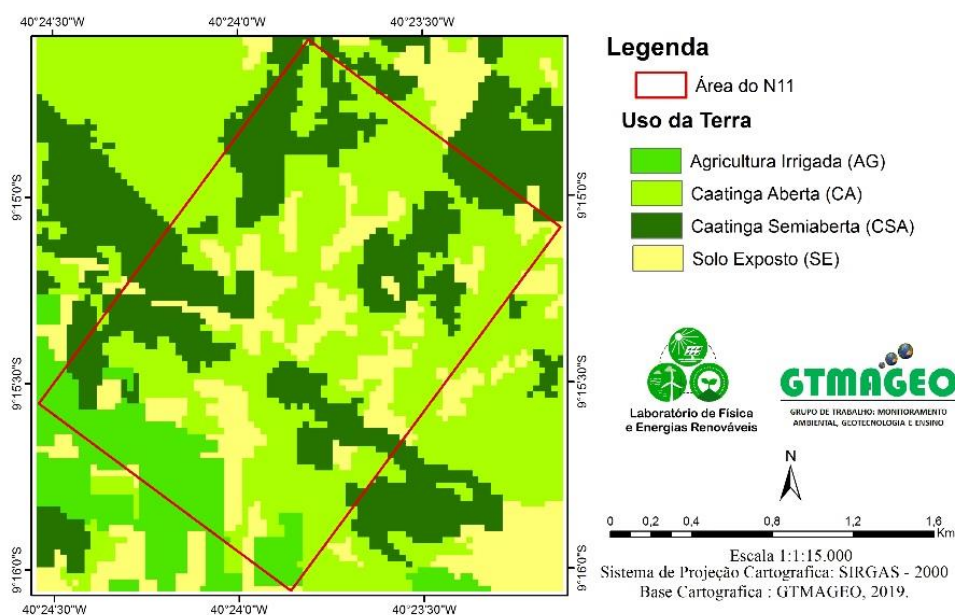
Índice de Vegetação Resistente à Atmosfera e Ajustado ao Solo (IVRAS)	$IVRAS = \frac{Nir - Rb}{Nir + Rb + L}$	O Índice de Vegetação Resistente à Atmosfera e Ajustado ao Solo (IVRAS) desenvolvido por Huete e Liu (1997), possui L como o IVAS e o fator de correção dos efeitos da atmosfera do IVRA, com o objetivo de melhorar as propriedades na avaliação da vegetação.	HUETE e LIU (1997)
Índice de Clorofila Verde (ICV)	$ICV = \frac{Nir}{Green} - 1$	Segundo Gitelson <i>et al.</i> (2005), o índice de Clorofila Verde (ICV), serve para o entendimento da capacidade, a fase de crescimento e do estresse do dossel da vegetação, por meio da interação da Faixa <i>Green</i> e do <i>Nir</i> .	GITELSON <i>et al.</i> , (2005)
Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde (IVDNV)	$IVDNV = \frac{(Nir - Green)}{(Nir + Green)}$	O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde (IVDNV), proposto com base na resposta espectral da vegetação, com faixa infravermelho próximo e parte baixa do visível do espectro eletromagnético, sendo <i>Nir</i> a faixa do espectro da banda do infravermelho e <i>Green</i> correspondente ao espectro da banda verde	FERNANDES, VEIVERBERG e SEBEM (2009)
Índice de Vegetação Ajustada do Solo Verde (IVASV)	$IVASV = 1,5 \cdot \frac{Nir - Green}{Nir + Green + 0,5}$	Segundo SRIPADA <i>et al.</i> (2006), o Índice de Vegetação Ajustada do Solo Verde (IVASV), tem como função a diminuição do solo exposto que aparece no fundo de vegetação que interfere no espectro da refletância do dossel	SRIPADA <i>et al.</i> , (2006)
Índice de Vegetação Ajustada pelo Solo Modificado (IVASM)	$IVASM = \frac{Nir - Red}{Nir + Red + L} \cdot 1 + L$ $L = 1 - \frac{2 \cdot s \cdot (Nir - Red) \cdot (Nir - s \cdot Red)}{(Nir + Red)}$	O Índice de Vegetação Ajustada pelo Solo Modificado (IVASM) tem como objetivo colocar o fator L mostrado (Equação 16), para ser utilizado como função de densidade de cobertura vegetal. Diferente do IVAS, o fator L é calculado a partir da equação (16.1), em que: S é a inclinação da linha do solo, obtido a partir do gráfico de valores do brilho da faixa espectral vermelha com a faixa do Infravermelho próximo.	OLIVEIRA <i>et al.</i> , (2007)
O Razão Simples Modificada (RSM)	$RSM = \frac{\frac{Nir}{Red} - 1}{\left(\frac{Nir}{Red}\right)^{0,5} + 1}$	O Razão Simples Modificada (RSM) é o melhoramento do SR, sendo mais sensível aos parâmetros biofísicos da vegetação, possibilitando a criação de modelos mais lineares	HABOUDANE <i>et al.</i> , (2004)
Índice Modificado de Vegetação Triangular (IMVT2)	$IMVT2 = \frac{(1,5 \cdot (1,2(Nir - Green) - 2,5 \cdot (Red - Green)))}{((2 \cdot Nir + 1)^2 - (6 \cdot Nir - 5 \cdot Red^{0,5}) - 0,5)^{0,5}}$	O Índice Modificado de Vegetação Triangular (IMVT2) tem o objetivo de caracterizar a energia da radiação, para entender a absorção dos pigmentos foliares em diferentes níveis relativos entre banda vermelha e infravermelha.	HABOUDANE <i>et al.</i> , (2004)
Índice de Normalização vermelho (NV)	$NV = \frac{Red}{Nir + Red + Green}$	O desenvolvimento Normalização vermelho (NV), é um dos índices mais sensíveis em questões individuais <i>Red</i> , para melhor análise da vegetação	SRIPADA <i>et al.</i> , (2006)
Índice de Infravermelho próximo normalizado (IPN)	$IPN = \frac{Nir}{Nir + Red + Green}$	O desenvolvimento IPN (Infravermelho próximo normalizado), é um dos índices mais sensíveis em questões individuais <i>Nir</i> , para melhor análise da vegetação.	SRIPADA <i>et al.</i> , (2006)
Índice de Vegetação Ajustada ao Solo Otimizado (IVASO)	$IVASO = \frac{(1 + 0,16)(Nir - Red)}{Nir + Red + 0,16}$	O Índice de Vegetação Ajustada ao Solo Otimizado (IVASO) teve seu desenvolvimento lançado para minimizar os efeitos da linha do sol dando mais precisão em análises com o coeficiente 0,16, mostrado na equação 21, para a redução de efeitos sobre a vegetação estudada.	RONDEAUX <i>et al.</i> , (1996)

Fonte: Autores, 2021.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O coeficiente de Kappa validou o mapa de uso e cobertura da terra. O valor de concordância foi 81%, considerado quase perfeito (quadro 1). Com este resultado, o mapa de uso e cobertura da terra (figura 2) foi empregado nas comparações e avaliações dos índices de vegetação conforme o objetivo do estudo.

Figura 2: Mapa de uso e cobertura da terra da área de estudo



Fonte: autores, 2021.

Agricultura irrigada (AG)

Os dois índices que concentraram sua faixa de densidade Alta sobre as áreas de agricultura irrigada foram: IVD 58,91% e o IVT 57,67%. Os índices a seguir chamam atenção por conterem fatores de ajustes à interferência do solo, destacando-se o IVAS 56,43%, o IVRAS 56,31% e o IVASM 55,81%. Em sexto e sétimo, estão o IVR 53,21% e o IMVT2 com 50,74% de pontos com densidade da vegetação alta sobre a agricultura irrigada. Para esses índices, novos estudos poderão ser realizados com diferentes valores para os fatores de ajuste à interferência dos solos na resposta espectral destes índices.

Os demais índices como o RS, NV e o ICV apresentaram ligações maiores entre suas faixas de média densidade de cobertura vegetal com a agricultura irrigada (quadro 3). Ou seja, são índices, em que para estudo sobre áreas de agricultura irrigada, não são aconselháveis em comparação com os índices que obtiveram melhores resultados como o IPN, IMGA, IVDNV e o IVND.

Caatinga Semiaberta (CSA)

A CSA possui densidade vegetal entre as classes Alta e Média. No estudo desenvolvido por Santos e Santos (2019), a caatinga Semiaberta, no ambiente de estudo, é caracterizada pelo predomínio de espécies lenhosas como a catingueira (*Poincianella pyramidalis*) e a jurema preta (*Mimosa tenuiflora*), espécies consideradas pioneiras e indicadoras de forte degradação ambiental na área analisada.



Vale destacar que a Caatinga Semiaberta é um ambiente onde há mescla entre coberturas fechadas e abertas. Nos índices de vegetação, as classes de valores que indicam vegetação densa e média (quadro 3 e figura 3) podem identificar áreas sobre caatinga Semiaberta.

Nesse sentido, os índices que apresentaram resultados positivos de pontos com densidade da vegetação alta sobre as caatingas Semiaberta foram: IMGa e o IVDNV com 98,41%; o conhecido IVDN com 96,38%; IVRA 83,41%, IVASO 61,23% e, por último, o IPN com 51,85% dos pontos com alta densidade sobre a caatinga Semiaberta.

Outros índices apresentaram boa identificação da caatinga Semiaberta em suas faixas (intervalos) destinados à vegetação com média densidade. Foram eles: IVASM 97,13%; IVAS 96,47%; IVRAS 95,59%; IVASV 88,32%; ICV 80,79%; IVR 79,07%; RS com 73,96%; RSM 69,74%; IVD 68,54% e o IVT com 59,91% dos pontos com intervalo de média densidade sobre a caatinga Semiaberta. Os três índices com menores valores foram o NV e o IMVT2 (quadro 3 e figura 3).

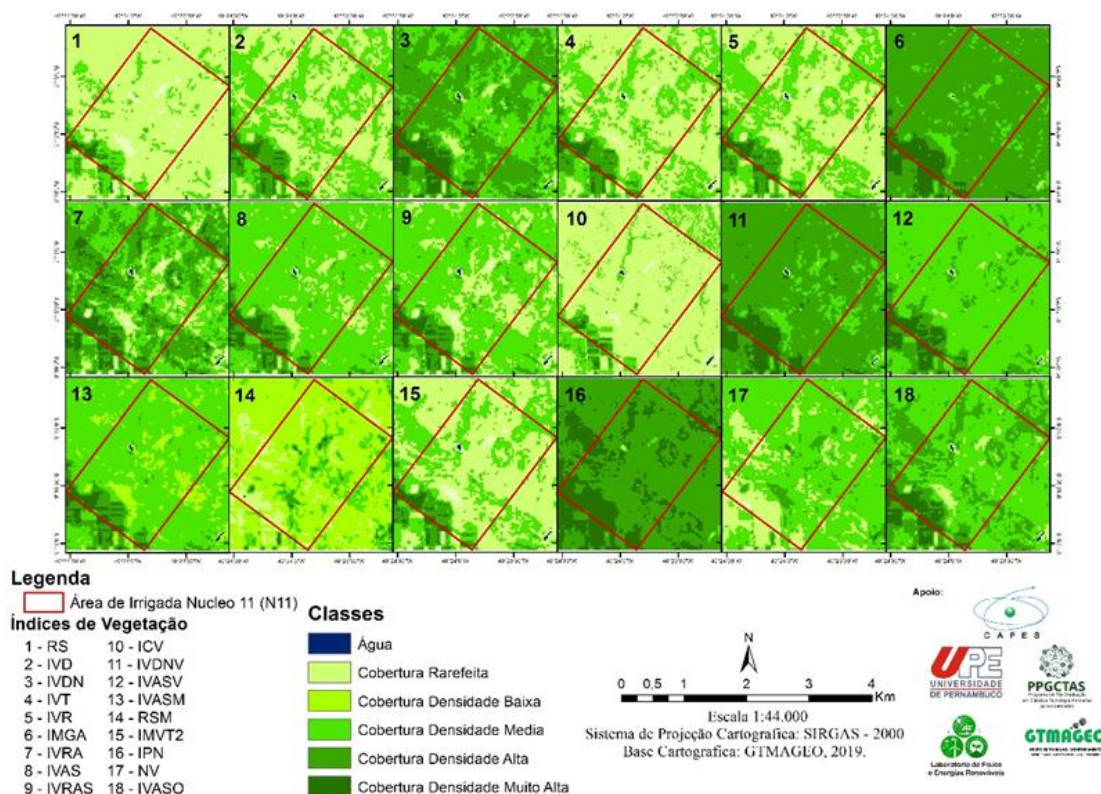
O RS, no intervalo destinado à identificação de cobertura vegetal rarefeita (misto de solo exposto e reduzida cobertura vegetal), teve 73,96% dos pontos identificados a classe da caatinga Semiaberta. Nesse contexto, esse índice não é recomendado para identificação de áreas com características das caatingas Semiaberta, assim como, para mapeamento às áreas com agricultura irrigada, como discutido anteriormente.

Quadro 3: Apresentação do quadro análise dos índices de vegetação empregados no estudo

Avaliação Ruim						Avaliação Parcial						Avaliação Boa						Avaliação Ótima					
Índices	Intervalos	AG (%)	CA (%)	CSA (%)	SE (%)	Índices	Intervalos	AG (%)	CA (%)	CSA (%)	SE (%)	Índices	Intervalos	AG (%)	CA (%)	CSA (%)	SE (%)	Índices	Intervalos	AG (%)	CA (%)	CSA (%)	SE (%)
ICV	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,56	RS	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	IVD	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	IVDN	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,56
	0 a 0,948	0,00	0,03	0,04	3,18		0 a 1,97	0,00	0,06	0,04	17,15		0 a 0,092	0,00	0,03	0,04	1,62		0 a 0,14	0,00	0,00	0,00	0,42
	0,949 a 1,896	0,50	80,08	18,77	67,89		1,98 a 3,94	8,66	98,52	25,90	77,49		0,093 a 0,184	0,00	67,97	30,79	54,20		0,15 a 0,28	0,00	0,00	0,04	1,06
	1,897 a 2,844	28,71	19,83	80,79	27,31		3,95 a 5,91	52,72	1,03	73,96	5,29		0,185 a 0,276	13,61	31,72	68,55	36,77		0,29 a 0,42	0,00	14,19	0,48	37,83
	2,845 a 3,792	50,62	0,06	0,40	1,06		5,92 a 7,88	26,24	0,00	0,09	0,07		0,277 a 0,368	58,91	0,28	0,62	6,63		0,43 a 0,56	20,54	85,64	98,41	56,81
	3,793 a 4,74	20,17	0,00	0,00	0,00		7,89 a 9,85	12,38	0,00	0,00	0,00		0,369 a 0,46	27,48	0,00	0,00	0,07		0,57 a 0,70	79,46	0,17	1,06	3,32
IVDNV	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,56	IVDN	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71	IVT	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71	RSM	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,56
	0 a 0,14	0,00	0,00	0,00	0,42		0 a 0,162	0,00	0,00	0,00	0,49		0 a 0,114	0,00	0,00	0,04	0,64		0 a 0,426	0,00	0,71	0,04	18,56
	0,15 a 0,28	0,00	0,00	0,04	1,06		0,163 a 0,324	0,00	0,43	0,04	15,24		0,119 a 0,236	3,09	16,79	1,06	32,82		0,427 a 0,852	1,61	92,33	29,82	67,25
	0,29 a 0,42	0,00	14,19	0,48	37,83		0,325 a 0,486	0,25	54,12	1,94	52,43		0,237 a 0,354	3,59	82,59	97,14	56,53		0,853 a 1,278	40,47	6,93	69,74	13,90
	0,43 a 0,56	20,54	85,64	98,41	56,81		0,487 a 0,649	28,47	45,40	96,39	30,28		0,355 a 0,472	55,82	0,31	1,76	8,68		1,279 a 1,704	42,33	0,03	0,40	0,28
	0,57 a 0,70	79,46	0,17	1,06	3,32		0,650 a 0,811	71,29	0,06	1,63	0,85		0,473 a 0,59	37,50	0,31	0,00	0,21		1,705 a 2,13	15,59	0,00	0,00	0,00
IVASV	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,56	IVR	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71	IMGA	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,78	IPN	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,56
	0 a 0,114	0,00	0,00	0,04	0,64		0 a 0,184	0,00	0,06	0,04	5,79		0 a 0,14	0,00	0,63	0,04	13,48		0 a 0,156	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,115 a 0,228	0,00	0,23	0,04	3,53		0,185 a 0,368	0,25	79,85	20,48	64,29		0,15 a 0,28	0,62	31,09	43,66	64,15		0,157 a 0,312	0,00	0,00	0,00	0,56
	0,229 a 0,342	1,11	95,55	88,33	76,29		0,368 a 0,552	21,29	20,03	79,07	26,11		0,29 a 0,42	24,63	68,25	55,99	19,05		0,313 a 0,468	0,00	0,00	0,04	2,75
	0,343 a 0,456	41,83	4,22	11,59	17,57		0,553 a 0,736	52,97	0,06	0,40	3,11		0,43 a 0,56	50,74	0,03	0,31	2,54		0,469 a 0,624	2,60	96,27	51,85	85,53
	0,457 a 0,57	57,05	0,00	0,00	1,41		0,737 a 0,92	25,50	0,00	0,00	0,00		0,57 a 0,70	24,01	0,00	0,00	0,00		0,625 a 0,78	97,40	3,73	48,11	11,15
IVASM	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71	IVRA	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71	IVAS	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71	NV	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,00
	0 a 0,118	0,00	0,00	0,04	1,06		0 a 0,186	0,00	0,00	0,00	0,21		0 a 0,084	3,09	0,00	0,00	0,00		0 a 0,168	31,06	1,91	42,91	7,13
	0,119 a 0,236	3,09	16,79	1,06	32,82		0,187 a 0,372	0,00	0,00	0,00	0,78		0,116 a 0,232	0,00	6,44	1,37	29,71		0,169 a 0,252	65,84	97,35	57,09	72,41
	0,237 a 0,354	3,59	82,59	97,14	56,53		0,373 a 0,558	0,00	7,38	1,23	22,23		0,233 a 0,348	5,57	92,90	96,48	58,65		0,253 a 0,336	0,00	0,74	0,00	20,11
	0,355 a 0,472	55,82	0,31	1,76	8,68		0,559 a 0,744	20,42	92,59	98,41	72,19		0,349 a 0,464	56,44	0,66	2,11	9,46		0,337 a 0,42	0,00	0,00	0,00	0,35
	0,473 a 0,59	37,50	0,31	0,00	0,21		0,745 a 0,93	79,58	0,03	0,35	4,59		0,465 a 0,58	38,00	0,00	0,00	0,00		0,49	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00
RSM	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	IVRAS	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,78	IVRAS	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,78	IVASO	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71
	0 a 0,426	0,00	0,71	0,04	18,56		0 a 0,19	0,00	0,06	0,00	9,32		0 a 0,064	0,00	0,03	0,00	8,96		0 a 0,146	0,00	0,00	0,00	0,56
	0,427 a 0,852	1,61	92,33	29,82	67,25		0,20 a 0,38	0,00	9,52	0,04	36,13		0,065 a 0,128	0,00	31,72	0,84	47,71		0,147 a 0,292	0,00	1,14	0,04	18,21
	0,853 a 1,278	40,47	6,93	69,74	13,90		0,39 a 0,57	2,48	66,97	6,48	37,54		0,129 a 0,192	8,29	67,83	95,59	35,85		0,293 a 0,438	0,62	90,31	38,59	62,46
	1,279 a 1,704	42,33	0,03	0,40	0,28		0,58 a 0,76	48,02	23,31	83,13	16,02		0,193 a 0,256	56,31	0,43	3,57	6,63		0,439 a 0,584	39,48	8,52	61,23	17,64
	1,705 a 2,13	15,59	0,00	0,00	0,00		0,77 a 0,95	49,50	0,14	10,35	0,21		0,257 a 0,32	35,40	0,00	0,00	0,00		0,42	0,585 a 0,73	59,90	0,03	0,13
IMVT2	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,78	IVRA	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71	IVRAS	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71	IVASO	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71
	0 a 0,14	0,00	0,63	0,04	13,48		0 a 0,19	0,00	0,06	0,00	9,32		0 a 0,064	0,00	0,03	0,00	8,96		0 a 0,146	0,00	0,00	0,00	0,56
	0,15 a 0,28	0,62	31,09	43,66	64,15		0,20 a 0,38	0,00	9,52	0,04	36,13		0,065 a 0,128	0,00	31,72	0,84	47,71		0,147 a 0,292	0,00	1,14	0,04	18,21
	0,29 a 0,42	24,63	68,25	55,99	19,05		0,39 a 0,57	2,48	66,97	6,48	37,54		0,129 a 0,192	8,29	67,83	95,59	35,85		0,293 a 0,438	0,62	90,31	38,59	62,46
	0,43 a 0,56	50,74	0,03	0,31	2,54		0,58 a 0,76	48,02	23,31	83,13	16,02		0,193 a 0,256	56,31	0,43	3,57	6,63		0,439 a 0,584	39,48	8,52	61,23	17,64
	0,57 a 0,70	24,01	0,00	0,00	0,00		0,77 a 0,95	49,50	0,14	10,35	0,21		0,257 a 0,32	35,40	0,00	0,00	0,00		0,42	0,585 a 0,73	59,90	0,03	0,13
IPN	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	IVRA	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,78	IVRAS	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,78	IVASO	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71
	0 a 0,156	0,00	0,00	0,00	0,00		0 a 0,19	0,00	0,06	0,00	9,32		0 a 0,064	0,00	0,03	0,00	8,96		0 a 0,146	0,00	0,00	0,00	0,56
	0,157 a 0,312	0,00	0,00	0,00	0,56		0,20 a 0,38	0,00	9,52	0,04	36,13		0,065 a 0,128	0,00	31,72	0,84	47,71		0,147 a 0,292	0,00	1,14	0,04	18,21
	0,313 a 0,468	0,00	0,00	0,04	2,75		0,39 a 0,57	2,48	66,97	6,48	37,54		0,129 a 0,192	8,29	67,83	95,59	35,85		0,293 a 0,438	0,62	90,31	38,59	62,46
	0,469 a 0,624	2,60	96,27	51,85	85,53		0,58 a 0,76	48,02	23,31	83,13	16,02		0,193 a 0,256	56,31	0,43	3,57	6,63		0,439 a 0,584	39,48	8,52	61,23	17,64
	0,625 a 0,78	97,40	3,73	48,11	11,15		0,77 a 0,95	49,50	0,14	10,35	0,21		0,257 a 0,32	35,40	0,00	0,00	0,00		0,42	0,585 a 0,73	59,90	0,03	0,13
NV	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	IVRAS	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71	IVRAS	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71	IVASO	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71
	0 a 0,084	3,09	0,00	0,00	0,00		0 a 0,19	0,00	0,06	0,00	9,32		0 a 0,064	0,00	0,03	0,00	8,96		0 a 0,146	0,00	0,00	0,00	0,56
	0,085 a 0,168	31,06	1,91	42,91	7,13		0,20 a 0,38	0,00	9,52	0,04	36,13		0,065 a 0,128	0,00	31,72	0,84	47,71		0,147 a 0,292	0,00	1,14	0,04	18,21
	0,169 a 0,252	65,84	97,35	57,09	72,41		0,39 a 0,57	2,48	66,97	6,48	37,54		0,129 a 0,192	8,29	67,83	95,59	35,85		0,293 a 0,438	0,62	90,31	38,59	62,46
	0,253 a 0,336	0,00	0,74	0,00	20,11		0,58 a 0,76	48,02	23,31	83,13	16,02		0,193 a 0,256	56,31	0,43	3,57	6,63		0,439 a 0,584	39,48	8,52	61,23	17,64
	0,337 a 0,42	0,00	0,00	0,00	0,35		0,77 a 0,95	49,50	0,14	10,35	0,21		0,257 a 0,32	35,40	0,00	0,00	0,00		0,42	0,585 a 0,73	59,90	0,03	0,13
IVASO	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71	IVRAS	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,78	IVRAS	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,78	IVASO	-1 a -0,99	0,00	0,00	0,00	0,71
	0 a 0,146	0,00	0,00	0,00	0,56		0 a 0,19	0,00	0,06	0,00	9,32		0 a 0,064	0,00	0,03	0,00	8,96		0 a 0,146	0,00	0,00	0,00	0,56
	0,147 a 0,292	0,00	1,14	0,04	18,21		0,20 a 0,38	0,00	9,52	0,04	36,13		0,065 a 0,128	0,00	31,72	0,84	47,71		0,147 a 0,292	0,00	1,14	0,04	18,21
	0,293 a 0,438	0,62	90,31	38,59	62,46		0,39 a 0,57	2,48	66,97	6,48	37,54		0,129 a 0,192	8,29	67,83	95,59	35,85		0,293 a 0,438	0,62	90,31	38,59	62,46
	0,439 a 0,584	39,48	8,52	61,23	17,64		0,58 a 0,76	48,02	23,31	83,13	16,02		0,193 a 0,256	56,31	0,43	3,57	6,63		0,439 a 0,584	39,48	8,52	61,23	17,64
	0,585 a 0,73	59,90	0,03	0,13	0,42		0,77 a 0,95	49,50	0,14	10,35	0,21		0,257 a 0,32	35,40	0,00	0,00	0,00		0,42	0,585 a 0,73	59,90	0,03	0,13

Fonte: autores, 2021.

Figura 3: Índices de vegetação empregados no estudo



Fonte: Autores, 2021

Caatinga Aberta (CA)

A Caatinga Aberta (CA) constitui uma cobertura vegetal, em que, as copas das árvores/arbustos não se encontram (CAVALCANTI, 2014). Tem sua origem em fatores naturais ou antropogênicos. Na área de estudo, o principal motivo que configura esta estrutura de caatinga é a interferência humana (SANTOS & SANTOS, 2019). Em campo foi possível verificar atividades de pastoreio e a retirada de madeira para construções de cercas para áreas irrigadas, fatores que reduzem a densidade da cobertura vegetal local. Quanto à estrutura florística, assemelha-se muito com as espécies predominantes na caatinga Semiaberta.

Nos índices de vegetação, a classe de intervalo mais adequada para mapear – identificar áreas formadas pelas caatingas abertas são as faixas de baixa densidade e, em último caso, de média densidade vegetal. Nesse sentido, os índices que apresentaram resultados positivos para mapeamentos de região com média densidade vegetal semelhante às Caatingas Abertas foram: SR 98,51%; ICV 80,08%; IVR 79,85,64%; DVI 67,96% e o RSM 92,33% (quadro 3 e figura 3).

Para os índices que apresentaram maiores correlações entre suas faixas de identificação de vegetação com média densidade com as Caatingas Abertas foram: NV 97,34%; IVASV 95,55%; IVAS 92,90%; IVASO 90,31% e o IVASM 82,58%. Os demais índices apresentaram valores abaixo de 70% (quadro 3 e figura 3).



O que chamou atenção foram índices que, na faixa – intervalo – destinado à identificação de cobertura vegetal com alta densidade caíram sobre as áreas de Caatinga Aberta. Foram eles: IPN com 96,26%; IMGa com 92,59% e o IVDNV que apresentou 85,64% do intervalo de alta densidade da vegetação sobre as caatingas abertas na área de estudo (quadro 3 e figura 3). O esperado para esses índices é que os intervalos caíssem sobre áreas com Agricultura Irrigada ou Caatinga Semiaberta. Neste caso, esses índices podem acarretar confusões ao serem utilizados para representar ou identificar áreas sobre Caatingas Abertas.

Solo exposto (SE)

O Solo Exposto (SE), tem origem nas práticas antropogênicas onde o solo torna-se totalmente exposto, sendo vulnerável à erosão, entre outros problemas de ordem ambiental. Em campo, foram observadas áreas sem cobertura vegetal, as quais anteriormente, foram destinadas à agricultura irrigada e, atualmente, estão abandonadas, além da retirada de madeira para construções de cercas empregadas na agricultura irrigada.

Os índices de vegetação foram desenvolvidos para identificar e analisar a cobertura vegetal, porém existem parâmetros extraídos pelos índices, com os quais pode-se mapear a presença ou não da cobertura vegetal. Nesse contexto, nos índices de vegetação, os valores próximos de 0 representam a ausência da cobertura vegetal ou cobertura rarefeita.

Nesse contexto, entre os índices analisados, nenhum intervalo de classe próximo de 0 acoplou em mais de 20% das áreas mapeadas como Solo Exposto, o que comprova a discussão apresentada no parágrafo anterior. Porém, no intervalo de classe dos índices que indicam baixa densidade da cobertura vegetal, destaca-se cinco índices que apresentaram estes intervalos assentados acima de 50% sobre as áreas de Solo Exposto. Foram eles: RS com 77,48%; ICV com 67,89%; RSM com 67,25 %; IVR com 64,29%; IMVT2 64,14%; IVT 61,11% e o IVD 54,19% (quadro 3 e figura 3).

Os índices pontuados anteriormente, são os mais indicados para identificação de áreas com reduzida presença de cobertura vegetal e/ou com solo exposto. Porém, alguns índices merecem cuidados. Cita-se como destaque o IVDN, o qual apresentou 52,43% de sua área na classe de intervalo destinada para vegetação com densidade Alta sobre o solo exposto. Esses índices são bastante utilizados nos estudos sobre as caatingas segundo Lopes *et al.* (2020). Além dos índices citados no parágrafo anterior, seguem as mesmas dinâmicas nos resultados o IPN, IGMA, OSAVI, IVRA, NV, IVASM, IVAS e o IVDNV (quadro 3 e figura 3).

No intervalo de classe dos índices que indicam Média densidade da cobertura vegetal, podemos destacar sete que tiveram valores acima de 50% de suas áreas assentadas sobre áreas mapeadas como solo exposto. Foram eles: o IVASV; NV; OSAVI; IVAS; IVASM; IVND e o IVRA. Observando os resultados, todos os índices apresentaram problemas na identificação da vegetação rarefeita e do solo exposto. Esse problema,



segundo Ribeiro, Silva e Silva (2016), é devido à interferência da reflectância dos solos, confundindo-os como vegetação, efeito conhecido como *background*.

CONCLUSÕES

Recomenda-se o uso de índices que apresentem, em sua estrutura matemática, o uso de ajustes aos efeitos da reflectância dos solos em seus resultados, evitando assim, a estimativa da cobertura vegetal em áreas que realmente esteja sobre solo exposto.

Os índices com avaliação ruim foram aqueles em que não foi possível separar as classes de acordo com a realidade de campo. Nesse caso, citam-se o IVDNV, IVASV, IPN, NV e o RS, índices que foram totalmente inexpressivos na identificação dos alvos-chaves nesse estudo. No RS, houve inversão drástica, onde em campo é Agricultura Irrigada e Caatinga Semiaberta o índice apontou Caatinga Aberta e Solo Exposto. Nesse contexto, foi o índice com resultado mais comprometido, semelhante ao NV.

Os índices que apresentaram boa avaliação foram o IVRAS, IVASM, IVAS, IVASO, IGMA, RSM e o NDVI. Esses índices conseguiram identificar bem até três classes de uso e cobertura da terra local. O problema apresentado em ambos, foram identificação das áreas de Solo Exposto conforme discussão anterior. Os melhores índices foram o IVRAS e o IVTM. Ambos conseguiram diferenciar bem as densidades da cobertura vegetal, identificando as áreas sobre Agricultura Irrigada, Caatinga Semiaberta, Caatinga Aberta e Solo Exposto.

Quanto aos índices mais usuais, o IVAS conseguiu diferenciar bem as áreas de Agricultura Irrigada e Caatinga Semiaberta, porém o percentual de acerto comparado com o IVRAS e o IVTM foi menor nas classes de uso citadas. Outro índice bastante utilizado nos estudos das caatingas, o IVDN, seguiu de perto os resultados do IVAS, porém o primeiro poderia ter resultados melhores caso, neste estudo, fossem empregados diferentes fatores de ajustes que retirassem os efeitos dos solos sobre a resposta espectral dos índices.

Vale destacar, também, que a estrutura espacial da cobertura vegetal dos ambientes semiárido, nesse caso particular, as caatingas permitem que os solos interfiram nos resultados, daí muitos índices que apresentam resultados positivos nas áreas de florestas úmidas apresentam resultados diferentes sobre as caatingas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Pernambuco e ao GTMAGEO (Grupo de Trabalho em Monitoramento Ambiental, Geotecnologia e Ensino pelo apoio técnico em campo e em laboratório.



REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de Natureza do Brasil**: Potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. V. L. Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, v.124, p.377- 387, 2016.
- BIRT, G. S.; MCVEY, G. Measuring the Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer. **Agronomy Journal**, v.60, p.640-643, 1968.
- BORGES, E. F.; SILVA, A. B. Técnicas de segmentação de imagens e classificação por região: mapeamento da cobertura vegetal e uso do solo, Mucugê-BA. **Mercator**, v. 8, n. 17, p.209-220, 2009.
- BRASIL. **Caatinga**: estratégias de conservação. Consultoria legislativa do Congresso Nacional. Estudo técnico: Brasília, 2017.
- BROGE, N. H.; LEBLANC. Comparing Prediction Power and Stability of Broadband and Hyperspectral Vegetation Indices for Estimation of Green Leaf Area Index and Canopy Chlorophyll Density. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, p. 156-172, 2000.
- CASTRO, F. C.; LOPES, R. J. C.; SANTOS, A. M. Índices De Salinização E Sua Aplicabilidade Para Mapeamento De Áreas Salinizadas. In: Lidriana de Souza Pinheiro; Adryane Goraye. (Org.). **Geografia Física e as Mudanças Globais**. Fortaleza: EUFC, 2019. p.1-12.
- ERTHAL, G. J.; FONSECA, L. M. G.; BINS, L. S. A.; VELASCO, F. R. D.; MONTEIRO, A. M. V. Um sistema de segmentação e classificação de Imagens de Satélite. **Anais... IV Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de imagens**. 1991.
- FERNANDES, P.; VEIVERBERG, K. T.; SEBEM, E. Determinação da Produtividade de Soja por Sensoriamento Remoto em Nível de Talhão. **Anais... XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 2009, INPE, p. 2009-2015.
- FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem compilação**. São Paulo: Oficina de Texto, 2008.
- GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; CIGANDA, V.; RUNDQUIST, D. C.; ARKEBAUER, T. J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n.8, p.1-4, 2005.
- HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY, E.; TEJADAD, P. J. Z.; STRACHANE, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v.90, p.337-352, 2004.
- HAZIR, M. H.M.; MUDA, T. M. T. The viability of remote sensing for extracting rubber smallholding information: A case study in Malaysia. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v.6, p.45-66, 2018.
- HUETE, A. R.; LIU, H. Q. An Error and Sensivity Analysis of the Atmospheric and Soil-Correcting Variants of the NDVI for the MODIS-EOS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.32, n.4, p.897-905, 1994.
- HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEEUWEN, W. V. A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.59, p.440-451, 1997.
- IBGE, Diretoria de Pesquisas, **Coordenação de População e Indicadores Sociais**, Estimativas da população residente com data de referência 1 de julho de 2021. IBGE, 2021.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução José Carlos Neves Epiphânio. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
- KUMAR, V.; SHARMA, A.; BHARDWAJ, R.; THUKRAL, A. K.; Comparison of different reflectance indices for vegetation analysis using Landsat-TM data. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v.12, p.70-77, 2018.
- LIU, T. D. J.; SHANGA, J.; MA, B. Q. B.; KOVACS, J. M.; WALTERSB, D.; JIAO, X.; GENG, X. SHIA, Y. Assessment of red-edge vegetation indices for crop leaf area index estimation. **Remote Sensing of Environment**, v.222, p.133-143, 2019.
- LOPES, R. J. C.; SANTOS, A. M.; ZLATAR, T.; LIMA JÚNIOR, C. Uso de índices de vegetação por sensoriamento remoto para estudos da caatinga: uma revisão sistemática. **Gaia Scientia**, [S. l.], v.14, n.1, p.104-116, 2021.
- OLIVEIRA, L. G. L.; PEREIRA, L. M. P.; PEREIRA, G.; MORAES, E. C.; MAEDA, E. E. Estudo da variabilidade de índices de vegetação através de imagens do ETM+/LANDSAT 7. **Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 2007, INPE, p. 5995-6002.
- RAGHAVENDRA, B. R.; ASLAM, M. A. M. Sensitivity of vegetation indices of MODIS data for the monitoring of rice crops in Raichur district, Karnataka, India. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, n.20, p.187-195, 2017.



- RIBEIRO, G. A.; SILVA, J. N. C.; SILVA, J. B. Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS): estado da arte e suas potencialidades. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9, n.6, p.2054-2074, 2016.
- ROCHA, P. A.; ESPARZA, J. R.; FERRARI, S. F. Differences in the structure of the bat community between a cloud forest refuge and a surrounding semi-arid Caatinga scrubland in the northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, v.151, p 41 – 48, 2018.
- SÁ, C. S. B.; SHIOSAKI, R. K.; SANTOS, A. M.; SILVA, M. A. Salinization causes abrupt reduction in soil nematode abundance in the Caatinga area of the Submedio San Francisco Valley, Brazilian semiarid region. **Pedobiologia**, v.85, p.150729, 2021.
- SANTOS, M. M.; MACHADO, I. E. S.; CARVALHO, E. V.; VIOLA, M. R.; GIONGO, M. Estimativa de parâmetros florestais em área de cerrado a partir de imagens do sensor oli Landsat 8. **FLORESTA**, v. 47, n.1, p.75-83, 2017.
- SANTOS, A. M.; SOUZA, R. F.; CASTRO, F. C. Auto-organização da vegetação de caatinga em áreas salinizadas no município de Petrolina-PE. **Scientia Plena**, v.14, n.8, p.1-12, 2018.
- SANTOS, K. P.; SANTOS, A. M. Uso da terra, cobertura vegetal e desertificação no Projeto de Irrigação N11 – Petrolina, PE, Brasil. **Terr@Plural**, v.13, n.2, p.385-399, 2019.
- SEMERAROA, T.; MASTROLEO, G.; POMES, A.; LUVISIA, A.; GISSID, E.; ARETANO, R. Modelling fuzzy combination of remote sensing vegetation index for durum wheat crop analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.156, p.684-692, 2019.
- SILLEOS, N. G.; ALEXANDRIDIS, T. K.; GITAS, I. K.; PERAKIS, K. Vegetation Indices: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years. **Geocarto International**, v.21, n.4, p.1-25, 2006.
- SILVA, P. F.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, R.; SOUZA, E. S.; SILVA, J. I.; ALVES, E. M. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**. v.147, p.71 – 82, 2017.
- SILVA, R. S.; PAES, Â. T. Por dentro da estatística. **Educação Continua em Saúde – EINSTEIN**, v.10, n.4, p.165 – 6, 2012.
- SILVA, U. B. T.; JARAMILLO, M. D.; AGUIAR, L. M. S.; BERNARDA, E. Species richness, geographic distribution, pressures, and threats to bats in the Caatinga drylands of Brazil. **Biological Conservation**, n.221, p. 312 – 322, 2018.
- SILVEIRA, H. L. F.; GALVÃO, L. S.; SANCHES, I. D.; SÁ, I. B.; TAURA, T. A. Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping vegetation and studying the relationships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region. **Int J Appl Earth Obs Geoinformation**. v. 73, p.179–190, 2018.
- TADDEO, S.; DRONOVA, I.; DEPSKY, N. Spectral vegetation indices of wetland greenness: Responses to vegetation structure, composition, and spatial distribution. **Remote Sensing of Environment**, v.234, p.111467, 2019.
- TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. O.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **Int J Appl Earth Obs Geoinformation**, v.73, p. 197 - 206, 2018.