

Avaliação do índice de área foliar e índice de área da planta em floresta seca utilizando modelos simplificados em imagens de alta resolução com o uso de VANT

Cloves Vilas Boas dos Santos*, Magna Soelma Beserra de Moura**, Herica Fernanda de Sousa Carvalho*, Josicléda Domiciano Galvêncio***, Rodrigo de Queiroga Miranda****, Adriana Aparecida Megumi Nishiwaki*, Suzana Maria Gico Lima Montenegro***

*Doutorando (a) em Desenvolvimento e Meio Ambiente; Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA); Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: cloves.vilasboas@ufpe.br (Autor correspondente); herica.carvalho@ufpe.br; adri_megumi@yahoo.com.br.

**Ph.D.; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido (EMBRAPA/CPATSA). E-mail: magna.moura@embrapa.br

***Ph.D.; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: josicleda.galvencio@ufpe.br; suzanam.ufpe@gmail.com

****Ph.D.; University of Guelph. E-mail: rodrigo.qmiranda@gmail.com.

Received 01/06/2022; accepted 08/24/2022.

RESUMO

O sensoriamento remoto tem possibilitado a aplicação de modelos para estimar variáveis ambientais, dentre eles o índice de área foliar (LAI) e o índice de área da planta (PAI), importantes para a avaliação da sazonalidade da vegetação, principalmente em florestas secas. Assim, objetivou-se avaliar o LAI e PAI na caatinga usando imagens aéreas de alta resolução obtidas com um veículo aéreo não tripulado (VANT). Em área de caatinga preservada foram realizados voos com o VANT acoplado com câmeras RGB e RGN. Utilizou-se modelos para estimativa do LAI e PAI tendo como parâmetro de entrada o NDVI. Dados de LAI e PAI a partir do satélite Landsat-8 foram usados para comparação entre os produtos obtidos pelo VANT. A avaliação do NDVI ocorreu por regressão linear ($R^2=0,993$), obtendo NDVI médio da Caatinga de 0,14 e 0,38 com os dados Landsat-8 nos períodos seco e chuvoso; 0,12 e 0,07 com a câmera RGB e RGN do VANT nos períodos seco e 0,65 e 0,27 para período chuvoso. Os dados LAI e o PAI ($m^2 m^{-2}$) representaram bem a área em estudo, obtendo $R^2=0,992$ e $R^2=0,993$ para LAI e PAI, respectivamente. O LAI médio da Caatinga foi 0,19 (período seco) e 0,80 (período chuvoso) pelo Landsat-8; 0,26 e 0,14 com a câmera RGB e RGN do VANT nos períodos secos e 2,18 e 0,48 para o período chuvoso. Já o PAI, os valores médios foram 1,39 e 2,02 com os dados Landsat-8 nos períodos seco e chuvoso; 1,46 e 1,34 com a câmera RGB e RGN do VANT nos períodos seco e 3,42 e 1,69 para o período chuvoso. Desse modo, os modelos calculados com imagens VANT para estimativa do LAI e do PAI da caatinga podem ser aplicados em imagens de alta resolução espacial obtidas em câmeras multiespectrais acopladas em VANT, obtendo resultados satisfatórios.

Palavras-chave: LAI, PAI, Caatinga, Drones, Mapir Survey 3N.

Evaluation of leaf area index and plant area index in dry forest using simplified models in high resolution images using UAV

ABSTRACT

Remote sensing has enabled the application of models to estimate environmental variables, including the leaf area index (LAI) and the plant area index (PAI), which are important for evaluating the seasonality of vegetation, especially in dry forests. Thus, the objective was to evaluate the LAI and PAI in the caatinga using high resolution aerial images obtained with an unmanned aerial vehicle (UAV). In a preserved caatinga area, flights were carried out with the UAV coupled with RGB and RGN cameras. Models were used to estimate the LAI and PAI having the NDVI as input parameter. LAI and PAI data from the Landsat-8 satellite were used to compare the products obtained by the UAV. The evaluation of the NDVI was carried out by linear regression ($R^2=0.993$), obtaining an average NDVI of the Caatinga of 0.14 and 0.38 with the Landsat-8 data in the dry and rainy periods; 0.12 and 0.07 with the UAV's RGB and RGN camera in the dry season and 0.65 and 0.27 for the rainy season. The LAI and PAI data ($m^2 m^{-2}$) represented the study area well, obtaining $R^2=0.992$ and $R^2=0.993$ for LAI and PAI, respectively. The average LAI of the Caatinga was 0.19 (dry

season) and 0.80 (rainy season) by Landsat-8; 0.26 and 0.14 with the UAV's RGB and RGN camera in the dry season and 2.18 and 0.48 for the rainy season. As for the PAI, the average values were 1.39 and 2.02 with the Landsat-8 data in the dry and rainy seasons; 1.46 and 1.34 with the UAV's RGB and RGN camera in the dry season and 3.42 and 1.69 for the rainy season. Thus, the models calculated with UAV images to estimate the LAI and PAI of the caatinga can be applied to high spatial resolution images obtained from multispectral cameras coupled to UAVs, obtaining satisfactory results.

Keywords: LAI, PAI, Caatinga, UAV, Mapir Survey 3N.

Introdução

O Índice de Área Foliar (do inglês, *Leaf Area Index* – LAI) é uma variável ambiental fortemente influenciada pelo clima, que reflete a sazonalidade da vegetação (Galvêncio et al., 2020). Esse índice é um dos principais parâmetros necessários para a compreensão dos processos fisiológicos das plantas, e é definido como a razão entre a área foliar da copa e a unidade de superfície projetada no solo pela mesma ($m^2 m^{-2}$) (Watson, 1947). Outros termos e definições estão relacionados ao LAI, sejam eles relacionados a estruturas da planta, como galhos e folhas; ou as partes fotossintéticas e não fotossintéticas (Fang et al., 2019).

Quando as estimativas do LAI acontecem a partir de métodos empíricos, costuma-se detectar situações do tipo em que as folhas têm tamanho infinitesimal, distribuídas aleatoriamente no volume da copa (Fang et al., 2019). Desta forma, procura-se estabelecer índices diferenciados para atribuir informações a cada componente. Um deles de grande relevância é o índice de área da planta (do inglês, *Plant Area Index* - PAI), pois seu valor corresponde a toda a arquitetura da planta, obtido por meio de vários perfis de densidade foliar que descrevem a aglomeração da distribuição de folhas (Neuman, 1989). A adoção destes termos acontece principalmente quando as estimativas são feitas por meio de sensores ópticos que normalmente consideram diferentes abordagens, levando em consideração a presença ou não de folha e galhos, por exemplo.

Existem diferentes métodos para estimativa de índices foliares que precisam ser considerados separadamente para estimar diferentes características da vegetação. O método direto é destrutivo e demorado, necessitando fazer desfolha, o qual apresenta na maioria das vezes limitações, além de custos e tempo. O uso deste método para plantas de grande porte requer a execução de atividades em vários dias, e ao longo do dia as folhas podem ficar murchas e o valor da área foliar medido pode não representar a realidade.

Os métodos indiretos são alternativas derivadas de parâmetros mensuráveis por meio de técnicas e ferramentas que visam facilitar o procedimento de determinação do LAI, além de permitir uma amostra espacial maior (Yan et al., 2020). Dentre estes métodos

se destaca o uso ferramentas aéreas e espaciais para determinação da reflectância espectral, e desta, se aplicam modelos para a determinação do LAI em nível de floresta ou de paisagem (Salinas et al., 2020).

Dentre os estudos que englobam análises e propostas de modelos destacam-se Lins et al. (2017) e Damasceno et al. (2020) que realizam uma avaliação espaço-temporal do LAI em município do semiárido do Brasil; Silva et al. (2019) que utilizaram o LAI na análise da cobertura vegetal em região semiárida; Carvalho et al. (2018) que estudaram uma área de caatinga preservada; Galvêncio et al. (2020) que estudaram a relação entre o LAI e as precipitações no bioma caatinga; Miranda et al. (2020) que propuseram modelos de estimativa do LAI e PAI para florestas secas; Nascimento et al. (2020) que avaliaram o impacto das chuvas no desenvolvimento da vegetação e na ocupação dos solos em áreas degradadas de um núcleo de desertificação do sertão pernambucano; e Melo et al. (2021) que utilizaram o LAI na análise dos parâmetros biofísicos diferentes fitofisionomias de caatinga.

Esses métodos que utilizam sensoriamento remoto são baseados em diferenças na reflexão espectral entre a vegetação e outras superfícies e podem refletir diferentes finalidades para as quais o LAI é utilizado. Em geral, os índices espectrais são empíricos, simples e calculados com base nas relações de regressão entre radiância ou reflectância detectados remotamente e que podem ser associados a presença de folhas e, ou atividade fotossintética (Wulder et al., 1998). A aplicação de índices espectrais empíricos é uma técnica de pesquisa acessível e abrange uma variedade de diferentes sensores e plataformas de satélites.

Com os avanços das tecnologias computacionais na área de geotecnologias e dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) que conduzem câmeras capazes de realizar imageamentos em diversas bandas espectrais, o uso de modelos de estimativa da LAI tem sido avaliado para o monitoramento ambiental com maior resolução espacial (Anderson et al., 2013; Rex et al., 2020). Levando-se em consideração esses avanços e o desenvolvimento de modelos mais específicos para a vegetação de caatinga é possível avaliar a aplicabilidade de imagens obtidas em VANTs para estimativa do LAI em floresta tropical sazonalmente seca, para as quais poucos trabalhos

investigaram a aplicação de sensores ativos ou passivos na estimativa do LAI, e para onde há uma grande variação de valores em razão da sazonalidade da vegetação (Carvalho et al., 2018; Almeida, et al., 2019; Galvínco et al., 2020; Miranda et al., 2020).

Metodologias de modelagem que fazem relações da vegetação Caatinga ao longo do tempo são incipientes e precisam ser investigadas no sentido de construir modelos mais próximos da realidade e futura aplicabilidade em cenários de mudanças climáticas para a região, que é carente deste tipo de informação. Dentre os parâmetros importantes para avaliação da sazonalidade da vegetação estão o LAI e o PAI, que apresentam relação direta com a interceptação da luz pela vegetação, e conseqüentemente com o estágio fenológico das plantas, processos metabólicos como transpiração e demais respostas das plantas a estímulos ambientais como assimilação de CO₂ e produção de

biomassa. Portanto, objetivou-se avaliar o uso de modelos simplificados para estimativa do LAI e do PAI da caatinga em imagens aéreas multiespectrais de alta resolução espacial obtidas em câmera acoplada a veículo aéreo não tripulado (VANT).

Material e Métodos

Área de Estudo

Esta pesquisa foi realizada em uma área de caatinga (09°02'36"S; 40°19'17"W) (Figura 1), localizada no Campo Experimental da Caatinga, pertencente a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), no Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido (Embrapa Semiárido), no município de Petrolina, Pernambuco.

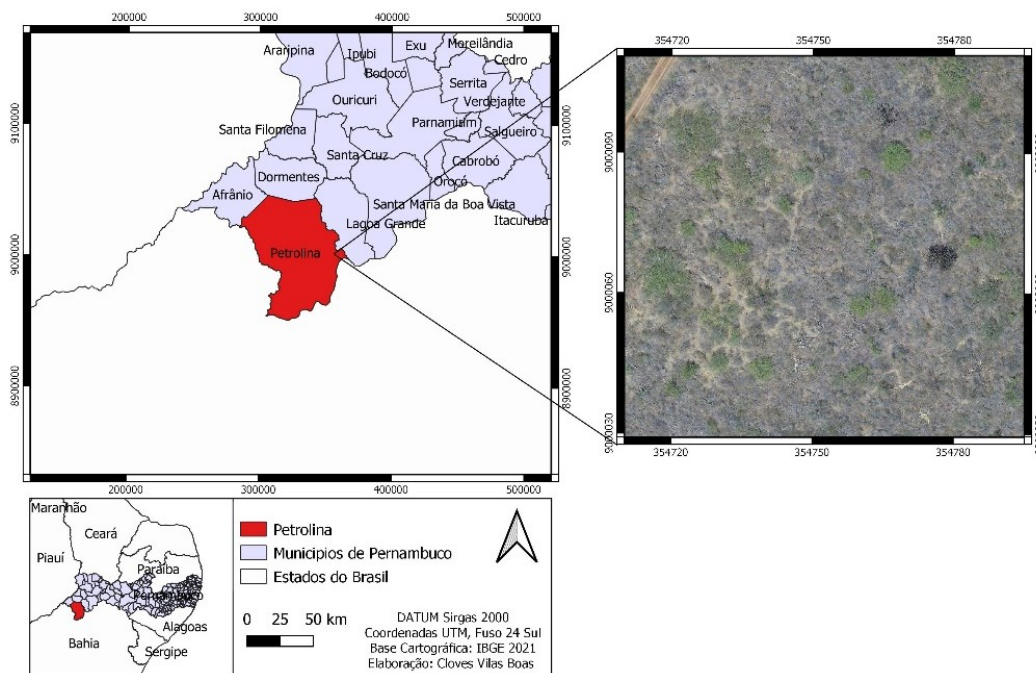


Figura 1. Localização da área de estudo no município de Petrolina, PE.

A área de estudo possui temperatura média anual de 26 °C e média histórica da precipitação anual em torno de 510 mm (Souza et al., 2015; 2017). Entretanto, ressalta-se que essa região tem apresentado registros de precipitações bem inferiores à média, sendo que em 2012 ocorreu o menor índice pluviométrico desde que se começaram as medidas em 1964 (Santos et al., 2017; 2020). Os valores mensais da precipitação ocorrida durante os anos de 2019 e 2020 indicam que o período chuvoso ocorreu entre os meses de fevereiro e

maio em 2019, com total de 233,92 mm (84,42% do total anual); enquanto o segundo semestre se configurou o período mais seco com chuvas inferiores a 10 mm (exceto por dezembro que teve 13,5 mm). Já em 2020 foi um ano em que se configurou como bem chuvoso, com precipitação anual (643,35 mm) acima da média histórica. Neste ano, a chuva ocorreu entre janeiro e junho, totalizando 545,10 mm (84,69% da precipitação total), sendo um valor equivalente a um ano inteiro e o dobro do acumulado no ano anterior. Os meses mais

chuvosos foram janeiro (169,94 mm) e março (190,76 mm). No segundo semestre, embora tenha se configurado o período seco (sem registros de precipitação entre setembro e outubro), houve acumulado de 98,55 mm com maior precipitação registrada em novembro (83,31 mm), quando se inicia a temporada chuvosa de acordo com as normais climatológicas da região. Os dados diários de precipitação durante os 15 dias que antecedem a obtenção de imagens são apresentados na Figura 2. Pode-se perceber que o total de chuva ocorrida no segundo semestre de 2019 foi praticamente a mesma, enquanto no primeiro de semestre de 2020 teve maior acúmulo de precipitação na véspera da passagem do Landsat 8.

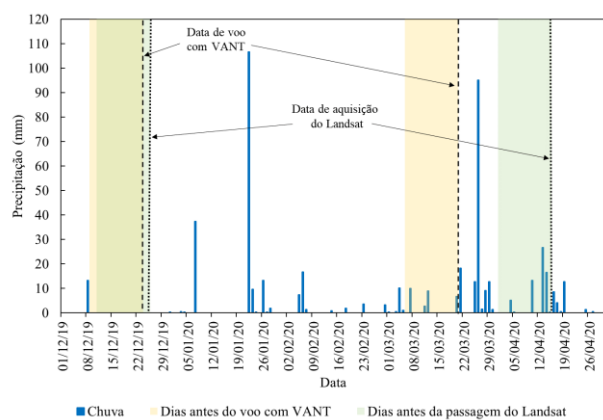


Figura 2. Precipitação pluviométrica diária no período que antecede a obtenção de imagens.

A área de estudo está preservada há mais de 40 anos, e possui vegetação predominantemente arbustivo-arbórea (Tabela 1), hiperxerófila com plantas de altura média de 5 metros (Souza et al., 2017). De acordo com Alberton et al. (2019), as mudanças fenológicas na caatinga são mais rápidas logo após as primeiras chuvas, com aumento do verdor da vegetação até atingir seu pico durante a estação chuvosa, enquanto o período seco é marcado pela ausência de folhas, com estabilidade da ausência de brotações até o próximo período chuvoso.

Base espacial de dados

Imagens aéreas obtidas por câmeras RGB e multiespectral (RGN) acopladas em VANT

As campanhas de campo foram realizadas com o VANT modelo DJI Phantom 3 Standard acoplado com uma câmera RGB (R – red ou vermelha; G – green ou verde; B – blue ou azul) modelo “CMOS 1/2.3” de 12 Mp, FOV 94° 20 mm (formato equivalente de 35 mm) e abertura de f/2.8 (câmera original do drone). Para a

captura de imagens multiespectrais (R – red ou vermelha; G – green ou verde; NIR – near infrared ou infravermelha próxima) utilizou-se a câmera RGN modelo “Mapir Survey 3N” de 12 Mp, HFOV 41° 47 mm e abertura de f/3.0. A câmera é acompanhada por um GPS de navegação para a geolocalização das imagens.

Tabela 1. Famílias e nomes científicos das espécies arbustivo-arbóreas predominantes na área de estudo na Caatinga em Petrolina, PE.

Família	Nome Botânico
Fabaceae	<i>Bauhinia cheilantha</i> (Bong) Steud
Fabaceae	<i>Cenostigma microphylla</i> Pohl
Burseraceae	<i>Commiphora leptophloeos</i> Mart. J.B. Gillett
Euphorbiaceae	<i>Cnidocolus quercifolius</i> Pohl
Euphorbiaceae	<i>Croton conduplicatus</i> Humb
Bignoniaceae	<i>Handroanthus spongiosa</i>
Euphorbiaceae	<i>Jatropha mollissima</i> (Pohl) Baill
Euphorbiaceae	<i>Manihot pseudoglaziovii</i> Pax & K.Hoffm
Fabaceae	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.
Euphorbiaceae	<i>Sapium argutum</i> (Müll.Arg.) Huber
Anacardiaceae	<i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl
Fabaceae	<i>Senegalia piauhiensis</i> (Benth)
Anacardiaceae	<i>Spondias tuberosa</i> Arruda

Fonte: (Maia, 2012; Alvarez & Kill, 2014; Lima Júnior et al., 2014).

Os voos foram realizados no dia 23 de dezembro de 2019, data em que já havia alguns registros de precipitação conforme apresentado na Figura 2, e assim, a vegetação já estava em fase de brotação e no dia 20 de março de 2020, momento em que a Caatinga estava no período chuvoso e em pleno vigor vegetativo.

As imagens RGB e RGN foram coletadas em voos planejados cobrindo a mesma área, utilizando o aplicativo DJI GSP (*Ground Station Pro*) com o uso de um Ipad para visualização, acompanhamento e controle do voo. O voo foi realizado a 80 m acima da superfície do solo, com a câmera RGB de alta resolução espacial programada para capturar imagens com sobreposição frontal e lateral de 90%.

As imagens em RGB foram capturadas no formato JPG. Já as multiespectrais foram capturadas no formato RAW (12 bits) para permitir a calibração das imagens. Na fase de pré-processamento, foi realizada a calibração dos números digitais utilizando o software gratuito *Mapir Camera Control*, realizando primeiramente a conversão de formato das imagens

RAW em TIFF e em seguida a calibração das imagens utilizando parâmetros sugeridos pelo próprio software e fabricante.

Em seguida foi realizado o processamento para a geração do ortomosaico das imagens RGB e multiespectrais (RGN). Para isso foi utilizado o Software Agisoft PhotoScan®, passando pelo processo de alinhamento das fotos, construção da nuvem de pontos, do modelo digital de superfície e de elevação, da textura e do ortomosaico, que foi exportado com resolução espacial de 5 cm por pixel. O recorte de imagem a partir do ortomosaico para uma área amostral de 0,81 ha foi realizado meio do Software Qgis versão 3.10.

A Figura 3 apresenta a delimitação da área de estudo a partir do ortomosaico gerado, enfocando a diversidade de alvos da área analisada. Quando se utilizam imagens de alta resolução espacial é possível identificar diversos alvos na superfície. Assim, a área apresenta-se muito heterogênea e possui diferentes alvos, podendo-se identificar bem áreas com maior ou menor predominância de vegetação, locais com galhos secos e solo exposto, e cactáceas que são bem presentes no local analisado, dentre outros. Destaca-se que a observação dessa diversidade de alvos se deve a alta resolução espacial conseguida com imagens de VANT.

Sensor OLI (Satélite Landsat-8)

Foi adquirida gratuitamente por meio da plataforma do Serviço Geológico Americano (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) duas cenas do sensor OLI (*Operational Land Images*) a bordo do Satélite Landsat-8. Foi utilizado o produto de reflectância da superfície (*Land Surface Reflectance*) do OLI para os dias mais próximos à data de realização dos voos com o VANT, conforme apresentando na Tabela 2. As imagens do satélite Landsat-8 possuem resolução espacial de 30 metros na faixa do visível (RGB) e do infravermelho próximo (NIR).

Houve maior distanciamento entre a data da campanha com o VANT e a imagem do Landsat-8 no período chuvoso em função das imagens mais próximas da data estarem com predominância de nuvens sobre a área de estudo. Em função disso, nos 15 dias que antecederam a aquisição de imagens com o VANT ocorreram 28,19 mm, enquanto foram verificados 61,97 mm nos 15 dias prévios a passagem do Landsat-8, conforme distribuição apresentada na Figura 2.

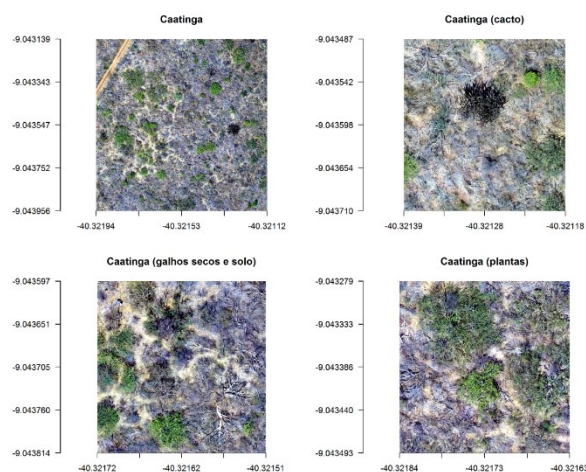


Figura 3. Delimitação da área amostral a partir do ortomosaico das imagens RGB em 23 de dezembro de 2019. Fonte: Cloves Vilas Boas dos Santos.

Tabela 2. Informações sobre as imagens de satélite e de VANT utilizadas no presente estudo.

Data de aquisição de imagens	Fonte dos dados (Plataforma)	Tempo de diferença em relação ao VANT
23/12/2019	VANT	
25/12/2019	Landsat-8	+ 2 dias
20/03/2020	VANT	
15/04/2020	Landsat-8	+ 25 dias

Processamento dos Dados

Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O NDVI é um dos índices mais utilizados em estudos e pesquisas que envolvem sensoriamento remoto para avaliação da vegetação, e tem por objetivo a análise do verdor da vegetação fotossinteticamente ativa por meio do computo da diferença normalizada entre as bandas do infravermelho próximo (NIR) e vermelho (R) (Giovos et al., 2021; Jião et al., 2021), conforme a metodologia de Rouse et al. (1973) (Equação 1).

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (\text{Eq. 1})$$

O cálculo no NDVI utilizando as imagens em formato RGB foi possível pela adoção da metodologia proposta por Arai et al. (2016) em que pixels da banda do vermelho (Red) são convertidos para o infravermelho próximo (NIR), conforme Equação 2.

$$NIR = (419,1 - Red) / 1,7537 \text{ (Eq. 2)}$$

Com isso, o NDVI foi computado para imagens de VANT nos espectros RGB e RGN, bem como para as imagens de satélite. O processamento das imagens de VANT foi realizado no software RStudio, enquanto as imagens de satélite foram processadas utilizando o software Qgis 3.10.

Índice de Área Foliar (LAI) e Índice de Área da Planta (PAI)

O modelo utilizado para computo do LAI e PAI no presente estudo foi validado a partir dos dados de reflectância do sensor OLI (Landsat-8), conforme apresentado por Miranda et al. (2020) para áreas de caatinga. Assim, para o cálculo do LAI e do PAI foram utilizadas as equações 3 e 4, que se baseiam no uso do NDVI (Miranda et al., 2020):

$$LAI = 4,9 \times (NDVI)^2 + 0,1 \text{ (Eq. 3)}$$

$$PAI = 5,0 \times (NDVI)^2 + 1,3 \text{ (Eq. 4)}$$

Análises

Procederam-se aos cálculos do NDVI, LAI e PAI conforme equações 1, 3 e 4, respectivamente, e considerando as três plataformas/sensores de coleta de dados espaciais: VANT/RGB, VANT/RGN e Satélite Landsat-8/OLI.

A partir da imagem de satélite foram elaboradas as shapes contendo os limites dos pixels de 30 x 30 m que estavam sobrepostos as imagens de VANT. Assim, foram utilizadas nove (09) shapes de pixels Landsat para delimitar áreas das ortofotos das câmeras RGB e RGN do VANT, conforme Figura 4.

As análises compreenderam correlações entre os dados das diferentes plataformas por meio de um modelo de regressão linear para verificar a relação entre as variáveis (NDVI, LAI e PAI) considerando os três sensores (RGB, RGN e OLI). Para isso, foram extraídos os valores médios e desvios padrão das variáveis para cada área (1, 2, 3, ..., 9) delimitada conforme a Figura 4.

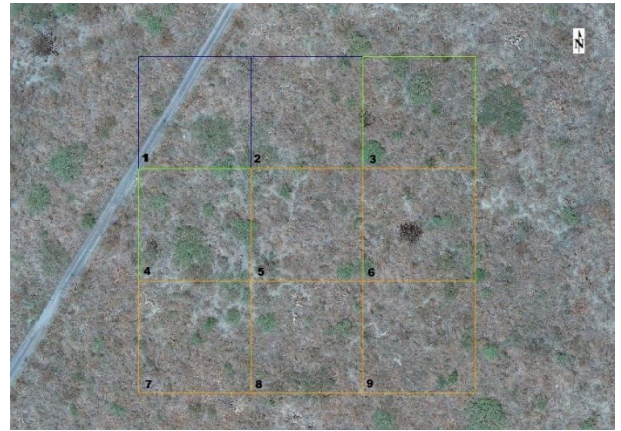


Figura 4. Delimitação dos nove (09) pixels na ortofoto gerada a partir de imagens RGB obtidas em 23 de dezembro de 2019 na área de caatinga, Petrolina, PE. Fonte: Cloves Vilas Boas dos Santos.

Resultados e Discussão

Índice de vegetação por diferença Normalizada (NDVI)

A análise da verdura da caatinga foi focada na avaliação dos dados da vegetação por meio dos índices calculados. A Figura 5 contém os mapas de NDVI gerados com os sensores RGB e RGN. Pode-se observar o aumento das porções verde da imagem do período chuvoso em relação ao período seco, tanto para a imagem RGB quanto RGN. Enquanto havia maior exposição do solo ($NDVI/RGB < 0,200$ e $NDVI/RGN < 0,100$) e poucas plantas com biomassa verde ($NDVI/RGB > 0,226$ e $NDVI/RGN > 0,111$) na imagem de dezembro de 2019, a maior parte da imagem de março de 2020 apresentou NDVI acima de 0,476 ($NDVI/RGB$) e do que 0,151 ($NDVI/RGN$), demonstrando que os limites de faixas de NDVI para os mesmos alvos podem variar de acordo com o sensor utilizado para sua determinação (Figura 5). Percebem-se de forma bem definida a presença da estrada em todas as imagens, sendo um excelente algo para identificação dos valores de NDVI representativo da classe de solo exposto. Gomes et al. (2021) avaliaram o NDVI resultante de câmera Micasense e Mapir, e observaram que a maioria dos pontos avaliados apresentaram valores de NDVI mais elevados quando determinado por meio da câmera Micasense. Segundo esses autores, isso se deve a vários fatores, dentre os quais, as próprias características da câmera, que utiliza uma mesma lente para capturar todas as imagens.

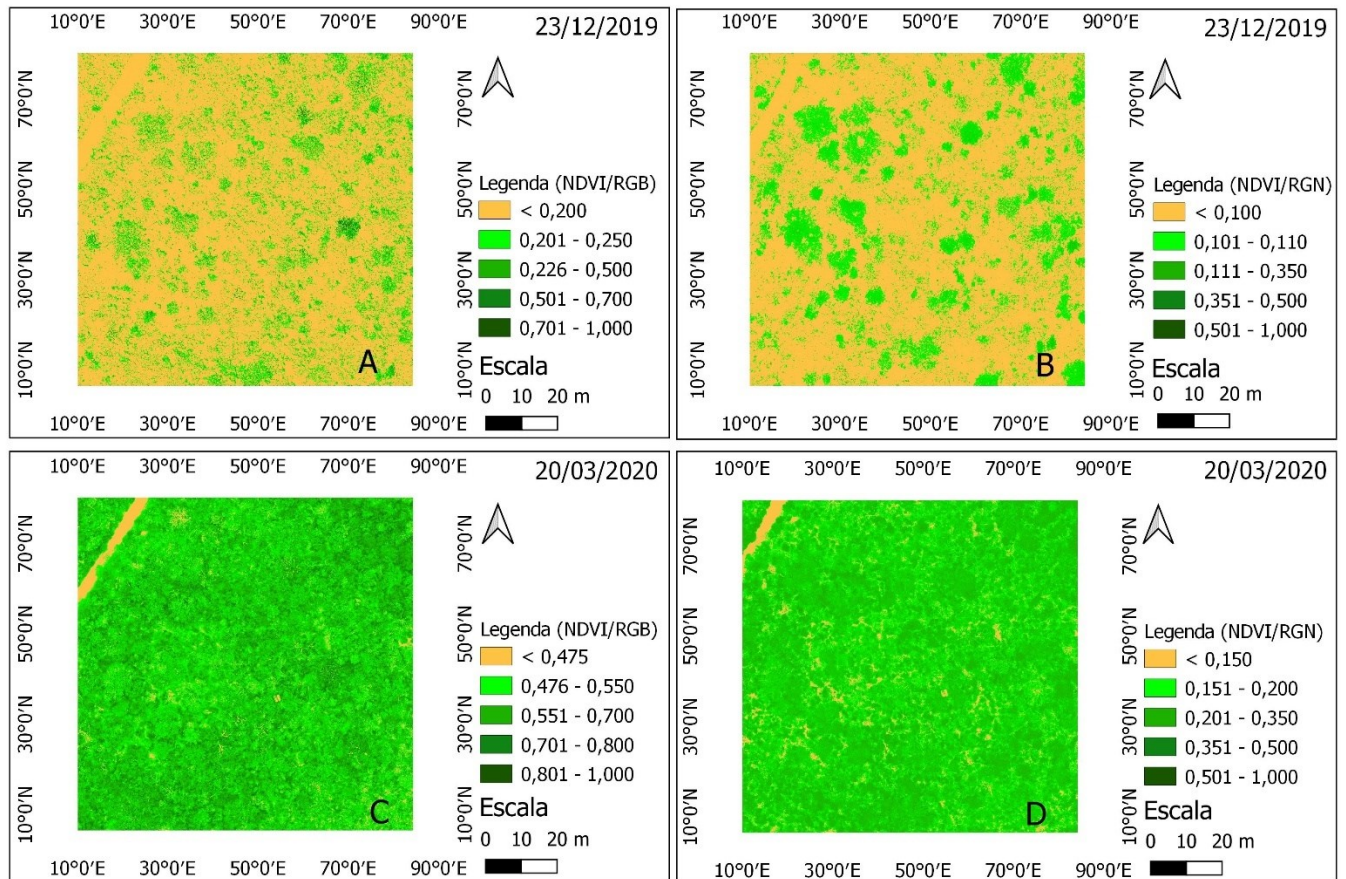


Figura 5. NDVI calculado a partir da câmera RGB (A e C) e NDVI calculado a partir da câmera RGN (B e D) acopladas em VANT nos dias 23 de dezembro de 2019 (A e B) e 20 de março de 2022 (C e D) em área de caatinga, Petrolina, PE.

Foi observado que as diferentes plataformas de aquisição de dados mostram variações nos valores de NDVI em função da forma de aquisição dos dados da banda NIR. Os dois modelos de câmera utilizam apenas um sensor para capturar as imagens nas diferentes bandas, tanto a câmera original RGB do Phantom, quanto a RGN da Mapir. Além disso, existem as incertezas atribuídas a estimativa da banda NIR quando se utiliza a banda R (Arai et al., 2016).

Além disso, o uso de imagens RGB exige que seja realizada uma conversão do detalhamento da resolução espacial das imagens, e embora médias estejam próximas, houve uma maior semelhança em termos de valores entre os dados de NDVI obtido a partir da câmera RGB com os dados de satélite para o período seco; e os dados da câmera RGN com o satélite para o período chuvoso. Para o período seco, os valores médios e o desvio padrão do NDVI de toda a área de estudo foram: $0,14 \pm 0,004$ para os dados a partir do sensor OLI/Landsat-8; $0,11 \pm 0,022$ para os dados a partir da câmera RGB/VANT e $0,07 \pm 0,005$ para os dados a partir da câmera RGN/VANT. Já no período chuvoso, os valores foram: $0,38 \pm 0,006$ para os dados a partir do

sensor OLI/Landsat-8, $0,65 \pm 0,012$ para os dados a partir da câmera RGB/VANT e $0,27 \pm 0,005$ para os dados a partir da câmera RGN/VANT. Como já esperado, a imagem de satélite se mostrou altamente homogênea em função da generalização dos pixels, com baixo desvio padrão. Quanto as imagens extraídas por meio das câmeras acopladas no VANT, mesmo considerando o baixo desvio padrão, os dados da câmera RGN estavam mais homogêneos e relação a câmera RGB que apresentou dispersão maior nos dados.

A Tabela 3 apresenta a média e o desvio padrão do NDVI nas 9 parcelas da área de estudo. Embora tenham diferenças entre os valores de NDVI com as imagens RGB e RGN, na maioria dos casos subestimando os dados do satélite, a caatinga foi bem representada nas imagens, mostrando a predominância de áreas secas, pois nesse período, a vegetação em sua maioria ainda estava desfolhada devido à baixa precipitação no período antecedente de aquisição das imagens.

Não houve registros de precipitação nos dias anteriores próximos a aquisição das imagens com o VANT no período seco, sendo o último registro em 16

dias antecedentes da aquisição com 13,21 mm de chuva (Figura 2). Já no período chuvoso, desde os primeiros meses do ano de 2020 que já havia grandes volumes de chuva (169,94 mm em janeiro e 34,80 mm em fevereiro) e nos dezanove dias do mês de março que antecederam a aquisição das imagens com o VANT, a precipitação acumulada foi de 33,53 mm, que influenciou no vigor ou na verdura da vegetação, principalmente ao se

comparar com a imagem do Landsat. Essas diferenças entre as respostas espectrais nas imagens em diferentes períodos (seco e chuvoso) também foram avaliadas em outras regiões semiáridas de acordo com os estudos de Brito et al. (2020), Damasceno et al. (2020), Lima et al. (2019), Nascimento et al. (2020) e Santos et al. (2017; 2020).

Tabela 3. Média e desvio padrão do NDVI a partir das câmeras RGB e RGN (VANT) e o valor correspondente ao pixel do sensor OLI (Landsat-8) das nove (09) subáreas de caatinga considerando datas em período seco e chuvoso.

Pixel	23/12/2019		25/12/2019	20/03/2020		15/04/2020
	VANT/RGB	VANT/RGN	Landsat-8/OLI	VANT/RGB	VANT/RGN	Landsat-8/OLI
1	0,08 ± 0,141	0,07 ± 0,054	0,13	0,61 ± 0,102	0,26 ± 0,066	0,38
2	0,12 ± 0,126	0,07 ± 0,043	0,14	0,65 ± 0,067	0,27 ± 0,046	0,38
3	0,15 ± 0,129	0,08 ± 0,049	0,14	0,67 ± 0,068	0,28 ± 0,046	0,38
4	0,10 ± 0,141	0,08 ± 0,054	0,14	0,64 ± 0,069	0,27 ± 0,052	0,38
5	0,10 ± 0,132	0,07 ± 0,044	0,14	0,64 ± 0,071	0,26 ± 0,051	0,38
6	0,13 ± 0,141	0,08 ± 0,048	0,13	0,65 ± 0,074	0,27 ± 0,050	0,36
7	0,10 ± 0,136	0,07 ± 0,041	0,13	0,66 ± 0,070	0,28 ± 0,052	0,39
8	0,12 ± 0,135	0,07 ± 0,044	0,13	0,66 ± 0,072	0,28 ± 0,048	0,38
9	0,13 ± 0,128	0,07 ± 0,046	0,13	0,63 ± 0,074	0,27 ± 0,049	0,38
Média	0,12 ± 0,136	0,07 ± 0,047	0,14 ± 0,004	0,65 ± 0,077	0,27 ± 0,052	0,38 ± 0,006

De acordo com Silva Júnior et al. (2021) existe uma relação entre a resolução espacial e a mistura dos alvos na superfície. Isso foi enfatizado por Souza et al. (2016), pois os autores apontam que as altas resoluções permitem maiores distinções entre os alvos, permitindo a realização de avaliações mais aprofundadas.

Portanto, a fim de exemplificar da variabilidade dos alvos em uma mesma subárea delimitada pelo tamanho do pixel da imagem Landsat, na Figura 6 são apresentados recortes com o NDVI feitos no pixel 4 (Figura 4). A alta resolução espacial das imagens do VANT trouxe um detalhamento que permitiu a identificação de alvos específicos da área estudada, a exemplo, da copa das árvores, solo exposto e os galhos secos, que são comuns principalmente no período seco, e bem detalhados nas imagens de VANT, enquanto nas imagens Landsat esses alvos são apresentados em forma de mistura espectral.

De forma similar, as diferenciações entre os dados da Figura 6 também foram identificados no ponto 1 (Figura 4) em que os valores do NDVI (Tabela 3) estavam mais baixos em relação as outras parcelas em valores de LAI inferiores a 0,100 (LAI/RGB) e 0,110 (LAI/RGN) correspondem a áreas de solo

função da área ser influenciada por solo, pois há grande número de pixels de solo exposto (estrada).

Foi observado que as feições da imagem mostraram bem os diferentes alvos na vegetação, sendo que tanto os mapas elaborados a partir das imagens RGB e RGN diferenciaram bem os alvos vegetação e solo. Com relação ao NDVI, com a câmera RGB no período mais seco discretizou melhor os alvos vegetação e solo; enquanto para o mês chuvoso, os dados com a câmera RGN detalharam melhor esses alvos (Figura 6). É importante ressaltar que no mês chuvoso, os dados do NDVI a partir da câmera RGB sobrestimaram muito em relação aos dados computados a partir dos outros sensores avaliados.

Índice de Área Foliar (LAI) e Índice de Área da Planta (PAI)

As Figuras 7 e 8 apresentam o índice de área foliar (LAI) e índice de área da planta (PAI), em $m^2 m^{-2}$, respectivamente, estimados de acordo com o modelo proposto por Miranda et al. (2020). Verifica-se que exposto, dominantes nas Figuras 7A e 7B, e são aquelas com os menores valores de NDVI.

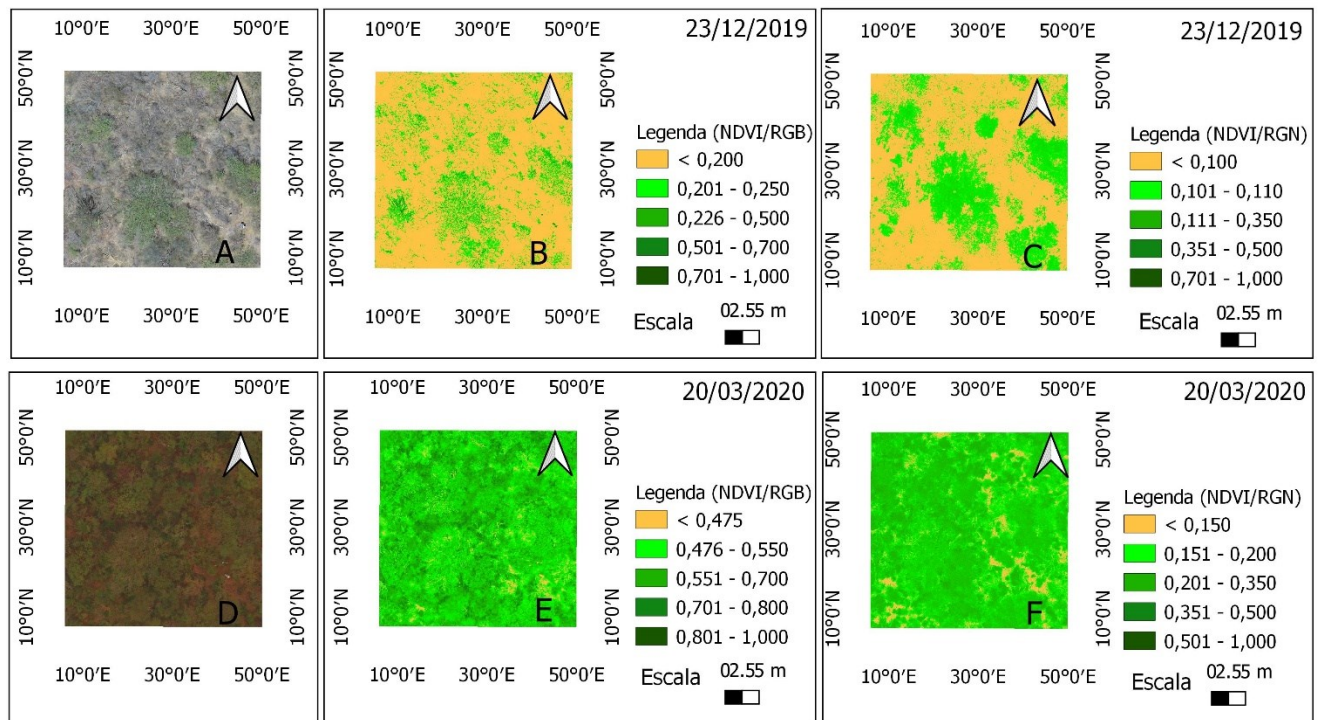


Figura 6. Ortofoto da caatinga em composição colorida a partir da imagem com a câmera RGB (A e D); NDVI calculado a partir da câmera RGB (B e E) e NDVI calculado a partir da câmera RGN (C e F) acopladas em VANT nos dias 23 de dezembro de 2019 (A, B e C) e 20 de março de 2022 (D, E e F). na caatinga, Petrolina, PE.

Para o período seco, os maiores valores de LAI nos mapas correspondem a poucos pixels superiores a $3,501 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (LAI/RGB) e $3,001 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (LAI/RGN). Sabe-se que com a ocorrência de chuvas a caatinga apresenta rápido surgimento de brotações e acúmulo de biomassa, e assim, o aumento dos valores do LAI pode ser verificado nas Figuras 7C e 7D.

Utilizando-se a imagem RGB, o LAI no período chuvoso apresentou valores mais elevados, com a última faixa de valores acima de $5,001 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Ao se considerar as imagens geradas com a câmera RGN, observa-se que o LAI máximo da caatinga concentrou-se na faixa de valores acima de $3,501 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Almeida et al. (2019) observaram que o LAI variou entre os anos e entre as áreas de caatinga, com valores médios oscilando entre $2,21$ e $4,26 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Miranda et al. (2020) observaram máximos valores de LAI da ordem de $4,00 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Marques et al. (2020) verificaram valores de LAI iguais a $1,94 \pm 0,62 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $1,57 \pm 0,62 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, entretanto, há de se considerar que estes autores utilizaram o produto do LAI do MODIS.

No período seco os valores médios e o desvio padrão do LAI da área no total foram: $0,19 \pm 0,006$ para os dados a partir do sensor OLI/Landsat-8; $0,26 \pm 0,25$

para os dados a partir da câmera RGB/VANT e $0,14 \pm 0,05$ para os dados a partir da câmera RGN/VANT. Já no período chuvoso, os valores foram: $0,80 \pm 0,022$ para os dados a partir do sensor OLI/Landsat 8, $2,18 \pm 0,47$ para os dados a partir da câmera RGB/VANT e $0,48 \pm 0,13$ para os dados a partir da câmera RGN/VANT. O desvio padrão apontou que os dados a partir do satélite e da câmera RGN estavam bem mais homogêneos, enquanto a câmera RGB mostrou uma dispersão maior nos dados.

Nos mapas do PAI (Figura 8) para o período chuvoso, as imagens da camera RGN foram mais discretizantes para os diferentes alvos, enquanto no período seco as respostas dos dois sensores foram semelhantes, com solo exposto sendo representado pela classe $1,500 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (RGB) e $1,250 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (RGN). Ainda em relação aos valores do PAI, considerando-se o período seco, os valores médios e o desvio padrão da área de estudo foram: $1,39 \pm 0,006 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para os dados a partir do sensor OLI/Landsat-8; $1,46 \pm 0,251 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para os dados a partir da câmera RGB/VANT e $1,34 \pm 0,046 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para os dados a partir da câmera RGN/VANT.

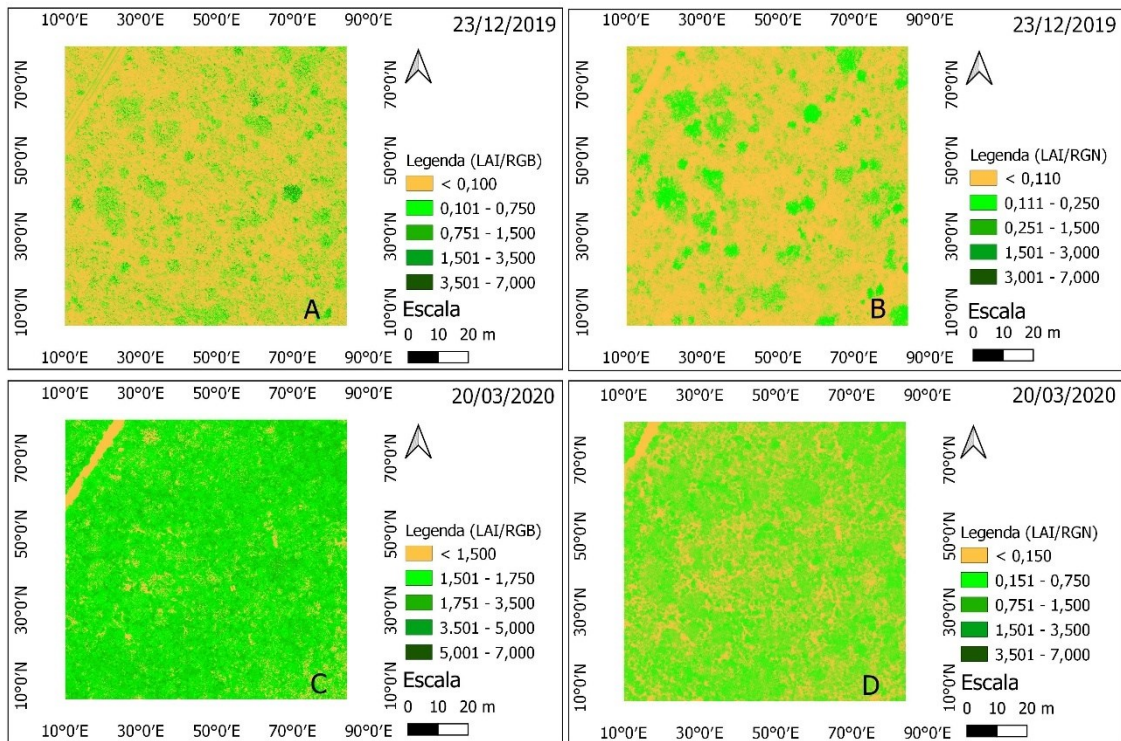


Figura 7. Índice de área foliar (LAI) calculado a partir da câmera RGB (A e C) e a partir da câmera RGN (B e D) acopladas em VANT nos dias 23 de dezembro de 2019 (A e B) e 20 de março de 2022 (C e D) em área de caatinga, Petrolina, PE.

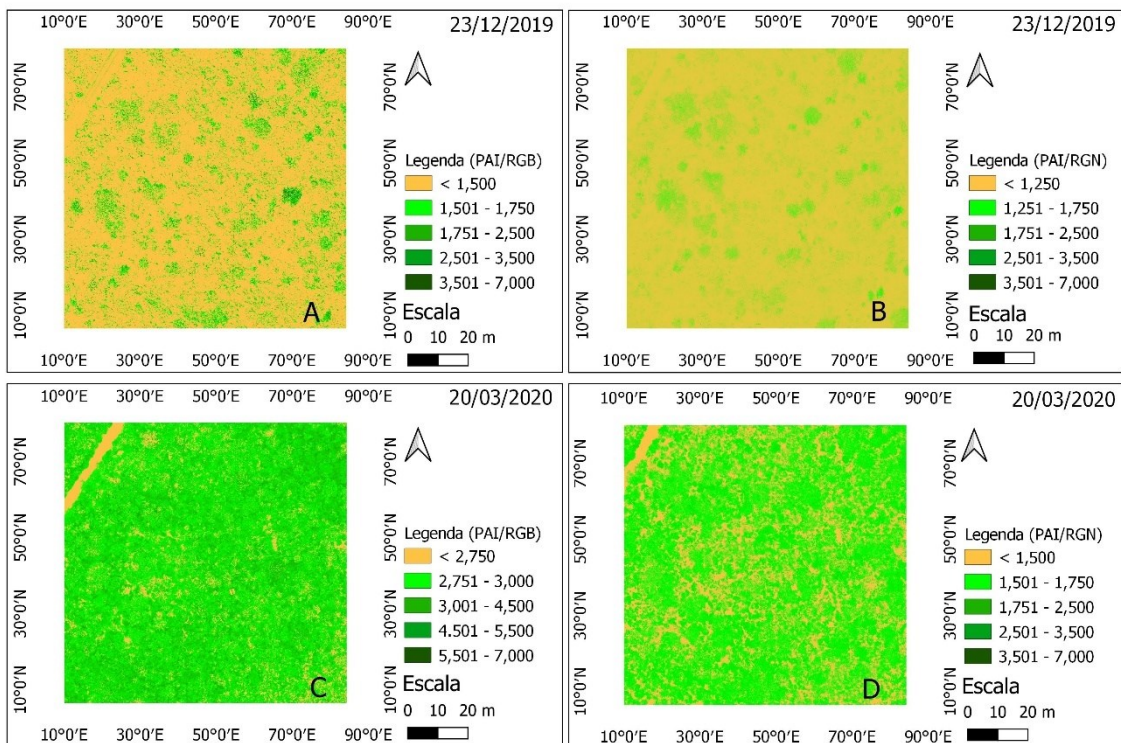


Figura 8. Índice de área da planta (PAI) calculado a partir da câmera RGB (A e C) e a partir da câmera RGN (B e D) acopladas em VANT nos dias 23 de dezembro de 2019 (A e B) e 20 de março de 2022 (C e D) em área de caatinga, Petrolina, PE.

Já no período chuvoso, os valores do PAI foram: $2,02 \pm 0,023 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para os dados obtidos a partir do sensor OLI/Landsat 8; $3,42 \pm 0,481 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para os dados oriundos da câmera RGB/VANT e $1,69 \pm 0,130 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para os dados resultantes da câmera RGN/VANT. Assim como o LAI, o PAI mostrou maior variabilidade nos dados obtidos a partir da câmera RGB/VANT. Conforme apresentado por Miranda et al. (2020), o PAI pode alcançar valores da ordem de $4,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ no período chuvoso em anos com maiores volumes de precipitação; e mínimos de $1,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ na época seca de anos extremamente secos, como foi 2012.

A média e o desvio padrão dos dados de LAI e PAI obtidos a partir das câmeras acopladas no VANT e

os dados referentes a delimitação dos pixels (Figura 4) do Landsat na área de estudo são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Os dados do LAI a partir da câmera RGN foram mais similares aos dados de referência utilizados em ambos os períodos, enquanto os dados obtidos a partir da câmera RGB apresentaram maiores diferenças para o período chuvoso. Tanto para o PAI quanto para o LAI, os modelos propostos por Miranda et al. (2020) aplicados em imagens Landsat-8, foram considerados referência para quantificação do LAI e PAI, visto que estes autores realizaram análises temporais e validação com dados de superfície em área de caatinga.

Tabela 5. Média e desvio padrão do Índice de Área Foliar (LAI) a partir das câmeras RGB e RGN (VANT) e o valor correspondente ao pixel do sensor OLI (Landsat-8) das nove (09) subáreas de caatinga considerando datas em período seco e chuvoso.

Pixel	23/12/2019		25/12/2019	20/03/2020		15/04/2020
	VANT/RGB	VANT/RGN	Landsat-8/OLI	VANT/RGB	VANT/RGN	Landsat-8/OLI
1	$0,23 \pm 0,199$	$0,14 \pm 0,045$	0,19	$1,98 \pm 0,564$	$0,46 \pm 0,145$	0,81
2	$0,25 \pm 0,227$	$0,13 \pm 0,040$	0,19	$2,17 \pm 0,423$	$0,47 \pm 0,117$	0,82
3	$0,30 \pm 0,284$	$0,14 \pm 0,050$	0,20	$2,33 \pm 0,444$	$0,49 \pm 0,119$	0,80
4	$0,25 \pm 0,238$	$0,15 \pm 0,054$	0,20	$2,15 \pm 0,432$	$0,48 \pm 0,129$	0,80
5	$0,24 \pm 0,215$	$0,13 \pm 0,039$	0,20	$2,16 \pm 0,442$	$0,46 \pm 0,125$	0,82
6	$0,29 \pm 0,327$	$0,14 \pm 0,050$	0,19	$2,19 \pm 0,465$	$0,47 \pm 0,126$	0,75
7	$0,24 \pm 0,220$	$0,13 \pm 0,035$	0,19	$2,27 \pm 0,449$	$0,49 \pm 0,129$	0,83
8	$0,26 \pm 0,240$	$0,14 \pm 0,040$	0,19	$2,25 \pm 0,460$	$0,50 \pm 0,123$	0,79
9	$0,26 \pm 0,233$	$0,14 \pm 0,046$	0,18	$2,08 \pm 0,451$	$0,47 \pm 0,123$	0,79
Média	$0,26 \pm 0,246$	$0,14 \pm 0,045$	$0,19 \pm 0,006$	$2,18 \pm 0,471$	$0,48 \pm 0,127$	$0,80 \pm 0,022$

Tabela 6. Média e desvio padrão do Índice de Área da Planta (PAI) a partir das câmeras RGB e RGN (VANT) e o valor correspondente ao pixel do sensor OLI (Landsat-8) das nove (09) subáreas de caatinga considerando datas em período seco e chuvoso.

Pixel	23/12/2019		25/12/2019	20/03/2020		15/04/2020
	VANT/RGB	VANT/RGN	Landsat-8/OLI	VANT/RGB	VANT/RGN	Landsat-8/OLI
1	$1,43 \pm 0,203$	$1,34 \pm 0,046$	1,39	$3,22 \pm 0,046$	$1,67 \pm 0,148$	2,03
2	$1,45 \pm 0,232$	$1,34 \pm 0,041$	1,40	$3,41 \pm 0,041$	$1,68 \pm 0,119$	2,03
3	$1,50 \pm 0,290$	$1,34 \pm 0,051$	1,40	$3,58 \pm 0,051$	$1,70 \pm 0,121$	2,01
4	$1,45 \pm 0,243$	$1,35 \pm 0,056$	1,40	$3,39 \pm 0,056$	$1,68 \pm 0,132$	2,01
5	$1,44 \pm 0,219$	$1,33 \pm 0,040$	1,40	$3,40 \pm 0,040$	$1,66 \pm 0,127$	2,03
6	$1,49 \pm 0,333$	$1,34 \pm 0,051$	1,39	$3,43 \pm 0,051$	$1,68 \pm 0,128$	1,96
7	$1,45 \pm 0,225$	$1,33 \pm 0,036$	1,39	$3,52 \pm 0,036$	$1,70 \pm 0,132$	2,04
8	$1,47 \pm 0,245$	$1,34 \pm 0,041$	1,39	$3,50 \pm 0,041$	$1,71 \pm 0,125$	2,01
9	$1,47 \pm 0,238$	$1,34 \pm 0,047$	1,39	$3,32 \pm 0,047$	$1,68 \pm 0,125$	2,01
Média	$1,46 \pm 0,251$	$1,34 \pm 0,046$	$1,39 \pm 0,006$	$3,42 \pm 0,481$	$1,69 \pm 0,130$	$2,02 \pm 0,023$

Com relação aos dados do PAI, os valores médios dos nove pixels determinados a partir da câmera RGB foram da ordem de $1,46 \pm 0,251 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ no período seco e de $3,42 \pm 0,481 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ na época chuvosa. Ao se realizar a estimativa por meio das imagens adquiridas

com a câmera RGN verificam-se menores valores do PAI, sendo da ordem de $1,34 \pm 0,046 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $1,69 \pm 0,130 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente para os períodos seco e chuvoso.

Ambas as variáveis representaram bem as características da Caatinga nos períodos analisados, com valores de LAI mais baixos devido a quase ausência de folhas e valores de PAI mais expressivos em função dele considerar não somente as folhas, mas também os galhos (Miranda et al., 2020). Os valores médios do LAI a partir do VANT também estão de acordo com os resultados encontrados por Silva et al. (2019), que analisando o LAI determinado a partir do sensor Landsat TM em um município situado em região do semiárido pernambucano, encontraram valores de 0,28 e 0,57 $m^2 m^{-2}$ em duas datas de período seco. Já Silva et al. (2019) avaliando o LAI no sertão cearense também por meio do produto do Landsat, encontraram valores médios de LAI para meses secos variando de 0,28 a 0,48 $m^2 m^{-2}$.

Esses padrões apresentados por meio dos dados confirmam o que já é esperado para esse período do ano em áreas de caatinga sob domínio climático semiárido, em que ainda não ocorreram precipitações (Figura 2) suficientes para promover o início das brotações e formação de folhas, ou seja, a vegetação encontra-se sem folhas. O LAI a partir do VANT representou de forma satisfatória as tendências naturais do contexto da caatinga, mostrando o aumento da densidade de folhas na floresta em relação aos diferentes períodos.

Os resultados gerados no presente estudo assemelham-se aos encontrados por Melo et al. (2021) em uma região semiárida no oeste do Piauí. Os autores analisaram uma área com predominância de caatinga arbustiva e calcularam o LAI a partir de imagens do Landsat-8, obtendo valores de 0,32 $m^2 m^{-2}$ no mês de setembro (mês seco).

Outros resultados analisados em nível de município foram encontrados por Damasceno et al. (2020) avaliando entre diferentes variáveis ambientais no semiárido, o IAF a partir de imagens do Landsat-5, encontrando valores a nível de município variando entre 0 e 0,3 $m^2 m^{-2}$ para um período de novembro de 2009. No entanto, os valores foram diferentes em setembro de 2010 com valores acima de 0,1 $m^2 m^{-2}$ e com locais em que os dados variaram entre 0,6 e 1 $m^2 m^{-2}$. Sítios diferentes possuem características distintas, pois, a depender da área de estudo muitos alvos são envolvidos para caracterizar a resposta espectral, e isso, influencia nas estimativas dos dados como o LAI.

Os trabalhos em discussão estão condizentes com o presente estudo, sendo que o que diferencia é a área amostral e o detalhamento dos dados com relação a resolução espacial dos produtos analisados, o que fez com que os dados subestimasse ou sobrestimasse em relação aos demais resultados com dados a partir dos satélites. Porém, destaca-se que somente com as imagens de alta resolução do VANT tem sido possível

mapear as importantes relações existentes no ambiente de caatinga – solo exposto, cacto, vegetação rasteira, árvores, etc.

O LAI seguiu tendências já esperadas para o contexto de caatinga em que conforme o aumento na densidade de folhas ao longo do período chuvoso, por consequência, os valores são mais expressivos nas imagens. De acordo com Galvêncio et al. (2020), mesmo que o LAI não dependa diretamente das precipitações ocorrentes, existe uma relação física entre as duas variáveis, e isso é observado nos dados no presente estudo, onde não há precipitações ocorrentes em períodos anteriores que possam evidenciar transformações na estrutura da Caatinga.

Os valores dos produtos analisados conforme a Tabela 5, estão de acordo com as tendências ocorrentes em outros estudos com as características da região estudada. Os resultados obtidos com o LAI no estudo de Lins et al. (2017) a nível de município mostrou que em imagens Landsat o LAI a partir de 1 $m^2 m^{-2}$ estão presentes em áreas mais vegetadas, o que mostra uma semelhança entre os dados analisados tanto no presente estudo utilizando outro produto de imagem. Isso também foi observado no estudo de Nascimento et al. (2020) na mesorregião do sertão pernambucano, com o LAI calculado a partir de dados TM (Landsat-5). Os autores encontraram valores de LAI em períodos secos variando em sua maioria entre 0,0 a 1,6 $m^2 m^{-2}$, o que segundo os autores, já é esperado em função das características peculiares do bioma caatinga.

Portanto, de acordo com as informações analisadas, percebe-se que com o uso de câmeras multiespectrais de alta resolução, como a utilizada no presente estudo (Mapir Survey 3N) a partir dos ajustes com os modelos propostos no presente, são muito eficientes em análises mais detalhadas para avaliações do índice de área foliar quanto para índice de área da planta.

Conclusões

O presente estudo verificou que o modelo de LAI e PAI a partir de câmeras multiespectrais acopladas em VANT são eficientes mostrando boas correlações com dados de referência nesse período, sendo recomendado mais avaliações em diferentes sítios, com diferentes usos com o objetivo de avaliar o comportamento do NDVI a partir dos dados em RGB.

Os modelos simplificados para estimativa do LAI e do PAI da caatinga podem ser aplicados em imagens de alta resolução espacial obtidas em câmeras multiespectrais acopladas em VANT, captando a dinâmica espacial e temporal da composição de espécies

vegetais da floresta tropical sazonalmente seca – a caatinga.

A precipitação pluviométrica foi um fator importante na dinâmica das modificações do LAI entre os dois períodos analisados, pois as tendências estavam de acordo com as chuvas ocorrentes em momentos antes das aquisições das imagens.

Os resultados apresentados no presente estudo apontam semelhanças em relação a outras pesquisas onde se fez o uso do sensoriamento remoto nas avaliações, e isso é um fator positivo, e mostra que as imagens de alta resolução podem ser utilizadas seguindo esta proposta metodológica do presente estudo dando resultados satisfatórios.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão das bolsas concedidas a Cloves Vilas Boas dos Santos (Processo IBPG 0813-9.25/17), Herica Fernanda de Sousa Carvalho (Processo IBPG 1062-9.25/18), Rodrigo de Queiroga Mirada (Processo APQ 0646-9.25/16). Os autores também agradecem a FACEPE pelo financiamento do Projeto “Monitoramento dos fluxos de radiação, energia, CO₂, vapor d'água e da fenologia em áreas de Caatinga” (Processo APQ 0062-1.07/15). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade de pesquisa concedida a Josiclêda Domiciano Galvêncio (Processo PQ 302934/2018-9) e pelo financiamento do Projeto Universal (Processo 402834/2016-0).

Referências

Alberton, B., Torres, R. S., Silva, T. S. F., Rocha, H. R., Moura, M. S. B., Morellato, L. P. C., 2019. Leafing patterns and drivers across seasonally dry tropical communities. *Remote Sensing*, 11, 2267. <https://doi.org/10.3390/rs11192267>

Almeida, C. L., Carvalho, T. R. A., Araújo, J. C., 2019. Leaf area index of Caatinga biome and its relationship with hydrological and spectral variables. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279, 107705. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107705>

Alvarez, I. A., Kiill, L. H. P., 2014. Arborização, floricultura e paisagismo com plantas da Caatinga. Embrapa Territorial - Artigo em periódico indexado (ALICE).

Anderson, K., Gaston, K. J., 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11, 138-146. <https://doi.org/10.1890/120150>

Arai, K., Gondoh, K., Shigetomi, O., Miura, Y., 2016. Method for NIR reflectance estimation with visible camera data based on regression for NDVI estimation and its application for insect damage detection of rice paddy fields. (IJARAI) *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, 5, 11.

Brito, P. V. S., Santos, T. O., Morais, Y. B. C. B., 2020. Análise da sazonalidade da vegetação de caatinga do município de Petrolina (Pernambuco) a partir de imagens do satélite Landsat 8-OLI. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, 1, 29–37.

Carvalho, H. F. S., Moura, M. S. B., Silva, T. G. F., 2018. Fluxos de radiação e energia em caatinga preservada e cana-de-açúcar no Semiárido. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33, 452-458. <https://doi.org/10.1590/0102-7786333005>

Damasceno, M. L., Pereira, J. A. D. S., Schuler, C. A. B., 2020. Análise espaço temporal da cobertura vegetal do município de Arcoverde (Pernambuco). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, 1, 038-050.

Fang, H., Baret, F., Plummer, S., Schaepman-Strub, G., 2019. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 57, 739-799. <https://doi.org/10.1029/2018RG000608>

Galvêncio, J. D., Mendes, S. M., Morais, Y. C. B., Miranda, R. Q., Souza, W. M., Moura, M. S. B., Santos, W., 2020. Correlação linear entre a precipitação e o Índice de Área Foliar do bioma Caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 3304-3314. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3304-3314>

Givos, R., Tassopoulos, D., Kalivas, D., Lougkos, N., Priovolou, A., 2021. Remote Sensing Vegetation Indices in Viticulture: A Critical Review. *Agriculture*, 11, 457. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050457>

Gomes, A., Queiroz, D. M. D., Valente, D. S., Pinto, F. D. A. D. C., & Rosas, J. T., 2021. Comparing a single-sensor camera with a multisensor camera for monitoring coffee crop using unmanned aerial vehicles. *Engenharia Agrícola*, 41, 87-97. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n1p87-97/2021>

Jiao, W., Wang, L., McCabe, M. F., 2021. Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future.

- Remote Sensing of Environment, 256, 112313. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112313>
- Lima, N. A. S., Oliveira, L. M. M., Xavier, M. L. P., Silva Júnior, U. J., Nascimento, E. F., 2019. Spectral Indices for remote sensing with the LANDSAT-5 and SENTINEL-2 satellites around the Poço Cruz reservoir-PE, 9, 299-309.
- Lins, F. A. C., Araújo, D. C. S., Silva, J. L. B., Lopes, P. M. O., Oliveira, J. D. A., Silva, A. T. C. S. G., 2017. Estimativa de parâmetros biofísicos e evapotranspiração real no semiárido pernambucano utilizando sensoriamento remoto. Irriga, 1, 64-75. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v1n1p64-75>
- Maia, G. N., 2012. Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades, Printcolor Gráfica e Editora, Fortaleza, 413.
- Marques, T. V., Mendes, K., Mutti, P., Medeiros, S., Silva, L., Perez-Marin, A. M., Campos, S., Lúcio, P. S., Lima, K., Reis, J., Ramos, T. M., Silva, D. F., Oliveira, C. P., Costa, G. B., Antonino, A. C. D., Menezes, R. S. C., Silva, C. M. S., Bezerra, B., 2020. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. Agricultural and Forest Meteorology, 287, 107957. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957>
- Melo, C. G. B., Fernandes, G. S. T., Lopes, P. M. O., Oliveira, V. B., Pessoa, V. G., 2021. Variação espaço-temporal de índices de vegetação e evapotranspiração em áreas de caatinga. Revista de Geociências do Nordeste, 7, 253-259. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID24343>
- Miranda, R. Q., Nóbrega, R. L. B., Moura, M. S. B., Raghavan, S., Galvêncio, J. D., 2020. Realistic and simplified models of plant and leaf area indices for a seasonally dry tropical forest. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 85, 101992. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101992>
- Nascimento, K. R. P., Alves, E. R., Alves, M. V. S., Galvêncio, J. D., 2020. Impacto da precipitação e do uso e ocupação do solo na cobertura vegetal na Caatinga. Journal of Environmental Analysis and Progress, 5, 221-231. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.2.2020.3058.221-231>
- Neumann, H. H., Den Hartog, G., & Shaw, R. H., 1989. Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. Agricultural and Forest Meteorology, 45, 325-345. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90052-X](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90052-X)
- Rex, F., Käfer, P. S., Corte A. P. D. VANTs: potenciais para engenharia florestal. IN: Pires, P. F. (Orgs) Geociências, sociedade e sustentabilidade, cap. 7. Piracanjuba-GO, Editora Conhecimento Livre. 2020.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A.; Deering, D. W., 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: Proceeding of ERTS-1 Symposium. Anais ... NASA, United States.
- Salinas, P. C., Zamudio, F., Yáñez, M., Gajardo, J., Valdés, H., Espinosa, C., Acevedo-Opazo, C., 2020. Evaluation of models to determine LAI on poplar stands using spectral indices from Sentinel-2 satellite images. Ecological Modelling, 428, 109058. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109058>
- Santos, C. V. B., Baptista, G. M. M., Moura, M. S. B., 2017. Seasonality of Vegetation Indices in different land uses in the São Francisco Valley. Journal of Hiperespectral Remote Sensing, 7, 158-167. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v7.3.p158-167>
- Santos, C. V. B., Carvalho, H. F. S., Silva, M. J., Moura, M. S. B., Galvêncio, J. D., 2020. Uso de Sensoriamento Remoto na análise da Temperatura da Superfície em áreas de Floresta Tropical Sazonalmente Seca. Revista Brasileira de Geografia Física, 13, 941-953. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p941-957>
- Silva, C. V. S., Silva, J. L. B., Moura, G. B. A., Lopes, P. M. O., Nascimento, C. R., Silva, L. C., 2019. Monitoramento da cobertura vegetal por sensoriamento remoto no semiárido brasileiro através de índices de vegetação. Nativa, 7, 708-717. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i6.7646>
- Silva, J. L. B., Moura, G. B. A., de França, Ê. F., Lopes, P. M. O., da Silva, T. T. F., Lins, F. A. C., Ortiz, P. F. S., 2019. Spatial-temporal dynamics of the Caatinga vegetation cover by remote sensing in municipality of the Brazilian semi-arid. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 14, 1-10. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i4a7128>
- Silva Junior, U. J., Gonçalves, R. M., Oliveira, L. M. M., Silva Junior, J. A., 2021. Sensibilidade Espectral dos Índices de Vegetação: GNDVI, NDVI e EVI na Mata Ciliar do Reservatório de Serrinha II-PE, Brasil. Revista Brasileira de Cartografia, 73, 17-35. <https://doi.org/10.14393/rbcv73n1-55252>
- Souza, L. S. B., Moura, M. S. B., Sedyiyama, G. C., Silva, T. G. F., 2015. Balanço de radiação em ecossistema de Caatinga preservada durante um ano de seca no semiárido Pernambucano. Revista Brasileira de Geografia Física, 8, 41-55. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.1.p041-055>
- Souza, L. S. B., Moura, M. S. B., Sedyiyama, G. C., Silva, T. G. F., 2017. Carbon exchange in a caatinga area

- during an unusually drought year. *Agrometeoros*, 25, 37-45. [10.31062/agrom.v25i1.26265](https://doi.org/10.31062/agrom.v25i1.26265)
- Souza, G. F., Gutierrez, L. A. R., Barbassa, A. P., Pereira, L. E., Cândido, A. K. A. A., Júnior, J. M., Paranhos Filho, A. C., 2016. Uso de Diferentes Sensores de Satélite na Discriminação de Alvos Naturais. *Anuário do Instituto de Geociências*, 39, 13-22. http://dx.doi.org/10.11137/2016_1_13_22
- Watson, D. J. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and with and between years. *Annals of Botany*, 11, 41-76, 1947. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a083148>
- Wulder, M. A., LeDrew, E. F., Franklin, S. E., Lavigne, M. B., 1998. Aerial image texture information in the estimation of northern deciduous and mixed wood forest leaf area index (LAI). *Remote Sensing of Environment*, 64, 64-76. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00169-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00169-7)
- Yan, G., Hu, R., Luo, J., Weiss, M., Jiang, H., Mu, X., Zhang, W., 2019. Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and forest meteorology*, 265, 390-411. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.033>