



## Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal

### ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA *Mauritia flexuosa* UTILIZANDO IMAGENS VANT-RGB

GABRIEL ETTORE TIENGO

M  
E  
S  
T  
R  
A  
D  
O

Ipameri-GO  
2026

**GABRIEL ETTORE TIENGO**

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA *Mauritia flexuosa* UTILIZANDO  
IMAGENS VANT-RGB**

Orientador: Prof. Dr. Vagner Santiago Do Vale

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de  
Goiás – UEG, Unidade Universitária de Ipameri  
como parte das exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Produção Vegetal para obtenção do  
título de MESTRE.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UEG  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

TT562      TIENGO, GABRIEL ETTORE  
í?      ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA *Mauritia flexuosa*  
UTILIZANDO IMAGENS VANT-RGB / GABRIEL ETTORE TIENGO;  
orientador Vagner Santiago Vale. -- Ipameri, 2026.  
33 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação  
Mestrado Acadêmico em Produção Vegetal) -- Unidade de  
Ipameri, Universidade Estadual de Goiás, 2026.

1. buriti. 2. drone. 3. ExG. 4. sensoriamento  
remoto. 5. VDVI. I. Vale, Vagner Santiago , orient. II.  
Título.

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** "ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA *Mauritia flexuosa* UTILIZANDO IMAGENS VANT-RGB"

**AUTOR(A):** Gabriel Ettore Tiengo

**ORIENTADOR(A):** Vagner Santiago do Vale

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE(A) EM PRODUÇÃO VEGETAL, pela comissão Examinadora:

Prof. Dr. Carlos de Melo e Silva Neto

Universidade Estadual de Goiás/ Unidade Universitária Ipameri- GO



Documento assinado digitalmente

CARLOS DE MELO E SILVA NETO

Data: 11/05/2026 19:55:31-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Vagner Santiago do Vale (Orientador)

Universidade Estadual de Goiás/ Unidade Universitária Ipameri- GO



Documento assinado digitalmente

VAGNER SANTIAGO DO VALE

Data: 11/05/2026 13:59:07-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Patrick Thomaz de Aquino Martins

Universidade Estadual de Goiás/ Campus Central Anapólis- GO



Documento assinado digitalmente

PATRICK THOMAZ DE AQUINO MARTINS

Data: 13/05/2026 11:52:21-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Data da realização: 16 de março de 2026

Registro de Declaração



Número: 322 Livro: R-01 Folhas: 05A Data: 16/03/2026 Assinatura:

### **Dedicatória**

Dedico este trabalho a Deus, autor e sustentador de todas as coisas, a quem pertence toda honra e toda glória;

À minha família, pelo apoio e pelos valores que me sustentam;

À Bruna Simão de Oliveira, pelo companheirismo e incentivo constantes;

E a todos que me acompanharam e apoiaram ao longo desta trajetória, construída com constância e superação, apesar das inúmeras dificuldades.

## **Agradecimentos**

A Deus, por conceder saúde, discernimento e constância ao longo de toda a trajetória acadêmica, sustentando cada etapa deste caminho com propósito e perseverança.

À minha família, pelo apoio incondicional, incentivo permanente e compreensão nos momentos de ausência, sendo base fundamental para a continuidade dos estudos e para a superação dos desafios enfrentados ao longo da formação acadêmica e profissional.

À Bruna Simão de Oliveira, pelo apoio constante, presença firme e compreensão em todos os momentos fundamentais para manter o equilíbrio emocional e a motivação ao longo desta etapa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal (PPGPV) da Universidade Estadual de Goiás (UEG), pela oportunidade de formação e pelas condições institucionais oferecidas para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Vagner Santiago do Vale, pelos preciosos ensinamentos, orientações técnicas e contribuições científicas, que foram determinantes para o direcionamento e a condução deste estudo.

Aos docentes do PPGPV, pelas contribuições e discussões ao longo do curso, que colaboraram para o amadurecimento científico e metodológico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos pelo período de 12 meses, apoio essencial para a dedicação às atividades acadêmicas.

Às instituições, projetos e programas nos quais atuei paralelamente à pós-graduação, em especial às atividades relacionadas à fiscalização ambiental e à Vigilância em Saúde Ambiental (VIGIMINAS), que contribuíram para a integração entre teoria e prática.

Por fim, a todos que, de forma direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a consolidação desta etapa da minha formação acadêmica e profissional.

*“Não chores. Eis o Leão da tribo de Judá, a Raiz de Davi, que venceu.”  
(Apocalipse 5:5)*

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> - <i>Mauritia flexuosa</i> (buriti). .....                                                                                                                                                 | 13 |
| <b>Figura 2</b> - Fluxograma com representação das etapas deste estudo. ....                                                                                                                               | 15 |
| <b>Figura 3</b> - Análise de componentes principais para copas e entornos de <i>Mauritia flexuosa</i> (buriti) para o índice de vegetação VDMI. ....                                                       | 19 |
| <b>Figura 4</b> - <i>Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise</i> (DBSCAN) aplicada a ACP para a detecção de copas consideradas outliers para o índice de vegetação VDMI. ....          | 19 |
| <b>Figura 5</b> - ACP dos pixels de copa e entorno com base no índice VDMI, considerando a base de dados sem a presença de outliers. ....                                                                  | 20 |
| <b>Figura 6</b> - Histograma de frequência de pixels para copa e entorno VDMI. ....                                                                                                                        | 21 |
| <b>Figura 7</b> - Histograma de frequências para o numero de pixels em cada classe para o VDMI para copas (verde) e áreas de entorno (laranja) para classes espectrais a cada 0,025 valores do pixel. .... | 21 |

## **Lista de Tabelas**

**Tabela 1.** Índices de vegetação utilizados na análise preliminar para distinguir a copa de *Mauritia flexuosa* de outros elementos da vegetação. B = Azul, G = Verde, R = Vermelho...17

## Sumário

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                                                                                                                           | 10 |
| <b>2. OBJETIVOS</b>                                                                                                                                            | 12 |
| 2.1 Geral                                                                                                                                                      | 12 |
| 2.2 Objetivos específicos                                                                                                                                      | 12 |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>                                                                                                                                   | 12 |
| 3.1 Objeto de estudo                                                                                                                                           | 12 |
| 3.2 Drone utilizado, plano de voo e extração das imagens                                                                                                       | 13 |
| 3.3 Avaliação preliminar dos índices de vegetação                                                                                                              | 16 |
| 3.4 Análises multivariadas e detecção de outliers                                                                                                              | 17 |
| 3.5 Análise em nível de pixels                                                                                                                                 | 18 |
| 3.6 Estimativa de incerteza via bootstrap                                                                                                                      | 18 |
| 3.7 Comparação estatística entre copas e entornos e definição da assinatura espectral de <i>Mauritia flexuosa</i>                                              | 18 |
| <b>4. RESULTADOS</b>                                                                                                                                           | 18 |
| 4.1 Estrutura multivariada e detecção de valores atípicos                                                                                                      | 18 |
| <b>5. DISCUSSÃO</b>                                                                                                                                            | 22 |
| 5.1 Estrutura multivariada e robustez do padrão: ACP, coerência intraclasses e controle de valores atípicos                                                    | 22 |
| 5.2 Desempenho comparativo de VDVI, ExG e TGI: explicações a partir das distribuições pixel a pixel e implicações do espectro visível para assinatura de copas | 24 |
| 5.3 Assinatura característica de copas e separação árvore–paisagem                                                                                             | 26 |
| 5.4 Limitações e aprendizados                                                                                                                                  | 27 |
| 5.4.1 Limitações do domínio espectral (RGB) e variabilidade de iluminação                                                                                      | 27 |
| 5.4.2 Dependência do delineamento de copa e risco de pixels mistos                                                                                             | 27 |
| 5.4.3 Importância e replicabilidade para Cerrado e veredas                                                                                                     | 28 |
| 5.4.4 Aprendizado do estudo                                                                                                                                    | 28 |
| <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                                                                                                                                 | 29 |
| <b>7. REFERÊNCIAS</b>                                                                                                                                          | 30 |

## Resumo

A diferenciação de copas de *Mauritia flexuosa* em ambientes de vereda no bioma Cerrado representa um desafio devido à elevada heterogeneidade estrutural da paisagem e às limitações espectrais inerentes a sensores RGB. Este estudo avaliou a capacidade de índices de vegetação derivados de imagens obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) em distinguir copas da espécie da vegetação circundante. Foram delimitadas copas individuais e respectivas áreas de entorno a partir de ortomosaicos, realizando-se análise pixel a pixel dos índices ExG, TGI e VDVI. A estrutura multivariada dos dados foi investigada por meio de Análise de Componentes Principais (ACP), com posterior detecção e remoção de outliers via algoritmo DBSCAN. As distribuições dos índices foram analisadas por histogramas em diferentes resoluções de classe, com estimativa de incerteza por bootstrap. A comparação estatística entre copas e entornos foi conduzida por testes não paramétricos (Kolmogorov–Smirnov e Mann–Whitney U), complementados pela estimativa de tamanho de efeito por meio do Delta de Cliff. Os resultados evidenciaram separação estatisticamente significativa entre as classes ( $p < 0,001$ ), com maior poder discriminatório para VDVI ( $\Delta \approx 0,62$ ) e ExG ( $\Delta \approx 0,61$ ), em comparação ao TGI ( $\Delta \approx 0,49$ ). A ACP indicou que mais de 64% da variância total concentrou-se nas duas primeiras componentes principais, reforçando a existência de padrão espectral consistente. Conclui-se que índices baseados na predominância do canal verde apresentam maior eficiência na distinção *Mauritia flexuosa* para o restante da paisagem em imagens RGB, demonstrando potencial para aplicações em inventários rápidos e monitoramento ambiental de veredas no Cerrado.

**Palavras-chave:** buriti; drone; ExG; sensoriamento remoto; VDVI.

## Abstract

The differentiation of *Mauritia flexuosa* tree crowns in vereda environments within the Cerrado biome poses significant challenges due to the high structural heterogeneity of the landscape and the spectral limitations inherent to RGB sensors. This study evaluated the capacity of vegetation indices derived from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) RGB imagery to distinguish species crowns from surrounding vegetation. Individual crowns and their respective surrounding areas were delineated from orthomosaics, followed by pixel-level analysis of the Excess Green Index ExG, TGI, and VDVI. The multivariate structure of the dataset was examined using Principal Component Analysis (PCA), with subsequent detection and removal of spectral outliers through the DBSCAN algorithm. Index distributions were assessed using histograms at multiple class resolutions, and uncertainty was estimated via bootstrap resampling. Statistical comparisons between crowns and surrounding areas were performed using non-parametric tests (Kolmogorov–Smirnov and Mann–Whitney U), complemented by effect size estimation through Cliff’s Delta. The results demonstrated statistically significant separation between classes ( $p < 0.001$ ), with greater discriminatory power observed for VDVI ( $\Delta \approx 0.62$ ) and ExG ( $\Delta \approx 0.61$ ) compared to TGI ( $\Delta \approx 0.49$ ). PCA indicated that more than 64% of total variance was explained by the first two principal components, supporting the presence of a consistent spectral pattern. It is concluded that indices emphasizing the green channel provide greater efficiency in distinguish *Mauritia flexuosa* from the environment in RGB imagery, highlighting their potential for rapid inventories and environmental monitoring of veredas in the Cerrado.

**Keywords:** buriti; drone; ExG; remote sensing; VDVI.

## 1. INTRODUÇÃO

A adaptabilidade e a multifuncionalidade dos drones têm expandido aplicações em pesquisas geográficas, possibilitando a obtenção de dados de maneira ágil e precisa em diferentes cenários ambientais e urbanos (Damasceno e Martins, 2025). O Sensoriamento Remoto (SR) é uma técnica que possibilita a obtenção e a análise de informações sobre objetos ou fenômenos à distância, sem a necessidade de contato direto, sendo uma das principais ferramentas para a análise da vegetação e o monitoramento ambiental em diferentes escalas espaciais (Almeida, 2016).

O SR consolidou-se como uma das tecnologias inovadoras para a observação da superfície terrestre, ao integrar informações coletadas por satélites e plataformas aéreas não tripuladas a técnicas computacionais avançadas (Tagliarini et al., 2021). No Brasil, a aplicação do sensoriamento remoto com objetivos ambientais e agrícolas intensificou-se principalmente a partir dos anos 2000, período em que políticas públicas passaram a estimular o monitoramento do Cerrado, da Amazônia e de bacias hidrográficas (Mendes et al., 2025).

Dessa forma, a aplicação integrada de sensores, sistemas de processamento e de transmissão de dados instalados em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) têm como finalidade investigar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície terrestre, a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e os diferentes materiais que a compõem em suas variadas manifestações (Novo, 2008).

Os VANTs correspondem a aeronaves desenvolvidas para operar sem piloto a bordo, e dispõem de carga útil embarcada, como sistemas de posicionamento GNSS/GPS, câmeras e sensores para aquisição de dados espaciais transformou significativamente o cenário do SR (Amaral et al., 2021). Dessa forma, os VANTs oferecem vantagens operacionais como flexibilidade de voo, menor custo comparativo em relação a plataformas tripuladas, elevada revisão temporal e, sobretudo, altíssima resolução espacial (Rex, Kafer e Corte).

O desenvolvimento de sensores de alta resolução, capazes de registrar imagens no espectro da luz visível e de serem embarcados em VANTs domésticos, mais acessíveis, de menor custo e mais simples de operar e pilotar tem ampliado as possibilidades de aplicação dessas plataformas no sensoriamento remoto (Sampaio et al., 2020). Nesse contexto, os sensores RGB (*Red, Green and Blue* – Vermelho, Verde e Azul) destacam-se como os mais utilizados em VANTs, por estarem presentes em câmeras fotográficas convencionais e operarem na mesma faixa do espectro visível ao olho humano, permitindo a aquisição de imagens por meio tanto de câmeras simples quanto de equipamentos profissionais, que oferecem maior estabilidade e melhor resolução (Rex, Kafer e Corte, 2020).

A interpretação dessas imagens baseia-se na interação entre a radiação eletromagnética e a vegetação (Almeida, 2016). Esse processo é viabilizado pela interação da planta com a radiação eletromagnética que reflete suas propriedades físicas e químicas (Ataíde, 2024). Como resultado dessa interação, estabelece-se um padrão de resposta espectral específico, associado aos processos de absorção, reflexão e espalhamento da energia no interior das folhas (Leão, 2021). No espectro visível, a reflectância da vegetação é reduzida em razão da elevada absorção pelos pigmentos fotossintetizantes presentes nas folhas, especialmente a clorofila, o que influencia diretamente a resposta espectral observada nessa faixa do espectro (Almeida, 2016).

A partir dessa resposta espectral, os índices de vegetação são definidos como combinações matemáticas entre valores de reflectância em diferentes bandas do espectro eletromagnético, com o objetivo de realçar características associadas à cobertura vegetal (Sampaio et al., 2020). Nesse contexto, as veredas enquanto formações savânicas associadas a áreas úmidas caracterizam-se pela organização em estratos herbáceo e arbóreo-arbustivo e pela presença do buriti (*Mauritia flexuosa*), espécie dominante nesses ambientes (Borges, Rodrigues e Leite, 2019).

A espécie *Mauritia flexuosa* (buriti) apresenta elevada relevância ecológica no contexto do bioma Cerrado, especialmente por sua associação direta às veredas, ambientes úmidos caracterizados pela presença de solos hidromórficos e pela ocorrência de nascentes (Borges, 2018; Ferreira et al., 2022). Essas formações desempenham papel fundamental na manutenção dos ecossistemas, contribuindo para a conservação da biodiversidade e para o equilíbrio ambiental em paisagens savânicas (Barbosa, 2016).

As veredas são reconhecidas como Áreas de Preservação Permanente (APPs) (Brasil, 2012), dada sua importância na proteção dos recursos hídricos e na regulação dos fluxos hidrológicos (Franco, Pimenta e Pelli, 2025). Diante disso, o buriti é frequentemente considerado uma espécie indicadora desses ambientes, uma vez que sua ocorrência está diretamente relacionada à disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, funcionando como marcador natural de áreas sensíveis do ponto de vista ambiental (Barbosa, 2016).

Além de sua importância ecológica, *Mauritia flexuosa* também apresenta relevância socioeconômica, sendo fonte de alimento, matéria-prima e recursos para comunidades locais (Ferreira et al., 2022). Dessa forma, a identificação e o monitoramento da espécie tornam-se estratégicos para o diagnóstico, a delimitação e a conservação de veredas e APPs (Borges, 2018).

Diante disso, sensores RGB embarcados em VANTs têm se destacado como ferramentas acessíveis e eficientes para aplicações em SR, especialmente no monitoramento

da vegetação (Ataíde, 2024). O avanço tecnológico nessa área tem possibilitado a realização de mapeamentos e monitoramentos da cobertura vegetal em ambientes urbanos e rurais de forma mais eficiente e com custos reduzidos (Amaral et al., 2021). Nesse contexto, índice derivado das bandas vermelha, verde e azul têm sido amplamente utilizados na identificação e quantificação de copas arbóreas, contribuindo para análises mais detalhadas da vegetação em ambientes naturais e urbanos (Borges, Rodrigues e Leite, 2019).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Geral

Avaliar a capacidade de índices de vegetação derivados de imagens RGB obtidas por veículo aéreo não tripulado em distinguir copas de *Mauritia flexuosa* da vegetação circundante.

### 2.2 Objetivos específicos

1) Delimitar copas individuais de *Mauritia flexuosa* e suas respectivas áreas de entorno a partir de ortomosaicos gerados por VANT; 2) Calcular e comparar os índices de vegetação em nível de pixel para copas e áreas adjacentes, buscando identificar o melhor índice para separação entre copas e entornos; 3) Utilizando a quantificação de pixels para o índice escolhido, caracterizar a distribuição dos valores utilizando histogramas em diferentes resoluções de classes; 4) Comparar as distribuições dos índices entre copas e entornos utilizando a abordagem de quantificação de pixels com medidas de tamanho de efeito.

## 3. MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Objeto de estudo

A análise foi conduzida utilizando imagens RGB das copas de *Mauritia flexuosa* (Buriti) e de seus arredores imediatos. Para cada indivíduo amostrado, foram considerados dois subconjuntos de imagem: (i) a copa da árvore (*tree canopy* – TC) e (ii) a área de entorno (*surrounding area* – SA). Todas as imagens foram processadas em nível de pixel, após a aplicação de máscara para remoção de pixels com valor zero, a fim de evitar contaminação por fundo ou áreas sem informação espectral.

A espécie-alvo deste estudo foi *Mauritia flexuosa* (buriti), é uma palmeira característica de áreas úmidas (veredas e ambientes associados), com papel relevante na manutenção desses ecossistemas e na oferta de recursos para a fauna e comunidades locais

(Ferreira et al., 2022). Diante disso, a sua identificação e monitoramento por sensoriamento remoto é importante para ações de conservação e manejo (Casapia et al., 2020).

**Figura 1** - *Mauritia flexuosa* (buriti).



Fonte: Próprios autores (2026).

### 3.2 Drone utilizado, plano de voo e extração das imagens

As imagens RGB foram obtidas por meio de um VANT DJI Air 2S (DJI, 2023)<sup>1</sup>, fabricado pela Da-Jiang Innovations, China. A plataforma é equipada com câmera RGB integrada e sistema de estabilização por gimbal, permitindo a aquisição de imagens com alta resolução espacial e adequada estabilidade geométrica. A combinação entre sensor de grande formato, altitude de voo controlada e estabilização da câmera possibilitou a obtenção de imagens com elevado detalhamento e consistência radiométrica, características fundamentais para a discriminação de atributos espectrais e texturais em nível de copa. Esses atributos tornam os dados RGB particularmente adequados para análises de vegetação, delimitação de copas e classificação em nível de espécie a partir de ortomosaicos<sup>2</sup> derivados de VANT (DJI, 2023).

Os voos (Figura 2a) foram realizados a 120 m de altura acima do nível do solo, sob condições atmosféricas estáveis, em dias sem nuvens, no período entre 10:00 e 14:00 (hora

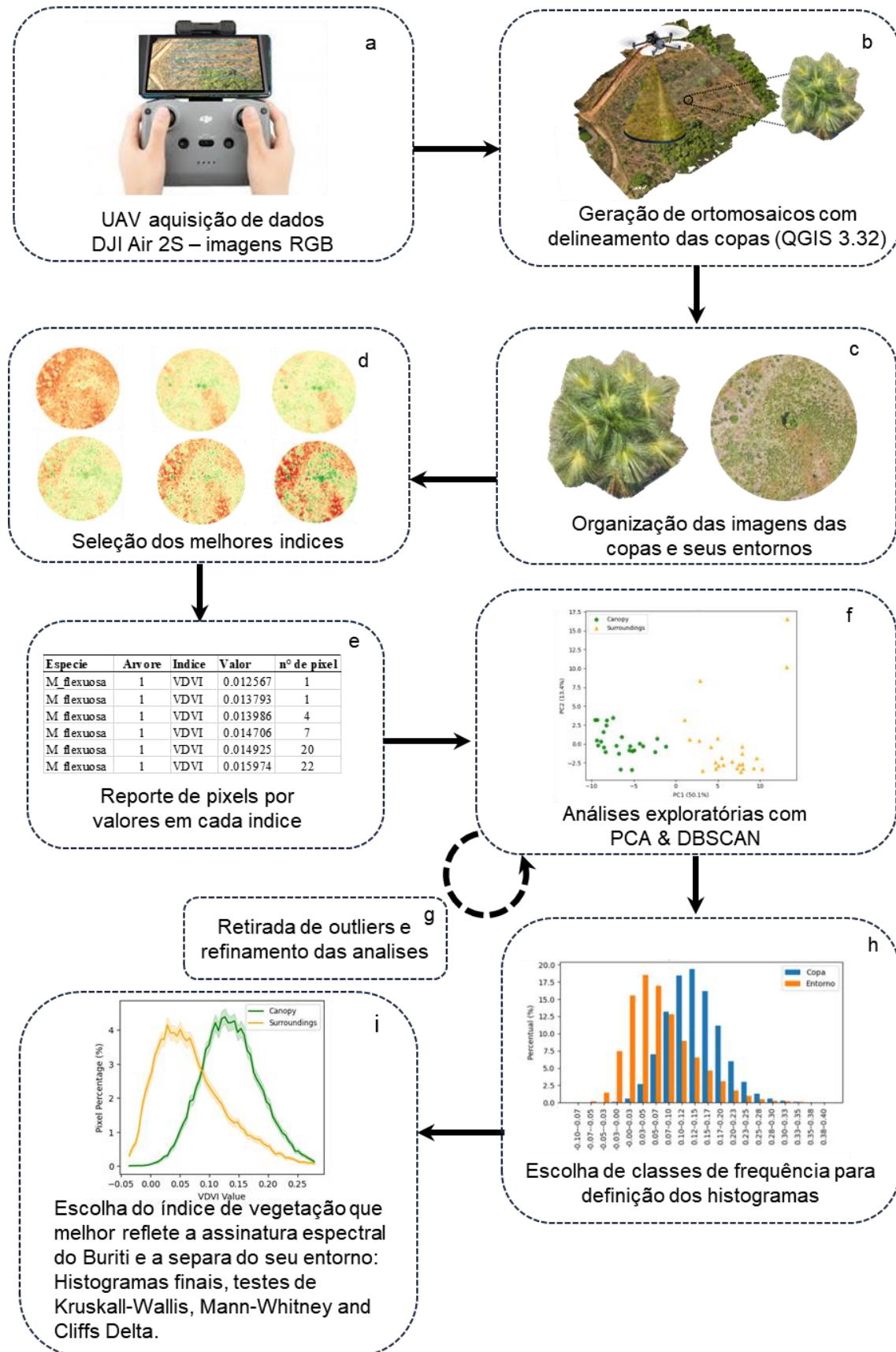
---

<sup>1</sup> Sensor CMOS de 1", 20 MP, resolução máxima de 5280 × 3956 pixels, lente equivalente a 24 mm e campo de visão de 84°.

<sup>2</sup> Mosaico de imagens aéreas corrigidas geometricamente, permitindo representação espacial precisa e medições confiáveis (Lillesand, Kiefer e Chipman, 2015).

local) em vereda localizada no Clube Caça e Pesca Itororó no final da estação seca e início da chuvosa (outubro). O horário de voo foi escolhido por apresentar menor incidência de sombras e iluminação solar mais homogênea e a época do ano por apresentar clara separação visual aérea entre a árvore alvo e a matriz de entorno. A sobreposição frontal e lateral das imagens foram padronizadas para 70° e a velocidade de voo foi de 10m.s<sup>-1</sup>. As imagens individuais adquiridas durante os voos foram inicialmente utilizadas para gerar ortomosaicos georreferenciados das áreas de estudo (Figura 2b) pelo software Agisoft Metashape, nas quais ocorria a espécie-alvo (*Mauritia flexuosa* – Buriti). Esses ortomosaicos forneceram uma representação espacial contínua e geometricamente corrigida da paisagem, permitindo a visualização, localização e delimitação precisa das copas individuais. No entanto, os ortomosaicos não foram utilizados diretamente nas análises subsequentes. Foram delimitadas manualmente 30 copas individuais de buriti no software QGIS (versão 3.32), utilizando ferramentas de criação de *shapefile* e digitalização de polígonos (Figura 2c). Para cada árvore-alvo, foi criado um polígono por interpretação visual do ortomosaico, traçando cuidadosamente os limites da copa de modo a incluir exclusivamente a área da copa (TC) e excluir solo exposto, sombras ou vegetação adjacente.

**Figura 2** - Fluxograma com representação das etapas deste estudo.



Fonte: Próprios autores (2026).

Após a delimitação da copa, foi gerado um *buffer* perfeitamente circular com área de 2.500 m<sup>2</sup> ao redor de cada árvore amostrada, utilizando o centro da árvore como referência. Esse *buffer* foi utilizado para criar um polígono representando a área de entorno (SA), a qual foi posteriormente analisada quanto aos índices de vegetação.

Em seguida, o procedimento de extração raster por máscara (*raster extraction by mask*) foi aplicado, utilizando os polígonos de TC e SA como máscaras espaciais para extrair, a partir do ortomosaico, as regiões correspondentes às copas e aos entornos (Figura 2c). Todas as imagens extraídas foram armazenadas em formato *TIFF* e organizadas em dois conjuntos de dados independentes: (i) imagens das copas das árvores e (ii) imagens das áreas de entorno. Esses conjuntos foram utilizados como entrada para o cálculo dos índices de vegetação e para as análises subsequentes.

### 3.3 Avaliação preliminar dos índices de vegetação

Um total de quatro índices de vegetação foram avaliados utilizando imagens das copas e de seus respectivos entornos (Tabela 1). Para descobrir qual índice RGB melhor distingue copa de buriti do entorno. Para a definição do índice com melhor capacidade discriminatória entre copa e entorno (Figura 2d) os valores de cada índice foram organizados em dois conjuntos independentes, correspondentes às classes copa e entorno. Para cada índice, a capacidade de discriminação foi avaliada por meio da curva ROC (Receiver Operating Characteristic, Fawcett, 2006). Os valores do índice foram utilizados como variável contínua, enquanto a classe do pixel (copa = 1; entorno = 0) foi considerada como variável binária. A partir dessa relação, foram calculadas as taxas de verdadeiros positivos (sensibilidade) e falsos positivos (1 – especificidade) em diferentes limiares, permitindo a construção da curva ROC. A área sob a curva (AUC) foi utilizada como medida síntese da capacidade de separação, sendo calculada individualmente para cada índice, com valores variando de 0,5 (sem discriminação) a 1,0 (discriminação perfeita). Adicionalmente, a diferença entre as distribuições dos valores dos índices para as classes copa e entorno foi avaliada por meio do Cliff's Delta ( $\delta$ ), uma medida de tamanho de efeito não paramétrica (Cliff, 1996). Essa métrica indica a tendência de um conjunto apresentar valores maiores que o outro. Para evitar vieses associados ao grande número de pixels, foram utilizados subconjuntos aleatórios dos dados no cálculo. Os valores de  $\delta$  variam de -1 a 1, sendo que valores próximos de zero indicam baixa separação entre as classes e valores absolutos mais elevados indicam maior distinção. Magnitudes inferiores a 0.147 são consideradas insignificantes, entre 0.147 e 0.333

são consideradas fracas, entre 0.333 e 0.474 são consideradas moderadas e superiores a 0.474 são consideradas fortes (Romano et al., 2006).

Dessa forma, as métricas AUC e Cliff's Delta foram utilizadas de forma complementar para cada índice, permitindo avaliar tanto a capacidade de discriminação quanto a diferença entre as distribuições dos dados, possibilitando a comparação do desempenho dos índices RGB na identificação de copas de buriti em imagens obtidas por drone. O índice VDVI se demonstrou o mais eficaz em distinguir *Mauritia flexuosa* dos demais elementos da paisagem (ou seja, seu entorno), incluindo gramíneas, vegetação herbácea e áreas sombreadas (Tabela 1).

Após a seleção do melhor foram calculados, no software QGIS, empregando a função *raster layer unique values report*. Esse procedimento gerou tabelas contendo o número de pixels associado a cada valor discreto dos índices (Figura 2e). Essas tabelas foram posteriormente utilizadas para caracterizar a distribuição de frequência dos valores dos índices de vegetação tanto para as copas quanto para as áreas de entorno.

**Tabela 1.** Índices de vegetação utilizados na análise preliminar para distinguir a copa de *Mauritia flexuosa* de outros elementos da vegetação. B = Azul, G = Verde, R = Vermelho.

| Índices de vegetação                     | Sigla | Formula             | AUC  | Cliff |
|------------------------------------------|-------|---------------------|------|-------|
| Green Ratio                              | GCC   | $G/(B+G+R)$         | 0.82 | 0.64  |
| Excess of green                          | ExG   | $2G-R-B$            | 0.77 | 0.54  |
| Triangular Greenness Index               | TGI   | $G-(0.39R)-(0.61B)$ | 0.74 | 0.51  |
| Visible-band Difference Vegetation Index | VDVI  | $(2G-R-B)/(2G+R+B)$ | 0.82 | 0.64  |

### 3.4 Análises multivariadas e detecção de outliers

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados e investigar a separabilidade espectral entre amostras de copa e de entorno para o índice VDVI. A detecção de valores atípicos (outliers) foi realizada exclusivamente nas amostras de copa, utilizando o algoritmo DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*), aplicado no espaço bidimensional definido pelas duas primeiras componentes principais (Figura 2f).

Os parâmetros do DBSCAN ( $\epsilon = 1,8$ ; número mínimo de amostras = 2) foram definidos para identificar amostras espectralmente isoladas, sem impor suposições sobre a forma dos agrupamentos. As copas classificadas como ruído (DBSCAN = -1) foram consideradas outliers espectrais e removidas das análises subsequentes (cinco árvores foram excluídas – Figura 2g). Após essa etapa, uma nova ACP foi realizada para os valores de VDVI de 25 árvores e seus entornos.

### 3.5 Análise em nível de pixels

Após a remoção dos outliers, os valores de VDVI foram recalculados em nível de pixel para todas as amostras remanescentes de copa e de entorno. As distribuições dos valores foram analisadas utilizando três resoluções de classes: classes grossas (largura de 0,100) para comparação global, classes intermediárias (0,050) e classes finas (0,025) (Figura 2h), visando caracterizar o comportamento espectral detalhado. Os histogramas foram normalizados em porcentagem de pixels para copas e entornos, permitindo a comparação direta entre as classes.

### 3.6 Estimativa de incerteza via bootstrap

Para quantificar a incerteza nas frequências das classes, foi empregado um método de bootstrap não paramétrico. Para cada classe, os valores de pixel foram reamostrados com reposição (300 iterações), estimando-se a frequência média e os intervalos de confiança de 95%. A amostragem bootstrap foi limitada a um máximo de 30.000 pixels por classe, a fim de evitar sobrecarga computacional sem comprometer a estrutura das distribuições. Esse método não assume normalidade e é particularmente adequado para dados espectrais de alta dimensionalidade (Figura 2i).

### 3.7 Comparação estatística entre copas e entornos e definição da assinatura espectral de *Mauritia flexuosa*

As diferenças entre as distribuições VDVI das copas e dos entornos foram avaliadas por meio de testes estatísticos não paramétricos complementares: o teste de Kolmogorov–Smirnov, para avaliar diferenças globais nas distribuições; o teste de Mann–Whitney U, para comparar as medianas; e o Delta de Cliff, para estimar o tamanho do efeito e quantificar a magnitude da separação entre as distribuições. Todos os testes foram realizados com valores VDVI aleatoriamente subamostrados ( $n = 1.000$  por classe), garantindo comparabilidade balanceada.

## 4. RESULTADOS

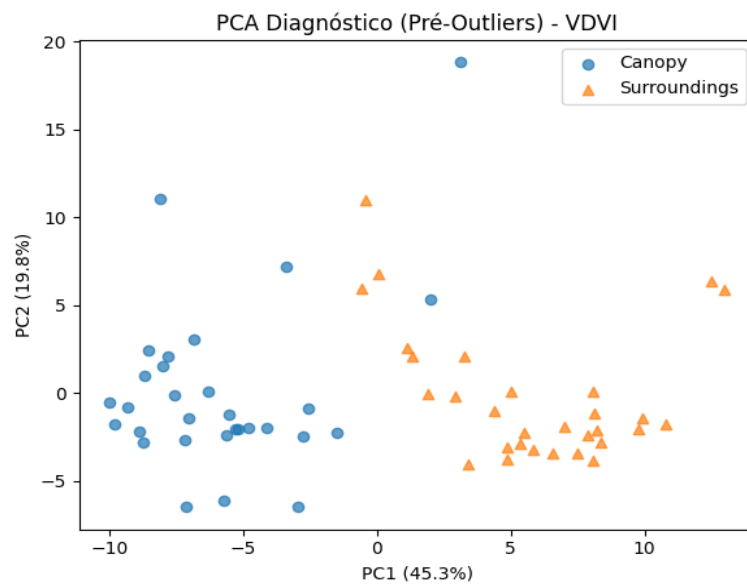
### 4.1 Estrutura multivariada e detecção de valores atípicos

A ACP aplicada ao conjunto completo de dados revelou uma estrutura multivariada clara, separando os pixels das copas de *Mauritia flexuosa* dos pixels de fundo e entorno para o VDVI. As duas primeiras componentes principais explicaram conjuntamente mais de 64% da

variância total, indicando que os descritores espectrais extraídos das imagens RGB capturaram as principais fontes de variabilidade do conjunto de dados (Figura 3).

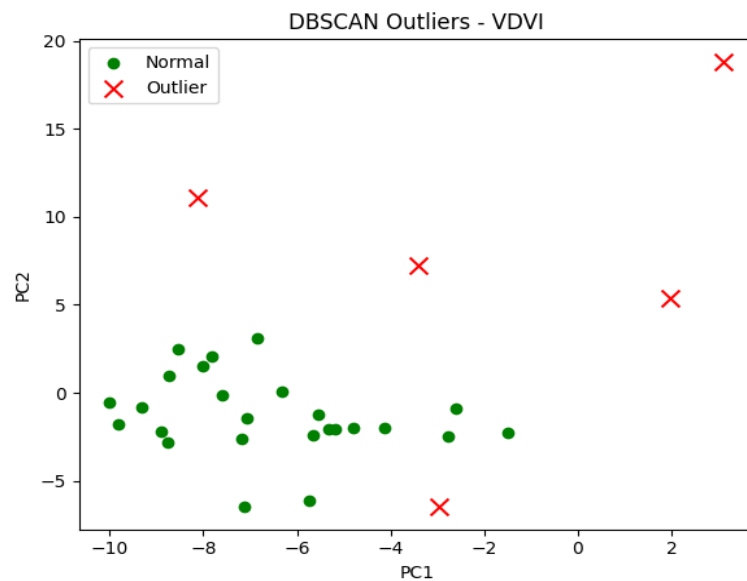
O algoritmo DBSCAN, aplicado no espaço da ACP, identificou com sucesso um pequeno subconjunto de copas como outliers espectrais (Figura 4). Essas amostras apresentaram isolamento no espaço de atributos e foram removidas das análises subsequentes para evitar vieses associados a condições anômalas de iluminação, sombras ou pixels mistos.

**Figura 3** - Análise de componentes principais para copas e entornos de *Mauritia flexuosa* (buriti) para o índice de vegetação VDMI.



Fonte: Próprios autores (2026).

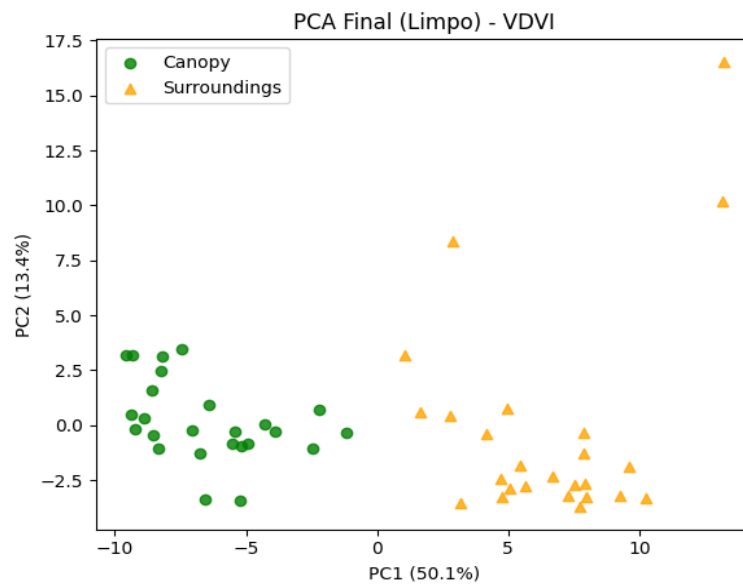
**Figura 4** - *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN) aplicada a ACP para a detecção de copas consideradas outliers para o índice de vegetação VDMI.



Fonte: Próprios autores (2026).

Após a remoção dos outliers, a ACP final revelou uma separação mais pronunciada entre copas e entornos, bem como uma redução da dispersão intraclasse das copas (Figura 5). O primeiro componente explicou aproximadamente 50% da variação dos dados, enquanto a segunda componente respondeu por cerca de 13,4%. Os diagramas de dispersão evidenciaram um agrupamento compacto das amostras de copa, contrastando com a maior heterogeneidade espectral observada nas áreas de entorno.

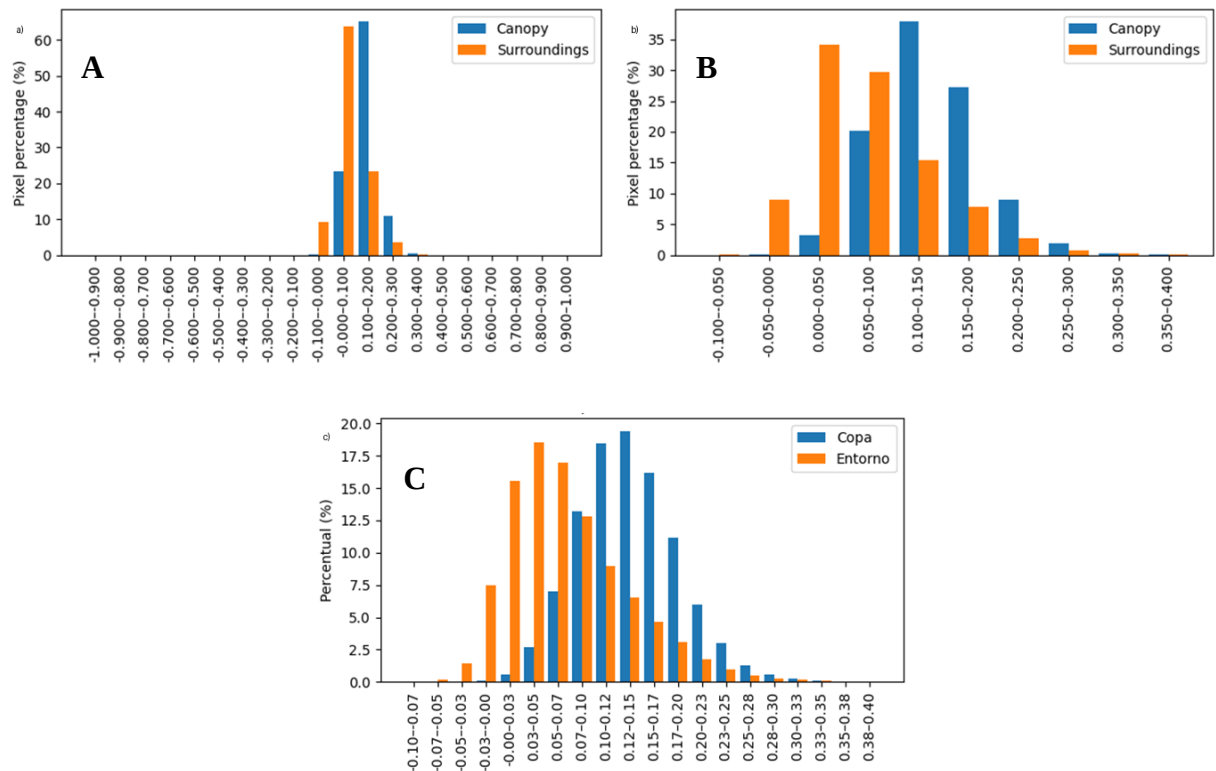
**Figura 5** - ACP dos pixels de copa e entorno com base no índice VDMI, considerando a base de dados sem a presença de outliers.



Fonte: Próprios autores (2026).

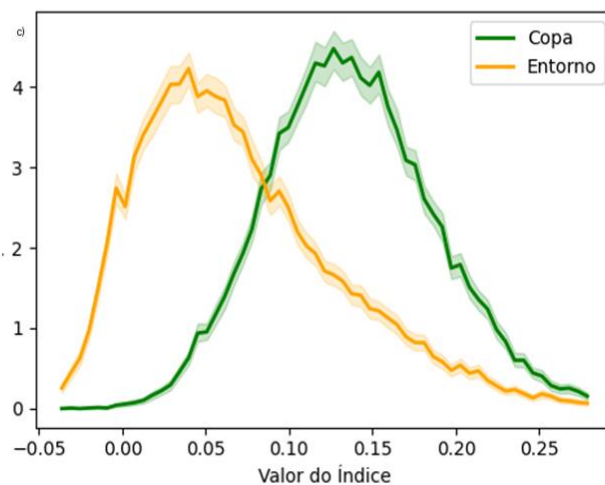
Para a definição de qual histograma representaria a assinatura espectral das copas das árvores, foram testados intervalos de classes de 0.100, 0.050 e 0.025 (Figura 6). Foi definido a utilização do histograma com intervalos a cada 0.025 (Figura 6c) para representar a variação de número de pixels dentro das classes do buriti. A Figura 7 expressa como a distribuição percentual de pixels por classe. A análise revelou padrões distintos entre copa e entorno para os três índices avaliados.

**Figura 6** - Histograma de frequência de pixels para copa e entorno VDMI.



**Legenda:** (a) Histograma considerando todo o intervalo de valores do índice, com classes de 0,100; (b) Detalhamento da faixa central do índice, com classes de 0,050; (c) Detalhamento de uma faixa específica do índice, com classes de 0,025, evidenciando a distribuição de pixels entre as classes copa (canopy) e entorno (surroundings). Fonte: Próprios autores (2026).

**Figura 7** - Histograma de frequências para o numero de pixels em cada classe para o VDMI para copas (verde) e áreas de entorno (laranja) para classes espectrais a cada 0,025 valores do pixel.



Fonte: Próprios autores (2026).

A continuidade das curvas que conectam os topos das barras dos histogramas evidencia a coerência espectral das copas de *Mauritia flexuosa*. As faixas sombreadas ao redor das curvas representam os intervalos de confiança de 95% obtidos via bootstrap, os quais apresentaram sobreposição limitada entre copas e entornos na maior parte da faixa dos índices, fornecendo forte evidência visual e estatística de capacidade de distinção entre copas e seus entornos.

Os testes estatísticos confirmaram a separação observada visualmente. O teste de *Kolmogorov–Smirnov* indicou que a distribuição de VDVI para copas e entornos são significativamente diferentes ( $p < 0,001$ ). De forma semelhante, o teste de *Mann–Whitney U* revelou diferenças altamente significativas na tendência central entre os grupos ( $p < 0,001$ ).

A magnitude dessa diferença foi quantificada pelo Delta de Cliff, que indicou tamanho de efeito elevado. O poder de separação observado para o VDVI foi considerado elevado (Delta de Cliff = 0,640,  $p < 0,001$ ). Esses resultados demonstram que a separação não é apenas estatisticamente significativa, mas também ecologicamente relevante, refletindo um contraste consistente nas propriedades espectrais relacionadas ao verdor entre as copas de *Mauritia flexuosa* e o ambiente ao redor quando utilizamos o índice VDVI.

## 5. DISCUSSÃO

Os resultados indicam que índices de vegetação derivados de imagens RGB obtidas por VANT são capazes de diferenciar copas de *Mauritia flexuosa* da vegetação circundante. Para uma melhor definição dessas diferenças foi necessário uma interpretação inicial dos possíveis melhores índices a serem considerados (Tabela 1) e eliminar valores atípicos (outliers) para aumentar a consistência do padrão de dados de valores extraídos. Após as análises realizadas pela distribuição pixel a pixel, o índice VDVI apresentou elevado diferenciação em frequência de pixels por classes de 0.025 de tamanho.

### 5.1 Estrutura multivariada e robustez do padrão: ACP, coerência intraclasse e controle de valores atípicos

A ACP aplicada ao conjunto indicou que os dois primeiros componentes explicaram mais de 64% da variância total, logo parte substancial da informação útil para distinguir copa e entorno está concentrada em um espaço reduzido de dimensões (Lillesand, Kiefer e Chipman, 2015). Assim, o uso da ACP como ferramenta exploratória para investigação da estrutura multivariada dos dados e para identificação de padrões dominantes no espaço de atributos pode ser incentivado para estudos sobre a distinção de elementos na paisagem (Chicati, 2019).

A variabilidade observada na ACP foi diretamente relacionada às diferenças físicas no comportamento espectral dos alvos, copas e entorno. Diferentes alvos da superfície terrestre apresentam respostas espectrais distintas em função do balanço entre absorção, refletância e transmissão da radiação incidente, o que fundamenta a utilização de combinações de bandas e índices (Novo, 2008). Além disso, a vegetação tende a absorver mais no vermelho e no azul e a refletir relativamente mais no verde, além de apresentar variações condicionadas pela estrutura do dossel, conteúdo de pigmentos e condições do alvo (Lillesand, Kiefer e Chipman, 2015).

Nesse contexto, a ACP funcionou como um mecanismo de organização da variabilidade dominante nos índices, permitindo identificar os padrões que mais contribuíram para a diferenciação entre copa e entorno. Esse aspecto é relevante, pois imagens RGB obtidas por VANT podem ser influenciadas por variações de iluminação, sombras e efeitos de fundo, especialmente em paisagens heterogêneas como veredas (Aasen e Bolten, 2018). Como forma de amenizar esse problema, procedeu-se à padronização dos horários de voo, concentrando as aquisições no intervalo de menor incidência de sombras (10h–14h), com o objetivo de reduzir esse componente de variabilidade. Ainda assim, apesar das fontes de ruído, observa-se um sinal consistente que diferencia copa e entorno.

Essa necessidade de reduzir interferências externas e capturar padrões dominantes também foi evidenciada por Letsoin et al. (2022), que ao trabalhar com imagens RGB obtidas por VANT para reconhecimento da palmeira *Metroxylon sagu*, destacaram como a heterogeneidade do ambiente, a presença de espécies morfológicamente semelhantes e variações de iluminação impactam diretamente o desempenho dos modelos de classificação. Mesmo ao se utilizar redes neurais profundas e pré-treinadas como a SqueezeNet, AlexNet e ResNet-50, a variabilidade visual causada por sobreposição de copas, agrupamentos naturais e diferenças estruturais entre indivíduos exige estratégias consistentes de tratamento dos dados. Nesse sentido, assim como observado no presente estudo, a identificação de padrões dominantes dentro de um espaço multivariado representa uma etapa fundamental para evidenciar que o padrão espectral do alvo persiste mesmo sob influência de ruído ambiental.

Ao retirar esses casos, a ACP final exibiu uma separação mais pronunciada entre copa e entorno com redução da dispersão intraclasse das copas, com PC1 explicando ~50,0% e PC2 ~13,4%. Isso aponta que, para o Buriti, existe um conjunto mais homogêneo de pixels em VDVI relativamente estável com menor variância interna em relação ao restante da paisagem.

Adicionalmente, a identificação de copas de *Mauritia flexuosa* e de outras palmeiras em ambientes tropicais depende da integração entre segmentação adequada e extração de

atributos geométricos e métricas texturais derivadas das bandas RGB (Casapia et al., 2020). Em contextos onde a paisagem apresenta predomínio de vegetação verde, a distinção espectral isolada tende a ser menos eficiente, exigindo a incorporação de informações estruturais para reduzir ambiguidades entre espécies com morfologia semelhante. O entorno das copas é composto majoritariamente por gramíneas, herbáceas e arbustos, além de porções de solo exposto e sombra, configurando um mosaico estruturalmente heterogêneo (Borges, 2018). Essa composição pode influenciar diretamente os valores dos índices, ampliando a variabilidade espectral do entorno e, conseqüentemente, impactando a separação estatística observada entre copa e paisagem. Assim, parte do desempenho diferencial dos índices pode estar associada não apenas às características intrínsecas da copa do buriti, mas também à complexidade estrutural e composicional do fundo analisado. Escolher épocas do ano mais secas e com maior separabilidade visual entre árvores e gramíneas podem facilitar a separação das mesmas.

A escolha de múltiplas resoluções de classes (0,100; 0,050; 0,025) e a seleção final de 0,025 para representar a assinatura espectral demonstrou que classes mais finas aumentam a capacidade de capturar detalhes da distribuição e deslocamentos. A presença de intervalos de confiança com sobreposição limitada na maior parte do domínio dos índices reforça que o padrão extraído não é apenas um artefato da amostragem, mas persiste sob reamostragem e, portanto, apresenta estabilidade inferencial. Recomendamos o uso de intervalos de 0,025 para os índices avaliados caso a intenção do estudo for à distinção de árvores, gramíneas, sombras e solo via índice de vegetação RGB.

## **5.2 Desempenho de VDVI a partir das distribuições pixel a pixel e implicações do espectro visível para assinatura de copas**

Os resultados indicam que VDVI apresentou elevado de diferenciação entre copa e entorno com valores de Delta de Cliff superiores a 0.6. Delta de Cliff representa uma medida de magnitude baseada na dominância entre distribuições e pode ser compreendido como o grau de não sobreposição entre dois grupos, permitindo avaliar a intensidade da diferença além da simples significância estatística (Meissel e Yao, 2024). Nesse sentido, valores mais elevados do Delta de Cliff indicam maior probabilidade de que uma observação de um grupo apresente magnitude superior à de uma observação do outro grupo, refletindo separação estrutural entre as distribuições. Assim, os resultados obtidos reforçam que VDVI apresenta distinção consistente entre copa e entorno.

Diante disso, em ambientes naturais, a diferença entre uma copa bem definida e um entorno composto por múltiplos elementos pode se manifestar como variação sistemática no

excesso de verde, refletindo-se em maior estabilidade na separação entre classes. Outros estudos têm demonstrado que o VDVI apresenta maior robustez na discriminação vegetação/não vegetação, alcançando valores de Kappa superiores a 0,84 e acurácia global acima de 92%. (Wang et al., 2025). Além disso, a formulação do VDVI, ao normalizar a diferença entre os canais verde e vermelho incorporando também o azul, reduz a interferência do brilho do solo e estabiliza o processo de segmentação em cenários com múltiplos tipos vegetais. Esses resultados corroboram a ideia de que índices que enfatizam o verde relativo tendem a apresentar maior consistência quando aplicados em paisagens heterogêneas, como observado no presente estudo.

Ademais, em ambientes com elevada densidade foliar, a resposta espectral pode se aproximar de um limite de saturação, reduzindo a sensibilidade do índice a variações adicionais na estrutura do dossel ou no conteúdo de pigmentos. A saturação, ou pureza espectral, relaciona-se ao intervalo de comprimentos de onda em torno do comprimento de onda médio no qual a energia é predominantemente refletida ou transmitida; valores elevados associam-se a cores mais puras, enquanto valores baixos indicam mistura de comprimentos de onda, resultando em tons mais apagados. Nessas condições, variações sutis na vegetação podem não ser plenamente capturadas por índices derivados exclusivamente das bandas visíveis (Crósta, 1992).

Os resultados dos testes estatísticos reforçaram que a separação observada entre copa e entorno não ocorreu ao acaso. O teste de Kolmogorov–Smirnov indicou diferenças significativas entre as distribuições ( $p < 0,001$ ), evidenciando que os conjuntos de dados não compartilham o mesmo comportamento probabilístico. Esse teste baseia-se na comparação entre as funções de distribuição empíricas de duas amostras, permitindo avaliar se os grupos apresentam padrões estatísticos equivalentes ou distintos (Pérez, 2018). Assim, a análise das distribuições empíricas de copa e entorno confirmou diferenças consistentes entre os grupos, sustentando a separação identificada nas análises espectrais.

Além disso, o teste de Mann–Whitney U reforçou a distinção entre os grupos ao indicar diferença estatisticamente significativa ( $p < 0,001$ ), sugerindo deslocamento nos valores do índice entre copa e entorno. Trata-se de um teste não paramétrico utilizado para comparar dois grupos independentes, fundamentado na ordenação conjunta das observações e na análise das posições relativas ocupadas por cada grupo na sequência combinada (Crippa, 2006). O procedimento considera as magnitudes observadas quando as amostras são dispostas em ordem crescente, permitindo identificar desvios em relação ao comportamento esperado sob a hipótese de distribuições idênticas (Pérez, 2018). Nesse contexto, a predominância sistemática de valores mais elevados em um dos grupos indica que a distinção observada não

se limita ao formato geral das distribuições, mas também se expressa na organização interna dos valores.

Diante disso, o uso combinado desses testes foi apropriado para dados de índice de vegetação em pixel-level, que frequentemente não seguem normalidade e podem ser assimétricos ou multimodais. Em conjunto com o bootstrap, isso sustenta uma interpretação robusta: VDVI e ExG, nas condições de aquisição e processamento adotadas, são descritores mais eficazes para compor a assinatura do buriti do que o TGI, embora o TGI ainda capture contraste relevante e contribua para o quadro multivariado.

### **5.3 Característica de copas e separação árvore–paisagem**

No cenário internacional, dois grandes caminhos têm sido adotados para separar árvores da paisagem circundante utilizando imagens VANT-RGB. O primeiro baseia-se na extração de atributos espectrais e estruturais, como índices de vegetação no visível, métricas da textura e estatísticas de cor, combinados a classificadores supervisionados tradicionais (Dong et al., 2025). O segundo fundamenta-se em abordagens de visão computacional, voltadas à detecção e segmentação automática de copas individuais em imagens RGB de alta resolução (Weinstein et al., 2019).

Estudos demonstram que, mesmo com câmeras RGB embarcadas, a extração de índices no visível, como NGRDI, RGRI e MGRVI, aliada à classificação da cena com base em estatísticas espaciais de cor, pode representar adequadamente componentes-alvo na imagem, permitindo o isolamento da área de interesse e sua relação com variáveis de campo. Nessas condições, a área de cobertura classificada apresentou alta correlação com o número de flores, e os índices derivados do visível evidenciaram forte associação com a variável de referência (Wan et al., 2018). Outras evidências indicam que o desempenho dessa abordagem se amplia quando informações espectrais e texturais são integradas. A combinação de índices espectrais com métricas de textura e aplicação de modelos multivariados resulta em desempenho superior ao uso isolado de índices, demonstrando que a textura captura variações estruturais do dossel que a informação espectral isolada não representa de forma suficiente (Zhang et al., 2022).

No conjunto de abordagens voltadas à detecção e segmentação automática de copas, reconhece-se que imagens RGB obtidas por VANT, embora apresentem limitação espectral, costumam oferecer resolução espacial muito elevada ( $\text{pixel} < 10 \text{ cm}$ ), o que favorece a exploração de atributos estruturais, como forma, dimensão e textura, além de padrões finos associados à arquitetura da copa. Essa característica permite a localização e a contagem de indivíduos arbóreos com base em imagens de altíssima resolução; contudo, tais métodos

frequentemente produzem resultados orientados à identificação do objeto como unidade, sem avançar para o delineamento preciso do contorno da copa ou para a discriminação taxonômica entre espécies (Ferreira et al., 2020).

De modo semelhante, aplicações voltadas à detecção de copas arbóreas têm adotado fluxos metodológicos que integram dados RGB e LiDAR, com desempenho avaliado por métricas como *recall* e *precision*. Entretanto, esse tipo de abordagem produz, em geral, caixas delimitadoras que apenas circunscrevem o objeto, sem necessariamente recuperar seu contorno detalhado ou solucionar, de forma isolada, a identificação taxonômica da espécie (Weinstein et al., 2019). Em cenários nos quais o objetivo consiste em diferenciar a copa de seu entorno com maior robustez interpretativa, descritores derivados do espectro visível, como índices de vegetação e métricas associadas, permanecem relevantes, sobretudo quando se busca evidenciar diferenças consistentes entre classes em paisagens estruturalmente heterogêneas (Ferreira et al., 2020; Weinstein et al., 2019).

## **5.4 Limitações e aprendizados**

### **5.4.1 Limitações do domínio espectral (RGB) e variabilidade de iluminação**

Embora a análise tenha demonstrado separação consistente entre copas e entorno com VDVI, a ausência de bandas no infravermelho próximo e no SWIR pode restringir a transferência do método para cenários nos quais o contraste no visível seja reduzido, como ambientes dominados por vegetação com resposta cromática semelhante ou baixa heterogeneidade estrutural. Evidências indicam que modelos baseados exclusivamente em atributos espectrais tendem a apresentar desempenho inferior àqueles que incorporam métricas texturais, sugerindo que a informação radiométrica isolada não representa de forma suficiente variações estruturais do dossel. O desempenho da modelagem também depende da variabilidade espacial da cena e das condições de aquisição da imagem, o que reforça a necessidade de controle radiométrico e padronização quando se busca aplicação em maior escala ou em diferentes períodos sazonais (Zhang et al., 2022).

### **5.4.2 Dependência do delineamento de copa e risco de pixels mistos**

A delimitação manual das copas constitui uma escolha metodológica válida e recorrente em estudos com imagens de alta resolução, ainda que dependa da interpretação do operador e possa introduzir variações relacionadas à inclusão ou exclusão de pixels de borda. A remoção de outliers por meio do algoritmo DBSCAN fundamenta-se no critério de densidade adotado pelo método, que classifica como ruído as observações situadas em regiões

de baixa densidade no espaço de atributos. Pontos que não atendem ao limiar mínimo de densidade não são incorporados aos agrupamentos principais, permanecendo isolados em relação às estruturas centrais do conjunto de dados (Goulart, 2024). A exclusão dessas copas atípicas contribui para reduzir a dispersão intraclasse e ampliar a consistência da separação entre copa e entorno.

#### 5.4.3 Importância e replicabilidade para Cerrado e veredas.

No contexto do Cerrado e das veredas, a relevância da separação árvore–paisagem é dupla. Primeiramente, trata-se de um bioma caracterizado por elevada heterogeneidade estrutural, configurando um mosaico de gramíneas, herbáceas, arbustos e árvores, o que dificulta a distinção entre componentes arbóreos e os demais elementos da paisagem (Ribeiro e Walter, 1998). Em segundo lugar, destaca-se a importância ecológica do buriti nesse sistema, por ser uma das palmeiras com ampla distribuição no território nacional e considerada símbolo do Cerrado, cuja ocorrência está associada à presença de água nas formações florestais conhecidas como veredas (Souza e Viana, 2018). Nesse sentido, o mapeamento de veredas torna-se estratégico, pois métodos de baixo custo baseados em VANT-RGB e índices derivados do visível podem subsidiar inventários rápidos, detecção de alterações na paisagem e priorização de áreas para monitoramento, especialmente em contextos nos quais imagens multiespectrais de alta resolução são economicamente inviáveis.

#### 5.4.4 Aprendizado do estudo

O índice de vegetação foi eficiente na separação copa/entorno devido a predominância do canal verde, o principal na discriminação de vegetação em imagens RGB. Outras combinações como o ExG e o GCC também ampliam o contraste entre material vegetal e superfícies de fundo, inclusive sob variações de solo e iluminação (Woebbecke et al., 1995) e devem ser passíveis de serem utilizados na separação entre espécies arbóreas e a paisagem. Índices derivados das bandas RGB podem apresentar respostas distintas à condição fisiológica da vegetação e serem sensível à intensidade do verde na cena (Silva, Elias e Rosário, 2022) logo, padronizações de horário e épocas de voo devem ser necessárias em comparações. Nesse contexto a elevada magnitude de diferença entre copa e entorno observada para VDVI reforça a interpretação de que índices que amplificam o excesso de verde tendem a produzir separações consistentes entre classes quando o contraste cromático é predominante.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A diferenciação de copas de *Mauritia flexuosa* em ambientes de vereda no Cerrado impõe desafios decorrentes da heterogeneidade estrutural da paisagem e da limitação espectral inerente a sensores RGB. Nesse contexto, a utilização de imagens obtidas por VANT associada à extração pixel a pixel do índice VDVI permitiu investigar a existência de uma faixa espectral distinta entre copas e seu respectivo entorno. A análise combinou procedimentos estatísticos univariados e multivariados, incluindo Análise de Componentes Principais, testes não paramétricos de comparação de distribuições e estimativa de magnitude de efeito, além da aplicação do algoritmo DBSCAN para identificação de observações atípicas. Esse conjunto metodológico possibilitou examinar, de forma integrada, tanto a organização estrutural dos dados quanto o comportamento diferencial dos índices entre copa e entorno.

No que tange aos objetivos propostos, verificou-se que foram alcançados de maneira consistente. A capacidade discriminatória dos índices RGB foi confirmada por diferenças estatisticamente significativas entre as classes analisadas, evidenciando que a separação copa–entorno não ocorreu ao acaso. Os objetivos específicos também foram atendidos, uma vez que se identificou a estrutura multivariada dominante dos dados, avaliou-se comparativamente o desempenho dos índices e demonstrou-se, por meio de medidas de efeito, a magnitude da distinção observada entre as distribuições.

Os resultados indicaram que VDVI apresentou alto poder de diferenciação entre copas e entornos, conforme evidenciado pelos valores do Delta de Cliff ( $\approx 0,64$ ). Esse comportamento sugere que índices que enfatizam a predominância do canal verde em relação aos canais vermelho e azul podem produzir separação consistente quando o contraste cromático é dominante. A análise das distribuições revelou ainda que os valores associados às copas apresentaram maior concentração em intervalos específicos, indicando relativa homogeneidade intraclasse quando comparadas ao entorno, cuja variabilidade é ampliada pela presença de gramíneas, herbáceas, solo exposto e zonas de transição.

A Análise de Componentes Principais demonstrou que a maior parte da variabilidade relevante para distinção entre classes concentrou-se nos primeiros componentes, reforçando a existência de um padrão espectral consistente mesmo sob condições de heterogeneidade ambiental. A remoção de outliers via DBSCAN contribuiu para reduzir a dispersão interna das copas e aumentar a estabilidade da separação, evidenciando a importância do controle de ruído e de observações periféricas em análises multivariadas aplicadas a imagens RGB.

Dessa forma, o estudo demonstrou relevância de investigar metodologias baseadas no visível para aplicações em ambientes complexos como o Cerrado e suas veredas. A possibilidade de caracterizar copas de buriti por meio de índices RGB de baixo custo amplia o potencial para inventários rápidos, monitoramento ambiental e apoio à gestão de áreas úmidas, especialmente em contextos em que sensores multiespectrais de maior custo não estão disponíveis. Além de contribuir metodologicamente para a discussão sobre separação árvore–paisagem, o estudo reforça a importância de aprofundar pesquisas que integrem análise estatística, modelagem multivariada e interpretação ecológica na caracterização espectral de espécies arbóreas.

## 7. REFERÊNCIAS

AASEN, Helge; BOLTEN, Andreas. Multi-temporal high-resolution imaging spectroscopy with hyperspectral 2D imagers: from theory to application. **Remote Sensing of Environment**, v. 205, p. 374–389, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425717305072> Acesso em: 12 fev 2026,

ALMEIDA, Jefferson William Lopes. **Métodos de sensoriamento remoto no mapeamento de veredas na APA Rio Pandeiros**. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/51ac28be-8d7a-4765-8ffc-17d0ffa4cb9d> Acesso em: 10 fev 2026.

AMARAL, Raquel Dias de Aguiar Moraes et al. Ferramentas para gestão da floresta urbana. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 10, n. 1, p. e18131-e18131, 2021. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/18131> Acesso em: 10 fev 2026.

ATAÍDE, Marcos Vinicius Rezende de. **Uso de drone para identificar a dominância de gramíneas invasoras e vegetação nativa em áreas de restauração do Cerrado**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2024. Disponível em: [https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNB\\_16793aff2d0e51340d9f3b4bac42e8d1](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNB_16793aff2d0e51340d9f3b4bac42e8d1) Acesso em: 12 fev 2026.

BARBOSA, Glauber Stefan. **Uso de atributos do solo na identificação de limites para preservação de veredas no Mato Grosso do Sul**. 2016. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Sistemas de Produção) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/f12619d6-16f9-40db-94b6-c10aff37cf62/content> Acesso em: 26 abr 2026.

BORGES, Mariley Gonçalves. **Fitofisionomias do Cerrado e as áreas potenciais de ocorrência do pequi (Caryocar brasiliense) e buritizeiro (Mauritia flexuosa) no norte de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Montes Claros, Montes Claros, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unimontes.br/handle/1/648> Acesso em: 6 fev 2026.

BORGES, Mariley Gonçalves; RODRIGUES, Hérick Lyncon Antunes; LEITE, Marcos Esdras. Sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento do Cerrado no Norte de Minas Gerais

e suas fitofisionomias. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 58, p. 819-835, 2019. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/19545> Acesso em: 11 fev 2026.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, **Código Florestal**. Brasília, DF: Presidência da República, 2012. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm) Acesso em: 26 abr 2026.

CASAPIA, Ximena Tagle et al. Identifying and quantifying the abundance of economically important palms in tropical moist forest using UAV imagery. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 9, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/1/9> Acesso em: 5 fev 2026.

CHICATI, Mônica Sacoto. **Geração de modelos para a quantificação dos teores de atributos físicos, mineralógicos e carbono orgânico com sensores hiperespectrais em diferentes níveis de aquisição de dados**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/6463> Acesso em: 6 fev 2026.

CLIFF, Norman. Dominance statistics: Ordinal analyses to answer ordinal questions. **Psychological Bulletin**, v.114, n.3, 494–509, 1996.

CRIPPA, Maria Margarida. **Monitoramento estatístico da qualidade da água de sistemas de distribuição**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2006. Disponível em: <https://posgraduacao.ufms.br/portal/trabalho-arquivos/download/16> Acesso em: 6 fev 2026.

CRÓSTA, Álvaro Penteado. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Ed. rev. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1992.

DAMASCENO, Carlos Eduardo; MARTINS, Alécio Perini. Viabilidade do Uso de Drones no Monitoramento de Cultivos de Soja: Estudo Comparativo em Jataí-GO. **Sociedade & Natureza**, v. 37, p. e76004, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/RP3NKzBNQxhY68rZYLDfNXk/?lang=pt> Acesso em: 11 fev 2026.

DONG, Junliang et al. Vegetation extraction through UAV RGB imagery and efficient feature selection. **PLoS One**, v. 20, n. 5, p. e0322180, 2025. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0322180> Acesso em: 5 fev 2026.

FAWCETT, Tom. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, v.27, n.8, 861–874, 2006.

FERREIRA, Maria das Graças Rodrigues *et al.* Mauritia flexuosa (Buriti). In: CORADIN, Lidio; CAMILLO, Julcéia; VIEIRA, Ima Célia Guimarães (ed.). Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro – Região Norte. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, p. 1215–1226, 2022.

FERREIRA, Matheus Pinheiro et al. Individual tree detection and species classification of Amazonian palms using UAV images and deep learning. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p. 118397, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811272031166X> Acesso em: 6 fev 2026.

FRANCO, Paulo César; PIMENTA, Paloma Cristina; PELLI, Afonso. Veredas: caracterização, distribuição e importância. **Editora Impacto Científico**, p. 1290-1309, 2025. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/editoraimpacto/article/view/11569> Acesso em: 26 abr 2026.

GOULART, Jorge Luiz de Jesus. **Árvore de decisão por agrupamento com DBSCAN aproximativo**. Tese (Doutorado em Ciências Computacionais e Modelagem Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Computacionais e Modelagem Matemática, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/bitstream/1/23352/5/Tese-%20Jorge%20Luiz%20de%20Jesus%20Goulart%20-%202024%20-%20Completa.pdf> Acesso em: 6 fev 2026.

LETSOIN, Sri Murniani Angelina et al. Recognition of sago palm trees based on transfer learning. **Remote Sensing**, v. 14, n. 19, p. 4932, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/19/4932> Acesso em 6 fev 2026.

LILLESAND, Thomas M.; KIEFER, Ralph W.; CHIPMAN, Jonathan W. **Remote sensing and image interpretation**. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

MEISSEL, Kane; YAO, Esther S. Using Cliff's delta as a non-parametric effect size measure: an accessible web app and R tutorial. **Practical Assessment, Research, and Evaluation**, v. 29, n. 1, 2024. Disponível em: <https://openpublishing.library.umass.edu/pare/article/id/1977/> Acesso em: 5 fev 2026.

MENDES, Willians Ribeiro et al. Sensoriamento Remoto Aplicado ao Monitoramento Agrícola e Ambiental. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 6, p. e4874-e4874, 2025. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/4874> Acesso em: 12 fev 2026.

NOVO, Evllyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

PÉREZ, Fernando Lucambio. *III. Procedimentos em k amostras*. Curitiba: Departamento de Estatística, Universidade Federal do Paraná, 2018. Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~lucambio/Nonparam/NparamIII.html> Acesso em: 5 fev 2026.

REX, Franciél Eduardo; KÄFER, Pâmela Suélen; CORTE, Ana Paula Dalla. VANTs: potenciais para a engenharia florestal. In: PIRES, Plínio Ferreira. **Geociências, Sociedade e Sustentabilidade**. Piracanjuba-GO: Editora Conhecimento Livre, p. 101–120, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Victor-Oliveira-Henrique/publication/341109480\\_DIALOGOS\\_ENTRE\\_A\\_EDUCACAO\\_AMBIENTAL\\_E\\_A\\_GESTAO\\_ESCOLAR/links/5fb32fb0a6fdcc9ae05b0cf1/DIALOGOS-ENTRE-A-EDUCACAO-AMBIENTAL-E-A-GESTAO-ESCOLAR.pdf#page=124.08](https://www.researchgate.net/profile/Victor-Oliveira-Henrique/publication/341109480_DIALOGOS_ENTRE_A_EDUCACAO_AMBIENTAL_E_A_GESTAO_ESCOLAR/links/5fb32fb0a6fdcc9ae05b0cf1/DIALOGOS-ENTRE-A-EDUCACAO-AMBIENTAL-E-A-GESTAO-ESCOLAR.pdf#page=124.08) Acesso em: 11 fev 2026.

RIBEIRO, José Felipe; WALTER, Bruno Machado Teles. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (ed.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, p. 89–152, 1998.

ROMANO, Jeanine et al. Appropriate statistics for ordinal level data: Should we really be using t-test and Cohen'sd for evaluating group differences on the NSSE and other surveys. In: **annual meeting of the Florida Association of Institutional Research**. 2006.

SAMPAIO, H. S. et al. Comparação entre índices de vegetação obtidos por imagens aéreas com veículo aéreo não tripulado (VANT) e satélite. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**, v. 14, n. 2, p. 111-124, 2020. Disponível em: <https://seer.cloud.prodb.com.br/BIOENG/article/view/888> Acesso em: 11 fev 2026.

SILVA, Matheus Henrique; ELIAS, Adão Robson; ROSÁRIO, Leticia Laura. Análise da cultura da soja a partir de índices de vegetação (ExG–GLI–TGI–VEG) advindos de imagens RGB obtidas com ARP. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 10, n. 2, p. 140-154, 2022. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/15042> Acesso em: 7 fev 2026.

SOUZA, Natália Francisca da Silva; VIANA, Deuzuita dos Santos Freitas. Aspectos Ecológicos E Potencial Econômico Do Buriti (*Mauritia flexuosa*). **AGRARIAN ACADEMY**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.5, n.9; p.535, 2018. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/Agrarian%20Academy/2018a/aspectos%20ecologicos.pdf> Acesso em: 07 fev 2026.

TAGLIARINI, Felipe de Souza Nogueira; RODRIGUES, Mikael Timóteo; RODRIGUES, Bruno Timóteo; BARROS, Ana Clara de; GARCIA, Yara Manfrin; CAMPOS, Sérgio. Índice radiométrico NDVI em área de preservação permanente obtido por meio de aeronave remotamente pilotada. **Irriga**, Botucatu, v. 26, n. 3, p. 717–731, 2021.

WAN, Liang et al. Combining UAV-Based Vegetation Indices and Image Classification to Estimate Flower Number in Oilseed Rape. **Remote Sensing**, v. 10, p. 1484, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/9/1484> Acesso em: 6 fev 2026.

WANG, Meng et al. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Plant Communities: Optimizing Visible Light Vegetation Index to Extract Multi-Species Coverage. **Plants**, v. 14, n. 11, p. 1677, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/14/11/1677> Acesso em: 7 fev 2026.

WANG, X.; WANG, M.; WANG, S.; WU, Y. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images. Nongye Gongcheng Xuebao / **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, vol. 31, n. 5, p. 152–159. 2015.

WEINSTEIN, Ben G. et al. Individual tree-crown detection in RGB imagery using semi-supervised deep learning neural networks. **Remote Sensing**, v. 11, n. 11, p. 1309, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/11/1309> Acesso em: 7 fev 2026.

WOEBBECKE, D. M.; MEYER, G. E.; VON BARGEN, K.; MORTENSEN, D. A. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE*, v. 38, n. 1, p. 259–269, 1995. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=27838&t=3&redir=&redirType> Acesso em: 6 fev 2026.

ZHANG, Youming et al. Combining spectral and textural information from UAV RGB images for leaf area index monitoring in kiwifruit orchard. **Remote Sensing**, v. 14, n. 5, p. 1063, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/5/1063> Acesso em: 5 fev 2026.