POTENCIAL DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DA BANDA VISÍVEL E MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE A PARTIR DE IMAGENS DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA FENOTIPAGEM DE MILHO

### **GUILHERME GONÇALVES COSWOSK**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ DEZEMBRO – 2024

### POTENCIAL DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DA BANDA VISÍVEL E MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE A PARTIR DE IMAGENS DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA FENOTIPAGEM DE MILHO

**GUILHERME GONÇALVES COSWOSK** 

"Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal"

Orientador: Eliemar Campostrini Coorientador: Valter Jário de Lima

> CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ DEZEMBRO – 2024

# FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

| C842 | Coswosk, Guilherme Gonçalves.   |
|------|---|
|      | POTENCIAL DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DA BANDA VISÍVEL E MODELOS DIGITAIS DE<br>SUPERFÍCIE A PARTIR DE IMAGENS DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA<br>FENOTIPAGEM DE MILHO / Guilherme Gonçalves Coswosk Campos dos Goytacazes, RJ,<br>2024. |
|      | 142 f. : il.<br>Bibliografia: 100 - 119.  |
|      | Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense<br>Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2024.<br>Orientador: Eliemar Campostrini.<br>Coorientador: Valter Jário de Lima.         |
|      | <ol> <li>geoprocessamento. 2. sensoriamento remoto. 3. fenotipagem de alto rendimento. 4.<br/>estatística aplicada. 5. agricultura de precisão. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense<br/>Darcy Ribeiro. II. Título.</li> </ol>      |
|      | CDD - 630   |

### POTENCIAL DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DA BANDA VISÍVEL E MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE A PARTIR DE IMAGENS DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA FENOTIPAGEM DE MILHO

### **GUILHERME GONÇALVES COSWOSK**

"Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor Em Produção Vegetal"

Aprovada em 06 de dezembro de 2024

Comissão Examinadora:

Profa. Alessandra Lopes Braga Fonseca – (D.Sc., Engenharia Civil - Informações Espaciais) – IFES

Prof. Samuel Henrique Kamphorst (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas) – UENF

Prof. Messias Gonzaga Pereira – (Ph.D., Plant Breeding) – UENF

Prof. Valter Jário de Lima (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas) – UVA Coorientador

> Prof. Eliemar Campostrini (D.Sc., Fisiologia Vegetal) – UENF Orientador

#### AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi apoiada pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES, Brasil) e pela Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF, Brasil). Além disso, esta pesquisa foi realizada com o apoio da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ, Brasil, E-26/200.957/2022, e E-26/200.836/2021). Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Brasil, 304470/2023-6). Agradeço ao Instituto Federal do Espírito Santo (IFES, Brasil) campus Nova Venécia pelo drone fornecido; ao Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal (LMGV) da Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF, Brasil) pelos equipamentos utilizados para avaliações fisiológicas e suporte da equipe; ao Comitê Baixo Paraíba do Sul e Itabapoana (CBHBPSI, Brasil) (Antonio Ednaldo Souza Oliveira) pelo equipamento GNSS RTK e suporte da equipe; a Vivane Mirian Lanhellas Gonçalves e Messias Gonzaga Pereira por concederem acesso ao experimento e aos dados morfoagronômicos; e à equipe da área experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro (PESAGRO-RIO, Brasil) (Itaocara) por fornecer o local do experimento e à equipe de apoio que cuidou do plantio.

# SUMÁRIO

| 1. | INTRODUÇÃO  | 16     |
|----|---|--------|
| 2. | REVISÃO DE LITERATURA   | 20     |
|    | 2.1. Milho e a ecofisiologia da planta  | 20     |
|    | 2.2. Fotogrametria  | 25     |
|    | 2.3. Sensoriamento Remoto   | 28     |
|    | 2.4. Fenotipagem  | 32     |
| 3. | MATERIAL E MÉTODOS  | 37     |
|    | 3.1. Material Vegetal, Condições de Cultivo e Delineamento Experimental       | 37     |
|    | 3.2. Avaliações com Índices de Vegetação                                      | 39     |
|    | 3.2.1. Avaliações RGB com VANT  | 39     |
|    | 3.2.2. Avaliação da Capacidade Fotossintética das Plantas, Estado Hídrico Fol | liar e |
|    | Pigmentos Foliares  | 43     |
|    | 3.2.3. Avaliação de Características Morfoagronômicas                          | 48     |
|    | 3.3. Avaliação de Altura de Planta  | 48     |
|    | 3.4. Avaliação de Cobertura Vegetal   | 49     |
|    | 3.5. Análise Estatística  | 50     |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO  | 52     |
|    | 4.1. Ortofotomosaicos   | 52     |
|    | 4.2. Índices de Vegetação   | 55     |
|    | 4.2.1. Variância de Quadrados Médios Usando o Teste F                         | 55     |
|    | 4.2.2. Teste de Tukey para Comparação das Médias                              | 61     |
|    | 4.2.3. Correlação de Pearson  | 67     |
|    | 4.2.4. Componentes Principais   | 75     |

| 4.3. Altura de Planta   | 79     |  |  |
|---|--------|--|--|
| 4.4. Cobertura Vegetal Verde  | 86     |  |  |
| 4.4.1. Cobertura Vegetal Verde sem corte por altura                   | 88     |  |  |
| 4.4.2. Cobertura Vegetal Verde com corte por altura                   | 92     |  |  |
| 4.4.3. Comparação entre métodos de cálculo de cobertura vegetal verde | 95     |  |  |
| 5. CONCLUSÕES   | 98     |  |  |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS  |        |  |  |
| APÊNDICES   |        |  |  |
| APÊNDICE A: DADOS CLIMATOLÓGICOS                                      | 121    |  |  |
| APÊNDICE B: BOXPLOTS DO CONJUNTO DE DADOS DAS VARIÁVEIS               | 123    |  |  |
| APÊNDICE C: POSICIONAMENTOS DE PARCELA TESTADOS                       | 125    |  |  |
| APÊNDICE D: DADOS DETALHADOS - ÍNDICES DE VEGETAÇÃO                   | 128    |  |  |
| APÊNDICE E: DADOS DETALHADOS - VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS                 | 133    |  |  |
| APÊNDICE F: DADOS DETALHADOS - ALTURA DE PLANTA                       | 136    |  |  |
| APÊNDICE G: DADOS DETALHADOS - COBERTURA VEGETAL SEM COR              | TE POR |  |  |
| ALTURA  | 137    |  |  |
| APÊNDICE H: DADOS DETALHADOS - COBERTURA VEGETAL COM COR              | TE POR |  |  |
| ALTURA  | 140    |  |  |

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático da localização da área de pesquisa.

Figura 2. (a) Mapa de distribuição das parcelas da área de estudo, dos pontos de controle em solo e dos pontos de verificação. (b) Imagens específicas dos pontos de controle em solo.

Figura 3. Diagrama da distribuição das missões de levantamento aéreo com drones sobre os estádios fenológicos das plantas.

Figura 4. (a) Diagrama destacando os blocos centrais (blocos 2 e 3). (b) Medição de campo com equipamento, mostrando a coleta de dados.

Figura 5. Ortofotomosaico do experimento.

Figura 6. Evolução da correlação entre índices de reflectância e rendimento de grãos.

Figura 7. Análise de Componentes Principais (PCA).

Figura 8. Etapas para processamento do MDS de 91 DAP (R2).

Figura 9. Modelo Digital de Superfície que representa altura de planta.

Figura 10. Etapas do processamento da Cobertura Vegetal.

Figura 11. Representação do índice VARI.

Figura A1. Valores climatológicos para cada dia após o plantio (DAP).

Figura A2. Boxplots do conjunto de dados das variáveis.

Figura A3. Posicionamento de parcela testados.

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Índices de vegetação extraídos das imagens RGB.

Tabela 2. Variáveis avaliadas utilizando o medidor portátil de clorofila e pigmentos foliares Dualex®.

Tabela 3. Variáveis avaliadas utilizando o fluorímetro Pocket PEA não modulado.

Tabela 4. Variáveis avaliadas utilizando o espectrômetro foliar CI710.

Tabela 5. Resumo da análise da variância de componentes RGB e índices de vegetação (VANT).

Tabela 6. Resumo da análise da variância das características morfoagronômicas avaliadas.

Tabela 7. Resumo da análise da variância das características fotossintéticas avaliadas.

Tabela 8. Teste de Tukey para comparação das médias dos índices e variáveis de vegetação RGB de VANT.

Tabela 9. Teste de Tukey para comparação das médias das variáveis morfoagronômicas.

Tabela 10. Correlação fenotípica entre variáveis morfoagronômicas e variáveis e índices RGB obtidos por VANT.

Tabela 11. Correlação fenotípica entre variáveis fenotípicas e variáveis e índices RGB de VANT.

Tabela 12. Análise da variância de quadrados médios em blocos aleatórios de altura de planta.

Tabela 13. Teste de Tukey para comparação das médias das alturas de planta.

Tabela 14. Correlação fenotípica entre altura média de planta.

Tabela 15. Resumo da análise da variância de cobertura vegetal sem corte por altura.

Tabela 16. Teste de Tukey para comparação das médias da cobertura vegetal sem corte por altura.

Tabela 17. Correlação fenotípica entre cobertura vegetal sem corte por altura e o rendimento de grãos.

Tabela 18. Resumo da análise da variância de cobertura vegetal com corte por altura.

Tabela 19. Teste de Tukey para comparação das médias da cobertura vegetal com corte por altura.

Tabela 20. Correlação fenotípica entre cobertura vegetal com corte por altura e o rendimento de grãos.

Tabela A1. Dados detalhados de índice de vegetação aos 34 DAP (V3–V4).

Tabela A2. Dados detalhados de índice de vegetação aos 91 DAP (R2).

Tabela A3. Dados detalhados de índice de vegetação aos 98 DAP (R3–R4).

Tabela A4. Dados detalhados de índice de vegetação aos 112 DAP (R4–R5).

Tabela A5. Dados detalhados de índice de vegetação aos 119 DAP (R5–R6).

Tabela A6. Dados detalhados de variáveis fisiológicas aos 98 DAP (R3-R4).

Tabela A7. Dados detalhados de variáveis fisiológicas aos 112 DAP (R4-R5).

Tabela A8. Dados detalhados de variáveis fisiológicas aos 119 DAP (R5–R6).

Tabela A9. Dados detalhados de altura de planta.

Tabela A10. Dados detalhados de cobertura vegetal sem corte por altura aos 19 (V2–V3) e 34 DAP (V3–V4).

Tabela A11. Dados detalhados de cobertura vegetal sem corte por altura aos 91 (R2) e 98 DAP (R3–R4).

Tabela A12. Dados detalhados de cobertura vegetal sem corte por altura aos 112 (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6).

Tabela A13. Dados detalhados de cobertura vegetal com corte por altura aos 19 (V2–V3) e 34 DAP (V3–V4).

Tabela A14. Dados detalhados de cobertura vegetal com corte por altura aos 91 (R2) e 98 DAP (R3–R4).

Tabela A15. Dados detalhados de cobertura vegetal com corte por altura aos 112 (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6).

### LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS

AP (metro): Altura de Planta

CV (%): Cobertura Vegetal Verde

DAP (dia): Dias Após o Plantio.

FAR: Fenotipagem de Alto Rendimento

IV: Índice de Vegetação.

MDS: Modelo Digital de Superfície.

R2 = grãos leitosos.

R3–R4 = grãos em formação.

R4–R5 = massa pastosa a massa dura.

R5–R6 = massa dura a maturidade fisiológica.

R6 = maturidade fisiológica.

RG (kg.ha-1): Rendimento de Grãos.

RGB: Red, Green, Blue (Vermelho, Verde, Azul).

V2–V3 = primeiras folhas verdadeiras.

V3–V4 = primeiros estádios vegetativos.

VANT: Veículo Aéreo Não Tripulado.

VARI: Índice de Resistência Atmosférica na região do Visível.

VE = Emergência Vegetativa.

VS = Semeadura.

#### RESUMO

COSWOSK; Guilherme Gonçalves; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; dezembro de 2024; POTENCIAL DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DA BANDA VISÍVEL E MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE A PARTIR DE IMAGENS DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA FENOTIPAGEM DE MILHO; Orientador: D.Sc. Eliemar Campostrini; Coorientador: D.Sc. Valter Jário de Lima.

A integração de tecnologias de sensoriamento remoto e medições tradicionais oferece novas perspectivas para o melhoramento genético de milho. Este estudo teve como objetivo avaliar índices de vegetação (IVs), a altura de planta pelo Modelo Digital de Superfície (MDS) e a dinâmica da cobertura vegetal por meio de imagens RGB coletadas por drones, bem como investigar as relações dessas variáveis com características fenotípicas de genótipos de milho. Oito híbridos de milho, incluindo quatro híbridos do Programa de Melhoramento da UENF (híbridos interpopulacionais) e quatro variedades comerciais (híbridos simples), foram avaliados utilizando um delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições. Os IVs foram obtidos em estádios fenológicos específicos das plantas 91 Dias Após o Plantio (R2) = R2; 98 DAP (R3-R4); 112 DAP (R4-R5) e 119 DAP (R5–R6), usando drones e o software Pix4D Mapper 4.7.5. Nas folhas individuais, índices como concentração de clorofilas e antocianinas foram determinados utilizando fluorímetro, medidores portáteis de pigmentos e espectrofotômetro de folhas. Durante o ciclo da cultura, foram avaliadas a altura de planta (AP) pelo MDS e a dinâmica da cobertura vegetal, expressa como o percentual de área verde nas imagens capturadas. Aos 80 DAP (V8-V10), a altura de planta medida com régua apresentou forte correlação com a AP aos 91 DAP (R2) derivada do Modelo Digital de Superfície (MDS) (r = 0.95). Aos 119 DAP (R5–R6), o coeficiente de variação (CV) da cobertura vegetal mostrou correlação significativa (r = -0.84) com o rendimento de grãos (RG). Além disso, o índice VARI, calculado a partir de imagens RGB aos 119 DAP (R5–R6), correlacionou-se fortemente com o RG (r = 0.99), florescimento feminino (r =-0.87), altura média de planta (r = -0.79), massa de 100 grãos (r = -0.77) e

índice de antocianina nas folhas (r = −0,86). A análise de componentes principais (PCA) mostrou uma separação entre híbridos locais e comerciais, explicando 46,7% da variância aos 91 DAP (R2), 52,3% aos 98 DAP (R3–R4), 64,2% aos 112 DAP (R4–R5) e 66,1% aos 119 DAP (R5–R6). Os resultados reforçam a utilidade de IVs e MDS na seleção de genótipos durante os estádios de enchimento de grãos.

Palavras-chave: geoprocessamento, sensoriamento remoto, fenotipagem de alto rendimento, estatística aplicada, agricultura de precisão.

#### ABSTRACT

COSWOSK; Guilherme Gonçalves; D.Sc.; State University of North Fluminense Darcy Ribeiro; december 2024; POTENTIAL OF VISIBLE BAND VEGETATION INDEXES AND DIGITAL SURFACE MODELS FROM UAV IMAGES FOR CORN PHENOTYPING; Advisor: D.Sc. Eliemar Campostrini; Co-advisor: D.Sc. Valter Jário de Lima.

The integration of remote sensing technologies and traditional measurements offers new perspectives for maize genetic improvement. This study aimed to evaluate vegetation indices (VIs), plant height using the Digital Surface Model (DSM), and the dynamics of vegetation cover through RGB images collected by drones, as well as to investigate the relationships of these variables with phenotypic traits of maize genotypes. Eight maize hybrids, including four hybrids from the UENF breeding program (interpopulational hybrids) and four commercial varieties (single hybrids), were evaluated using a randomized block design with four replications. VIs were obtained at specific phenological stages of the plants 91 Days After Plant (R2); 98 DAP (R3-R4); 112 DAP (R4-R5), and 119 DAP (R5–R6), using drones and the Pix4D Mapper 4.7.5 software. For individual leaves, indices such as chlorophyll and anthocyanin concentrations were determined using a fluorometer, portable pigment meters, and a leaf spectrophotometer. Throughout the crop cycle, plant height (PH) was evaluated using DSM and vegetation cover dynamics, expressed as the percentage of green area in the captured images. At 80 DAP (V8-V10), plant height measured with a ruler showed a strong correlation with PH at 91 DAP (R2) derived from the DSM (r = 0.95). At 119 DAP (R5–R6), the coefficient of variation (CV) of vegetation cover showed a significant correlation (r = -0.84) with grain yield (GY). Additionally, the VARI index, calculated from RGB images at 119 DAP (R5–R6), strongly correlated with GY (r = 0.99), female flowering (r = -0.87), mean plant height (r = -0.79), 100-grain weight (r = -0.77), and anthocyanin index in the leaves (r = -0.86). Principal Component Analysis (PCA) showed a clear separation between local and commercial hybrids, explaining 46.7% of the

variance at 91 DAP (R2), 52.3% at 98 DAP (R3–R4), 64.2% at 112 DAP (R4–R5), and 66.1% at 119 DAP (R5–R6). The results reinforce the utility of VIs and DSM in genotype selection during the grain-filling stages.

Keywords: geoprocessing, remote sensing, high-throughput phenotyping, applied statistics, precision agriculture.

### 1. INTRODUÇÃO

Para atender às demandas projetadas de crescimento populacional global até 2050, a agricultura enfrenta o desafio de aumentar a produção (Yang et al., 2017; Thierfelder et al., 2018). Para alcançar isso, o aumento anual do rendimento das culturas precisa ser de aproximadamente 2,4%. No entanto, a taxa atual de crescimento do rendimento previsto é de apenas 1,3%. Portanto, é imperativo aplicar estratégias de manejo inovadoras e usar técnicas avançadas associadas ao melhoramento de plantas para obter aumentos sustentáveis nos rendimentos agrícolas, garantindo um fornecimento seguro de alimentos para uma população em constante crescimento (Tilman et al., 2011).

Para obter cultivares superiores, a fenotipagem é crucial em programas de melhoramento de plantas (Maes e Steppe, 2019). No entanto, no contexto dos programas de melhoramento de milho no Brasil, as metodologias convencionais para avaliar características fenotípicas ainda são comumente utilizadas. Essas abordagens convencionais são muitas vezes imprecisas, demoradas, ineficientes, exigem muita mão de obra e são mais caras. Assim, para avaliar eficientemente as características fenotípicas das culturas, é vital utilizar métodos cada vez mais rápidos, precisos, não destrutivos e não invasivos (fenotipagem de alto rendimento) (Araus e Cairns, 2014; Jannoura et al., 2015).

Na fenotipagem de alto rendimento, veículos aéreos não tripulados (VANTs), comumente conhecidos como drones, desempenham um papel de suporte fundamental. Essas aeronaves não tripuladas, equipadas com sensores RGB, capturam imagens aéreas de alta resolução, registrando rapidamente informações visíveis ao olho humano em três bandas espectrais diferentes. Nos drones, as vantagens do uso de sensores RGB incluem a capacidade de adquirir imagens de alta resolução, permitindo observações detalhadas das características fenotípicas das plantas (Brocks e Bareth, 2018). Além disso, as imagens capturadas possibilitam a análise de cores, texturas e padrões de

crescimento, contribuindo para a avaliação do vigor das plantas, o mapeamento de áreas agrícolas e a tomada de decisões importantes na agricultura de precisão. A combinação da mobilidade dos drones com a precisão dos sensores RGB faz destes equipamentos uma ferramenta valiosa na pesquisa e na prática de fenotipagem de alto rendimento (FAR) (Anderson e Gaston 2013; Montes de Oca e Flores, 2021).

A avaliação de índices de reflectância/transmitância da vegetação é crucial para a implementação eficaz de metodologias de FAR. Isso permite a análise rápida e precisa do desempenho genotípico associado à capacidade fotossintética, crescimento e desenvolvimento das culturas. Identificar corretamente os índices de sensoriamento remoto que melhor predizem a variabilidade genotípica na produção e escolher o estádio fenológico ideal da cultura para analisar esses índices são fundamentais para uma boa correlação com a produtividade e para otimizar a seleção dos genótipos mais promissores. Essa metodologia, portanto, tem um potencial significativo para acelerar a seleção de genótipos elite em programas de melhoramento e otimizar o monitoramento de práticas de manejo (Araus e Kefauver, 2018; Gracia-Romero et al., 2019).

Os índices de vegetação da banda visível na região vermelha, verde e azul (RGB) podem ser calculados usando diferentes combinações dessas bandas de cores, como o Índice Normalizado de Diferença Verde-Vermelho (NGRDI). Esses índices de vegetação da banda visível podem fornecer informações importantes sobre o desenvolvimento vegetativo e o estado de saúde das plantas, que podem estar relacionados à capacidade fotossintética e à produtividade das plantas. Dessa forma, a correlação entre esses índices e características morfofisiológicas pode fornecer informações valiosas para a avaliação do estado fisiológico e do potencial de rendimento dos genótipos em estudo (Huete, 1988; Gitelson e Merzlyak, 1998; Madec et al., 2017; Gracia-Romero et al., 2019).

Em milho, nas pesquisas de FAR, VANTs equipados com sensores RGB têm sido usados para avaliar características como altura da planta, densidade foliar e cobertura do dossel, bem como os efeitos do estresse hídrico sobre a produtividade (Xie e Yang, 2020). Esses estudos visam entender a relação entre características fenotípicas e genótipos, e prever os rendimentos das culturas. No entanto, os principais desafios para a otimização da FAR incluem a padronização dos procedimentos de coleta e processamento de dados, bem como a análise eficiente de grandes volumes de dados. Além disso, a interpretação precisa das informações relacionadas às imagens espectrais requer a consideração de fatores como a intensidade da radiação solar no momento da aquisição das imagens, a heterogeneidade da vegetação e as variações nas condições ambientais. Essas considerações são essenciais para obter resultados confiáveis e relevantes, otimizando assim a tomada de decisões no manejo agrícola (Wan et al., 2019; Xie e Yang, 2020; Montes de Oca e Flores, 2021).

Os avanços recentes na fenotipagem de milho destacaram o potencial da FAR como uma ferramenta promissora para melhorar a análise de culturas. Na previsão do rendimento de milho, Saravia et al. (2022) destacaram a eficácia das imagens multiespectrais de VANTs. Li et al. (2022) usaram imagens oblíquas de VANT para estimar o índice de área foliar e a altura da planta a partir de nuvens de pontos 3D. Essas inovações ressaltam o potencial dos drones equipados com sensores RGB para aumentar a precisão e a eficiência da fenotipagem.

Na fenotipagem de milho, apesar desses avanços, o uso de VANTs equipados com câmeras RGB pode ser mais explorado. Os estudos abrangentes são necessários para compreender completamente a aplicabilidade e eficácia desta técnica no uso de VANTs. Portanto, o principal objetivo deste estudo foi avaliar a associação de índices de vegetação RGB e modelos digitais de superfície via VANT e as propriedades espectrais de reflectância e a capacidade fotoquímica de folhas individuais características com morfoagronômicas de genótipos de milho, bem como os estádios fenológicos ideais do milho para a correta avaliação dos índices RGB via VANT e dos índices/capacidade fotossintética de folhas individuais.

As questões científicas específicas que se busca responder são as seguintes: (1) Quais índices de vegetação da banda visível via VANT avaliados

melhor predizem a variabilidade genotípica de milho? (2) Para uma previsão de rendimento, em quais estádios fenológicos esses índices devem ser avaliados? (3) Como os índices RGB, altura de planta e cobertura vegetal verde obtidos via VANT se correlacionam com características morfoagronômicas e com índices/capacidade fotossintética de folhas individuais?

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

#### 2.1. Milho e a ecofisiologia da planta

No mundo, após o arroz e o trigo, o milho (*Zea mays* L.) é uma cultura altamente significativa, e ocupa o terceiro lugar em importância econômica e em termos de quantidade produzida (Madan et al., 2022; Patel et al., 2017). Pertencente à família Poaceae, o milho é uma fonte alimentar básica em muitos países e desempenha um papel fundamental na segurança alimentar, especialmente em nações em desenvolvimento (Patel et al., 2017; Silva et al., 2020). Além de ser amplamente utilizado para consumo humano, o milho tem diversas outras aplicações, incluindo ração animal e matéria-prima para indústrias variadas, como as de amido de milho, óleo de milho e bioetanol, o que contribui para o desenvolvimento de uma nova indústria baseada no milho (Győri, 2010; Patel et al., 2017).

As propriedades físicas do milho, como peso, volume, densidade, porosidade e esfericidade do grão, são essenciais para determinar sua qualidade e adequação a diferentes usos (Madan et al., 2022). A estrutura e a composição do grão de milho, ricas em amido, variam conforme o genótipo e as práticas culturais adotadas (Singh et al., 2013). Além disso, o milho contém compostos bioativos, como carotenoides, antocianinas e compostos fenólicos, que proporcionam maior capacidade antioxidante quando comparado a outros cereais, como trigo, aveia e arroz (Singh et al., 2013). A qualidade do milho é influenciada por fatores como o estado nutricional do solo e as práticas de cultivo, as quais podem impactar tanto o valor nutricional quanto o uso industrial (Győri, 2010; Patel et al., 2017).

O milho também desempenha um papel importante no contexto brasileiro e global, especialmente devido à versatilidade. No Brasil, a cultura é amplamente utilizada para a produção de ração animal, que tem grande relevância no comércio exterior, particularmente na cadeia produtiva de carne animal (Souza et al., 2018). A versatilidade do milho é refletida nas aplicações deste cereal, que incluem a produção de bioetanol, ração animal e alimentos derivados de processos como a moagem a seco, moagem úmida e nixtamalização (Serna-Saldívar & Carrillo, 2003; Salawu, 2023).

Nos Estados Unidos, cerca de 40% da produção de milho é destinada à produção de etanol combustível, o que aumenta a competição pela demanda, e influencia os preços do milho em outras áreas de consumo (Ranum et al., 2014). Globalmente, o milho também é uma importante fonte de energia, proteína, micronutrientes e fitoquímicos para consumo humano, especialmente em regiões como América Latina e África (Salawu, 2023). Os produtos derivados do milho, como cereais matinais, mingaus, salgadinhos, xaropes, tortilhas e chips, são amplamente consumidos nesses continentes (Serna-Saldívar & Carrillo, 2003; Salawu, 2023).

Além das indústrias alimentícias e de ração animal, o milho é amplamente utilizado na indústria química e na produção de energia, evidenciando o papel deste cereal como matéria-prima industrial (Migut et al., 2022). Essas diversas aplicações, tanto no Brasil quanto no mundo, reforçam a importância econômica e estratégica do milho, que sustenta tanto o consumo interno quanto os mercados de exportação (Souza et al., 2018; Migut et al., 2022).

Conforme destacado em um estudo que examina os preditores da produção de milho nessas regiões, os principais países produtores de milho incluem Estados Unidos, China, Brasil, Argentina e Ucrânia (Nangia et al., 2023). No Brasil, a produção de milho aumentou significativamente nas últimas décadas, e, entre 1977 e 2017 houve uma notável expansão na área cultivada em 49,08%, a qual foi impulsionada tanto pelo aumento da área cultivada, quanto pela melhoria na produtividade (Artuzo et al., 2019). Em particular, a região Centro-Oeste do Brasil tem se destacado no crescimento substancial na produção de milho, favorecido principalmente pela adoção de práticas de cultivo e pelo incremento das safras adicionais, como a segunda e a terceira safras, conhecidas como "safrinhas" (Klein & Luna, 2023).

A produção anual de milho no Brasil é influenciada por diversos fatores, dentre os quais se destacam os avanços tecnológicos e o uso de

variedades transgênicas de milho, o que resulta em variações significativas na produtividade entre os estados (Ventura et al., 2020). Os estados de Mato Grosso, Paraná e Goiás figuram entre os maiores produtores de milho do país, sendo o Mato Grosso um dos principais contribuintes para esse cenário, devido às práticas agrícolas de larga escala e às condições climáticas favoráveis (Ventura et al., 2020).

Globalmente, a eficiência técnica da produção de milho também é um aspecto crucial. Os estudos revelam que a eficiência técnica média da produção de milho é de 0,863, o que indica uma perda média de 13,7%. Esse dado ressalta a necessidade de adotar métodos agrícolas mais eficientes e de melhorar o gerenciamento de insumos para reduzir essas perdas (Wang & Hu, 2021). No que diz respeito aos custos de produção, há uma variação significativa entre as diferentes regiões produtoras no Brasil. Regiões como Chapadão do Sul, no Mato Grosso do Sul, apresentam os menores custos de produção, enquanto áreas como Unaí, em Minas Gerais, e Boa Vista, em Roraima, têm custos mais elevados, o que reflete a diversidade do cenário econômico agrícola no país (Ventura et al., 2020).

Na caracterização dos genótipos de milho, as características morfoagronômicas fisiológicas desempenham papéis As е cruciais. características morfoagronômicas englobam características como a altura da planta, a altura da espiga, o comprimento e o perímetro da espiga, o número de grãos por linha e o número de fileiras de grãos por espiga, além do rendimento de grãos. Nos programas de melhoramento de milho, essas características são essenciais para a avaliação da diversidade genética e do potencial de rendimento (Mengistu, 2021; Kumar et al., 2024). A altura da planta e a altura da espiga são particularmente relevantes, uma vez que influenciam diretamente a resistência ao acamamento e o rendimento de grãos, juntamente com a posição relativa na espiga, sendo que variações nessas características podem ser significativamente afetadas por fatores ambientais, como fotoperíodo e temperatura (Liu et al., 2021).

Além disso, outras características como o número de espigas por planta e o tempo necessário até a maturidade são fundamentais para compreender o ciclo de crescimento e o potencial produtivo dos diferentes genótipos (Mengistu, 2021). As características fisiológicas, como a concentração de clorofilas, também possuem grande relevância na caracterização de genótipos, uma vez que indicam a correlação, em muitos casos, com a eficiência fotossintética da planta (Rajasekar et al., 2024). Esses aspectos são cruciais para a seleção de genótipos com maior eficiência na conversão de radiação solar em biomassa e, consequentemente, em grãos.

A diversidade genética entre os genótipos de milho, frequentemente analisada por meio de técnicas como agrupamento e componentes principais, revela a importância dessas características para distinguir variedades e selecionar candidatos ideais para hibridização (Mengistu, 2021; Kumar et al., 2024; Rajasekar et al., 2024). Essas análises permitem uma seleção mais precisa de genótipos com características agronômicas desejáveis, otimizando os programas de melhoramento genético.

Além disso, os estudos de correlação e análises de coeficiente de trilha evidenciam as influências diretas e indiretas dessas características sobre o rendimento de grãos e outras características agronômicas importantes, reforçando a importância dessas características em programas que visam maximizar a produtividade do milho (Rajasekar et al., 2024). No geral, uma compreensão detalhada das características morfoagronômicas e fisiológicas é fundamental para a caracterização eficaz dos genótipos e o desenvolvimento de variedades de milho superiores e mais produtivas.

A radiação solar desempenha um papel crucial na eficiência da capacidade fotossintética, no crescimento e na produtividade do milho (*Zea mays* L.). Como principal fonte de energia para a fotossíntese, a radiação solar impulsiona o enchimento de grãos, influenciando diretamente a produção final da cultura. Um aumento na radiação fotossinteticamente ativa (RFA) tem efeitos significativos no desempenho da planta, melhorando a taxa média e a taxa máxima de enchimento de grãos, além de aumentar o peso dos grãos, o que resulta em maior produtividade (Yang et al., 2022).

Por outro lado, a redução da radiação solar exerce efeitos negativos na distribuição da matéria seca, na morfologia das raízes e no

rendimento de grãos. Radiação fotossinteticamente ativa (RFA) elevada, acima de 1200 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, favorece a estabilidade do desenvolvimento, enquanto níveis reduzidos, abaixo de 800 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, podem comprometer esses processos. As cultivares de milho reagem à diminuição da radiação solar alterando a proporção entre o peso seco da parte aérea e o das raízes. Há uma redução na densidade do comprimento das raízes e na área superficial radicular, o que é fundamental para manter a estabilidade do rendimento sob condições de menor RFA (Guo et al., 2022). A sensibilidade das cultivares de milho à radiação solar pode variar consideravelmente. Por exemplo, a cultivar ZD958 é mais suscetível a pequenas reduções na radiação solar em comparação com a cultivar XY335, que demonstra maior resistência sob condições de reduzida RFA (Yang et al., 2019; Yang et al., 2021).

A radiação solar também influencia o acúmulo e a transferência de matéria seca, sendo que intensidades mais elevadas de radiação promovem uma maior assimilação e translocação de produtos fotossintéticos, essenciais para alcançar altos rendimentos (Yang et al., 2021). A absorção de fótons na região do espectro do azul e vermelho é fundamental para a fotossíntese, enquanto a reflexão e a transmissão de outras faixas do espectro acima do vermelho contribuem para o balanço energético e a regulação térmica das plantas.

Compreender a dinâmica entre a absorção da radiação solar, a fotossíntese e a translocação de produtos fotossintéticos é crucial para o desenvolvimento de cultivares de milho mais adaptadas a diferentes condições de radiação solar. Essa adaptação torna-se especialmente relevante diante das mudanças climáticas globais e seus impactos nas práticas agrícolas (Yang et al., 2019; Yang et al., 2021; Guo et al., 2022; Yang et al., 2022). O desenvolvimento de cultivares com maior eficiência no uso da radiação solar emerge como uma estratégia essencial para aumentar a resiliência do milho frente à variabilidade climática.

A produção de milho no Brasil enfrenta diversos desafios significativos, principalmente devido às condições tropicais, que intensificam as pressões de pragas e doenças e agravam os problemas relacionados ao déficit hídrico. Esses fatores ambientais demandam o desenvolvimento de híbridos de milho de alto rendimento, uma tarefa complexa diante dos custos crescentes dos programas de melhoramento e da necessidade de técnicas inovadoras para aumentar os ganhos genéticos de forma eficiente (Pinho et al., 2022). Embora o Brasil tenha registrado um crescimento substancial na produção e produtividade do milho ao longo dos anos, ainda persistem disparidades regionais e uma instabilidade na produtividade, sendo que os estados das regiões sul, centrooeste e sudeste são os mais afetados por essas questões (Artuzo et al., 2019).

Adicionalmente, a adoção disseminada dos sistemas de cultivo duplo de soja e milho está sob ameaça devido às mudanças climáticas e às alterações na cobertura do solo, especialmente pelo encurtamento da estação chuvosa. Essas alterações afetam diretamente a viabilidade desses sistemas, com medidas de adaptação, como o uso de cultivares de ciclo mais curto e o ajuste das datas de semeadura, não se mostrando totalmente eficazes para manter a produtividade e a receita agrícola, principalmente em regiões com elevados índices de desmatamento (Brumatti et al., 2020).

Diante desses desafios multifacetados, torna-se evidente a necessidade de abordagens integradas que utilizem ferramentas tecnológicas avançadas, como a fotogrametria, para superar as limitações impostas pelos fatores ambientais e garantir a sustentabilidade da produção de milho no Brasil. Técnicas de sensoriamento remoto, como a fotogrametria, oferecem soluções promissoras para monitorar e otimizar o manejo das lavouras, integrando dados espaciais e agronômicos com maior precisão e eficiência.

#### 2.2. Fotogrametria

A fotogrametria é uma técnica que utiliza fotografias para medir e definir a forma, dimensões e posição espacial dos objetos. Esta técnica se destaca como um método versátil e econômico, e popular, devido à facilidade de aplicação e à capacidade de produzir resultados precisos, tornando-se assim uma alternativa viável aos métodos tradicionais de escaneamento (Puerta et al., 2020). O princípio central da fotogrametria é a reconstrução de modelos

tridimensionais a partir de imagens bidimensionais, utilizando sensores passivos ou ativos. Os sensores passivos, comuns na fotogrametria, dependem da luz natural para capturar informações, diferentemente dos sensores ativos, que emitem energia na cena para coleta de dados (Coelho et al., 2023). A técnica é amplamente utilizada em áreas como engenharia, arquitetura, arqueologia e educação, criando modelos 3D realistas e de alta resolução para variados fins educacionais (Puerta et al., 2020; Tychola et al., 2024). A capacidade da fotogrametria de gerar modelos 3D detalhados e precisos com base em fotografias a torna uma ferramenta valiosa, combinando custo-benefício, precisão e versatilidade.

A fotogrametria tem grande relevância na agronomia, com diversas aplicações que aprimoram a precisão e a eficiência das práticas agrícolas. Um dos principais usos está na modelagem 3D de culturas e na fenomenologia vegetal, onde equipamentos fotogramétricos acessíveis capturam imagens detalhadas das plantas, permitindo a extração de índices quantitativos de características, como arquitetura do dossel, dimensões das folhas e volume do dossel. Esses dados são essenciais para o monitoramento do crescimento e a análise de características das culturas, sendo valiosos para cientistas e melhoristas de plantas (Hrzich et al., 2023a; 2023b).

Na agricultura de precisão, a fotogrametria auxilia na coleta de dados em tempo real, suportando decisões sobre plantio, fertilização e colheita. Por meio de drones que capturam imagens, as análises fotogramétricas geram ortofotos que auxiliam na avaliação de biomassa, estresse hídrico e monitoramento de pragas e doenças (Delgado-Vera et al., 2017). Além disso, a fotogrametria de drones de curto alcance é utilizada para monitorar a dinâmica das culturas ao longo do tempo, proporcionando dados de alta resolução que permitem a análise precisa da progressão das plantas (Arriola-Valverde et al., 2020). Essas aplicações evidenciam a versatilidade da fotogrametria na agronomia, oferecendo soluções inovadoras para o gerenciamento e a análise de culturas.

A fotogrametria com drones envolve a captura de imagens aéreas por câmeras de alta definição montadas em VANTs, com o processamento das imagens resultando em modelos e mapas 3D detalhados. O processo começa com drones sobrevoando a área-alvo, capturando imagens de vários ângulos, que são processadas por software fotogramétrico para gerar modelos digitais de elevação, mapas ortográficos e mapas de contorno, aplicáveis em áreas como planejamento urbano e monitoramento ambiental (Ngo et al., 2023; Pang, 2024).

A variedade de drones, desde hexacópteros a minidrones acessíveis, oferece flexibilidade em termos de custo, qualidade de imagem e estabilidade (Hormeño et al., 2024). O uso de inteligência artificial nos drones simplificou ainda mais o processo fotogramétrico, permitindo o processamento eficiente de imagens a bordo, o que é essencial para aplicações como agricultura, silvicultura e monitoramento industrial (Kumari & Dubey, 2023). Além disso, em ambientes educacionais, a fotogrametria com drones é empregada para criar modelos 3D realistas que aprimoram a experiência de aprendizado em disciplinas como geografia e história (Tychola et al., 2024). O avanço nos sistemas de processamento de imagens visa reduzir o tempo de computação e o consumo de energia, aumentando a eficiência dos VANTs (Kumari & Dubey, 2023).

A fotogrametria com drones apresenta desafios em várias fases, desde a aquisição até o processamento dos dados. A otimização da aquisição de dados para equilibrar precisão, tempo e custo é um dos principais obstáculos, o que inclui a escolha do VANT adequado, o design eficiente da rota de voo e o uso de software apropriado (Pargieła, 2023). O fluxo de trabalho, que abrange a aquisição de dados, triangulação aérea e correspondência de imagens, é complexo, e o desempenho dos algoritmos é crucial para a precisão dos produtos finais (Jiang et al., 2022). A qualidade dos modelos, como ortomosaicos, depende significativamente da qualidade dos dados do VANT e das ferramentas de processamento utilizadas (Berra & Peppa, 2020). Além disso, restrições relacionadas à carga útil e à precisão de georreferenciamento devem ser cuidadosamente consideradas (Lari & El-Sheimy, 2015). O grande volume de dados gerados também requer fluxos de trabalho eficientes, capazes de fornecer produtos de mapeamento de alta qualidade, sem que os usuários precisem de experiência técnica profunda (Lari & El-Sheimy, 2015). No geral, esses desafios apontam para a necessidade contínua de pesquisas para aprimorar a eficiência e precisão da fotogrametria com VANTs.

#### 2.3. Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é uma tecnologia sofisticada que envolve a aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem fazer contato físico, principalmente por meio do uso de sensores montados em satélites, aeronaves, drones ou instrumentos terrestres (Xia, 2022; Dahiya & Rathi, 2024). A Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto o define como a medição ou aquisição de informações de alguma propriedade de um objeto ou fenômeno por um dispositivo de gravação que não está em contato físico ou íntimo com o objeto ou fenômeno em estudo (Xia, 2022). Essa tecnologia é particularmente aplicada à observação da Terra e de outros corpos celestes, capturando dados em várias formas de radiação eletromagnética, como luz visível, infravermelho e micro-ondas (Xia, 2022; Dahiya & Rathi, 2024).

O sensoriamento remoto é um campo multidisciplinar que integra ciência e engenharia para abordar questões de macro-observação e teve avanços significativos nos últimos anos, com um aumento no número e nas capacidades dos sensores (Benediktsson & Wu, 2021). A tecnologia é crucial para coletar informações geográficas necessárias para entender os sistemas ambientais e sociais, oferecendo vantagens como eficiência de tempo, custo-benefício e a capacidade de coletar dados além do alcance visual, sem ser intrusiva (Borg et al., 2022; Xia, 2022).

O sensoriamento remoto engloba uma variedade de sensores, princípios de medição e modos de gravação, permitindo a geração de dados com diversas resoluções geométricas, espectrais, radiométricas e temporais para resolver problemas específicos na agricultura (Borg et al., 2022). Suas aplicações na área agrícola incluem o monitoramento de culturas, manejo hídrico, detecção de estresse em plantas e estimativas de produtividade, com crescente integração a tecnologias de ponta, como inteligência artificial e aprendizado de máquina, para aumentar a eficiência e precisão das análises (Benediktsson & Wu, 2021; Chetna, 2023; Dahiya & Rathi, 2024). O rápido desenvolvimento de técnicas e plataformas de sensoriamento remoto levou a um aumento exponencial na disponibilidade de dados, o que apresenta desafios para o processamento eficiente e escalável, especialmente em aplicações práticas no setor agrícola (Benediktsson & Wu, 2021).

Os sensores de sensoriamento remoto operam detectando e medindo a radiação eletromagnética que é emitida ou refletida por objetos ou cenas na superfície da Terra. Esses sensores podem ser categorizados em dois tipos principais: sensores ativos e passivos. Os sensores ativos, como radares e lidares, emitem as próprias ondas eletromagnéticas e medem a reflexão do alvo, permitindo que funcionem independentemente das condições de radiação solar (Marghany, 2022). Os sensores passivos, por outro lado, dependem da radiação natural, como a radiação solar, refletida do alvo para capturar dados (Marghany, 2022).

Os sensores de sensoriamento remoto podem ser montados em várias plataformas, como satélites, aviões e VANTs, o que permite a coleta de dados em grandes áreas com diferentes resoluções geométricas, espectrais, radiométricas e temporais (Borg et al., 2022). A capacidade de capturar dados em múltiplas resoluções torna o sensoriamento remoto uma ferramenta poderosa para o estudo de diversas áreas de conhecimento.

Os dados coletados por esses sensores são processados para gerar imagens que podem ser utilizadas em diversas aplicações agrícolas, como o monitoramento dinâmico de mudanças na vegetação, condições do solo e disponibilidade de recursos hídricos. Essas informações são cruciais para otimizar o manejo das culturas, aumentar a eficiência do uso de insumos e promover práticas agrícolas mais sustentáveis (Zhou, 2023).

No geral, os sensores de sensoriamento remoto são essenciais para a aquisição eficiente de geoinformações, ajudando a superar desafios como a disponibilidade de dados e tempos de processamento, enquanto oferecem suporte a uma ampla gama de aplicações (Borg et al., 2022). A integração crescente com técnicas como aprendizado de máquina e inteligência artificial aprimora ainda mais a precisão e a capacidade de análise, permitindo que o sensoriamento remoto continue desempenhando um papel crítico no desenvolvimento de soluções inovadoras para questões ambientais e de planejamento (Benediktsson & Wu, 2021).

As resoluções geométricas, espectrais, radiométricas e temporais são aspectos críticos do sensoriamento remoto que definem a qualidade e a aplicabilidade dos dados coletados. A resolução geométrica, geralmente chamada de resolução espacial, indica o menor objeto que pode ser detectado por um sensor, determinando essencialmente o nível de detalhe visível em uma imagem. A alta resolução espacial é crucial para aplicações que exigem imagens detalhadas, como planejamento urbano e agricultura de precisão (Merry et al., 2023; Wang et al., 2023).

A resolução espectral se refere à capacidade de um sensor de distinguir entre diferentes comprimentos de onda da radiação solar, o que é essencial para identificar vários materiais e tipos de cobertura do solo com base em características de reflectância espectral (Jenicka, 2021). Esta resolução é vital para aplicações em monitoramento ambiental e classificação da cobertura do solo, onde diferentes materiais precisam ser identificados com precisão (Borg et al., 2022).

A resolução radiométrica define a capacidade do sensor de discriminar diferenças muito pequenas na energia, o que afeta o contraste da imagem e a capacidade de detectar mudanças sutis na cena. Uma resolução radiométrica mais alta pode melhorar a precisão da classificação, embora nem sempre leve a melhores resultados, pois também aumenta o volume de dados e a complexidade de processamento (Verde et al., 2018).

A resolução temporal descreve a frequência com que um sensor pode capturar dados para o mesmo local, o que é crucial para monitorar mudanças ao longo do tempo, como crescimento da vegetação, expansão urbana ou avaliação do impacto de desastres (Borg et al., 2022; Merry et al., 2023). A integração dessas resoluções permite que o sensoriamento remoto seja uma ferramenta versátil para várias aplicações, desde monitoramento ambiental até gerenciamento de recursos, fornecendo dados abrangentes que podem ser personalizados para necessidades específicas (Borg et al., 2022; Merry et al., 2023). Assim, compreender essas resoluções ajuda a selecionar os dados de sensoriamento remoto apropriados para aplicações específicas, garantindo que os dados coletados atendam aos requisitos necessários para análise e tomada de decisões (Jenicka, 2021).

Por meio da análise de dados de reflectância espectral, os índices de vegetação (VIs) são ferramentas cruciais na agricultura de precisão, usados principalmente para avaliar o crescimento das plantas. Esses índices são calculados usando diversas formulações matemáticas que combinam diferentes bandas espectrais, principalmente nas faixas do visível (VIS) e do infravermelho próximo (NIR). Por exemplo, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é amplamente utilizado e calculado pela diferença entre o NIR e as faixas vermelhas, normalizada por sua soma, permitindo avaliar a capacidade fotossintética das plantas (Sarvakar & Thakkar, 2024). Da mesma forma, o Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) e o Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI) fornecem informações sobre o estado das plantas, especialmente relacionadas às clorofilas das folhas (Sarvakar & Thakkar, 2024). Além disso, índices baseados em RGB, como o Excess Green (ExG) e o Triangular Greenness Index (TGI), são utilizados para estimar áreas de dossel, destacando-se no uso de imagens digitais para identificar regiões de vegetação, com foco no espectro verde (Özlüoymak, 2024).

Além disso, sistemas avançados, como VANts equipados com câmeras estéreo, podem gerar mapas 3D de índices de vegetação, fornecendo uma análise mais detalhada do vigor das plantas, capturando imagens RGB e computando índices como o Índice de Vegetação por Diferença de Banda Visível (Montes de Oca e Flores, 2023). A seleção de VIs apropriados é crítica, pois diferentes índices são adequados para diferentes culturas e condições e, muitas vezes, uma combinação de índices é necessária para alcançar o monitoramento preciso da cultura e a previsão do rendimento (Vidican et al., 2023). No geral, o cálculo e a aplicação de VIs na agricultura de precisão envolvem uma mistura de tecnologias tradicionais e inovadoras, cada uma contribuindo para práticas agrícolas mais eficientes e informadas. O sensoriamento remoto na agricultura de precisão apresenta vários desafios, principalmente ao associar índices de vegetação (VIs) às características morfofisiológicas das plantas. Um desafio principal é a seleção de VIs apropriados a partir da ampla variedade disponível, pois cada índice pode variar em eficácia dependendo da cultura e do objetivo específicos, levando a possíveis imprecisões se não for escolhido corretamente (Vidican et al., 2023). As características espectrais das culturas podem mudar ao longo da safra, complicando a aplicação consistente de VIs e tornando difícil distinguir entre diferentes culturas ou mesmo entre diferentes estádios de crescimento (Vidican et al., 2023). Esses desafios destacam a necessidade de pesquisa e desenvolvimento contínuos para refinar as tecnologias e metodologias de sensoriamento remoto, garantindo que elas possam apoiar efetivamente práticas agrícolas precisas.

#### 2.4. Fenotipagem

A fenotipagem de alto rendimento (FAR) e a fenotipagem tradicional diferem significativamente em metodologias, eficiência e impacto no melhoramento de culturas. A fenotipagem tradicional costuma ser trabalhosa, demorada e subjetiva, contando com medições manuais e avaliações visuais, o que limita a precisão e a escalabilidade da coleta de dados, especialmente para características complexas como acamamento no trigo (Singh et al., 2019). Em contraste, a FAR emprega tecnologias avançadas, como imagens, sensores e VANT, para coletar dados de forma não destrutiva e eficiente em grandes populações e ambientes diversos (Singh et al., 2019; Omprakash et al., 2024). Essa abordagem permite a triagem dinâmica de características em vários estádios de desenvolvimento (Li et al., 2020). A FAR preenche a lacuna entre a genômica e a fenômica, permitindo a aquisição e análise precisas e de alto rendimento de fenótipos multidimensionais, o que é crucial para compreender a relação genótipo e fenótipo e acelerar os ganhos genéticos no melhoramento de culturas (Song et al., 2021). Além disso, a FAR facilita a identificação de loci de características quantitativas (QTL) com precisão comparável aos métodos tradicionais. Um exemplo é observado na cultura do arroz, onde foi capaz de identificar variações genéticas associadas a importantes características de produção por meio de avaliações não destrutivas e de alta precisão (Tanger et al., 2017).

A capacidade de aplicação em larga escala da FAR é ainda mais destacada por sua habilidade de lidar com dezenas de milhares de parcelas, tornando-a uma ferramenta poderosa para compreender a base genética de características complexas e acelerar os ganhos no melhoramento genético (Singh et al., 2019). No geral, a FAR representa uma mudança de paradigma no melhoramento de culturas, oferecendo uma abordagem mais eficiente, precisa e abrangente para a fenotipagem, superando as limitações dos métodos tradicionais e apoiando o desenvolvimento de culturas mais resilientes ao estresse e com maior potencial de rendimento (Song et al., 2021; Omprakash et al., 2024).

Em relação a outros métodos de fenotipagem de plantas, a imagem RGB de drones oferece várias vantagens, principalmente devido à eficiência, precisão e custo-benefício. O uso de imagens RGB coletadas por meio de drones pode melhorar significativamente o rendimento e a precisão, reduzindo os custos em comparação com as medições manuais em testes de campo (Volpato et al., 2023). Conforme demonstrado em programas de melhoramento de feijão-fava, essa tecnologia permite a fenotipagem rápida e eficiente de alto rendimento de características agronomicamente importantes, como altura da planta, a concentração de clorofila, e a produtividade (Mohammadi et al., 2024).

Além disso, imagens RGB baseadas em drones podem substituir os métodos tradicionais para rastrear a maturidade da planta, a contagem de povoamentos e a altura da planta, proporcionando maior precisão e margens de erro reduzidas, como visto em estudos de feijão seco (Volpato et al., 2023). A capacidade de capturar dados de séries temporais e aplicar modelos de aprendizado profundo, como CNN-LSTM, aprimora ainda mais a previsão de maturidade relativa e outras características, superando os métodos tradicionais de pré-processamento de imagem (Volpato et al., 2023). Além disso, os dados do drone RGB podem ser usados para classificar os estádios da fenologia das culturas com base nas características da cor, o que é crucial para o gerenciamento de recursos agrícolas e classificação de culturas (Maurya et al., 2023).

A integração de imagens RGB com outros sensores, como hiperespectral e lidar, em plataformas multi sensores, fornece um *pipeline* abrangente de fenotipagem que combina conjuntos de dados geoespaciais com informações verdadeiras básicas, aumentando a confiabilidade dos serviços de fenotipagem (Oh et al., 2023). Além disso, o uso drones equipados com sensores RGB, facilita a coleta de *big data* sobre a dinâmica de crescimento das plantas, permitindo a automação e o aprimoramento da estimativa e previsão de características fenotípicas, que antes eram difíceis ou impossíveis de quantificar (Herr et al., 2023). No geral, a imagem RGB de drones é uma ferramenta versátil e indispensável no melhoramento moderno de plantas, oferecendo vantagens significativas em termos de velocidade, precisão e capacidade de lidar com tarefas de fenotipagem em grande escala com eficiência.

Esses drones facilitam a extração de características fenotípicas, como altura da planta e índice de área foliar, empregando técnicas de aprendizado de máquina, como redes neurais convolucionais e modelos de aprendizado em conjunto, que aumentam a precisão e a estabilidade da estimativa de características (Shepard et al., 2024). Por exemplo, as Convolutional Neural Network foram aplicadas com sucesso para classificar imagens de milho com alta precisão, permitindo o processamento de grandes volumes de dados fenotípicos em diversos ambientes (Shu et al., 2022). Além disso, a integração de imagens RGB com dados multiespectrais e técnicas avançadas de modelagem, como empilhamento e média do modelo bayesiano, melhora ainda mais a precisão da estimativa de características como peso fresco e peso seco (Adak et al., 2024). O uso de algoritmos de detecção de objetos, como o Yolov5, permite a avaliação precisa da qualidade do plantio ao detectar irregularidades no espaçamento entre plantas, o que é crucial para maximizar o rendimento na agricultura de precisão (Casuccio & Kotze, 2022). A combinação de imagens de drones RGB com índices de vegetação e análise funcional de componentes principais (FPCA) também aprimora as previsões fenômicas e genômicas das principais características agronômicas, demonstrando fortes correlações com o rendimento de grãos e a altura da planta em vários ambientes e anos (Adak et al., 2024). No geral, a integração da tecnologia de drones RGB com abordagens sofisticadas de modelagem e processamento de dados está revolucionando a fenotipagem do milho, oferecendo uma solução escalável, econômica e precisa para programas de melhoramento e pesquisa agrícola.

A fenotipagem com imagens RGB baseadas em drones apresenta vários desafios que precisam ser enfrentados para aproveitar totalmente o potencial desta técnica em pesquisa agrícola e melhoramento de safras. Um dos principais desafios é a falta de protocolos padronizados para aquisição de dados e processamento de dados, o que pode levar a inconsistências nos dados fenotípicos coletados em diferentes plataformas e estudos (Xu et al., 2021). Além disso, embora os sensores RGB sejam eficazes para capturar certas características, eles podem não fornecer os dados abrangentes necessários para todas as características fenotípicas, necessitando da integração de sensores adicionais, como câmeras multiespectrais e térmicas, para capturar uma gama mais ampla de características da planta (Xu et al., 2021; Sweet et al., 2022). Outro desafio é o desenvolvimento de um software robusto para extração e padronização de características, que é crucial para o uso eficaz de dados de fenotipagem de alto rendimento em programas de melhoramento de culturas (Sweet et al., 2022). Embora as imagens RGB possam ser usadas para estimar o conteúdo de nitrogênio da cultura e outras características, a precisão dessas estimativas pode ser limitada por fatores como as condições ambientais e a complexidade da copa da planta, que podem afetar a reflectância capturada pelos sensores (Patil et al., 2023). O poder de previsão dos dados fenômicos temporais de drones às vezes pode exceder o dos dados genômicos, mas isso requer a captura de dados em vários estádios de crescimento, o que pode exigir muitos recursos e ser logisticamente desafiador (Adak et al., 2021; Carstens, 2022). Além disso, a integração de dados fenômicos com dados genômicos para melhorar a previsão da aptidão das plantas ainda está em estádios iniciais, e mais pesquisas são necessárias para otimizar esses métodos para aplicações práticas no melhoramento de plantas (Adak et al., 2021; Carstens, 2022). No geral, embora a fenotipagem RGB baseada em drones seja uma grande promessa, enfrentar esses desafios é essencial para sua implementação bemsucedida na agricultura de precisão e no melhoramento de plantas.
# 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Material Vegetal, Condições de Cultivo e Delineamento Experimental

Nesta pesquisa foram estudados quatro híbridos do Programa de Melhoramento de milho da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Estes incluíram os híbridos interpopulacionais registrados UENF 506-11 (H1) e UENF 506-16 (H2), desenvolvidos para produção de grãos; o híbrido UENF MSV 2210 (H3), adequado para silagem e milho verde; e o híbrido UENF MS 2208 (H4), destinado à produção de silagem. Também foram avaliados quatro híbridos comerciais de milho, com características distintas: os híbridos duplos BM 207 (H5) e AG 1051 (H8), conhecidos por maior estabilidade e adaptação a diferentes condições; e os híbridos simples LG 6036 (H6) e 30F35R (H7), reconhecidos pelo alto potencial produtivo e maior uniformidade genética. O experimento foi realizado na Estação Experimental Ilha Barra do Pomba, em Itaocara, estado do Rio de Janeiro, RJ (-21.64770151S, -42.06342908W) (Figura 1) (Gonçalves et al., 2024).

O uso de híbridos interpopulacionais pelo programa de melhoramento da UENF se justifica pela relação custo-benefício e pela adequação às condições da agricultura no norte fluminense. Embora o programa possua capacidade técnica para desenvolver híbridos simples, o processo de criação e manutenção de linhagens puras apresenta custos elevados, tornando os híbridos simples menos acessíveis para pequenos e médios produtores. Em contraste, os híbridos interpopulacionais são obtidos a partir do cruzamento de populações varietais altamente produtivas, resultando em sementes com menor custo de produção e maior volume por hectare. Essa estratégia torna os híbridos interpopulacionais uma opção mais viável e adaptada ao sistema agrícola regional, caracterizado por menores níveis de tecnificação. Apesar de não competirem diretamente com os híbridos simples em uniformidade e produtividade máxima, os híbridos interpopulacionais oferecem uma solução eficiente para atender às necessidades locais,



promovendo acessibilidade e sustentabilidade no setor agrícola (Gonçalves et al., 2024).

Figura 1. Diagrama esquemático da localização da área de pesquisa.

O solo foi fertilizado e irrigado seguindo as práticas recomendadas de fertilização para a região de cultivo, e os tratamentos da cultura foram realizados de acordo com as diretrizes para o milho (van Raij et al., 1997). O experimento foi conduzido em delineamento de blocos ao acaso, com oito tratamentos e quatro repetições. Cada unidade experimental foi composta por quatro fileiras de plantas de 4 m de comprimento, com espaçamento de 0,70 m entre fileiras e 0,20 m entre plantas na fileira, totalizando 80 plantas por parcela (Gonçalves et al., 2024). Durante todo o período experimental, a radiação fotossinteticamente ativa, a temperatura média, a umidade relativa média e a precipitação total foram 1423,6 ± 296,6 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 22,0 ± 2,9°C, 75 ± 5,5% e 100,8 ± 3,3 mm, respectivamente. Os valores climatológicos para cada dia após o plantio (DAP) podem ser encontrados na Figura A1 dos Materiais Suplementares, obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET),

estação automática número 604, localizada a aproximadamente 12,7 km do experimento (Cambuci—RJ). Para garantir o controle e a qualidade dos dados, foram verificados a integridade e consistência dos dados por meio de comparação cruzada com estações meteorológicas locais e dados climatológicos históricos.

# 3.2. Avaliações com Índices de Vegetação

## 3.2.1. Avaliações RGB com VANT

Um VANT DJI Mavic 2 Pro (DJI, Shenzhen, China) equipado com uma câmera Hasselblad L1D-20c (Hasselblad Group, Göteborg, Suécia) foi utilizado para coletar imagens aéreas. A câmera possuía um sensor RGB CMOS de 1" e 20 MP, gerando imagens de 5472 × 3648 pixels. A lente apresentava um campo de visão (FOV) de aproximadamente 77°, equivalente a 35 mm; um intervalo de abertura de f/2.8 a f/11; e um alcance de foco de 1 m a  $\infty$ .

Em conformidade com as regulamentações brasileiras para o uso de VANTs, o drone recebeu o certificado emitido pelo Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (SISANT) da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), válido para solicitar autorização de plano de voo através do Sistema de Solicitação de Acesso ao Espaço Aéreo por Aeronaves Não Tripuladas (SARPAS) do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Além disso, a aeronave possuía Seguro Obrigatório de Responsabilidade Civil Aeronáutica do Operador ou Transportador Aéreo (RETA) atualizado, e o piloto estava devidamente registrado no site do SARPAS (DECEA).

O plano de voo foi criado utilizando a plataforma DroneDeploy (DroneDeploy, Inc., San Francisco, CA, EUA) a uma altura de 80 m acima do nível do solo. A distância amostral do solo (GSD) obtida foi de 2 cm. A área total ocupada pelas 32 parcelas foi de 856,8 m<sup>2</sup>. O sobrevoo frontal e lateral foi ajustado para 80%, e as imagens foram capturadas nos dias 0 (emergência), 19 (V2–V3), 34 (V3–V4), 91 (R2), 98 (R3–R4), 112 (R4–R5), 119 (R5–R6) e 139 DAP (R6). Assim, foi possível obter imagens de toda a área de estudo em um único voo, com duração de aproximadamente 2 min e 42 s. Para minimizar os efeitos de sombreamento, os voos foram realizados em dias ensolarados e sem nuvens, entre 11:00 e 13:00 h. Ainda, dias com vento mínimo foram escolhidos para evitar alterações na estrutura do dossel das plantas. Durante cada voo, 17 imagens foram registradas a uma velocidade de aproximadamente 5 m s<sup>-1</sup>. As imagens foram armazenadas no Google Drive (Google LLC, Mountain View, CA, EUA) e organizadas por cada dia de avaliação.

Para melhorar a precisão das coordenadas das imagens, e para um georreferenciamento mais preciso, foram instalados cinco pontos de controle em solo e seis pontos de verificação na área experimental. As coordenadas dos pontos foram obtidas por meio de levantamento cinemático em tempo real (RTK) usando um par de GNSS geodésicos CHC X91+ (CHCNAV, Smart Navigation and Geo-Spatial Technology Park, Shanghai, China) com precisão milimétrica. O mapa de distribuição das parcelas da área de estudo, dos pontos de controle em solo e dos pontos de verificação é fornecido na Figura 2a. Imagens específicas dos pontos de controle em solo são mostradas na Figura 2b. O erro-médio de georreferenciamento RMS foi de 0,010 m.



Figura 2. (a) Mapa de distribuição das parcelas da área de estudo, dos pontos de controle em solo e dos pontos de verificação. Os pontos de controle em solo

(GCPs) (amarelos) e os pontos de verificação (Cps) (verdes) estão marcados para melhorar a precisão do georreferenciamento. (b) Imagens específicas da aparência real dos pontos de controle em solo (GCPs) instalados na área experimental. Esses GCPs foram utilizados para o georreferenciamento preciso utilizando o levantamento cinemático em tempo real (RTK) com um par de GNSS geodésicos CHC X91+.

Em cada dia de avaliação, o processamento das imagens foi realizado utilizando o software Pix4D Mapper (Pix4D SA, Lausanne, Suíça). Com base em milhões de pontos modelados com precisão, criação de ortomosaicos e geração de modelo digital de superfície, foram realizadas as interpolações necessárias para a reconstrução 3D do experimento e geração dos modelos digitais de superfície para cada dia de missão.

Para calcular os índices de vegetação (VIs), os ortomosaicos segmentados foram utilizados para extrair um conjunto de variáveis de imagem de cada parcela experimental em diferentes estádios do ciclo da cultura: (a) 0 DAP (Semeadura, missão 1); (b) 19 DAP (V2–V3, missão 2); (c) 34 DAP (V3– V4, missão 3); (d) 91 DAP (R2, missão 4); (e) 98 DAP (R3-R4, missão 5); (f) 112 DAP (R4–R5, missão 6); (g) 119 DAP (R5–R6, missão 7); e (h) 138 DAP (R6, missão 8) (Figura 3). Neste experimento, não foram separados os pixels da cultura e do solo; e foi processado todo o conjunto, assumindo que o dossel do milho era denso o suficiente para cobrir o solo a partir de 91 DAP (R2), com base na distribuição entre plantas e fileiras. As variáveis de imagem foram calculadas a partir do número médio de pixels dentro das áreas de interesse em cada parcela (quatro fileiras de plantas por parcela). As bandas vermelho (R), verde (G) e azul (B) (espaço de cor RGB) foram extraídas usando a ferramenta estatística zonal no QGIS, enquanto os componentes de matiz (H); saturação (S); luminosidade (L) (espaço de cor HSL); intensidade (I) (espaço de cor HSI); a\* (a) e b\* (b) (espaco de cor CIELab); e u\* (u) e v\* (v) (espaco de cor CIEluv) foram extraídos das imagens utilizando o software FIJI 2.9.0 (Fiji is Just ImageJ) (de Lima et al., 2021), com o plugin Maize Scanner Breedpix 2.0 (Jaume Casadesús, IRTA, Lleida, Espanha). Para combinar esses dados, foi utilizado um sistema de georreferenciamento preciso que nos permitiu alinhar os dados das imagens com as localizações exatas das medições de campo. Pontos de controle em solo foram utilizados para garantir a correspondência espacial entre os dados obtidos pelo VANT e as observações de campo.



Figura 3. Diagrama da distribuição das missões de levantamento aéreo com drones sobre os estádios fenológicos das plantas. Abreviações: VS = Semeadura (0 DAP), VE = Emergência Vegetativa, V2–V3 = primeiras folhas verdadeiras (19 DAP), V3–V4 = primeiros estádios vegetativos (34 DAP), R2 = grãos leitosos (91 DAP), R3–R4 = grãos em formação (98 DAP), R4–R5 = massa pastosa a massa dura (112 DAP), R5–R6 = massa dura a maturidade fisiológica (119 DAP), R6 = maturidade fisiológica (139 DAP).

Todos os índices de vegetação calculados e utilizados neste estudo foram baseados em componentes de imagens RGB e estão descritos na Tabela 1.

| Variável | Nome  | Descrição  | Cálculo   |
|----------|---|--|---|
| SCI *    | Índice de Cor do<br>Solo  | Avalia as cores do solo em imagens,<br>e pode fornecer informações sobre a<br>composição e características do solo<br>(Sun et al., 2006).  | (R – G)/(R + G)   |
| GLI *    | Índice Folha<br>Verde   | Quantifica a luz verde refletida pelas<br>plantas, o que pode indicar a<br>capacidade fotossintética e<br>crescimento (Barzin et al., 2020).   | (2G – R – B)/(2G +<br>R + B)                                      |
| NGRDI *  | Índice de<br>diferença verde<br>vermelho<br>normalizado         | Compara a diferença entre as<br>intensidades da cor verde e<br>vermelha nas imagens, o que pode<br>fornecer informações sobre o estado<br>fisiológico das plantas (Tucker,<br>1979).   | (G – R)/(G + R)   |
| VARI *   | Índice de<br>resistência<br>atmosférica na<br>região do visível | Avalia o estado fisiológico da<br>vegetação e pode detectar estresses<br>nas plantas (Araus e Kefauver,<br>2018).  | (G - R)/(G + R + B)   |
| GA **    | Índice de Área<br>Verde   | Quantidade a área de coloração<br>verde em uma imagem, o que pode<br>ser útil para a quantificação do<br>índice de área foliar ativo (Buchaillot<br>et al., 2019).   | % de pixels da<br>imagem na faixa de<br>matiz (H) de 60 a<br>180° |
| GGA **   | Índice de Área<br>Mais Verde                                    | O GGA é semelhante ao GA, mas<br>pode fornecer uma avaliação mais<br>sensível das áreas verdes em uma<br>imagem (Buchaillot et al., 2019).   | % de pixels da<br>imagem na faixa de<br>matiz (H) de 80 a<br>180° |
| CSI *    | Índice de<br>Senescência de<br>Culturas                         | Avalia a senescência das culturas,<br>ou seja, a intensidade da<br>degradação das moléculas de<br>clorofilas no dossel das plantas, o<br>que pode ser útil para determinar a<br>intensidade de estresse e estádio de<br>desenvolvimento das culturas<br>(Buchaillot et al., 2019). | 100 × (GA –<br>GGA)/GA  |

Tabela 1. Índices de vegetação extraídos das imagens RGB.

\* Calculado pelo software LibreOffice Calc. \*\* Calculado pelo software ImageJ. R = Red; G = Green e B = Blue do espaço de cores RGB.

3.2.2. Avaliação da Capacidade Fotossintética das Plantas, Estado Hídrico Foliar e Pigmentos Foliares

Realizadas aos 98 (R3–R4), 112 (R4–R5) e 129 (R5–R6) dias após o plantio (DAP), as avaliações de características fisiológicas (pigmentos fotossintéticos, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada — NDVI, emissão de fluorescência da clorofila e propriedades espectrais de reflectância foliar) foram realizadas em folhas individuais de plantas nos dois blocos centrais (blocos 2 e 3) (Figura 4), com quatro plantas por tratamento, na parte intermediária da primeira folha acima da espiga, entre 11 h e 13 h.



Figura 4. (a) Diagrama destacando os blocos centrais (blocos 2 e 3). (b) Medição de campo com equipamento, mostrando a coleta de dados. As avaliações fisiológicas foram realizadas entre 11 h e 13 h para assegurar condições ambientais mais estáveis e adequadas à coleta de dados.

Durante este período, a radiação solar é mais intensa e uniforme, minimizando variações que poderiam interferir em medições como eficiência fotossintética e fluorescência da clorofila. Além disso, evita-se o impacto do orvalho e da alta umidade comum nas primeiras horas da manhã, que poderiam alterar a precisão dos instrumentos. Essa escolha também segue padrões metodológicos amplamente adotados em estudos agronômicos, facilitando a comparabilidade dos resultados com a literatura científica.

O medidor portátil Dualex® (FORCE-A, Orsay, França) foi utilizado para obter índices relativos de clorofila foliar (Chl), de flavonoides (Flavs), de antocianinas (Anths) (pigmentos foliares) e índices de balanço de nitrogênio (NBIs) (Tabela 2).

Tabela 2. Variáveis avaliadas utilizando o medidor portátil de clorofila e pigmentos foliares Dualex® (FORCE-A, Orsay, França).

| Variável | Nome         | Descrição   |
|----------|--------------|---|
|          |              | Estimativa da concentração de clorofilas totais nas folhas: um  |
| Chl      | Clorofila    | indicador da capacidade fotossintética e indicativo de estresse |
|          |              | (Cerovic et al., 2012).   |
|          |              | Estimativa da concentração de flavonoides nas folhas: este      |
| Flav     | Flavonoides  | índice está associado à concentração de compostos orgânicos     |
|          |              | com funções antioxidantes, e podem desempenhar um papel         |
|          |              | importante na resposta a estresses ambientais (Cerovic et al.,  |
|          |              | 2012).  |
|          |              | Estimativa da concentração de antocianinas nas plantas:         |
| Anth     | Antocianinas | estes pigmentos possuem propriedades antioxidantes e atuam      |
|          | Antoolahinas | na proteção contra o excesso da radiação solar (Cerovic et al., |
|          | ,            | 2012).  |
|          | Índice de    | Este índice está associado ao teor de nitrogênio nas folhas e   |
| NBI      | Balanço de   | pode indicar a capacidade fotossintética das folhas (Cerovic et |
|          | Nitrogênio   | al., 2012).   |

Um medidor portátil de NDVI FieldScout CM 1000 (Spectrum Technologies, Aurora, IL, EUA) foi utilizado para obter o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) de folhas individuais (Tucker, 1979). Para realizar essa avaliação, o medidor de NDVI foi mantido a 0,5 m acima do dossel das plantas, com quatro disparos realizados na parte intermediária da primeira folha acima da espiga. As medições foram realizadas entre 11 h e 13 h (UTC-3), em dias com céu limpo e ausência de nuvens, para evitar interferências na leitura causadas por variações de luz ambiente.

Nas mesmas folhas utilizadas para avaliar os pigmentos foliares, a emissão de fluorescência da clorofila, foi avaliada entre 11 h e 13 h utilizando o fluorímetro Pocket PEA não modulado (Hansatech Instruments, King's Lynn, Reino Unido), e as variáveis φPo, φEo, φDo, ABS/CSo e Piabs foram obtidas (Tabela 3). Antes das avaliações de emissão de fluorescência, uma área no meio da folha foi selecionada, e grampos fornecidos pelo fabricante do fluorímetro foram utilizados para manter uma área amostrada de 6 mm<sup>2</sup> no escuro por 30 minutos, a fim de garantir que todo o sistema fotoquímico permanecesse oxidado. Com as variáveis selecionadas da emissão de fluorescência da clorofila, buscou-se caracterizar a absorção geral, captura, transporte e dissipação de energia no aparato fotossintético.

| Tabela  | 3.   | Variáveis | avaliadas   | utilizando  | 0   | fluorímetro | Pocket | PEA | não |
|---------|------|-----------|-------------|-------------|-----|-------------|--------|-----|-----|
| modulad | do ( | Hansatech | Instruments | s, Reino Un | ido | ).          |        |     |     |

| Variável         | Nome   | Descrição   |
|------------------|--|---|
| φPo =<br>TRo/ABS | Eficiência quântica<br>máxima do<br>fotossistema II,<br>PSII   | Eficiência com que o PSII converte fótons da radiação<br>fotossinteticamente ativa (RFA) absorvidos em fotoquímica<br>ativa pela redução de QA ( <i>Quinone Aceptor</i> ). É uma<br>avaliação da taxa de utilização da RFA para a produção de<br>energia guímica (Goltsev et al., 2016).  |
| φEo =<br>ETo/ABS | Eficiência quântica<br>da transferência de<br>elétrons do QA-<br>para a cadeia de<br>transporte de<br>elétrons além de<br>QA | Ao longo da cadeia transportadora de elétrons, esta<br>variável estima a eficiência com que os fótons da RFA<br>absorvidos e utilizados para redução de QA promovem o<br>movimento de elétrons além de QA (Goltsev et al., 2016).   |
| φDo =<br>Dio/ABS | Eficiência quântica<br>da dissipação do<br>excesso de energia<br>térmica   | Eficiência com que o PSII regula a dissipação de energia<br>luminosa quando a demanda de energia química para a<br>fotossíntese é menor. O excesso de energia luminosa é<br>dissipado na forma de calor, em vez de ser usada na<br>fotossíntese. Essa dissipação da energia pode evitar a<br>formação de espécies reativas de oxigênio (Goltsev et al.,<br>2016). |
| ABS/Cso          | Número de centros<br>de antena<br>absorventes por<br>centro de reação<br>aberto  | Quantifica o número de centros de antena que estão<br>absorvendo fótons de luz em relação ao número de centros<br>de reação que estão abertos e prontos para a fotoquímica<br>ativa (Goltsev et al., 2016).   |
| Plabs            | Índice de<br>desempenho para<br>absorção   | Um indicador da atividade funcional do PSII normalizado com a energia absorvida (Goltsev et al., 2016).   |

Além disso, o espectrômetro modelo CI710 (CiD BioScience, Camas, Washington, EUA) (avaliou a parte adaxial da folha) foi utilizado para medir simultaneamente a reflexão da radiação em uma ampla faixa de comprimentos de onda, abrangendo UV até o infravermelho próximo (NIR), na faixa de 360–1100 nm. Para esta pesquisa, os seguintes índices da parte adaxial das folhas individuais foram usados: ARI1, ARI2, CRI1, CRI2, SIPI, FRI, CNDVI, Ge, NDVIe, NPCI, SRPI, PRI, PSRI e WBI (Tabela 4). Para isso, foram utilizadas as mesmas folhas selecionadas para avaliar os índices de pigmentos foliares e a emissão de fluorescência da clorofila, e as avaliações foram realizadas entre 11 h e 13 h (UTC-3).

Tabela 4. Variáveis avaliadas utilizando o espectrômetro foliar CI710 (CiD BioScience, EUA).

| Variável | Nome   | Descrição  | Fórmula                          |
|----------|--|--|----------------------------------|
| CRI1     | Índice de<br>Reflectância de<br>Clorofila 1                                | Este índice está associado ao teor de<br>clorofilas totais das folhas (Myneni et<br>al., 1999).  | (1/W510) -<br>(1/W550)           |
| CRI2     | Índice de<br>Reflectância de<br>Clorofila 2                                | Similar ao CRI1, este índice está<br>associado ao teor de clorofilas totais<br>das folhas (Myneni et al., 1999).   | (1/W510) -<br>(1/W700)           |
| SIPI     | Índice de<br>Pigmentação<br>Independente da<br>Estrutura                   | Fornece informações sobre a<br>concentração de pigmentos nas<br>plantas, independentemente da<br>estrutura da folha (Gitelson et al.,<br>2001).  | (W800 - W445) /<br>(W800 + W680) |
| FRI      | Índice de<br>Reflectância de<br>Flavonoides                                | Detecta flavonoides nas plantas, que<br>são pigmentos responsáveis pelas<br>cores amarela e vermelha (Nuzzo et<br>al., 2015).  | (1/W410 -<br>1/W460) * W800      |
| CNDVI    | Índice de<br>Vegetação de<br>Diferença<br>Normalizada do<br>Dossel         | Uma versão normalizada do NDVI que<br>leva em consideração a influência da<br>geometria do dossel vegetativo na<br>medição (Li et al., 2017).  | (W750 - W705) /<br>(W750 + W705) |
| Ge       | Índice de Banda<br>Verde (medido pelo<br>espectrômetro)<br>Índice de       | Este índice está associado ao teor de<br>clorofilas totais das folhas (Teillet et al.,<br>1997)  | W554 / W677                      |
| NDVIe    | Vegetação de<br>Diferença<br>Normalizada<br>(medido pelo<br>espectrômetro) | Este índice está associado ao teor de<br>clorofilas totais das folhas (Tucker,<br>1979).   | (W800 - W680) /<br>(W800 + W680) |
| NPCI     | Índice Normalizado<br>de Pigmento de<br>Clorofila                          | Este índice está associado ao teor de<br>clorofilas totais das folhas (Penillaa e<br>Asrar, 2018)  | (W680 - W430) /<br>(W680 + W430) |
| SRPI     | Índice de Pigmento<br>de Razão Simples                                     | Este índice está associado com a<br>relação carotenoides/clorofila a das<br>folhas (Peñuelas et al., 1995).  | W430 / W680                      |
| PRI      | Índice de<br>Reflectância<br>Fotoquímica                                   | Este indice se correlaciona com o<br>estado de epoxidação do ciclo das<br>xantofilas (está associado à eficiência<br>no uso da radiação fotossintética)<br>(Gamon et al., 1994).       | (W531 - W570) /<br>(W531 + W570) |
| PSRI     | Índice de<br>Reflectância de<br>Senescência das<br>Plantas                 | Este índice está associado ao processo<br>de senescência das folhas e avalia a<br>intensidade da relação teor de<br>carotenoides/teor de clorofilas totais<br>(Merzlyak et al., 1999). | (W680 - W500) /<br>W750          |
| WBI      | Índice de Água   | Avalia o estado hídrico das folhas<br>(Peñuelas et al., 1994).   | (W900 / W970)                    |

Comprimento de onda (W).

As avaliações supracitadas que foram efetuadas em folhas individuais tiveram, em média, cinco minutos para serem realizadas em cada

parcela. Para completar a pesquisa de um dia, foram necessárias aproximadamente duas horas por dispositivo.

#### 3.2.3. Avaliação de Características Morfoagronômicas

O florescimento masculino (FM) e feminino (FF) foram expressos em número de dias após o plantio (DAP), até que 50% das plantas na área de estudo de cada parcela apresentassem panículas e estilos-estigmas emergidos, respectivamente. A altura média das plantas (AP) foi expressa em metros (m), medida do solo até o nó de inserção da espiga. Antes da colheita, o número total de plantas (NP) foi determinado contando o número total de plantas na parcela, e o número de espigas (NP) foi determinado contando o número de espigas por parcela. O comprimento médio da espiga (CME) e o diâmetro médio da espiga (DME) foram determinados usando um paquímetro digital e expressos em milímetros (mm), obtidos pela média de seis espigas por parcela. O peso de 100 grãos (MCG) foi obtido pesando-se 100 grãos de cada fileira da parcela, em uma balança analítica com resolução de 0,001 g. A produtividade de grãos (RG) foi avaliada após a debulha das espigas, estimada em kg por parcela, corrigida para 13% de umidade e convertida para kg.ha<sup>-1</sup> (Gonçalves et al., 2024).

#### 3.3. Avaliação de Altura de Planta

A avaliação da altura das plantas (AP) de milho foi realizada para comparar dados obtidos manualmente e por Modelos Digitais de Superfície (MDS) gerados por VANT em diferentes estádios de crescimento: 34 DAP (V3–V4), 91 DAP (R2), 98 DAP (R3–R4), 112 DAP (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6). As medições manuais foram realizadas em seis plantas por parcela, com a altura medida até a folha bandeira, e a média foi calculada para cada parcela.

Os MDS foram derivados de levantamentos fotogramétricos usados também na análise de índices de vegetação. Para remover pixels de solo e plantas daninhas rasteiras, aplicou-se uma limiarização binária, mantendo apenas pixels com altura ≥ 30 cm. O MDS de cada missão foi ajustado com base no MDS de 0 DAP (Semeadura) para calcular alturas absolutas. A altura média em cada parcela foi obtida por estatística zonal no QGIS.

## 3.4. Avaliação de Cobertura Vegetal

Os ortofotomosaicos e as parcelas utilizadas para a avaliação de cobertura vegetal verde foram os mesmos empregados na análise do índice de vegetação e altura da planta. A determinação da porcentagem de cobertura vegetal verde foi realizada por meio do cálculo do Índice de Resistência Atmosférica na região do Visível (VARI), definido pela fórmula: (G – R)/(G + R + B). O cálculo do índice foi executado utilizando a ferramenta Calculadora de Raster do QGIS, onde a equação correspondente foi inserida no campo de expressão.

Para identificar as áreas de vegetação verde, uma classificação binária foi aplicada com base nos valores obtidos do VARI, utilizando a ferramenta de limiarização binária. O método de *thresholding* definiu o valor de corte para separar vegetação verde e áreas não vegetadas. Foi estabelecido que valores de VARI acima de 0,02 representavam vegetação verde, enquanto os demais valores indicam solo ou outras coberturas [VARI  $\geq$  0,02  $\rightarrow$  Vegetação Verde (1); VARI < 0,02  $\rightarrow$  Não vegetação (0)]. O valor de *threshold* foi ajustado empiricamente com base em análises visuais (fotointerpretação) e testes preliminares com as imagens.

Cada parcela foi usada como máscara para extrair as áreas correspondentes à vegetação verde. A partir da classificação binarizada, foram calculados o número total de pixels e a quantidade de pixels representando vegetação verde em cada parcela e em cada missão de voo, utilizando a ferramenta de Estatística Zonal do QGIS. A porcentagem de cobertura vegetal verde foi determinada pela equação 1:

Cobertura Vegetal (%) = 
$$\frac{TotaldePixels}{PixelsdeVegetação} \times 100$$
 (Eq.1)

Adicionalmente, para verificar o efeito da eliminação de possíveis interferências de solo e plantas daninhas, o raster do índice VARI foi dividido pelo Modelo Digital de Superfície (MDS) binarizado utilizado para as avaliações de altura de planta, mantendo apenas pixels com altura igual ou superior a 0,3 m. Essa etapa também foi realizada na Calculadora de Raster do QGIS.

### 3.5. Análise Estatística

Boxplots (Figura A2) foram utilizados para avaliar a variabilidade dos dados e identificar valores discrepantes. Os dados passaram por uma análise de variância dos quadrados médios usando o teste F para comparar as médias de diferentes grupos experimentais e determinar se existem diferenças estatisticamente significativas entre eles. Em seguida, as variáveis com resultados significativos foram submetidas à análise de correlação de Pearson para medir a força e a direção da associação linear entre pares de características. O teste de Tukey foi usado como análise post-hoc após a ANOVA para realizar comparações entre as médias dos genótipos e identificar quais genótipos diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade.

A análise de componentes principais (PCA) foi realizada para identificar os componentes principais que explicam a maior parte da variação nas variáveis medidas. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Genes versão 1990.2023.45 (Cruz, 2013), e os gráficos e PCAs foram processados no programa R. A análise individual foi realizada para avaliar a diferença entre os genótipos de acordo com o seguinte modelo estatístico:

$$Yij=\mu+Blj+Gi+\epsilon ij$$
 (Eq.2)

onde *Yij* é o valor observado para a variável em estudo referente à combinação do i-ésimo nível do fator Genótipo com o j-ésimo nível do fator Ano Agrícola;  $\mu$  é a média geral; *Blj* é o efeito do j-ésimo bloco, assumindo *NID*(0, $\sigma^2$ ); *Gi* é o efeito do i-ésimo nível do fator Genótipo sobre o valor observado;  $\epsilon i j$  é o erro experimental associado à observação, assumindo  $NID(0,\sigma^2)$ .

# 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Ortofotomosaicos

Para obter os dados do drone, cada sobrevoo durante o experimento (missão) produziu 17 arquivos de imagem, que formaram produtos de ortofotomosaico (uma única imagem para cada missão, em formato tif). Os relatórios de processamento de imagens produzidos pelo Pix4D Mapper indicam que todas as características de qualidade foram alcançadas. Esses parâmetros dos relatórios estão associados às imagens (mediana de pontos-chave por imagem), ao conjunto de dados (imagens calibradas e habilitadas), ao uso ideal da câmera (parâmetros internos da câmera) e à georreferência (pontos de controle 3D no solo e erro quadrático médio (RMS)). Os ortofotomosaicos resultantes do processamento tiveram uma resolução espacial de 2 cm/pixel e são mostrados na Figura 5, com o vetor de divisão da parcela (em branco) (bloco e híbrido).





(g) (h) Figura 5. Ortofotomosaico do experimento em (a) 0 DAP (Semeadura); (b) 19 DAP (V2–V3); (c) 34 DAP (V3–V4) (missão 3); (d) 91 DAP (R2) (missão 4); (e)

98 DAP (R3–R4) (missão 5); (f) 112 DAP (R4–R5) (missão 6); (g) 119 DAP (R5–R6) (missão 7); (h) 139 DAP (R6) (missão 8). UENF 506-11 (H1), UENF 506-16 (H2), UENF MSV 2210 (H3), UENF MS 2208 (H4), BM 207 (H5), LG 6036 (H6), 30F35R (H7) e AG 1051 (H8); Ponto vermelho: Pontos de Controle no Solo (GCPs).

O primeiro plantio do híbrido comercial BM 207 (H5) a 0 DAP (Semeadura) foi mal-sucedido (Figura 5b), por isso este híbrido foi replantado a 19 DAP (V2–V3) e, como estava em um estádio fenológico diferente dos outros híbridos, não foi considerado em nenhuma análise estatística. Para chegar a essa divisão, a análise de variância dos quadrados médios foi realizada usando o teste F e a análise de correlação de Pearson, considerando todos os híbridos. Como todas as variáveis RGB obtidas pelo VANT não apresentaram correlações significativas com o rendimento de grãos (RG), optou-se por desconsiderar o híbrido 5. A Figura 5d mostra danos nas plantas dos híbridos 5, 8, 6 e 2 no bloco 4. No entanto, os dados do bloco 4 foram coletados e incluídos nas análises estatísticas. A senescência foliar foi observada a partir de 112 DAP (R4–R5) (Figuras 5f–h).

Com o posicionamento de parcelas experimentais mostrado na Figura A3a (parcelas com o mesmo tamanho, alinhadas e equidistantes), nenhuma variável correlacionou significativamente com o rendimento de grãos. O tamanho da parcela foi pensado de forma a sobrepor as duas linhas centrais de cada parcela, excluindo as plantas das bordas entre os blocos. Um segundo teste (Figura A3b) foi realizado movimentando as parcelas para posições que englobassem o maior número de plantas. Ainda assim, considerando os 8 híbridos. apenas uma variável associada à imagem correlacionou significativamente com o rendimento de grãos. Por fim, o híbrido H5 foi excluído (Figura A3c) dos cálculos estatísticos por ter sido replantado, os resultados apresentados nos capítulos seguintes são provenientes dessa organização de parcelas.

Os relatórios de processamento de imagens do Pix4D Mapper indicaram que os parâmetros de qualidade da imagem, como conjunto de dados, otimização da câmera e georreferenciamento, foram adequados. Isso sugere que as imagens coletadas a uma altitude de 80 m durante as missões de levantamento foram processadas com sucesso, resultando em ortoimagens de alta qualidade (2 cm/pixel), que serviram como base para as análises subsequentes (Daughtry, 2000).

Como as imagens aéreas foram adquiridas em condições de céu com ausência de nuvens, não foi considerada necessária a correção de calibração radiométrica cruzada. Quando os coeficientes de determinação entre os valores das imagens calibradas e não calibradas são considerados altos, as fotos não necessitam de calibração de cor separada (Penczek et al., 2014). Além disso, de acordo com Buchaillot et al. (2019), a aplicação de coeficientes de calibração de cor não melhorou o desempenho do índice de vegetação RGB.

Os dados brutos do experimento estão detalhados no Apêndice D.

# 4.2. Índices de Vegetação

4.2.1. Variância de Quadrados Médios Usando o Teste F

A partir da avaliação em 91 DAP (R2), os componentes e índices RGB mostraram diferenças significativas para a maioria das características, com exceções em 91 DAP (R2) (a, u, v, GA, GGA e CSI), 98 DAP (R3–R4) (L e v), e 112 e 119 DAP (R5–R6) (I, L, b e v). As missões anteriores a 91 DAP (R2) (missões 1, 2 e 3) não mostraram diferenças significativas para os índices e não foram utilizadas nas análises (Tabela 5).

| FV    | Trat.           | Mé.        | CV%    | Trat.       | Mé.      | CV%     | Trat.      | Mé.       | CV%   |
|-------|-----------------|------------|--------|-------------|----------|---------|------------|-----------|-------|
| Var.  | 34 DA           | AP (V3–V4) |        | 91          | DAP (R2) |         | 98 D       | AP (R3–R4 | 4)    |
| SCI   | 0,0010ns        | -0,07      | 34,76  | 0,0011**    | -0,12    | 5,34    | 0,0016**   | -0,08     | 10,74 |
| GLI   | 0,0008ns        | 0,17       | 12,35  | 0,0015**    | 0,16     | 5,32    | 0,0010**   | 0,12      | 7,06  |
| NGRDI | 0,0010ns        | 0,07       | 34,76  | 0,0011**    | 0,12     | 5,34    | 0,0016**   | 0,08      | 10,74 |
| VARI  | 0,0019ns        | 0,1        | 34,75  | 0,0024**    | 0,19     | 5,59    | 0,0046**   | 0,14      | 11,88 |
| I     | 0,0001ns        | 0,17       | 6,11   | 0,0005**    | 0,14     | 7,80    | 0,0003*    | 0,13      | 7,25  |
| Н     | 45,5221ns       | 77,18      | 6,9    | 68,8384**   | 98,78    | 2,69    | 214,0860** | 92,6      | 5,22  |
| S     | 0,0009ns        | 0,31       | 6,07   | 0,0033**    | 0,19     | 10,78   | 0,0023*    | 0,16      | 14,8  |
| L     | 2,0473ns        | 20,49      | 5,55   | 8,3870*     | 16,25    | 10,01   | 3,9758ns   | 15,2      | 9,5   |
| а     | 2,4035ns        | -8,24      | 12,29  | 1,1599ns    | -8,29    | -8,51   | 1,0117*    | -6,42     | 7,89  |
| b     | 1,4848ns        | 16,52      | 5,22   | 257,7162**  | 13,95    | 35,76   | 119,3165*  | 11,56     | 49,67 |
| u     | 2,2366ns        | -2,88      | 36,41  | 0,3437ns    | -4,04    | 12,44   | 0,6857**   | -2,65     | 11,25 |
| V     | 1,5307ns        | 14,39      | 6      | 4,9469ns    | 9,32     | 15,7    | 2,0049ns   | 7,86      | 16,71 |
| GA    | 0,0030ns        | 0,37       | 10,61  | 0,0001ns    | 0,45     | 0,93    | 0,0002ns   | 0,44      | 2,68  |
| GGA   | 0,0071ns        | 0,21       | 30,98  | 0,0009ns    | 0,43     | 5,07    | 0,0093**   | 0,36      | 11,97 |
| CSI   | 274,9316ns      | 44,89      | 28,78  | 48,3089ns   | 4,61     | 93,26   | 382,7851** | 18,99     | 44,75 |
|       | 112 DAP (R4–R5) |            |        |             |          | )       |            |           |       |
| SCI   | 0,0026**        | -0,03      | 40,86  | 0,0034**    | -0,01    | 269,95  |            |           |       |
| GLI   | 0,0010**        | 0,09       | 14,85  | 0,0014**    | 0,07     | 21,78   |            |           |       |
| NGRDI | 0,0026**        | 0,03       | 40,86  | 0,0034**    | 0,01     | 269,95  |            |           |       |
| VARI  | 0,0071**        | 0,06       | 41,24  | 0,0091**    | 0,01     | 258,08  |            |           |       |
| I     | 0,0001ns        | 0,15       | 8,25   | 0,0001ns    | 0,16     | 5,6     |            |           |       |
| Н     | 459,5754**      | 74,6       | 7,97   | 691,5479**  | 62,53    | 10,76   |            |           |       |
| S     | 0,0026**        | 0,18       | 12,59  | 0,0019*     | 0,18     | 13,11   |            |           |       |
| L     | 10364503ns      | 625,65     | 514,58 | 0,3807ns    | 17,74    | 6,21    |            |           |       |
| а     | 3,3344**        | -4,96      | 15,51  | 6,4594**    | -3,66    | 19,87   |            |           |       |
| b     | 2,7117ns        | 10,43      | 13,64  | 1,6698ns    | 10,19    | 9,69    |            |           |       |
| u     | 3,6427**        | -1,2       | 45,86  | 6,3041**    | -0,01    | 4968,95 |            |           |       |
| V     | 1,5572ns        | 8,84       | 17,32  | 1,0389ns    | 8,62     | 10,61   |            |           |       |
| GA    | 0,0166**        | 0,34       | 11,08  | 0,0379**    | 0,24     | 19,9    |            |           |       |
| GGA   | 0,0518**        | 0,17       | 33,2   | 0,0334**    | 0,1      | 40,55   |            |           |       |
| CSI   | 2143,4674**     | 56,1       | 18,69  | 1482,5698** | 66,23    | 11,99   |            |           |       |

Tabela 5. Resumo da análise da variância de componentes RGB e índices de vegetação (VANT).

ns—não significativo usando o teste F; \*\* e \* significativos a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, de acordo com o teste F. Tratamentos (Trat.); Média (Me.); Coeficiente de variação (CV%); Variáveis (Var.); Dias após o Plantio (DAP); Índice de Cor do Solo (SCI); Índice de Folha Verde (GLI); Índice Normalizado de Diferença Verde Vermelha (NGRDI); Índice de Resistência Atmosférica Visível (VARI); Intensidade (I); Matiz (H); Saturação (S); Luminosidade (L); a\* (a); b\* (b); u\* (u); v\* (v); Índice de Área Mais Verde (GGA); Índice de Senescência da Cultura (CSI).

Os índices RGB (vermelho, verde, azul) obtidos por VANT desempenharam um papel significativo na diferenciação entre híbridos de milho. Esses índices são sensíveis a características das plantas além da nutrição mineral e disponibilidade de água, incluindo a concentração de pigmentos foliares, estrutura dos órgãos e vigor geral das plantas. Os resultados da ANOVA revelaram diferenças significativas nos componentes RGB em diferentes espaços de cor entre os híbridos de milho. Essas variações podem ser interpretadas em termos de concentração de pigmentos e estrutura da planta. Os componentes RGB, que representam a intensidade de vermelho, verde e azul, respectivamente, podem fornecer informações sobre a concentração e distribuição de pigmentos nas plantas (Li et al., 2016). Por exemplo, diferenças no espectro vermelho podem indicar variações na concentração de clorofila, um pigmento crucial para a fotossíntese. O espectro verde está relacionado à quantidade de massa verde nas plantas, enquanto o espectro azul reflete a densidade do dossel e a estrutura da planta (Mathews e Jensen, 2013).

Assim, os índices de vegetação podem estar relacionados a uma maior concentração de pigmentos foliares, e essa maior concentração pode contribuir para uma maior eficiência/capacidade fotossintética ou taxa de fotossíntese. Consequentemente, isso pode levar a um maior crescimento do dossel e ao desenvolvimento mais vigoroso das plantas (Holman et al., 2016).

Os índices de vegetação calculados a partir das imagens de drones também mostraram diferenças significativas entre os híbridos de milho em diferentes estádios de desenvolvimento. Em resumo, as diferenças nos componentes RGB em diferentes espaços de cor e os IVs entre os híbridos de milho podem ser explicadas em termos de concentração de pigmentos, eficiência fotossintética, crescimento do dossel e vigor das plantas. Esses resultados destacam a importância de considerar múltiplas variáveis e índices ao avaliar o desempenho das culturas, dado que cada um pode fornecer informações específicas sobre aspectos relevantes da produção vegetal.

Em diferentes DAP, a análise de variância revelou variações significativas em vários componentes e índices RGB obtidos por VANT. No estádio inicial (91 DAP (R2)), foram observadas diferenças estatisticamente significativas em componentes como SCI, GLI, NGRDI, VARI e I. Essas variações podem ser atribuídas à resposta inicial da planta aos fatores ambientais e de crescimento. À medida que a cultura progrediu para 98 DAP (R3–R4), H e S também apresentaram diferenças significativas, indicando possíveis mudanças na estrutura foliar e na concentração de pigmentos durante esse período. Aos 112 DAP (R4-R5), além dos componentes anteriores, L, a e b também exibiram diferencas significativas, sugerindo uma evolução complexa nas características de cor e estrutura da planta. Quando a cultura atingiu 119 DAP (R5–R6), os componentes u e v apresentaram diferenças significativas, sugerindo possíveis variações na distribuição de cor das plantas. Os índices de vegetação GA, GGA e CSI também apresentaram variações estatisticamente significativas ao longo dos diferentes DAPs, refletindo mudanças na eficiência fotossintética e no vigor geral das plantas à medida que o ciclo da cultura avançava. Esses resultados destacam a dinâmica das características das plantas ao longo do ciclo de crescimento e a importância de considerar essas mudanças ao avaliar o desempenho dos híbridos de milho em diferentes estádios de desenvolvimento (Geipel et al., 2014).

Na análise de variância de características morfoagronômicas, diferenças significativas foram observadas para todas as variáveis, exceto para o número de plantas (NP) (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo da análise da variância das características morfoagronômicas avaliadas.

| Variáveis | Tratamentos    | Médias  | CV(%) |
|-----------|----------------|---------|-------|
| FM        | 37,5804**      | 60,45   | 2,41  |
| FF        | 37,5751**      | 64,18   | 3,09  |
| AP        | 0,2265**       | 2,66    | 2,65  |
| NP        | 73,4048ns      | 79,39   | 8,64  |
| CME       | 780,6262**     | 248,42  | 1,92  |
| DME       | 17,0620**      | 59      | 2,13  |
| NE        | 380,7381**     | 66,61   | 12,52 |
| MCG       | 1184,0254**    | 32,71   | 4,74  |
| RG        | 7991551,6579** | 6400,66 | 15,31 |

ns—não significativo pelo teste F; \*\* significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Coeficiente de Variação (CV%); florescimento masculino (FM); florescimento feminino (FF); altura média de planta (AP); número total de plantas (NP); comprimento médio da espiga (CME); diâmetro médio da espiga (DME); número de espigas (NE); massa de 100 grãos (MCG); rendimento de grãos (RG) (Gonçalves et al., 2024).

Diferenças significativas nas variáveis morfoagronômicas entre os híbridos de milho ressaltaram sua variabilidade genética, mesmo em condições de cultivo uniformes. Isso demonstra a importância de selecionar híbridos que se adequem a condições de cultivo específicas. Essas diferenças permitem a escolha de híbridos que atendam melhor às necessidades e condições locais (Montes de Oca e Flores, 2021; Kior et al., 2024).

O número de plantas (NP) não apresentou diferenças significativas entre os híbridos, apesar das variações em outras variáveis. Isso sugere que, nas condições de cultivo do presente estudo, todos os híbridos mantiveram um padrão semelhante de densidade populacional. Esse fato é importante para a consistência e confiabilidade dos resultados do estudo, uma vez que a densidade populacional uniforme entre os híbridos reduz fontes potenciais de variação que poderiam mascarar os efeitos das características genéticas em outras variáveis analisadas (Díaz-Varela et al., 2015).

Entre as variáveis associadas à capacidade fotossintética e aos pigmentos, apenas φEo e Plabs (98 DAP (R3–R4)), ABS/Cso e Plabs (112 DAP (R4–R5)) e Anth (119 DAP (R5–R6)) mostraram resultados significativos (Tabela 7).

| FV   | Trat.     | Mé.        | CV%   | Trat.           | Mé.            | CV%        | Trat.     | Mé.        | CV%    |  |  |
|--|-----------|------------|-------|-----------------|----------------|------------|-----------|------------|--------|--|--|
| Var.   | 98        | DAP (R3–R4 | )     | 112             | 2 DAP (R4–R    | 5)         | 119       | DAP (R5-R6 | 6)     |  |  |
|  |           |            |       | Dualex® (FOR    | CE-A, Orsay,   | França)    |           |            |        |  |  |
| Chl  | 10,8994ns | 40,38      | 6,20  | 21,1315ns       | 34,58          | 13,66      | 32,8303ns | 31,67      | 15,85  |  |  |
| Flav   | 0,0438ns  | 1,30       | 10,33 | 0,0467ns        | 1,38           | 11,00      | 0,0442ns  | 1,39       | 9,26   |  |  |
| Anth   | 0,0005ns  | 0,17       | 8,64  | 0,0006ns        | 0,22           | 11,88      | 0,0032**  | 0,22       | 6,35   |  |  |
| NBI  | 29,9538ns | 32,72      | 11,39 | 36,3143ns       | 26,32          | 19,95      | 11,7909ns | 23,23      | 14,92  |  |  |
| FieldScout CM 1000 (Spectrum Technologies, Aurora, IL) |           |            |       |                 |                |            |           |            |        |  |  |
| NDVI   | 0,0113ns  | 0,71       | 9,24  | 0,0138ns        | 0,66           | 16,85      | 0,0131ns  | 0,63       | 11,09  |  |  |
|  |           |            | P     | ocket PEA (Hans | satech Instrun | nents, UK) |           |            |        |  |  |
| φΡο  | 0,0028ns  | 0,72       | 4,40  | 0,0012ns        | 0,75           | 2,43       | 0,0031ns  | 0,73       | 6,04   |  |  |
| φΕο  | 0,0049*   | 0,45       | 7,08  | 0,0026ns        | 0,45           | 6,61       | 0,0024ns  | 0,40       | 12,61  |  |  |
| φDo  | 0,0028ns  | 0,28       | 11,24 | 0,0012ns        | 0,25           | 7,36       | 0,0031ns  | 0,27       | 16,16  |  |  |
| ABS/Cso  | 406779ns  | 4464,43    | 7,67  | 159096*         | 4305,82        | 3,35       | 384162ns  | 4148,59    | 13,56  |  |  |
| Plabs  | 1,7304**  | 2,68       | 12,78 | 2,4285**        | 2,85           | 17,50      | 0,5089ns  | 1,95       | 34,43  |  |  |
|  |           |            |       | CI710 (CiD      | BioScience, L  | JSA)       |           |            |        |  |  |
| ARI1   | 0,0001ns  | -0,02      | 25,30 | 0,0001ns        | -0,01          | 24,09      | 0,0001ns  | -0,01      | 94,89  |  |  |
| ARI2   | 0,0183ns  | -0,91      | 22,45 | 0,0151ns        | -0,66          | 23,54      | 0,1613ns  | -0,41      | 96,35  |  |  |
| CRI1   | 0,0001ns  | 0,03       | 13,39 | 0,0001ns        | 0,05           | 11,16      | 0,0001ns  | 0,03       | 28,57  |  |  |
| CRI2   | 0,0001ns  | 0,01       | 33,33 | 0,0001ns        | 0,03           | 19,81      | 0,0001ns  | 0,02       | 32,53  |  |  |
| SIPI   | 0,0007ns  | 0,74       | 3,20  | 0,0004ns        | 0,76           | 2,55       | 0,0051ns  | 0,67       | 12,23  |  |  |
| FRI  | 0,0121ns  | 1,07       | 17,24 | 0,0196ns        | 1,12           | 18,33      | 0,0641ns  | 1,14       | 19,35  |  |  |
| CNDVI  | 0,0018ns  | 0,52       | 7,58  | 0,0009ns        | 0,49           | 11,00      | 0,0094ns  | 0,37       | 35,16  |  |  |
| Ge   | 0,0441ns  | 2,03       | 5,05  | 0,0452ns        | 2,24           | 5,46       | 0,2413ns  | 1,97       | 19,57  |  |  |
| NDVIe  | 0,0010ns  | 0,73       | 4,05  | 0,0005ns        | 0,75           | 3,00       | 0,0227ns  | 0,61       | 25,14  |  |  |
| NPCI   | 0,0002ns  | 0,10       | 18,27 | 0,0002ns        | 0,09           | 14,97      | 0,0207ns  | 0,16       | 78,28  |  |  |
| SRPI   | 0,0005ns  | 0,82       | 3,56  | 0,0005ns        | 0,84           | 2,60       | 0,0274ns  | 0,76       | 19,93  |  |  |
| PRI  | 0,0002ns  | 0,04       | 31,41 | 0,0001ns        | 0,02           | 63,65      | 0,0007ns  | 0,01       | 275,91 |  |  |
| PSRI   | 0,0001ns  | -0,03      | 14,34 | 0,0001*         | -0,02          | 16,58      | 0,0158ns  | 0,02       | 446,00 |  |  |
| WBI  | 0,0007ns  | 0,72       | 5,57  | 0,0018ns        | 0,96           | 5,33       | 0,0005ns  | 0,74       | 10,35  |  |  |

Tabela 7. Resumo da análise da variância das características fotossintéticas avaliadas.

Não significativo (ns) pelo teste F; \*\* e \* significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. Tratamentos (Trat.); Média (Mé.); Coeficiente de Variação (CV%); Variáveis (Var.); Dias Após o Plantio (DAP). Clorofila (Chl); Flavonoides (Flav); Antocianinas (Anth); Índice de Balanço de Nitrogênio (NBI); Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI); Eficiência quântica efetiva do fotossistema II, PSII (φPo); Eficiência quântica da dissipação do excesso de energia térmica (φEo); Eficiência quântica da dissipação regulatória (φDo); Número de centros de antena absorventes por centro de reação aberto (ABS/Cso); Probabilidade de um centro de antena estar excitado (Plabs); Índice de Reflectância de Antocianina 1 (ARI1); Índice de Reflectância de Antocianina 2 (ARI2); Índice de Reflectância de Clorofila 1 (CRI1); Índice de Reflectância de Diferença Normalizada do Dossel (CNDVI); Banda Verde medida pelo espectrômetro (Ge);

Índice de Vegetação de Diferença Normalizada medido pelo espectrômetro (NDVIe); Índice Normalizado de Pigmento de Clorofila (NPCI); Índice de Pigmento de Razão Simples (SRPI); Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI); Índice de Reflectância de Senescência das Plantas (PSRI); Índice de Banda de Água (WBI).

Várias variáveis relacionadas à capacidade fotossintética e à concentração de pigmentos nas folhas individuais mostraram diferenças significativas entre os híbridos de milho em diferentes estádios de desenvolvimento, indicando variações na eficiência fotoquímica, concentração de pigmentos fotossintéticos ou vigor da planta. As variáveis φEo e Plabs aos 98 DAP (R3–R4) sugerem variações na eficiência fotoquímica, indicando adaptações dos híbridos para um uso mais eficiente da radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Aos 112 DAP (R4–R5), as variáveis ABS/Cso, Plabs e PSRI, e aos 119 DAP (R5–R6), Anth, refletem diferenças na concentração de pigmentos foliares. Esses achados estão de acordo com estudos anteriores, destacando a importância da capacidade fotossintética e da concentração de pigmentos associados à fotossíntese e à proteção foliar na seleção de híbridos de milho adequados a condições específicas de cultivo (Gilmore, 1997).

### 4.2.2. Teste de Tukey para Comparação das Médias

Para as variáveis e índices RGB de VANT, o resultado do teste de comparação de médias (Tukey) está mostrado na Tabela 8. A Tabela 9 contém os resultados das variáveis morfoagronômicas. Em ambas as tabelas, as médias e as letras que indicam grupos estatisticamente similares são apresentadas para cada variável em cada DAP.

| Variáveis | UENF 506-11<br>(H1) | UENF 506-16<br>(H2) | UENF MSV<br>2210 (H3) | UENF MS<br>2208 (H4) | LG 6036 (H6) | 30F35R (H7) | AG 1051 (H8) |
|-----------|---------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|--------------|-------------|--------------|
|           |                     |                     | 91 DA                 | P (R2)               |              |             |              |
| SCI       | -0,11a              | -0,13b              | -0,11a                | -0,11a               | -0,15c       | -0,13b      | -0,11a       |
| GLI       | 0,15bcd             | 0,17b               | 0,15cd                | 0,16bc               | 0,20a        | 0,15bcd     | 0,14d        |
| NGRDI     | 0,11c               | 0,13b               | 0,11c                 | 0,11c                | 0,15a        | 0,13b       | 0,11c        |
| VARI      | 0,17d               | 0,20bc              | 0,17d                 | 0,17d                | 0,24a        | 0,21ab      | 0,18cd       |
| I         | 0,14ab              | 0,14ab              | 0,14ab                | 0,16a                | 0,12b        | 0,13ab      | 0,14ab       |
| Н         | 94,82c              | 97,95bc             | 96,73bc               | 94,31c               | 100,44abc    | 106,18a     | 101,07ab     |
| S         | 0,19ab              | 0,20a               | 0,18ab                | 0,21a                | 0,23a        | 0,15b       | 0,15b        |
| L         | 16,50ab             | 16,48ab             | 16,31ab               | 18,76a               | 14,09b       | 15,05ab     | 16,54ab      |
| b         | 11,14b              | 11,61b              | 10,70b                | 12,77b               | 31,98a       | 9,44b       | 9,98b        |
|           |                     |                     | 98 DAP                | (R3–R4)              |              |             |              |
| SCI       | -0,07a              | -0,08a              | -0,07a                | -0,07a               | -0,11b       | -0,12b      | -0,08a       |
| GLI       | 0,12bc              | 0,13bc              | 0,11c                 | 0,12bc               | 0,16a        | 0,13b       | 0,11c        |
| NGRDI     | 0,07b               | 0,08b               | 0,07b                 | 0,07b                | 0,11a        | 0,12a       | 0,08b        |
| VARI      | 0,11b               | 0,13b               | 0,11b                 | 0,12b                | 0,18a        | 0,20a       | 0,13b        |
| I         | 0,14ab              | 0,13ab              | 0,14ab                | 0,14a                | 0,121        | 0,12ab      | 0,14a        |
| Н         | 87,52b              | 89,21b              | 87,63b                | 87,48b               | 95,67b       | 107,54a     | 93,19b       |
| S         | 0,17ab              | 0,18ab              | 0,16ab                | 0,19a                | 0,19a        | 0,13b       | 0,14ab       |
| а         | -6,02a              | -6,31ab             | -5,84a                | -6,52ab              | -7,22b       | -6,92ab     | -6,10ab      |
| b         | 9,74b               | 9,90b               | 9,43b                 | 10,73ab              | 23,82a       | 8,22b       | 9,06b        |
| u         | -2,28a              | -2,48ab             | -2,21a                | -2,56ab              | -3,13bc      | -3,30c      | -2,56ab      |
| GGA       | 0,33b               | 0,35ab              | 0,32b                 | 0,31b                | 0,41ab       | 0,44a       | 0,35ab       |
| CSI       | 25,55ab             | 21,00abc            | 26,26ab               | 29,02a               | 8,46bc       | 2,80c       | 19,84abc     |
|           |                     |                     | 112 DAP               | (R4–R5)              |              |             |              |
| SCI       | -0,02ab             | -0,03abc            | -0,01a                | -0,01ab              | -0,06cd      | -0,08d      | -0,04bc      |
| GLI       | 0,08bc              | 0,09abc             | 0,08c                 | 0,08bc               | 0,20a        | 0,11ab      | 0,09bc       |
| NGRDI     | 0,02cd              | 0,03bcd             | 0,01d                 | 0,01cd               | 0,06ab       | 0,08a       | 0,04bc       |
| VARI      | 0,03cd              | 0,04bcd             | 0,02d                 | 0,02d                | 0,09ab       | 0,13a       | 0,07bc       |
| Н         | 67,66bc             | 70,78bc             | 64,52c                | 64,91c               | 79,86ab      | 93,70a      | 80,81ab      |
| S         | 0,19abc             | 0,19abc             | 0,19abc               | 0,20ab               | 0,21a        | 0,14c       | 0,15bc       |
| а         | -4,34ab             | -4,71abc            | -3,95a                | -4,24a               | -6,06bc      | -6,30c      | -5,16abc     |
| u         | -0,56ab             | -0,87abc            | -0,23a                | -0,32a               | -2,00cd      | -2,73d      | -1,68bcd     |
| GA        | 0,31cd              | 0,34bcd             | 0,27d                 | 0,28d                | 0,40ab       | 0,44a       | 0,38abc      |
| GGA       | 0,10b               | 0,11b               | 0,07b                 | 0,06b                | 0,24a        | 0,36a       | 0,24a        |
| CSI       | 69,43a              | 69,95a              | 74,00a                | 80,42a               | 42,10b       | 18,31b      | 38,51b       |

Tabela 8. Teste de Tukey para comparação das médias dos índices e variáveis de vegetação RGB de VANT.

|       |         |          | 119 DAP | P (R5–R6) |         |        |         |
|-------|---------|----------|---------|-----------|---------|--------|---------|
| SCI   | 0,02ab  | 0.00abc  | 0,02a   | 0,03a     | -0,03cd | -0.06d | -0,02bc |
| GLI   | 0,06b   | 0,07ab   | 0,05b   | 0,05b     | 0,09a   | 0,10a  | 0,07ab  |
| NGRDI | -0,02cd | 0,00bcd  | -0,02d  | -0,03d    | 0,03ab  | 0,06a  | 0,02bc  |
| VARI  | -0,02cd | -0,01bcd | -0,03d  | -0,04d    | 0,04ab  | 0,09a  | 0,03bc  |
| Н     | 53,52cd | 58,72bcd | 51,98d  | 48,98d    | 69,66b  | 86,14a | 68,74bc |
| S     | 0,18a   | 0,19a    | 0,18a   | 0,19a     | 0,20a   | 0,14a  | 0,15a   |
| а     | -2,76a  | -3,39ab  | -2,61a  | -2,30a    | -4,90bc | -5,72c | -3,96ab |
| u     | 0,84ab  | 0,35abc  | 1,02a   | 1,32a     | -0,88cd | -2,19d | -0,54bc |
| GA    | 0,18c   | 0,22bc   | 0,16c   | 0,14c     | 0,32ab  | 0,40a  | 0,29ab  |
| GGA   | 0,05cd  | 0,05cd   | 0,03d   | 0,02d     | 0,14bc  | 0,27a  | 0,15b   |
| CSI   | 72,87ab | 79,83a   | 79,57a  | 86,99a    | 59,17bc | 32,12d | 53,08c  |

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, de acordo com o teste de Tukey. Da esquerda para a direita: H1, H2, H3, H4 (UENF), H6, H7 e H8 (comercial). Dias Após o Plantio (DAP). Índice de Cor do Solo (SCI); Índice de Folha Verde (GLI); Índice de Diferença Normalizada Verde-Vermelho (NGRDI); Índice de Resistência Atmosférica na região do Visível (VARI); Intensidade (I); Matiz (H); Saturação (S); Luminosidade (L); a\* (a); b\* (b); u\* (u); v\* (v); Índice de Área Verde (GA); Índice de Área Mais Verde (GGA); Índice de Senescência de Culturas (CSI).

| Variáveis | UENF 506-11<br>(H1) | UENF 506-16<br>(H2) | UENF MSV<br>2210 (H3) | UENF MS<br>2208 (H4) LG 6036 (H6) |           | 30F35R (H7) | AG 1051 (H8) |
|-----------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------|-------------|--------------|
| FM        | 64,63a              | 61,81ab             | 58,63bc               | 64,25a                            | 57,69c    | 57,69c      | 58,44bc      |
| FF        | 68,00a              | 64,19abc            | 65,13ab               | 67,50a                            | 60,00c    | 60,69bc     | 63,75abc     |
| AP        | 2,60bc              | 2,61b               | 2,94a                 | 3,06a                             | 2,49bc    | 2,45c       | 2,51bc       |
| CME       | 250,84bc            | 234,08d             | 265,26a               | 264,77a                           | 230,80d   | 253,34b     | 239,85cd     |
| DME       | 57,13c              | 57,53c              | 59,15bc               | 57,17c                            | 62,65a    | 60,77ab     | 58,64bc      |
| NE        | 67,50ab             | 71,50ab             | 52,25b                | 62,50b                            | 67,50ab   | 83,75a      | 61,25b       |
| MCG       | 32,80ab             | 31,43ab             | 34,83a                | 34,97a                            | 32,95ab   | 30,46b      | 31,52ab      |
| RG        | 5451,81bc           | 5675,16bc           | 5420,42bc             | 4899,53c                          | 7456,68ab | 8795,25a    | 7105,77abc   |

| <b>T</b> I I A | <b>—</b> ( ) |       |          | ~       |     | <b>/</b> I <sup>1</sup> |     | ., .      |        |        | <u> </u>  |
|----------------|--------------|-------|----------|---------|-----|-------------------------|-----|-----------|--------|--------|-----------|
| I ahela y      | AD AT2AI     |       | nara com | naracao | dae | mediae                  | dae | Variaveis | mort   | naaror | nmicae    |
|                |              | TUNCY |          | paração | uus | modias                  | uus | vanavois  | 111011 | Jugior | 101111043 |

Letras iguais na linha não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, de acordo com o teste de Tukey. Da esquerda para a direita: H1, H2, H3, H4 (local), H6, H7 e H8 (comercial). Florescimento masculino (FM); florescimento feminino (FF); altura média de planta (AP); número total de plantas (NP); comprimento médio da espiga (CME); diâmetro médio da espiga (DME); número de espigas (NE); massa de 100 grãos (MCG); rendimento de grãos (RG) (Gonçalves et al., 2024).

Os valores medidos para as variáveis morfoagronômicas estão detalhados na tese de doutorado de Vivane Mirian Lanhellas Gonçalves (Genética e Melhoramento de Plantas - UENF). Com relação às variáveis morfoagronômicas e rendimento de grãos (RG), o híbrido comercial H7 (30F35R) apresentou o melhor desempenho, seguido por H6 (LG 6036) e H8 (AG 1051), que obtiveram resultados estatisticamente semelhantes. Entre os híbridos locais (UENF), H2 (UENF 506-16) teve o maior rendimento de grãos, seguido por H1 (UENF 506-11) e H3 (UENF MSV 2210). Esses híbridos formaram grupos semelhantes. Por fim, o híbrido com a menor produção média é estatisticamente diferente dos demais foi o híbrido local H4 (UENF MS 2208).

Os dados de 91 DAP (R2) para as variáveis de vegetação RGB mostraram que os híbridos locais UENF MSV 2210, UENF MS 2208 e UENF 506-11 foram semelhantes nas variáveis SCI, GLI, NGRDI e VARI. Por outro lado, o híbrido comercial LG 6036 obteve uma média superior e diferenças significativas para as variáveis GLI e NGRDI. Aos 98 DAP (R3–R4), e em comparação com os híbridos comerciais (H6, H7 e H8), os híbridos locais (H1, H2, H3 e H4) foram significativamente diferentes (Tabela 8). Em relação ao SCI, os híbridos locais apresentaram desempenho semelhante, enquanto H6 e H7 foram significativamente diferentes, especialmente H6. Para a variável GLI, H6 demonstrou desempenho superior, enquanto os híbridos locais exibiram valores mais baixos e resultados mais semelhantes. O NGRDI mostrou que os híbridos locais e o comercial H8 tiveram respostas semelhantes, com os melhores valores, enquanto os híbridos comerciais H6 e H7 apresentaram desempenho inferior. No que diz respeito ao VARI, H6 e H7 apresentaram uma resposta distinta em relação aos híbridos locais.

Com relação aos dados de 112 DAP (R4–R5), para a variável SCI, H3 obteve o maior valor, seguido pelos híbridos H4, H2 e H1 (locais), com uma resposta semelhante. No entanto, ao comparar com os híbridos locais, os híbridos comerciais H6, H7 e H8 apresentaram desempenho superior. Em relação à variável GLI e aos híbridos locais, mais uma vez, H6 e H7 demonstraram desempenho superior, com H6 obtendo a maior média. No NGRDI, os híbridos mostraram um padrão semelhante. Para essa variável, e em relação aos híbridos locais, H7 e H8 (comercial) apresentaram diferenças significativas. No VARI, H7 se destacou, enquanto os híbridos locais apresentaram desempenho inferior e resposta semelhante. Para o GGA, avaliado em 112 DAP (R4–R5), os híbridos comerciais foram superiores aos locais e exibiram a maior porcentagem de pixels no espectro verde.

Aos 119 DAP (R5–R6), na variável SCI, o desempenho dos híbridos locais H1, H2, H3 e H4 foi semelhante e superior ao dos outros híbridos. No entanto, para a mesma variável, os híbridos comerciais H6, H7 e H8 apresentaram diferenças significativas. Em relação ao GLI, H6 e H7 se destacaram com desempenho superior em comparação aos híbridos locais. Nos índices NGRDI e VARI, os híbridos apresentaram padrões semelhantes, destacando-se o desempenho superior de H7, enquanto os híbridos locais demonstraram respostas inferiores e semelhantes.

A análise dos resultados do teste de Tukey revelou informações importantes sobre o desempenho de híbridos locais e comerciais em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, especialmente em relação a índices que mostraram forte correlação com o rendimento de grãos. Por exemplo, aos 112 e 119 DAP (R5-R6), o VARI, guando comparado aos híbridos comerciais (H6, H7 e H8), apresentou respostas semelhantes e inferiores para híbridos locais (H1, H2, H3 e H4). O híbrido H7 obteve o maior valor de VARI, indicando uma forte associação com o rendimento. Em relação a índices como GLI e NGRDI, aos 112 DAP (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6), os híbridos comerciais (H7 e H8) demonstraram desempenho superior, sugerindo uma possível vantagem em estádios posteriores de desenvolvimento, dada a correlação positiva entre esses índices e o rendimento de grãos. O SCI mostrou uma forte correlação negativa com o rendimento de grãos e, em geral, exibiu agrupamento inverso em relação a outros índices. Ao avaliar o desempenho de diferentes híbridos associados a índices relacionados de forma diferenciada ao rendimento agrícola, de acordo com o DAP, é essencial considerar a importância dos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura na avaliação.

O híbrido 30F35R (H7) apresentou o maior rendimento de grãos, superando todos os híbridos locais. Essa diferença está associada ao fato de o híbrido comercial ser um híbrido simples, resultante do cruzamento de duas linhagens puras, o que maximiza a heterose e garante maior uniformidade genética. Em contraste, os híbridos locais originam-se de cruzamentos interpopulacionais, nos quais duas ou mais populações varietais distintas são combinadas. Nesse caso, os híbridos interpopulacionais capturam parcialmente a heterose, resultando em rendimentos mais baixos devido à maior variabilidade genética dentro da população e menor uniformidade (Hallauer et al., 2010).

Aos 119 DAP (R5–R6) e com relação ao SCI (Índice de Cor do Solo), os híbridos comerciais H6, H7 e H8 apresentaram valores significativamente menores em comparação com seus equivalentes locais, indicando uma possível diferença nos valores médios de RGB dos lotes híbridos. O híbrido H7 teve o maior valor de GLI (Índice de Folha Verde), sugerindo um maior número de folhas verdes nas plantas. Essa diferença pode estar relacionada a uma maior área fotossintética, uma vez que mais clorofila pode resultar em maior assimilação de carbono fotossintético. O H7 também apresentou o maior valor de NGRDI, indicando uma maior diferença entre as bandas verde e vermelha. Isso pode estar relacionado à concentração de pigmentos foliares, e à concentração de clorofila (uma vez que as moléculas de clorofila absorvem luz no espectro eletromagnético vermelho e azul, e diferentes concentrações alteram o valor do NGRDI), o que pode influenciar diretamente a capacidade fotossintética. Para o VARI (Indice de Resistência Atmosférica na região do Visível), o H7 novamente obteve o maior valor, indicando maior resistência atmosférica visível. Essa variável está associada à morfologia do dossel da planta (área foliar do dossel). Em relação ao índice H (Matiz), o híbrido H7 teve o maior valor, sugerindo diferenças entre os híbridos em relação aos traços de cor das folhas. Com relação ao índice S (saturação), o híbrido H6 exibiu o maior valor, indicando o grau de pureza da cor nas plantas. Alta saturação indica uma cor pura, e baixa saturação indica uma cor mais desbotada, ou seja, próxima ao tom de cinza. O maior valor do índice S pode estar relacionado ao vigor foliar e à maior capacidade fotossintética. Em relação ao índice a, o híbrido H7 obteve o menor valor, indicando diferentes intensidades do canal de cor a\*, que estão associadas à faixa de vermelhos e magentas nas plantas. O híbrido H7 obteve o menor valor para o índice u, indicando diferentes intensidades do canal de cor u\*, e o maior valor de GA (Índice de Área Verde), sugerindo uma maior área foliar com maior capacidade fotossintética. O híbrido H7 também apresentou o maior índice GGA (Índice de Área Mais Verde), indicando que esse híbrido possui a maior área de cor verde nas folhas. O CSI (Índice de Senescência da Cultura), associado à senescência precoce da planta (Li et al., 2015; Makanza et al., 2018), foi mais alto no híbrido H4.

Os resultados obtidos nos índices deste estudo indicam que as diferenças na concentração de pigmentos foliares, capacidade fotossintética, área foliar do dossel e vigor das plantas são cruciais na diferenciação dos híbridos de milho. Além disso, houve diferenças no agrupamento entre híbridos locais e comerciais, com o H7 frequentemente obtendo os maiores ou menores valores em vários índices (aos 119 DAP (R5–R6): SCI, GLI, NGRDI, VARI, H, a, u, GA, GGA e CSI). Esses resultados podem ser atribuídos à genética dos híbridos. Uma análise das variações nos traços de cor das folhas, associada à área foliar e à concentração de pigmentos, pode fornecer informações importantes para a seleção de híbridos, bem como para o manejo correto da cultura do milho.

Em resumo, os resultados do teste de Tukey destacaram a importância de variáveis relacionadas à concentração de pigmentos foliares, capacidade fotossintética, densidade do dossel e vigor geral das plantas na diferenciação dos híbridos de milho. Essas variáveis demonstraram ser determinantes no desempenho dos híbridos ao longo do tempo, refletindo a influência duradoura desses traços no crescimento e produção das plantas. Esses achados podem contribuir para a seleção de híbridos mais eficientes e o desenvolvimento de estratégias de manejo agronômico que otimizem a produção de milho.

#### 4.2.3. Correlação de Pearson

Após a análise das informações da ANOVA, as variáveis com diferenças significativas foram submetidas à análise de correlação de Pearson. Os resultados das variáveis morfoagronômicas *versus* variáveis e índices RGB obtidos por VANT são apresentados na Tabela 10.

| Variável  | FM     | FF      | AP     | CME   | DME       | NE    | MCG    | RG      |
|---|--------|---------|--------|-------|-----------|-------|--------|---------|
| 91 DAP (R2)                                     |        |         |        |       |           |       |        |         |
| SCI   | 0 49   | 0.82*   | 0.52   | 0.65  | -, -0.82* | -0 47 | 0.31   | -0.57   |
| GLI   | -0.10  | -0.45   | -0.16  | -0.53 | 0.54      | 0.18  | 0.08   | 0.10    |
|   | -0.49  | -0.82*  | -0.52  | -0.65 | 0.82*     | 0.47  | -0.31  | 0.57    |
| VARI  | -0.61  | -0.91** | -0.62  | -0.63 | 0.86*     | 0.57  | -0.45  | 0,73    |
|   | 0,66   | 0.83*   | 0,02   | 0,00  | -0.87*    | -0.39 | 0,40   | -0.68   |
| ч   | -0 79* | -0.86*  | -0.72  | -0.34 | 0,07      | 0,55  | -0.76* | 0,00    |
| S   | 0,75   | 0,00    | 0,72   | -0.22 | 0,00      | -0.21 | 0,70   | -0.48   |
| I I   | 0,00   | 0.84*   | 0,50   | 0,22  | -0.86*    | -0.40 | 0,02   | -0.75   |
| L<br>h  | -0.20  | -0.51   | -0.23  | -0.52 | -0,00     | -0,40 | 0,45   | 0.73    |
| 0,23 -0,21 -0,23 -0,32 0,70 -0,01 0,13 0,22<br> |        |         |        |       |           |       |        |         |
| SCI   | 0 50   | 0.87*   | 0.62   |       | -0.84*    | -0.73 | 0.52   | -0.87*  |
| GU  | -0.30  | -0.68   | -0.37  | -0.48 | -0,04     | 0,75  | -0.16  | -0,07   |
|   | -0,50  | -0,00   | -0,57  | -0,40 | 0,74      | 0,49  | -0,10  | 0,40    |
|   | -0,59  | -0,07   | -0,02  | -0,39 | 0,04      | 0,75  | -0,52  | 0,07    |
| VARI  | -0,01  | -0,07   | -0,64  | -0,34 | 0,01      | 0,76  | -0,56  | 0,91    |
|   | 0,57   | 0,03    | -0,66  | 0,46  | -0,64     | -0,62 | 0,40   | -0,73   |
|   | -0,65  | -0,79   | -0,64  | -0,19 | 0,67      | 0,76  | -0,69  | 0,96    |
| 5   | 0,47   | 0,28    | 0,39   | -0,18 | -0,10     | -0,36 | 0,60   | -0,61   |
| a   | 0,36   | 0,72    | 0,40   | 0,39  | -0,73     | -0,61 | 0,28   | -0,63   |
| D   | -0,29  | -0,50   | -0,23  | -0,53 | 0,69      | -0,03 | 0,16   | 0,20    |
| u   | 0,56   | 0,84^   | 0,56   | 0,35  | -0,78^    | -0,72 | 0,51   | -0,87^  |
| GGA   | -0,66  | -0,89** | -0,75  | -0,43 | 0,79*     | 0,78* | -0,69  | 0,95**  |
| CSI   | 0,71   | 0,92^^  | 0,76*  | 0,45  | -0,82^    | -0,74 | 0,68   | -0,95^^ |
| 112 DAP (R4–R5)                                 |        |         |        |       |           |       |        |         |
| SCI   | 0,69   | 0,87*   | 0,79*  | 0,45  | -0,74     | -0,73 | 0,75   | -0,98** |
| GLI   | -0,58  | -0,89** | -0,70  | -0,59 | 0,86*     | 0,67  | -0,53  | 0,82*   |
| NGRDI   | -0,69  | -0,87*  | -0,79* | -0,45 | 0,74      | 0,73  | -0,75  | 0,99**  |
| VARI  | -0,68  | -0,86*  | -0,78* | -0,42 | 0,72      | 0,74  | -0,76* | 0,99**  |
| Н   | -0,67  | -0,81*  | -0,78* | -0,38 | 0,64      | 0,73  | -0,80* | 0,98**  |
| S   | 0,43   | 0,29    | 0,44   | -0,06 | -0,07     | -0,38 | 0,65   | -0,64   |
| а   | 0,65   | 0,89**  | 0,78*  | 0,54  | -0,79*    | -0,72 | 0,69   | -0,95** |
| u   | 0,69   | 0,86*   | 0,81*  | 0,48  | -0,73     | -0,71 | 0,76*  | -0,99** |
| GA  | -0,65  | -0,86*  | -0,87* | -0,61 | 0,67      | 0,73  | -0,84* | 0,95**  |
| GGA   | -0,72  | -0,82*  | -0,78* | -0,38 | 0,69      | 0,66  | -0,75  | 0,99**  |
| CSI   | 0,73   | 0,81*   | 0,79*  | 0,38  | -0,69     | -0,62 | 0,75   | -0,99** |
| 119 DAP (R5–R6)                                 |        |         |        |       |           |       |        |         |
| SCI   | 0,73   | 0,88*   | 0,79*  | 0,43  | -0,73     | -0,72 | 0,77*  | -0,99** |
| GLI   | -0,69  | -0,94** | -0,77* | -0,55 | 0,84*     | 0,72  | -0,66  | 0,92**  |
| NGRDI   | -0,73  | -0,88*  | -0,79* | -0,43 | 0,73      | 0,72  | -0,77* | 0,99**  |
| VARI  | -0,72  | -0,87*  | -0,79* | -0,41 | 0,72      | 0,73  | -0,77* | 0,99**  |
| Н   | -0,71  | -0,85*  | -0,78* | -0,39 | 0,68      | 0,73  | -0,79* | 0,99**  |
| S   | 0,45   | 0,30    | 0,45   | -0,06 | -0,11     | -0,36 | 0,63   | -0,66   |
| а   | 0,73   | 0,92**  | 0,80*  | 0,49  | -0,79*    | -0,72 | 0,74   | -0,98** |
| u   | 0,72   | 0,87*   | 0,80*  | 0,43  | -0,72     | -0,72 | 0,78*  | -0,99** |
| GA  | -0,75  | -0,89** | -0,82* | -0,48 | 0,75      | 0,68  | -0,77* | 0,99**  |
| GGA   | -0,69  | -0,78*  | -0,73  | -0,26 | 0,65      | 0,70  | -0,74  | 0,98**  |
| CSI   | 0,68   | 0,74    | 0,78*  | 0,28  | -0,63     | -0,64 | 0,75   | -0,97** |

Tabela 10. Correlação fenotípica entre variáveis morfoagronômicas e variáveis e índices RGB obtidos por VANT.

\*\* e \* significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pela correlação fenotípica. Dias Após o Plantio (DAP). Índice de Cor do Solo (SCI); Índice de Folha Verde (GLI); Índice de Diferença Normalizada Verde-Vermelho (NGRDI); Índice de Resistência Atmosférica na região do Visível (VARI); Intensidade (I); Matiz (H); Saturação (S); Luminosidade (L); a\* (a); b\* (b); u\* (u); v\* (v); Índice de Área Verde (GA); Índice de Área Mais Verde (GGA); Índice de Senescência de Culturas (CSI); Florescimento masculino (FM); Florescimento feminino (FF); Altura média de planta (AP); Comprimento médio da espiga (CME); Diâmetro médio da espiga (DME); Número de espigas (NE); Massa de 100 grãos (MCG); Rendimento de grãos (RG).

As melhores correlações fenotípicas entre variáveis morfoagronômicas e variáveis e índices RGB de VANT foram observadas aos 91 DAP (R2) (dias após o plantio): entre FM e H (-0,79), FF e VARI (-0,91), AP e L (0,76), DME e I (0,87), MCG e H (-0,76) e RG e H (0,97). Aos 98 DAP (R3–R4), as correlações foram FF e CSI (0,92), AP e CSI (0,76), DME e I (-0,84), NE e GGA (0,78) e RG e H (0,96). Aos 112 DAP (R4–R5): FF e a (0,89), AP e GA (-0,78), DME e GLI (0,86), MCG e GA (-0,837) e RG e GGA (0,99). Aos 119 DAP (R5–R6), as correlações foram FF e GLI (-0,93), AP e GA (-0,84), DME e GLI (0,84), MCG e H (-0,79) e RG e NGRDI (0,99).

Em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, os resultados destacaram correlações importantes entre as variáveis morfoagronômicas e os índices RGB obtidos por VANT. Aos 91 DAP (R2), observou-se uma forte correlação positiva entre o rendimento de grãos (RG) e o componente H (r = 0.97), sugerindo uma possível relação entre a produção e o matiz dos pixels (Gracia-Romero et al., 2017).

Aos 91 DAP (R2), foram observadas correlações significativas entre variáveis morfoagronômicas, como o rendimento de grãos (RG) (H, r = 0,97 \*\*) e a altura média das plantas (AP) (L, r = 0,84 \*\*), com componentes RGB do VANT, como H e L, fornecendo informações cruciais. A forte correlação positiva entre RG e o índice H sugere que o desenvolvimento da cultura nesse estádio está relacionado à quantidade de massa verde (Gracia-Romero et al., 2017). Esses achados podem ser explicados pelo fato de que, nesse momento, as plantas estão em crescimento ativo, e a eficiência fotossintética, bem como a distribuição de pigmentos, desempenha um papel crucial na acumulação de biomassa (Jannoura et al., 2015).

À medida que a cultura avançou para 98 DAP (R3–R4), foram observadas correlações importantes, como a forte associação entre RG e o CSI. Isso sugere que, nesse estádio, o rendimento da cultura está intimamente relacionado à concentração de pigmentos foliares. Além disso, correlações significativas entre CSI e AP indicam que a concentração de pigmentos foliares

e a capacidade fotossintética podem influenciar a morfologia da planta. Essas associações podem ser explicadas pelo fato de que, nesse estádio, as plantas estão atingindo o crescimento máximo e a capacidade fotossintética, e as diferenças nas características morfoagronômicas e na concentração de pigmentos foliares podem afetar os rendimentos.

Aos 112 DAP (R4–R5), as correlações entre variáveis morfoagronômicas e componentes e índices RGB do VANT também fornecem informações importantes. A forte correlação entre RG e variáveis VANT RGB (NGRDI, VARI, u, GGA e CSI), com um valor de [0,99], sugere que o rendimento da cultura também pode estar relacionado à eficiência fotossintética das plantas durante a fase crítica de desenvolvimento do milho, especificamente durante a fase de enchimento de grãos. Além disso, a correlação entre AP e o índice GA indica a importância da concentração de clorofila foliar para a morfologia da planta e a altura média das plantas. Nesse estádio, a concentração de moléculas de clorofila desempenha um papel essencial no rendimento.

Os índices de vegetação (IVs) derivados de imagens RGB, como o Índice de Diferença Verde-Vermelho Normalizado (NGRDI), servem como indicadores indiretos da densidade e distribuição das folhas, correlacionando-se com o teor de clorofila nas folhas. A clorofila, sendo um pigmento chave para a fotossíntese, indica a capacidade fotossintética da planta. Portanto, maiores IVs sugerem maiores níveis de clorofila e potencial fotossintético. No entanto, embora os IVs forneçam uma estimativa indireta da clorofila, eles não a medem diretamente. A previsão do rendimento da cultura usando IVs baseia-se em sua correlação com parâmetros agronômicos, como área foliar, teor de clorofila e biomassa da planta, que influenciam o rendimento. Monitorar esses parâmetros ao longo do ciclo de crescimento ajuda a identificar padrões que indicam o potencial de rendimento.

À medida que as plantas atingem 119 DAP (R5–R6), as correlações continuam a fornecer dados valiosos. A forte correlação (r = 0,99) entre RG e variáveis VANT (SCI, NGRDI, VARI, H, u e GA) sugere que o rendimento está relacionado à distribuição de cor das folhas das plantas. A

correlação negativa entre AP e o índice GA indica que a altura média das plantas pode ser influenciada pela porcentagem de pixels com valor de H na faixa verde. Essas associações ressaltam a complexidade das interações entre características morfoagronômicas, concentração de pigmentos foliares e estrutura das plantas no ciclo de crescimento tardio.

Torna-se importante notar que a relação entre a capacidade fotossintética e as bandas utilizadas em cada índice é complexa. De modo geral, o uso de diferentes bandas coloridas (vermelha, verde, azul) para calcular os índices RGB do VANT está diretamente associado à absorção e reflectância de clorofila/carotenoides, densidade do dossel, morfologia da planta e à quantidade de pigmentos não fotossintéticos presentes nas folhas. Por exemplo, o VARI, que utiliza bandas vermelha, verde e azul, é sensível à concentração de pigmentos cloroplastos nas folhas e pode refletir diferenças na concentração de clorofila e carotenoides, essenciais na fase fotoquímica da fotossíntese. Observou-se uma forte correlação entre o rendimento de grãos (RG) e o VARI aos 98 DAP (R3–R4) (r = 0,91), 112 DAP (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6) (r = 0,99) (Figura 6). Essa correlação indica uma forte e significativa associação entre esse índice de vegetação e o rendimento da cultura (Geipel et al., 2014).


Figura 6. Evolução da correlação entre índices de reflectância e rendimento de grãos. Significativo quando menor que -0,75 ou maior que 0,75.

Entre outras variáveis morfoagronômicas analisadas em diferentes estádios de desenvolvimento do milho, várias exibiram correlações significativas com os índices RGB obtidos por VANT. Aos 91 DAP (R2), o florescimento feminino (FF) revelou uma forte correlação (r = -0,91) com o VARI. Além disso, aos 91 DAP (R2), a altura média das plantas (AP) mostrou uma forte correlação (r = 0,76) com o índice L, relacionado à morfologia da planta, indicando que as características morfoagronômicas são altamente relevantes nos estádios iniciais de crescimento do milho. Além disso, outras variáveis, como o diâmetro médio da espiga (DME), o número de espigas (NE) e a massa de 100 grãos (MCG) também mostraram correlações significativas com vários índices RGB do VANT, incluindo SCI, GLI, NGRDI, GA e CSI. Os valores de IV para essas correlações variaram, destacando as complexas relações entre a morfologia das plantas e as características obtidas a partir das imagens de drones, variando de 0,73 a 0,88.

A correlação fenotípica entre variáveis associadas à capacidade fotossintética e à concentração de pigmentos foliares versus variáveis e índices RGB de VANT é apresentada na Tabela 11, que mostra que apenas antocianina (Anth) foi significativamente correlacionada com variáveis e índices RGB de VANT aos 119 DAP (R5–R6), sendo GGA a melhor correlação (-0,90).

|           | 98 I  | DAP   |         | 112 DAP |       | 119 DAP |
|-----------|-------|-------|---------|---------|-------|---------|
|           | (R3-  | –R4)  |         | (R4–R5) |       | (R5–R6) |
|           | Poo   | cket  | Poc     | ket     | CI710 | Dualex  |
| Variáveis | φΕο   | Plabs | ABS/Cso | Plabs   | PSRI  | Anth    |
| SCI       | 0,44  | 0,48  | -0,11   | -0,18   | -0,28 | 0,86*   |
| GLI       | -0,21 | -0,28 |         |         |       |         |
| NGRDI     | -0,45 | -0,48 | 0,11    | 0,18    | 0,28  | -0,85*  |
| VARI      | -0,48 | -0,51 | 0,09    | 0,18    | 0,26  | -0,86*  |
| I         | 0,55  | 0,51  |         |         |       |         |
| Н         | -0,54 | -0,54 | 0,03    | 0,22    | 0,24  | -0,88** |
| S         | 0,60  | 0,34  | 0,20    | -0,25   | 0,28  | 0,83*   |
| а         | 0,08  | 0,24  | -0,16   | -0,31   | -0,49 | 0,78*   |
| b         |       |       |         |         |       | 0,55    |
| u         | -0,35 | 0,34  | -0,09   | -0,31   | -0,32 | 0,87*   |
| V         |       |       |         |         |       | 0,32    |
| GA        |       |       | -0,02   | 0,32    | 0,41  | -0,83*  |
| GGA       | -0,45 | -0,46 | 0,08    | 0,20    | 0,15  | -0,90** |
| CSI       | 0,45  | 0,46  | -0,10   | -0,20   | -0,11 | 0,88**  |

Tabela 11. Correlação fenotípica entre variáveis fenotípicas e variáveis e índices RGB de VANT.

\*\* e \* significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pela correlação fenotípica; célula em branco representa um componente ou índice de vegetação RGB de VANT sem diferença significativa (ANOVA), considerando duas repetições para um dado DAP. Dias Após o Plantio (DAP). Índice de Cor do Solo (SCI); Índice de Folha Verde (GLI); Índice de Diferença Normalizada Verde-Vermelho (NGRDI); Índice de Resistência Atmosférica Visível (VARI); Intensidade (I); Matiz (H); Saturação (S); Luminosidade (L); a (a); b (b); u\* (u); v\* (v); Índice de Área Verde (GA); Índice de Área Mais Verde (GGA); Índice de Senescência de Culturas (CSI); Eficiência Quântica da Dissipação de Energia Térmica (φEo); Número de Complexos de Colheita de Luz por Centro de Reação Aberto (ABS/Cso); Probabilidade de um Complexo de Antena ser Excitado (Plabs); Índice de Reflectância de Senescência das Plantas (PSRI); Antocianinas (Anth).

Com relação às variáveis associadas à capacidade fotossintética e aos pigmentos foliares, a única correlação significativa observada foi entre Anth aos 119 DAP (R5–R6) e os índices RGB obtidos por VANT. Esse resultado demonstra uma associação significativa entre Anth e os índices de sensoriamento remoto. A melhor correlação (r = -0,90) foi observada com o índice GGA, indicando uma relação inversamente proporcional. Isso implica que concentrações mais elevadas de Anth nas folhas de milho estão associadas a menores valores do índice GGA, que representa características verdes nas imagens de drones. Essa correlação negativa sugere que a maior concentração de antocianinas pode estar relacionada à redução da intensidade do verde nas folhas, possivelmente influenciada por interações com outros pigmentos, como aqueles associados ao espectro vermelho (Baek et al., 2019).

A concentração de antocianinas nas plantas tem um papel importante, pois atua como um indicador de condições fisiológicas e estresses ambientais, além de contribuir para a proteção das folhas contra danos oxidativos. Essa mensuração permite avaliar a capacidade fotossintética, o vigor das plantas e sua resposta a diferentes condições de manejo e estresse. Assim, imagens de drones e índices RGB obtidos por VANT são ferramentas promissoras para avaliar não apenas a concentração de pigmentos foliares, mas também a capacidade fotossintética e o vigor das plantas de milho no campo. Essas informações podem ser cruciais para otimizar o manejo agronômico e selecionar genótipos com características desejáveis de concentração de pigmentos foliares e vigor da planta (Baek et al., 2019).

#### 4.2.4. Componentes Principais

A análise de componentes principais (PCA) é mostrada na Figura 7, revelando agrupamento e dispersão dos híbridos locais e comerciais em espaços de características multidimensionais.



(**b**)



(**d**)

Figura 7. Análise de Componentes Principais (PCA) em (a) 91 DAP (R2); (b) 98 DAP (R3–R4); (c) 112 DAP (R4–R5); (d) 119 DAP (R5–R6). Grupos de híbridos comerciais (comercial) e UENF. Missões 4 (D4), 5 (D5), 6 (D6) e 7 (D7). Índice de Cor do Solo (SCI); Índice de Folha Verde (GLI); Índice de Diferença Normalizada Verde-Vermelho (NGRDI); Índice de Resistência Atmosférica Visível (VARI); Intensidade (ITT); Matiz (Hue); Saturação (STT); Luminosidade (LG); a\* (a); b\* (b); u\* (u); v\* (v); Índice de Área Verde (GA); Índice de Área Mais

Verde (GGA); Índice de Senescência de Culturas (CSI); florescimento masculino (MF); florescimento feminino (FF); altura média da planta (AP); número de plantas (NP); comprimento médio da espiga (AEL); diâmetro médio da espiga (AED); número de espigas (NE); massa de 100 grãos (GW100); rendimento de grãos (GY).

Os gráficos da análise de componentes principais (PCA) conduzidos em diferentes dias após o plantio (DAP) (91, 98, 112 e 119) fornecem informações sobre a resposta das variáveis e índices avaliados em híbridos locais e comerciais. Aos 91 DAP (R2), a distribuição dos pontos mostra uma separação entre os grupos de híbridos locais e comerciais, com PC1 e PC2 explicando 46,7% e 18,5% da variância, respectivamente. As variáveis SCI, CME, I, FF, L, FM e MCG contribuíram significativamente para essa diferença. Aos 98 DAP (R3–R4), a dispersão dos pontos diminuiu, com PC1 e PC2 explicando 52,3% e 14,5% da variância, respectivamente. GLI, I, MCG, FM, CSI, AP, FF, SCI e CME foram as principais variáveis que influenciaram essa separação. Aos 112 e 119 DAP (R5–R6), a separação tornou-se mais evidente, com variáveis menos dispersas e mais próximas, e PC1 explicando 64,2% e 66,1% da variância, respectivamente. Nesses momentos (112 e 119 DAP (R5–R6)), GLI, DME, NE, GGA, GA, H, VARI, RG e NGRDI contribuíram para a diferença entre os grupos.

A análise de componentes principais (PCA) demonstrou que a variação nos índices de vegetação e características morfoagronômicas entre híbridos locais e comerciais é menos evidente nos estádios iniciais de crescimento/desenvolvimento das plantas (91 e 98 DAP (R3–R4)), enquanto variáveis como S e GLI desempenham um papel fundamental na separação de dois agrupamentos: híbridos locais e comerciais. À medida que as plantas crescem e se desenvolvem (112 e 119 DAP (R5–R6)), atributos como GLI tornam-se mais relevantes. Esses resultados indicam que a seleção de híbridos pode ser otimizada considerando-se características específicas em diferentes estádios de crescimento/desenvolvimento. Além disso, a identificação das variáveis mais influentes em cada estádio pode orientar futuros esforços de

melhoramento e manejo agronômico, maximizando, assim, o rendimento de grãos. No presente estudo, as diferentes características dos híbridos contribuíram para os resultados da PCA, que mostram uma separação entre os agrupamentos de híbridos comerciais e híbridos da UENF (Yang et al., 2017).

A PCA sugere que, aos 91 e 98 DAP (R3–R4), as variáveis tendem a se dispersar mais, indicando que, nesses estádios, a distinção entre os materiais pode ser mais complexa. No entanto, à medida que as plantas crescem e se desenvolvem, a avaliação das características e a distinção entre os genótipos estudados tornam-se mais precisas, o que pode ser crucial para a seleção dos híbridos mais adequados. Além disso, os híbridos comerciais frequentemente se destacaram nos índices, indicando maior quantidade de folhas verdes e sugerindo uma área foliar com alta capacidade fotossintética. Essas diferenças podem ser atribuídas à genética dos híbridos. É importante notar que os diferentes agrupamentos entre híbridos locais e comerciais podem estar relacionados ao ciclo de crescimento: os híbridos locais são frequentemente mais precoces, completando o ciclo vegetativo mais rapidamente, enquanto os híbridos comerciais apresentam ciclos mais longos, prolongando o período reprodutivo e, muitas vezes, garantindo maior produtividade (Araus et al., 2018).

#### 4.3. Altura de Planta

As médias de altura de plantas da parcela foram calculadas através do modelo digital de superfície. As médias encontradas estão detalhadas na Tabela A9.

A Figura 8 ilustra as etapas de processamento do Modelo Digital de Superfície (MDS) obtido aos 91 DAP (R2). Essas etapas incluem o ortofotomosaico inicial (Figura 8a), a geração do MDS completo (Figura 8b), a aplicação da limiarização binária para remoção de pixels de solo (Figura 8c) e o recorte final do MDS ajustado (Figura 8d).



Figura 8. Etapas para processamento do MDS de 91 DAP (R2). (a) Ortofotomosaico. (b) MDS completo. (c) limiarização binária. (d) MDS recortado.

A Figura 9 apresenta os Modelos Digitais de Superfície que representam a altura das plantas para os diferentes Dias Após o Plantio (DAP): (a) 19 DAP (V2–V3), (b) 34 DAP (V3–V4), (c) 91 DAP (R2), (d) 98 DAP (R3–R4), (e) 112 DAP (R4–R5) e (f) 119 DAP (R5–R6).





Figura 9. Modelo Digital de Superfície que representa altura de planta para (a) 19 dias após o plantio (DAP); (b) 34 DAP (V3–V4); (c) 91 DAP (R2); (d) 98 DAP (R3–R4)); (e) 112 DAP (R4–R5) e (f) 119 DAP (R5–R6).

Observa-se, nos MDS de 112 (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6) (Figura 9), que as parcelas 1H8, 2H4, 2H3, 2H1, 3H4, 3H6 e 4H4 apresentam espaçamentos mais visíveis devido ao processo de secagem das plantas, o que leva à redução da densidade foliar. As áreas mais verdes e intensas correspondem às regiões em que a altura das plantas se aproxima de 2,5 metros.

A Tabela 12 apresenta a análise da variância dos quadrados médios em blocos aleatórios para as alturas médias de plantas em diferentes DAPs.

| AP              | Trat.   | Mé.  | CV%   |
|-----------------|---------|------|-------|
| 34 DAP (V3–V4)  | 0,064** | 0,68 | 18,17 |
| 91 DAP (R2)     | 0,081** | 1,97 | 4,10  |
| 98 DAP (R3-R4)  | 0,042** | 1,99 | 4,39  |
| 112 DAP (R4–R5) | 0,038ns | 1,81 | 8,59  |
| 119 DAP (R5–R6) | 0,067ns | 2,11 | 10,23 |

Tabela 12. Resumo da análise da variância de altura de planta.

ns—não significativo usando o teste F; \*\* e \* significativos a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, de acordo com o teste F. Tratamentos (Treat.); Média (Me.); Coeficiente de variação (CV%); Dias após o Plantio (DAP); Altura média de Planta (AP).

A análise da variância revelou diferenças significativas (p < 0,01) entre os tratamentos aos 34 (V3–V4), 91 (R2) e 98 DAP (R3–R4), indicando variações no desenvolvimento das plantas nesses estádios. Contudo, aos 112 (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6), as diferenças não foram significativas, indicando a estabilização do crescimento vegetativo. Essa variação pode ser atribuída às características genéticas dos híbridos.

A diminuição na média de altura de planta observada aos 112 DAP (R4–R5) pode ser atribuída a possíveis inconsistências na geração do Modelo Digital de Superfície (MDS), como falta de pontos de referência comuns suficientes ou imprecisões no alinhamento das imagens durante o processamento. Além disso, fatores externos, como vento, podem ter afetado a posição das plantas no momento da captura das imagens, resultando em uma subestimação da altura nesse estádio.

A Tabela 13 apresenta os resultados do teste de Tukey, comparando as médias das alturas de planta entre os híbridos em diferentes DAPs.

| Variávei<br>s      | UENF<br>506-11<br>(H1) | UENF<br>506-16<br>(H2) | 0ENF<br>MSV<br>2210<br>(H3) | UENF<br>MS 2208<br>(H4) | LG 6036<br>(H6)  | 30F35R<br>(H7) | AG 1051<br>(H8)   |
|--------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------|----------------|-------------------|
| 34 DAP<br>(V3–V4)  | 0,64ab                 | 0,61ab                 | 0,88a                       | 0,74ab                  | 0,57b            | 0,80ab         | 0,54b             |
| 91 DAP<br>(R2)     | 1,88b                  | 1,87b                  | 2,14a                       | 2,21a                   | 1,84b            | 1,93b          | 1,94b             |
| 98 DAP<br>(R3–R4)  | 1,93bc                 | 1,90bc                 | 2,15a                       | 2,08ab                  | 1,86c            | 2,00abc        | 2,01abc           |
| 112 DAP<br>(R4–R5) | 1,77a                  | 1,68a                  | 1,97a                       | 1,82a                   | 1,72a            | 1,85a          | 1,86a             |
| 119 DAP<br>(R5–R6) | 2,03a                  | 2,00a                  | 2,37a                       | 2,10a                   | 2,00a            | 2,12a          | 2,15a             |
| 80 DAP<br>RG       | 2,60bc<br>5452bc       | 2,61b<br>5675bc        | 2,94a<br>5420bc             | 3,06a<br>4900c          | 2,49bc<br>7457ab | 2,45c<br>8795a | 2,51bc<br>7106abc |

Tabela 13. Teste de Tukey para comparação das médias das alturas de planta.

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, de acordo com o teste de Tukey. Da esquerda para a direita: H1, H2, H3, H4 (UENF), H6, H7 e H8 (comercial). Dias Após o Plantio (DAP). Altura média de Plantas (AP).

O teste de Tukey revelou que os híbridos (mesmo em ambas as metodologias) H3 (UENF MSV 2210) e H4 (UENF MS 2208) apresentaram as maiores alturas em diversos DAPs, enquanto H6 (LG 6036) e H8 (AG 1051) tiveram médias menores. Essas diferenças podem ser atribuídas à variabilidade genética dos híbridos, já que todos foram submetidos ao mesmo manejo agronômico e condições uniformes de irrigação. Essa uniformidade de manejo elimina fatores externos, como disponibilidade hídrica ou fertilização, como possíveis causas para as diferenças observadas, reforçando o papel predominante da genética no comportamento vegetativo dos híbridos (Zhang & Zhang, 2024).

Os híbridos que alcançaram maiores alturas podem ter características genéticas que favorecem o crescimento vegetativo, enquanto os de menor altura podem priorizar o desenvolvimento reprodutivo. Essa diferenciação genética é importante para a seleção de híbridos, dependendo dos objetivos do produtor, como maior biomassa para silagem ou melhor relação entre crescimento vegetativo e produtividade de grãos. Esses resultados destacam a importância de considerar a variabilidade genética no planejamento de cultivares para diferentes sistemas de manejo e objetivos agronômicos (Li et al., 2016).

A Tabela 14 apresenta as correlações fenotípicas entre a altura média das plantas medidas por MDS em diferentes DAPs, pela régua aos 80 DAP, e o rendimento de grãos (RG).

| Variáveis          | AP 34 DAP<br>(V3–V4)<br>MDS | AP 91 DAP<br>(R2) MDS | AP 98 DAP<br>(R3–R4)<br>MDS | AP 112 DAP<br>(R4–R5)<br>MDS | AP 119 DAP<br>(R5–R6)<br>MDS |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| AP 80 DAP<br>RÉGUA | 0,54                        | 0,91**                | 0,72                        | 0,40                         | 0,49                         |
| RG                 | -0,11                       | -0,51                 | -0,31                       | 0,00                         | -0,14                        |

Tabela 14. Correlação fenotípica entre altura média de planta.

\*\* e \* significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pela correlação fenotípica. Dias Após o Plantio (DAP). Altura média de planta (AP); Modelo Digital de Superfície (MDS).

A análise revelou uma correlação significativa entre a altura de planta medida manualmente aos 80 DAP (AP 80 DAP RÉGUA) e a altura estimada pelo Modelo Digital de Superfície aos 91 DAP (R2) (AP 91 DAP (R2) MDS), com r = 0,91 (p < 0,01). Esse resultado evidencia a confiabilidade do MDS em capturar a altura das plantas de forma representativa. Além disso, a análise dos outros estádios fenológicos revelou correlações significativas, como AP 34 DAP (V3–V4) MDS (r = 0,54), AP 98 DAP (R3–R4) MDS (r = 0,72), AP 112 DAP (R4–R5) MDS (r = 0,40) e AP 119 DAP (R5–R6) MDS (r = 0,49), demonstrando a estabilidade e precisão do MDS ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas.

A altura de planta (AP) manual foi medida em apenas seis plantas por parcela, enquanto a AP derivada do Modelo Digital de Superfície (MDS) considerou todos os pixels da parcela, proporcionando uma estimativa mais abrangente e detalhada da altura média. Além disso, as medições manuais foram realizadas até a folha bandeira, enquanto o MDS incluiu a altura total, considerando também o pendão. Essa diferença metodológica explica as possíveis discrepâncias entre os dois métodos, especialmente em estádios avançados, quando o pendão contribui significativamente para a altura total da planta (Oliveira et al., 2024).

A correlação significativa entre a AP manual aos 80 DAP e a AP MDS aos 91 DAP pode ser atribuída à uniformidade do desenvolvimento vegetativo nesse período. Aos 91 DAP, as plantas ainda não haviam alcançado a plena expansão do pendão, reduzindo as diferenças entre os métodos. À medida que o ciclo avança, essas discrepâncias aumentam devido à inclusão do pendão no MDS e às limitações da mensuração manual para representar toda a variabilidade da parcela.

Esses fatores reforçam a utilidade do MDS como uma ferramenta para avaliação de altura de planta em experimentos agrícolas, especialmente quando é necessário capturar a variabilidade dentro das parcelas. Contudo, para comparações diretas com medições manuais, é fundamental considerar as diferenças nas metodologias e seus impactos nos resultados (Holman et al., 2016)

A ausência de correlação significativa entre altura de planta e RG, com valores variando de -0,51 a 0, sugere que a altura das plantas não foi um bom indicador de rendimento de grãos. A altura da planta não é uma característica que define a produtividade de grãos, apesar de haver a possibilidade de correlações positivas e significativas. As plantas podem priorizar o crescimento vegetativo em detrimento do reprodutivo, resultando em plantas mais altas com menor alocação de biomassa para a produção de grãos. Além disso, plantas de maior porte podem apresentar maior auto sombreamento ou alocação ineficiente de recursos, o que compromete o desenvolvimento de estruturas reprodutivas. Esses resultados reforçam a importância de considerar múltiplas variáveis no processo de seleção de híbridos, priorizando não apenas o vigor vegetativo, mas também características reprodutivas diretamente associadas ao rendimento (Ferraz et al., 2024).

A análise de altura das plantas indicou que o uso de Modelos Digitais de Superfície (MDS) é eficaz para monitorar o desenvolvimento da cultura ao longo do ciclo de crescimento. A forte correlação entre os dados obtidos aos 91 DAP (R2) pelo MDS e as medições manuais aos 80 DAP (r = 0,91) demonstra a boa concordância entre os dois métodos, mas ressalta a necessidade de ajustes metodológicos para garantir precisão em diferentes estádios fenológicos. Assim, o MDS se apresenta como uma ferramenta complementar útil, mas não totalmente substitutiva para o monitoramento manual, especialmente no estádio R2 (Li et al., 2024).

Em conclusão, o uso do MDS, especialmente em DAPs críticos como 91 DAP (R2), mostrou-se uma ferramenta robusta para a avaliação da altura de plantas, fornecendo descobertas valiosas para o manejo agronômico e a seleção de materiais genéticos promissores.

### 4.4. Cobertura Vegetal Verde

A porcentagem de cobertura vegetal (%CV) foi avaliada ao longo de diferentes Dias Após o Plantio (DAP) para cada parcela experimental de milho (Figura 10). As avaliações ocorreram em 19 DAP (V2–V3), 34 DAP (V3– V4), 91 DAP (R2), 98 DAP (R3–R4), 112 DAP (R4–R5), e 119 DAP (R5–R6) (Figura 11).









Figura 11. Representação do índice VARI para (a) 19 DAP (V2–V3); (b) 34 DAP (V3–V4); (c) 91 DAP (R2); (d) 98 DAP (R3–R4)); (e) 112 DAP (R4–R5) e (f) 119 DAP (R5–R6).

4.4.1. Cobertura Vegetal Verde sem Corte por Altura

As Tabelas A10-12, apresenta o detalhamento da cobertura vegetal calculada para cada parcela sem corte de altura. A Tabela 15 apresenta a análise da variância para a cobertura vegetal em diferentes DAPs.

Tabela 15. Resumo da análise da variância de cobertura vegetal sem corte por altura.

| CV              | Trat.      | Mé.  | CV%   |
|-----------------|------------|------|-------|
| 19 DAP (V2–V3)  | 0,017503*  | 0,14 | 50,03 |
| 34 DAP (V3–V4)  | 0,02778ns  | 0,73 | 15,06 |
| 91 DAP (R2)     | 0,000158ns | 0,99 | 1,75  |
| 98 DAP (R3–R4)  | 0,014168*  | 0,88 | 7,22  |
| 112 DAP (R4–R5) | 0,121721*  | 0,50 | 37,42 |
| 119 DAP (R5–R6) | 0.115102** | 0.31 | 46,82 |

ns—não significativo usando o teste F; \*\* e \* significativos a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, de acordo com o teste F. Tratamentos (Treat.); Média (Me.); Coeficiente de variação (CV%); Dias após o Plantio (DAP); Cobertura Vegetal (CV).

A cobertura vegetal verde das parcelas foi avaliada em diferentes estádios de desenvolvimento, representados pelos Dias Após o Plantio (DAP). A análise revelou padrões distintos de crescimento entre os híbridos, destacando-se a influência genética no estabelecimento e manutenção da área foliar. Os valores de cobertura vegetal foram consistentes com a dinâmica de desenvolvimento do milho. A partir de 19 DAP (V2–V3), observou-se um rápido aumento na cobertura até 91 DAP (R2), momento em que as plantas alcançaram o máximo de desenvolvimento vegetativo, seguido por um declínio gradual relacionado ao avanço da senescência.

A análise de variância (ANOVA) indicou diferenças significativas (p < 0,05) entre os tratamentos para a cobertura vegetal em 19 DAP (V2–V3), 98 DAP (R3–R4), 112 DAP (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6) (Tabela 15). Esses resultados sugerem variações entre os híbridos na velocidade de desenvolvimento inicial e na capacidade de manter o dossel verde em estádios mais tardios.

A capacidade de manter o dossel verde em estádios mais tardios, característica associada ao comportamento *stay-green*, é geralmente benéfica

para a produção de grãos, pois permite maior interceptação de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e uma extensão da duração do enchimento de grãos (Venancio, 2020). O *stay-green* refere-se à manutenção prolongada da saúde foliar, mesmo após o desenvolvimento reprodutivo avançado, ajudando a maximizar o aproveitamento da luz e a eficiência no uso de nutrientes (Cerrudo, 2017). Esse comportamento é crucial em condições de estresse, como déficit hídrico ou altas temperaturas, pois contribui para a redução das perdas fisiológicas e mantém a capacidade fotossintética ativa por mais tempo. Além disso, plantas com características *stay-green* apresentam melhor adaptação a ambientes adversos, o que pode resultar em maior resiliência e estabilidade de rendimento ao longo de ciclos sazonais (Ribeiro, 2021). Estudos indicam que a manutenção prolongada da capacidade fotossintética durante os estádios finais pode aumentar significativamente o potencial de produção, tornando o *stay-green* um fator promissor no desenvolvimento de híbridos mais eficientes e adaptados às condições climáticas extremas (Zheng et al., 2023).

No entanto, em regiões com períodos de chuva limitados, como o norte e noroeste fluminense, ciclos mais curtos podem ser vantajosos, garantindo que as plantas completem seu ciclo antes que o déficit hídrico comprometa o desenvolvimento e a produtividade. Contudo, é importante considerar que, em situações onde o déficit hídrico coincide com o período de florescimento, os ciclos mais curtos podem ser prejudiciais, limitando o potencial de produtividade devido à menor duração do período reprodutivo (Wenzhe et al., 2021). Assim, a escolha de híbridos deve considerar tanto a capacidade de manter o dossel verde quanto a adequação do ciclo ao regime hídrico local, buscando o equilíbrio entre produtividade potencial e adaptação às condições climáticas específicas (Gracia-Romero et al., 2019).

A Tabela 16 apresenta os resultados do teste de Tukey, comparando as médias da cobertura vegetal entre os híbridos em diferentes DAPs.

| Variáveis          | UENF 506-<br>11 (H1) | UENF<br>506-16<br>(H2) | UENF<br>MSV<br>2210<br>(H3) | UENF<br>MS 2208<br>(H4) | LG 6036<br>(H6) | 30F35R<br>(H7) | AG 1051<br>(H8) |
|--------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 19 DAP<br>(V2–V3)  | 0,15a                | 0,10a                  | 0,21a                       | 0,19a                   | 0,57a           | 0,20a          | 0,06a           |
| 34 DAP<br>(V3–V4)  | 0,72a                | 0,70a                  | 0,85a                       | 0,70a                   | 0,65a           | 0,83a          | 0,64a           |
| 91 DAP<br>(R2)     | 0,99a                | 0,99a                  | 0,98a                       | 0,98a                   | 0,99a           | 1,00a          | 0,98a           |
| 98 DÁP<br>(R3–R4)  | 0,87ab               | 0,89ab                 | 0,78b                       | 0,87ab                  | 0,94a           | 0,96a          | 0,87ab          |
| 112 DAP<br>(R4–R5) | 0,39a                | 0,48a                  | 0,29a                       | 0,33a                   | 0,72a           | 0,66a          | 0,65a           |
| 119 DAP<br>(R5–R6) | 0,21ab               | 0,24ab                 | 0,14b                       | 0,12b                   | 0,50a           | 0,52a          | 0,41ab          |
| ` RG ´´            | 5452bc               | 5675bc                 | 5420bc                      | 4900c                   | 7457ab          | 8795a          | 7106abc         |

Tabela 16. Teste de Tukey para comparação das médias da cobertura vegetal sem corte por altura.

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, de acordo com o teste de Tukey. Da esquerda para a direita: H1, H2, H3, H4 (UENF), H6, H7 e H8 (comercial). Dias Após o Plantio (DAP). Cobertura Vegetal (CV).

O teste de Tukey revelou agrupamentos distintos entre os híbridos em 119 DAP (R5–R6). Os híbridos LG 6036 (H6) e 30F35R (H7) apresentaram os maiores valores de cobertura vegetal (50% e 52%, respectivamente), refletindo sua maior capacidade de manter o dossel verde (Tabela 17). Por outro lado, híbridos como UENF MSV 2210 (H3) e UENF MS 2208 (H4) apresentaram os menores valores, indicando senescência mais precoce.

A Tabela 17 apresenta as correlações fenotípicas entre cobertura vegetal em diferentes DAPs e o rendimento de grãos (RG).

| Tabela 17. Correlação  | fenotípica | entre | cobertura | vegetal | sem | corte | por | altura | е |
|------------------------|------------|-------|-----------|---------|-----|-------|-----|--------|---|
| o rendimento de grãos. | 1          |       |           |         |     |       |     |        |   |

| _ |          |         |         |       |         |         |         |   |
|---|----------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|---|
|   |          | CV 19   | CV 34   | CV 91 | CV 98   | CV 112  | CV 119  |   |
|   | Variável | DAP     | DAP     | DAP   | DAP     | DAP     | DAP     |   |
|   |          | (V2–V3) | (V3–V4) | (R2)  | (R3–R4) | (R4–R5) | (R5–R6) |   |
|   | RG       | -0,20   | 0,06    | 0,55  | 0,72    | 0,88**  | 0,96**  |   |
|   |          |         |         |       |         |         |         | ٠ |

\*\* e \* significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pela correlação fenotípica. Dias Após o Plantio (DAP). Cobertura Vegetal (CV).

A análise de correlação de Pearson demonstrou que a cobertura vegetal em 112 e 119 DAP (R5–R6) apresentou correlação significativa positiva

com o rendimento de grãos (r = 0,88 e r = 0,96, respectivamente; p < 0,01; Tabela 17). Esses achados indicam que híbridos que mantiveram o dossel verde por mais tempo, característica associada ao fenômeno *stay-green*, apresentaram maior potencial produtivo (Cerrudo et al., 2017).

A análise da cobertura vegetal verde revelou diferenças fenológicas marcantes entre híbridos comerciais e interpopulacionais. Os híbridos comerciais, mais precoces na floração, apresentaram ciclos reprodutivos mais longos, o que favoreceu a manutenção do dossel verde por mais tempo durante as fases críticas do enchimento de grãos. Por outro lado, os híbridos interpopulacionais exibiram ciclos vegetativos mais longos e reprodutivos mais curtos, resultando em menor persistência da cobertura verde em estádios mais avançados. Esse comportamento fenológico está diretamente correlacionado ao rendimento de grãos e aos índices RGB, indicando que a duração dos ciclos vegetativo e reprodutivo influencia a capacidade fotossintética e o vigor das plantas. Esses resultados reforçam a importância de considerar o ciclo fenológico na escolha de híbridos, especialmente em função das condições de manejo e dos objetivos produtivos (Peroni, 2020).

#### 4.4.2. Cobertura Vegetal Verde com Corte por Altura

As Tabelas A13 a A15, apresentam o detalhamento da cobertura vegetal calculada para cada parcela com corte por altura. A Tabela 18 apresenta a análise da variância dos quadrados médios em blocos aleatórios para a cobertura vegetal em diferentes DAPs.

| CV              | Trat.      | Mé.  | CV%   |
|-----------------|------------|------|-------|
| 34 DAP (V3–V4)  | 0,083533ns | 0,64 | 28,83 |
| 91 DAP (R2)     | 0,002694ns | 0,97 | 6,35  |
| 98 DAP (R3–R4)  | 0,012464ns | 0,86 | 10,29 |
| 112 DAP (R4–R5) | 0,106238*  | 0,49 | 39,86 |
| 119 DAP (R5–R6) | 0,102668** | 0,29 | 53,01 |

Tabela 18. Resumo da análise da variância de cobertura vegetal com corte por altura.

ns—não significativo usando o teste F; \*\* e \* significativos a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, de acordo com o teste F. Tratamentos (Treat.); Média (Me.); Coeficiente de variação (CV%); Dias após o Plantio (DAP); Cobertura Vegetal (CV).

A utilização do Modelo Digital de Superfície (MDS) para eliminar pixels abaixo de 0,3 m resultou em um refinamento dos dados de cobertura vegetal verde, removendo possíveis interferências de solo e plantas daninhas.

A cobertura vegetal com corte por altura apresentou dinâmica similar à avaliação sem corte, com um aumento expressivo entre 34 DAP (V3– V4) e 91 DAP (R2), alcançando valores próximos a 100% para a maioria dos híbridos no pico vegetativo. Contudo, os valores ajustados foram ligeiramente inferiores em comparação aos dados sem corte, especialmente em estádios iniciais (34 DAP (V3–V4)), devido à exclusão de áreas não representativas do dossel ativo. Após 91 DAP (R2), observou-se o início do declínio na cobertura vegetal, relacionado ao processo de senescência.

A análise de variância (ANOVA) com corte por altura indicou diferenças significativas (p < 0,05) entre os híbridos em 112 DAP (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6) (Tabela 18). Esses resultados reforçam que, em estádios mais avançados do ciclo, os híbridos exibem variações mais pronunciadas na capacidade de manutenção do dossel verde.

A Tabela 19 apresenta os resultados do teste de Tukey, comparando as médias da cobertura vegetal entre os híbridos em diferentes DAPs.

| Variávei<br>s      | UENF<br>506-11<br>(H1) | UENF<br>506-16<br>(H2) | UENF<br>MSV<br>2210<br>(H3) | UENF<br>MS 2208<br>(H4) | LG 6036<br>(H6) | 30F35R<br>(H7) | AG 1051<br>(H8) |
|--------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 34 DAP<br>(V3–V4)  | 0,67a                  | 0,57a                  | 0,84a                       | 0,62a                   | 0,52a           | 0,79a          | 0,43a           |
| 91 DAP<br>(R2)     | 0,99a                  | 0,99a                  | 0,98a                       | 0,98a                   | 0,93a           | 1,00a          | 0,95a           |
| 98 DAP<br>(R3–R4)  | 0,86a                  | 0,87a                  | 0,77a                       | 0,86a                   | 0,88a           | 0,95a          | 0,83a           |
| 112 DAP<br>(R4–R5) | 0,39a                  | 0,48a                  | 0,28a                       | 0,32a                   | 0,67a           | 0,66a          | 0,63a           |
| 119 DAP<br>(R5–R6) | 0,19ab                 | 0,24ab                 | 0,14b                       | 0,11b                   | 0,45ab          | 0,52a          | 0,38ab          |
| RG                 | 5452bc                 | 5675bc                 | 5420bc                      | 4900c                   | 7457ab          | 8795a          | 7106abc         |
| /                  |                        |                        |                             |                         |                 |                |                 |

Tabela 19. Teste de Tukey para comparação das médias da cobertura vegetal com corte por altura.

Médias seguidas pelas mesmas letras na linha não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, de acordo com o teste de Tukey. Da esquerda para a direita: H1, H2, H3, H4 (UENF), H6, H7 e H8 (comercial). Dias Após o Plantio (DAP). Cobertura Vegetal (CV).

O teste de Tukey confirmou a superioridade dos híbridos LG 6036 (H6) e 30F35R (H7) na manutenção da cobertura vegetal tardia. Em 119 DAP (R5–R6), ambos apresentaram valores significativamente maiores (45% e 52%, respectivamente), destacando-se como híbridos com maior capacidade *stay-green*. Por outro lado, híbridos como UENF MSV 2210 (H3) e UENF MS 2208 (H4) mostraram os menores valores de cobertura vegetal, refletindo um declínio mais rápido da área foliar ativa (Tabela 20).

A Tabela 20 apresenta as correlações fenotípicas entre cobertura vegetal em diferentes DAPs e o rendimento de grãos (RG).

|          | ao graco. |       |         |         |         |
|----------|-----------|-------|---------|---------|---------|
|          | CV 34     | CV 91 | CV 98   | CV 112  | CV 119  |
| Variável | DAP       | DAP   | DAP     | DAP     | DAP     |
|          | (V3–V4)   | (R2)  | (R3–R4) | (R4–R5) | (R5–R6) |
| RG       | -0,04     | -0,25 | 0,64    | 0,90**  | 0,98**  |
|          |           |       |         |         |         |

Tabela 20. Correlação fenotípica entre cobertura vegetal com corte por altura e o rendimento de grãos.

\*\* e \* significativos a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pela correlação fenotípica. Dias Após o Plantio (DAP). Cobertura Vegetal (CV).

Os dados ajustados com corte por altura apresentaram uma correlação positiva ainda mais forte entre a cobertura vegetal tardia e o rendimento de grãos. Em 112 e 119 DAP (R5–R6), os coeficientes de correlação de Pearson foram de r = 0,90 e r = 0,98, respectivamente (p < 0,01; Tabela 20). Esses resultados indicam que a remoção de interferências na análise melhorou a precisão da relação entre o comportamento *stay-green* e a produtividade.

Os híbridos H6 e H7, que mantiveram maior cobertura vegetal em 119 DAP (R5–R6), destacaram-se como os mais produtivos. Isso evidencia que a capacidade de prolongar a funcionalidade do dossel é um atributo determinante para o aumento da eficiência fotossintética e, consequentemente, do rendimento de grãos (Makanza et al., 2018).

A utilização do Modelo Digital de Superfície (MDS) para remover pixels abaixo de 0,3 m eliminou possíveis interferências de solo e plantas daninhas. Essa metodologia refinada confirmou as tendências observadas nos dados sem corte por altura, destacando os híbridos H6 e H7 como os de maior capacidade de manutenção da cobertura vegetal tardia.

4.4.3. Comparação entre métodos de cálculo de cobertura vegetal verde

Os resultados obtidos destacam a importância da avaliação da cobertura vegetal verde para caracterizar o desempenho das cultivares de milho. A análise evidenciou que o comportamento *stay-green* é determinante na manutenção da área foliar funcional em estádios tardios do ciclo, estando fortemente correlacionado ao rendimento de grãos. Híbridos como LG 6036 (H6) e 30F35R (H7) demonstraram vantagens em termos de cobertura vegetal

tardia e produtividade, enquanto híbridos como UENF MSV 2210 (H3) e UENF MS 2208 (H4) apresentaram senescência mais precoce, refletida em menor eficiência produtiva (Cerrudo, 2017).

A aplicação do método com corte por altura, utilizando o Modelo Digital de Superfície (MDS) para eliminar pixels abaixo de 0,3 m, permitiu uma análise mais refinada ao remover possíveis interferências de solo e plantas daninhas. Isso garantiu que apenas a área foliar funcional fosse considerada, aprimorando a precisão na correlação com o rendimento de grãos.

Por outro lado, o método sem corte por altura apresentou vantagens práticas, especialmente em termos de agilidade no processamento. A ausência de uma etapa adicional para gerar e aplicar o MDS torna o método mais eficiente para análises em larga escala ou contextos com restrições de tempo. Além disso, a possibilidade de identificar manualmente a presença de plantas daninhas por meio de fotointerpretação oferece uma solução prática e confiável, especialmente quando as condições de campo são homogêneas em termos de manejo.

Outro ponto crítico é a confiabilidade na geração do MDS. Em algumas situações, o MDS pode não representar fielmente a superfície real devido às limitações na resolução do equipamento ou às inconsistências no processamento dos dados. Essa imprecisão pode introduzir erros na exclusão de áreas relevantes do dossel, comprometendo a representatividade da cobertura vegetal avaliada (Ferraz, 2024).

Ambos os métodos têm seus méritos, e a escolha entre eles deve considerar o objetivo do estudo, os recursos disponíveis e o contexto experimental. O método com corte por altura é recomendado para análises em que a precisão seja essencial, como estudos sobre competição de plantas daninhas ou variações sutis entre tratamentos. Já o método sem corte por altura, pela sua simplicidade e menor demanda de processamento, é indicado para estudos em larga escala ou para cenários em que a fotointerpretação possa garantir a exclusão visual de interferências.

Assim, os resultados desta pesquisa contribuem para o avanço metodológico na análise de cobertura vegetal, reforçando a necessidade de

adaptar os métodos às condições e objetivos específicos de cada estudo. Ambos os métodos demonstraram ser eficazes na identificação de híbridos superiores em características *stay-green*, fornecendo subsídios valiosos para a seleção de cultivares de milho mais produtivas e resilientes.

## 5. CONCLUSÕES

Os índices de vegetação RGB foram ferramentas eficazes para avaliar características de genótipos de milho. Altas correlações observadas entre esses índices e variáveis-chave, como florescimento, altura média de planta, massa de 100 grãos, concentração de antocianinas e rendimento de grãos, indicam a capacidade desses índices de refletirem o desempenho genético e o estado fisiológico das plantas.

O estádio de 119 DAP (R5–R6) (maturidade fisiológica) foi identificado como um período crítico para a aquisição de imagens. Durante este estádio, o índice de vegetação RGB VARI mostrou uma correlação significativa (r = 0,99 \*\*) com o rendimento de grãos. Além disso, o VARI demonstrou correlações consistentes com outras variáveis agronômicas chave, como florescimento feminino (FF) (r = -0.87 \*), altura média de planta (AP) (r = -0.79 \*), massa de 100 grãos (100 GW) (r = -0.77 \*) e índice de antocianina nas folhas (Anth) (r = -0.86 \*). Esses achados destacam o potencial do VARI como um indicador confiável para avaliar o rendimento e outras características importantes em culturas de milho.

A avaliação da altura média de plantas por meio de dados do Modelo Digital de Superfície (MDS) apresentou correlação significativa com as medidas realizadas manualmente com régua aos 80 DAP, demonstrando que a altura média medida por MDS pode estimar fielmente a altura das plantas. Além disso, com essa metodologia é possível medir todas as plantas da parcela com precisão e em menor tempo para a coleta de dados em campo.

A cobertura vegetal foi um parâmetro crucial para diferenciar híbridos de milho, especialmente nos estádios tardios do ciclo. Híbridos que mantiveram maior cobertura vegetal, característica associada ao comportamento *stay-green*, apresentaram maior rendimento de grãos. Esse achado reforça a importância do monitoramento do dossel ao longo do ciclo para identificar genótipos de alto desempenho. A análise de componentes principais destacou que a distinção entre híbridos locais e comerciais é mais evidente nos estádios finais do ciclo (112 (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6)). A fenotipagem de alto rendimento com drones demonstrou ser uma abordagem eficiente para selecionar genótipos superiores e otimizar práticas de manejo agronômico, com impacto direto no melhoramento de cultivares adaptadas a condições específicas.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a exclusão de índices de vegetação (SCI, H, S, L, I, a, b, u, v, GA, GGA e CSI) e a consideração de índices adicionais, como o Índice Triangular de Verde (TGI), para simplificar a metodologia e viabilizar sua aplicação em larga escala. A repetição do experimento em outros anos seria fundamental para validar os achados, considerando variações climáticas e sazonais, além de incluir um maior número de genótipos provenientes de populações segregantes escolhidas ao acaso, aumentando a validade e a abrangência dos resultados. Também é recomendada a validação do experimento em populações segregantes, permitindo maior flexibilidade na classificação dos ciclos vegetativo e reprodutivo e reduzindo as limitações observadas no presente estudo. Por fim, o desenvolvimento de um índice de seleção baseado nos índices de vegetação seria uma ferramenta promissora para predizer genótipos de alto desempenho, otimizando o processo de melhoramento e manejo agronômico.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Adak, A., DeSalvio, A.J., Arik, M.A., Murray, S.C. (2024) Field-based highthroughput phenotyping enhances phenomic and genomic predictions for grain yield and plant height across years in maize. *G3: Genes, Genomes, Genetics* 14:jkae092 . DOI doi.org/10.1093/g3journal/jkae092.

Adak, A., Murray, S.C., Anderson, S.L. (2021) Temporal phenomic predictions from unoccupied aerial systems can outperform genomic predictions. *bioRxiv*. DOI doi.org/10.21203/rs.3.rs-954708/v1.

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

Araus, J.L., Cairns, J.E. (2014) Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends in Plant Science* 19:52-61. DOI doi.org/10.1016/j.tplants.2013.09.008.

Araus, J.L., Kefauver, S.C. (2018) Breeding to adapt agriculture to climate change: affordable phenotyping solutions. *Current Opinion in Plant Biology* 45:237-247. DOI doi.org/10.1016/j.pbi.2018.05.003.

Araus, J.L., Kefauver, S.C., Zaman-Allah, M., Olsen, M.S., Cairns, J.E. (2018) Translating high-throughput phenotyping into genetic gain. *Trends in Plant Science* 23:451-466. DOI doi.org/10.1016/j.tplants.2018.02.001.

Arriola-Valverde, S., Villagra-Mendoza, K., Méndez-Morales, M., Solórzano-Quintana, M., Gómez-Calderón, N., Rimolo-Donadio, R. (2020) Analysis of crop dynamics through close-range UAS photogrammetry. *International*  Symposium on Circuits and Systems. DOI doi.org/10.1109/ISCAS45731.2020.9181285.

Artuzo, F.D., Foguesatto, C.R., Machado, J.A.D., Oliveira, L., Souza, R.L. (2019) O potencial produtivo brasileiro: uma análise histórica da produção de milho. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* 12:515-540. DOI doi.org/10.17765/2176-9168.2019V12N2P515-540.

Baek, I., Cho, B.-K., Gadsden, S.A., Eggleton, C., Oh, M., Mo, C., Kim, M.S. (2019) A novel hyperspectral line-scan imaging method for whole surfaces of round shaped agricultural products. *Biosystems Engineering* 188:57-66. DOI doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.09.014.

Barzin, R., Pathak, R., Lotfi, H., Varco, J., Bora, G.C. (2020) Use of UAS multispectral imagery at different physiological stages for yield prediction and input resource optimization in corn. *Remote Sensing* 12:2392. DOI doi.org/10.3390/rs12152392.

Benediktsson, J.A., Wu, Z. (2021) Distributed computing for remotely sensed data processing. *Proceedings of the IEEE* 109:1737-1740. DOI doi.org/10.1109/JPROC.2021.3094335.

Berra, E.F., Peppa, M.V. (2020) Advances and challenges of UAV SFM MVS photogrammetry and remote sensing: short review. *IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference*. DOI doi.org/10.1109/LAGIRS48042.2020.9285975.

Borg, E., Truckenbrodt, S.C., Lausch, A., Dietrich, P., Schmidt, K. (2022) Remote sensing. In: Kresse, W., Danko, D. (ed.) *Springer Handbook of Geographic Information*. Springer Handbooks. Springer, Cham. DOI doi.org/10.1007/978-3-030-53125-6\_10. Brocks, S., Bareth, G. (2018) Estimating barley biomass with crop surface models from oblique RGB imagery. *Remote Sensing* 10:268. DOI doi.org/10.3390/rs10020268.

Brumatti, L.M., Pires, G.F., Santos, A.B. (2020) Challenges to the adaptation of double cropping agricultural systems in Brazil under changes in climate and land cover. *Atmosphere* 11:1310. DOI doi.org/10.3390/atmos11121310.

Buchaillot, M.L., Gracia-Romero, A., Vergara-Diaz, O., Zaman-Allah, M.A., Tarekegne, A., Cairns, J.E., Prasanna, B.M., Araus, J.L., Kefauver, S.C. (2019) Evaluating maize genotype performance under low nitrogen conditions using RGB UAV phenotyping techniques. *Sensors* 19:1815. DOI doi.org/10.3390/s19081815.

Carstens, J.C. (2022) Temporal phenomic predictions from unoccupied aerial systems can outperform genomic predictions. *G3: Genes, Genomes, Genetics* 12:jkac294 . DOI doi.org/10.1093/g3journal/jkac294.

Casuccio, L., Kotze, A. (2022) Corn planting quality assessment in very highresolution RGB UAV imagery using Yolov5 and Python. *AGILE: GIScience Series* 3:28-2022. DOI doi.org/10.5194/agile-giss-3-28-2022.

Cerovic, Z.G., Masdoumier, G., Ghozlen, N.B., Latouche, G. (2012) A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. *Physiologia Plantarum* 146:251-260. DOI doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01639.x.

Cerrudo, D., González, L., Lugo, J.A.M., Trachsel, S. (2017) Stay-green and associated vegetative indices to breed maize adapted to heat and combined heat-drought stresses. *Remote Sensing* 9:235. DOI doi.org/10.3390/rs9030235.

Chetna, J.A. (2023) Observation from space: remote sensing. In: *Remote Sensing and Digital Image Processing*. Springer, Singapore. DOI doi.org/10.1007/978-981-19-6905-8\_5.

Coelho, D.M., Paes, L.E.S., Guarato, A.Z., Araújo, D.B., Vilarinho, L.O. (2023) Photogrammetry applied for inspection of additive manufactured components. *COBEF 2023*. DOI doi.org/10.26678/abcm.cobef2023.cof23-0176.

Cruz, C.D. (2013) GENES-A software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum Agronomy* 35:271-276. DOI doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.21251.

Dahiya, P., Rathi, K. (2024) Introduction to remote sensing: principles, techniques, and applications. In: *Advances in Geospatial Technologies*. DOI doi.org/10.58532/v3bdai2p3ch2.

Daughtry, C. (2000) Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 74:229-239. DOI doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9.

de Lima, V.J., Gracia-Romero, A., Rezzouk, F.Z., Diez-Fraile, M.C., Araus-Gonzalez, I., Kamphorst, S.H., do Amaral Júnior, A.T., Kefauver, S.C., Aparicio, N., Araus, J.L. (2021) Comparative performance of high-yielding European wheat cultivars under contrasting Mediterranean conditions. *Frontiers in Plant Science* 12:687622. DOI doi.org/10.3389/fpls.2021.687622.

Delgado-Vera, C., Aguirre-Munizaga, M., Jiménez-Icaza, M., Manobanda-Herrera, N., Rodríguez-Méndez, A. (2017) A photogrammetry software as a tool for precision agriculture: a case study. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 672:283-297. DOI doi.org/10.1007/978-3-319-67283-0\_21. Díaz-Varela, R., de la Rosa, R., León, L., Zarco-Tejada, P. (2015) Highresolution airborne UAV imagery to assess olive tree crown parameters using 3D photo reconstruction: application in breeding trials. *Remote Sensing* 7:4213-4232. DOI doi.org/10.3390/rs70404213.

Ferraz, M.A.J., Barboza, T.O.C., Arantes, P.S., Pinho, R.G.V., Santos, A.F. (2024) Integrating satellite and UAV technologies for maize plant height estimation using advanced machine learning. *AgriEngineering* 6:0002. DOI doi.org/10.3390/agriengineering6010002.

Gamon, J.A., Peñuelas, J., Field, C.B. (1992) A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment* 41:35-44. DOI doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S.

Geipel, J., Link, J., Claupein, W. (2014) Combined spectral and spatial modeling of corn yield based on aerial images and crop surface models acquired with an unmanned aircraft system. *Remote Sensing* 6:10335-10355. DOI doi.org/10.3390/rs61110335.

Gilmore, A.M. (1997) Mechanistic aspects of xanthophyll cycle-dependent photoprotection in higher plant chloroplasts and leaves. *Physiologia Plantarum* 99:197-209. DOI doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb03449.x.

Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N. (1998) Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research* 22:689-692. DOI doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01133-2.

Goltsev, V.N., Kalaji, H.M., Paunov, M., Baba, W., Horaczek, T., Mojski, J., Kociel, H., Allakhverdiev, S.I. (2016) Variable chlorophyll fluorescence and its use for assessing physiological condition of plant photosynthetic apparatus.

Russian Journal of Plant Physiology 63:869-893. DOI doi.org/10.1134/S1021443716050058.

Gonçalves, V.M.L., Crevelari, J.A., Santa Catarina, R., de Souza, Y.P., Pereira, M.G. (2024) Performance of single, double, and interpopulation maize (Zea mays L.) hybrids based on adaptability and stability via GGE biplot. *Scientific Reports* (no prelo).

Gracia-Romero, A., Kefauver, S.C., Fernandez-Gallego, J.A., Vergara-Díaz, O., Nieto-Taladriz, M.T., Araus, J.L. (2019) UAV and ground image-based phenotyping: a proof of concept with durum wheat. *Remote Sensing* 11:1244. DOI doi.org/10.3390/rs11101244.

Gracia-Romero, A., Kefauver, S.C., Vergara-Díaz, O., Zaman-Allah, M.A., Prasanna, B.M., Cairns, J.E., Araus, J.L. (2017) Comparative performance of ground vs. aerially assessed RGB and multispectral indices for early-growth evaluation of maize performance under phosphorus fertilization. *Frontiers in Plant Science* 8:2004. DOI doi.org/10.3389/fpls.2017.02004.

Guo, X., Yang, Y., Liu, H., Liu, G., Liu, W., Wang, Y., Zhao, R., Ming, B., Xie, R., Wang, K., Li, S., Hou, P. (2022) Effects of solar radiation on dry matter distribution and root morphology of high yielding maize cultivars. *Agriculture* 12:299. DOI doi.org/10.3390/agriculture12020299.

Győri, Z. (2010) Corn: characteristics and quality requirements. In: Cereal Grains: *Assessing and Managing Quality*. Woodhead Publishing, pp. 183-211. DOI doi.org/10.1533/9781845699529.2.183.

Hallauer, A.R., Carena, M.J., Miranda Filho, J.B. (2010) *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. Springer, New York. ISBN 978-1-4419-0765-3.

Herr, A., Adak, A., Carroll, M., Elango, D., Kar, S.P., Li, C., Jones, S., Carter, A.H., Murray, S.C., Paterson, A.H., Sankaran, S., Singh, A., Singh, A.K. (2023) UAS imagery for phenotyping in cotton, maize, soybean, and wheat breeding. *Crop Science* 63:21028. DOI doi.org/10.1002/csc2.21028.

Holman, F., Riche, A., Michalski, A., Castle, M., Wooster, M., Hawkesford, M. (2016) High throughput field phenotyping of wheat plant height and growth rate in field plot trials using UAV based remote sensing. *Remote Sensing* 8:1031. DOI doi.org/10.3390/rs8121031.

Hormeño, A.J., Martín, D., Escalera, A., Armingol, J.M. (2024) A precise positioning methodology for autonomous navigation of a tethered UAV for photogrammetry. *IEEE MetroAeroSpace*. DOI doi.org/10.1109/metroaerospace61015.2024.10591607.

Hrzich, J., Bidinosti, C.P., Beck, M.A., Henry, C.J., Manawasinghe, K., Tanino, K. (2023a) Low-cost photogrammetry rig for 3D crop modelling and plant phenomics. *ESS Open Archive*. DOI doi.org/10.22541/essoar.169724957.75454897/v1.

Hrzich, J., Bidinosti, C.P., Beck, M.A., Henry, C.J., Manawasinghe, K., Tanino, K. (2023b) Low-cost photogrammetry rig for 3D crop modelling and plant phenomics. *ESS Open Archive*. DOI doi.org/10.22541/essoar.169705230.03901178/v1.

Huete, A.R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25:295-309. DOI doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X.

Jannoura, R., Brinkmann, K., Uteau, D., Bruns, C., Joergensen, R.G. (2015) Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. *Biosystems Engineering* 129:341-351. DOI doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.007. Jenicka, S. (2021) Introduction to remote sensing. In: *Geospatial Information Systems. Springer*. DOI doi.org/10.1007/978-3-030-66595-1\_1.

Jiang, S., Jiang, W., Wang, L. (2022) Unmanned aerial vehicle-based photogrammetric 3D mapping: a survey of techniques, applications, and challenges. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 10:135-171. DOI doi.org/10.1109/MGRS.2021.3122248.

Kior, A., Yudina, L., Zolin, Y., Sukhov, V., Sukhova, E. (2024) RGB imaging as a tool for remote sensing of characteristics of terrestrial plants: a review. *Plants* 13:1262. DOI doi.org/10.3390/plants13091262.

Klein, H.S., Luna, F.V. (2023) Maize. In: *Handbook of Crop Science*. Springer. DOI doi.org/10.1007/978-3-031-38589-6\_5.

Kumar, A., Narayan, A., Choudhary, V.K. (2024) Morphological characterization and diversity analysis of maize inbred lines (Zea mays L.). *Journal of Advances in Biology & Biotechnology* 27:81224. DOI doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i81224.

Kumari, R., Dubey, D. (2023) A review of various image processing techniques for UAV based photogrammetry. *IEEE International Conference*. DOI doi.org/10.1109/ICICAT57735.2023.10263713.

Lari, Z., El-Sheimy, N. (2015) System considerations and challenges in 3D mapping and modeling using low-cost UAV systems. *ISPRS Archives XL*-3/W3:343-349. DOI doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-343-2015.

Li, H., Li, H., Feng, H., Guo, C., Yang, S., Huang, W., Xiong, X., Liu, J., Chen, G., Liu, Q., Xiong, L., Liu, K., Yang, W. (2020) High-throughput phenotyping accelerates the dissection of the dynamic genetic architecture of plant growth

and yield improvement in rapeseed. *Plant Biotechnology Journal* 18:13396. DOI doi.org/10.1111/pbi.13396.

Li, J., Zhang, F., Qian, X., Zhu, Y., Shen, G. (2015) Quantification of rice canopy nitrogen balance index with digital imagery from unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing Letters* 6:183-189. DOI doi.org/10.1080/2150704X.2015.1021934.

Li, M., Shamshiri, R.R., Schirrmann, M., Weltzien, C., Shafian, S., Laursen, M.S. (2022) UAV oblique imagery with an adaptive micro-terrain model for estimation of leaf area index and height of maize canopy from 3D point clouds. *Remote Sensing* 14:585. DOI doi.org/10.3390/rs14030585.

Li, W., Niu, Z., Chen, H., Li, D., Wu, M., Zhao, W. (2016) Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Ecological Indicators* 67:637-648. DOI doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.036.

Li, Y., Li, C., Cheng, Q., Duan, F., Zhai, W., Li, Z., Mao, B., Ding, F., Kuang, X., Chen, Z. (2024) Estimating maize crop height and aboveground biomass using multi-source unmanned aerial vehicle remote sensing and Optuna-optimized ensemble learning algorithms. *Remote Sensing* 16:3176. DOI doi.org/10.3390/rs16173176.

Liu, W., Liu, G., Yang, Y., Guo, X., Ming, B., Xie, R., Liu, Y., Wang, K., Hou, P., Li, S. (2021) Spatial variation of maize height morphological traits for the same cultivars at a large agroecological scale. *European Journal of Agronomy* 131:126349. DOI doi.org/10.1016/j.eja.2021.126349.

Madan, S.G., Singh, A.K., Munjaji, K.S. (2022) Studies on physical properties of different corn (Zea mays L.) varieties. Journal of Dairying, *Foods & Home Sciences* 41:1991. DOI doi.org/10.18805/ajdfr.dr-1991.
Madec, S., Baret, F., de Solan, B., Thomas, S., Dutartre, D., Jezequel, S., Hemmerlé, M., Colombeau, G., Comar, A. (2017) High-throughput phenotyping of plant height: comparing unmanned aerial vehicles and ground LiDAR estimates. *Frontiers in Plant Science* 8:2002. DOI doi.org/10.3389/fpls.2017.02002.

Maes, W.H., Steppe, K. (2019) Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in Plant Science* 24:152-164. DOI doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007.

Makanza, R., Zaman-Allah, M., Cairns, J., Magorokosho, C., Tarekegne, A., Olsen, M., Prasanna, B. (2018) High-throughput phenotyping of canopy cover and senescence in maize field trials using aerial digital canopy imaging. *Remote Sensing* 10:330. DOI doi.org/10.3390/rs10020330.

Marghany, M. (ed.). (2022) Recent Remote Sensing Sensor Applications -Satellites and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *IntechOpen*. DOI doi.org/10.5772/intechopen.95162.

Mathews, A., Jensen, J. (2013) Visualizing and quantifying vineyard canopy LAI using an unmanned aerial vehicle (UAV) collected high density structure from motion point cloud. *Remote Sensing* 5:2164-2183. DOI doi.org/10.3390/rs5052164.

Maurya, A.K., Khangarot, L.S., Singh, D. (2023) Crop phenology studies using RGB drone data. *IEEE Conference*. DOI doi.org/10.1109/ELEXCOM58812.2023.10370340.

Mengistu, S. (2021) Maize germplasm characterization using principal component and cluster analysis. *American Journal of BioScience* 9:12. DOI doi.org/10.11648/j.ajbio.20210904.12.

Merry, K., Bettinger, P., Crosby, M., Boston, K. (2023) Remote sensing. In: *Geographic Information System Skills for Foresters and Natural Resource Managers*. Elsevier, pp. 269-301. DOI doi.org/10.1016/B978-0-323-90519-0.00001-7.

Merzlyak, M.N., Gitelson, A.A., Chivkunova, O.B., Rakitin, V.Y. (1999) Nondestructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum* 106:135-141. DOI doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x.

Migut, D., Buczek, J., Janczak-Pieniazek, M., Szpunar-Krok, E. (2022) Przemyslowe i energetyczne wykorzystanie roslin kukurydzy. *Polish Journal for Sustainable Development* 25:6. DOI doi.org/10.15584/pjsd.2021.25.1.6.

Mohammadi, S., Uhlen, A.K., Lillemo, M., Ergon, Å., Shafiee, S. (2024) Enhancing phenotyping efficiency in faba bean breeding: integrating UAV imaging and machine learning. *Precision Agriculture* 25:10121. DOI doi.org/10.1007/s11119-024-10121-4.

Montes de Oca, A., Flores, G. (2021) The AgriQ: a low-cost unmanned aerial system for precision agriculture. *Expert Systems with Applications* 182:115163. DOI doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115163.

Nangia, S., Munasinghe, T., Tubbs, H., Anyamba, A. (2023) From satellites to fields: machine learning applications for prediction of corn production using NDVI, precipitation and land surface temperature for large producer countries. *IEEE Big Data.* DOI doi.org/10.1109/BIGDATA59044.2023.10386225.

Ngo, K.H., Tran, Q.K., Quan, C.H., Luu, N.K.N., Nguyen, M.C., Dautremont, M., Badie, A. (2023) Photogrammetry-based building scan using ultra-

lightweight drone for urban applications. *Smart Cities*. DOI doi.org/10.1007/978-981-99-7434-4\_183.

Oh, S., Adams, J., Flatt, E., Bechdol, M.A., Yang, Y. (2023) Multisensor field phenotyping pipeline using unmanned aircraft systems (UAS) at the Indiana Corn and Soybean Innovation Center (ICSC) at Purdue University. *ESS Open Archive*. DOI doi.org/10.22541/essoar.169871545.53328229/v1.

Oliveira, J.P., Oliveira, A.L.F., Souza, H.M., Araújo, I.V.S., Nuñez, D.N.C. (2024) Determination of height in corn (Zea mays L.) crops through the use of images produced by UAVs. *Brazilian Journal of Science* 3:519. DOI doi.org/10.14295/bjs.v3i3.519.

Omprakash, O., Thakur, P., Aparna, A., Dogra, P.C., Bairwa, S.K., Meena, S.K., Chandra, K. (2024) Modern phenotyping: a paradigm of present need in crop improvement. *International Journal of Plant & Soil Science* 36:14326. DOI doi.org/10.9734/ijpss/2024/v36i14326.

Özlüoymak, Ö.B. (2024) Comparison and evaluation of vegetation indices for image sensing systems in precision agriculture. In: *Smart Agriculture*. Springer. DOI doi.org/10.1007/978-3-031-51579-8\_29.

Pang, Q. (2024) UAV photogrammetry and digital 3D product production technology design. *Academic Journal of Science and Technology* 16:zfax36 . DOI doi.org/10.54097/16zfax36.

Pargieła, K. (2023) Optimising UAV data acquisition and processing for photogrammetry: a review. *Geomatics and Environmental Engineering* 17:29. DOI doi.org/10.7494/geom.2023.17.3.29.

Patel, A.K., Ardeshna, R.B., Kumar, D. (2017) Quality characters of maize and NPK status of soil as influenced by various sole and intercropping treatments. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 6:191. DOI doi.org/10.20546/ijcmas.2017.609.191.

Patil, S.M., Choudhary, S., Kholova, J., Anbazhagan, K., Gattu, P., Mallayee, S., Rajalakshmi, P., Chandramouli, M., Adinarayana, J. (2023) UAV-based digital field phenotyping for crop nitrogen estimation using RGB imagery. *IEEE Conference*. DOI doi.org/10.1109/GlobConET56651.2023.10150110.

Penczek, J., Boynton, P.A., Splett, J.D. (2014) Color error in the digital camera image capture process. *Journal of Digital Imaging* 27:182-191. DOI doi.org/10.1007/s10278-013-9644-1.

Peñuelas, J., Baret, F., Filella, I. (1995) Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica* 31:221-230.

Peñuelas, J., Gamon, J.A., Fredeen, A.L., Merino, J., Field, C.B. (1994) Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment* 48:135-146. DOI doi.org/10.1016/0034-4257(94)90136-8.

Peroni, L., Chartuni, E., Hummel, C.A., Neale, C.M., Gonçalves, I.Z., Filgueiras, R., Eugenio, F.C. (2020) Potential of using spectral vegetation indices for corn green biomass estimation based on their relationship with the photosynthetic vegetation sub-pixel fraction. *Agricultural Water Management* 240:106155. DOI doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106155.

Pinho, R.G.V., Silva, E.V.V., Oliveira, T.L. (2022) Challenges of maize breeding under tropical conditions of Brazil. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo* 21:1258. DOI doi.org/10.18512/rbms2022vol21e1258.

Puerta, A.P.V., Jimenez-Rodriguez, R.A., Fernandez-Vidal, S., Fernandez-Vidal, S.R. (2020) Photogrammetry as an engineering design tool. In: *Advanced Engineering Design*. IntechOpen. DOI doi.org/10.5772/intechopen.92998.

Rajasekar, R., Kumar, A., Akilan, M., Nirmalaruban, R. (2024) Morphological characterization and genetic diversity analyses of yield and yield attributing traits in sweet corn (Zea mays var. saccharata). *Journal of Scientific Research and Reports* 30:72177. DOI doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i72177.

Ramirez, G., Montes de Oca, A., Flores, G. (2023) 3D maps of vegetation indices generated onboard a precision agriculture UAV. *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 564-571. DOI doi.org/10.1109/ICUAS57906.2023.10156582.

Ranum, P., Peña-Rosas, J.P., García-Casal, M.N. (2014) Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1312:105-112. DOI doi.org/10.1111/nyas.12396.

Ribeiro, H.J., Schwambach, D.A., Marcato, V.J., Cortez, J.W. (2021) Vegetation indices and their correlation with second-crop corn grain yield in Mato Grosso do Sul, Brazil. *Agronomic Research* 20:1195. DOI doi.org/10.18512/rbms2021v20e1195.

Salawu, I.A. (2023) Maize. In: *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*. Elsevier. DOI doi.org/10.1016/B978-0-323-95295-8.00030-7.

Saravia, D., Salazar, W., Valqui-Valqui, L., Quille-Mamani, J., Porras-Jorge, R., Corredor, F.-A., Barboza, E., Vásquez, H., Casas Diaz, A., Arbizu, C. (2022) Yield predictions of four hybrids of maize (Zea mays) using multispectral images obtained from UAV in the coast of Peru. *Agronomy* 12:2630. DOI doi.org/10.3390/agronomy12112630.

Sarvakar, K., Thakkar, M.G. (2024) Different vegetation indices measurement using computer vision. In: *Smart Agriculture*. Springer. DOI doi.org/10.1007/978-981-99-8684-2\_9.

Serna-Saldívar, S.O., Carrillo, E.P. (2003) Food uses of whole corn and drymilled fractions. In: *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*. Elsevier. DOI doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00016-4.

Shepard, N.R., DeSalvio, A.J., Arik, M., Adak, A., Murray, S.C., Varela, J.I., León, N. (2024) Deep learning-based high-throughput phenotyping of maize (Zea mays L.) tasseling from UAS imagery across environments. *bioRxiv*. DOI doi.org/10.1101/2024.06.24.600506.

Shu, M., Fei, S., Zhang, B., Yang, X., Guo, Y., Li, B., Ma, Y. (2022) Application of UAV multisensor data and ensemble approach for highthroughput estimation of maize phenotyping traits. *Plant Phenomics* 2022:9802585. DOI doi.org/10.34133/2022/9802585.

Silva, L.E.B., Silva, J.C.S., Souza, W.C.L., Lima, L.L.C., Santos, R.L.V. (2020) Desenvolvimento da cultura do milho (Zea mays L.): revisão de literatura. *Diversitas Journal* 5:869. DOI doi.org/10.17648/diversitas-journal-v5i3-869.

Singh, D., Wang, X., Kumar, U., Gao, L., Noor, M., Imtiaz, M., Singh, R.P., Poland, J. (2019) High-throughput phenotyping enabled genetic dissection of crop lodging in wheat. *Frontiers in Plant Science* 10:394. DOI doi.org/10.3389/fpls.2019.00394.

Singh, N., Kaur, A., Shevkani, K. (2013) Maize: grain structure, composition, milling, and starch characteristics. In: *Cereal Grains*. Springer. DOI doi.org/10.1007/978-81-322-1623-0\_5.

Song, P., Wang, J., Wang, J., Xinyu, G., Yang, W., Zhao, C. (2021) Highthroughput phenotyping: breaking through the bottleneck in future crop breeding. *Crop Journal* 9:633-645. DOI doi.org/10.1016/j.cj.2021.03.015.

Souza, A.E., Reis, J.G.M., Raymundo, J.C., Pinto, R.S. (2018) Estudo da produção do milho no Brasil. *Revista Agropecuária Técnica* 4:182-194. DOI doi.org/10.24325/issn.2446-5763.v4i11p182-194.

Sun, W., Xu, G., Gong, P., Liang, S. (2006) Fractal analysis of remotely sensed images: a review of methods and applications. *International Journal of Remote Sensing* 27:4963-4990. DOI doi.org/10.1080/01431160600676695.

Sweet, D.D., Tirado, S.B., Springer, N.M., Hirsch, C.N., Hirsch, C.D. (2022) Opportunities and challenges in phenotyping row crops using drone-based RGB imaging. *Plant Phenome Journal* 5:20044. DOI doi.org/10.1002/ppj2.20044.

Tanger, P., Klassen, S.P., Mojica, J.P., Lovell, J.T., Moyers, B.T., Baraoidan, M., Naredo, M.E.B., McNally, K.L., Poland, J., Bush, D.R., Leung, H., Leach, J.E., McKay, J.K. (2017) Field-based high throughput phenotyping rapidly identifies genomic regions controlling yield components in rice. *Scientific Reports* 7:42839. DOI doi.org/10.1038/srep42839.

Thierfelder, C., Baudron, F., Setimela, P., Nyagumbo, I., Mupangwa, W., Mhlanga, B., Lee, N., Gérard, B. (2018) Complementary practices supporting conservation agriculture in Southern Africa. *A review. Agronomy for Sustainable Development* 38:16. DOI doi.org/10.1007/s13593-018-0492-8.

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B.L. (2011) Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National* 

Academy of Sciences of the United States of America 108:20260-20264. DOI doi.org/10.1073/pnas.1116437108.

Tucker, C.J. (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8:127-150. DOI doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.

Tychola, K.A., Tsimperidis, I., Papakostas, G.A. (2024) Photogrammetry. In: Advances in Educational Technologies. *IGI Global*. DOI doi.org/10.4018/979-8-3693-3045-6.ch016.

van Raij, B., Cantarella, H., Quaggio, J.A., Furlani, M.C. (1997) *Recomendações de Adubação e Calagem Para o Estado de São Paulo*. Instituto Agronômico, Campinas.

Ventura, M.V.A., Batista, H.R.F., Bessa, M.M., Costa, E.M., Pereira, L.S., Silva, R.M. (2020) Production cost of transgenic corn in the first and second harvest in different regions in Brazil. Research, *Society and Development* 9:4136. DOI doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4136.

Verde, N., Mallinis, G., Tsakiri-Strati, M., Georgiadis, C., Patias, P. (2018) Assessment of radiometric resolution impact on remote sensing data classification accuracy. *Remote Sensing* 10:1267. DOI doi.org/10.3390/rs10081267.

Vidican, R., Malinas, A., Ranta, O., Moldovan, C.M., Marian, O., Ghete, A.-L., Ghise, C.R., Popovici, F., Catunescu, G.M. (2023) Using remote sensing vegetation indices for the discrimination and monitoring of agricultural crops:
a critical review. *Agronomy* 13:3040. DOI doi.org/10.3390/agronomy13123040.

Volpato, L., Wright, E.M., Gómez, F. (2023) Digital phenotyping in plant breeding: evaluating relative maturity, stand count, and plant height in dry beans (Phaseolus vulgaris L.) via RGB drone-based imagery and deep learning approaches. *Research Square*. DOI doi.org/10.21203/rs.3.rs-3160633/v1.

Wan, J., Xu, C., Luo, Z., Wu, Y., Zhou, B., Yan, J. (2019) An approach to Moho topography recovery using the on-orbit GOCE gravity gradients and its applications in Tibet. *Remote Sensing* 11:1567. DOI doi.org/10.3390/rs11131567.

Wang, J., Hu, X. (2021) Research on corn production efficiency and influencing factors of typical farms: based on data from 12 corn-producing countries from 2012 to 2019. *PLOS ONE* 16:e0254423 . DOI doi.org/10.1371/journal.pone.0254423.

Wang, Q., Tang, Y., Ge, Y., Xie, H., Tong, X., Atkinson, P.M. (2023) A comprehensive review of spatial-temporal-spectral information reconstruction techniques. *Science of Remote Sensing* 8:100102. DOI doi.org/10.1016/j.srs.2023.100102.

Wenzhe, J., Lixin, W., William, K.S., Qing, C., Honglang, W., Paolo, D'O. (2021) Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades. *Nature Communications* 12:24016. DOI doi.org/10.1038/s41467-021-24016-9.

Xia, M. (2022) Remote sensing fundamentals. In: *Geospatial Technologies. Wiley*. DOI doi.org/10.1002/9781119813392.ch1.

Xie, C., Yang, C. (2020) A review on plant high-throughput phenotyping traits using UAV-based sensors. *Computers and Electronics in Agriculture* 178:105731. DOI doi.org/10.1016/j.compag.2020.105731.

Xu, R., Li, C., Bernardes, S. (2021) Development and testing of a UAV-based multi-sensor system for plant phenotyping and precision agriculture. *Remote Sensing* 13:3517. DOI doi.org/10.3390/rs13173517.

Yang, G., Liu, J., Zhao, C., Li, Z., Huang, Y., Yu, H., Xu, B., Yang, X., Zhu, D., Zhang, X. (2017) Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. *Frontiers in Plant Science* 8:1111. DOI doi.org/10.3389/fpls.2017.01111.

Yang, Y., Xu, W., Hou, P., Liu, G., Liu, W., Wang, Y., Zhao, R., Ming, B., Xie, R., Wang, K., Li, S. (2019) Improving maize grain yield by matching maize growth and solar radiation. *Scientific Reports* 9:40081. DOI doi.org/10.1038/s41598-019-40081-Z.

Yang, Y., Guo, X., Liu, G., Liu, W., Xue, J., Ming, B., Xie, R., Wang, K., Peng, H., Li, S. (2021) Solar radiation effects on dry matter accumulations and transfer in maize. *Frontiers in Plant Science* 12:727134. DOI doi.org/10.3389/fpls.2021.727134.

Yang, Y., Liu, G., Guo, X., Liu, W., Xue, J., Ming, B., Xie, R., Wang, K., Hou, P., Li, S. (2022) Quantitative relationship between solar radiation and grain filling parameters of maize. *Frontiers in Plant Science* 13:906060. DOI doi.org/10.3389/fpls.2022.906060.

Zhang, H., Zhang, L. (2024) Estimating maize plant height using a crop surface model constructed from UAV RGB images. *Biosystems Engineering* 240:003. DOI doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.04.003.

Zheng, R., Deng, M., Lv, D., Tong, B., Liu, Y., Luo, H. (2023) Combined BSA-Seq and RNA-Seq reveal genes associated with the visual stay-green of maize (Zea mays L.). *International Journal of Molecular Sciences* 24:17617. DOI doi.org/10.3390/ijms242417617.

Zhou, Q. (2023) Application of remote sensing technologies in environmental monitoring and geological surveys. *Applied and Computational Engineering* 3:403. DOI doi.org/10.54254/2755-2721/3/20230403.

### APÊNDICES

APÊNDICE A: DADOS CLIMATOLÓGICOS APÊNDICE B: BOXPLOTS DO CONJUNTO DE DADOS DAS VARIÁVEIS APÊNDICE C: POSICIONAMENTOS DE PARCELA TESTADOS APÊNDICE D: DADOS DETALHADOS - ÍNDICES DE VEGETAÇÃO APÊNDICE E: DADOS DETALHADOS - VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS APÊNDICE F: DADOS DETALHADOS - ALTURA DE PLANTA APÊNDICE G: DADOS DETALHADOS - COBERTURA VEGETAL SEM CORTE POR ALTURA APÊNDICE H: DADOS DETALHADOS - COBERTURA VEGETAL COM

CORTE POR ALTURA



### **APÊNDICE A: DADOS CLIMATOLÓGICOS**







### **APÊNDICE B: BOXPLOTS DO CONJUNTO DE DADOS DAS VARIÁVEIS**





123



(c) Figura A2. Boxplots do conjunto de dados das variáveis: (a) Índices de vegetação. (b) Fisiológicos. (c) Morfoagronômicos.



**APÊNDICE C: POSICIONAMENTOS DE PARCELA TESTADOS** 

(**a**)



(**b**)



(c) Figura A3. Posicionamento de parcela testados. (a) equidistantes, paralelos e perpendiculares. (b) movimentadas para dossel mais denso e com o mesmo tamanho. (c) sem H5.

# APÊNDICE D: DADOS DETALHADOS - ÍNDICES DE VEGETAÇÃO Tabela A1. Dados detalhados de índice de vegetação aos 34 DAP (V3–V4).

|     |    |         |         |        |        |       |       | VARIÁ | VEIS RO | GB - 34 C | DAP (V3 | –V4)   |         |        |        |            |       |       |        |
|-----|----|---------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|---------|-----------|---------|--------|---------|--------|--------|------------|-------|-------|--------|
| Hib | BI | R       | G       | В      | SCI    | GLI   | NGRDI | VARI  | I       | н         | S       | L      | a*      | b*     | u*     | <b>v</b> * | GA    | GGA   | CSI    |
| 1   | 1  | 100,348 | 110,241 | 60,975 | -0,047 | 0,155 | 0,047 | 0,066 | 0,162   | 72,047    | 0,326   | 19,896 | -7,180  | 16,541 | -1,826 | 14,033     | 0,350 | 0,133 | 61,946 |
| 1   | 2  | 97,874  | 110,703 | 62,413 | -0,062 | 0,160 | 0,062 | 0,088 | 0,160   | 75,940    | 0,309   | 19,748 | -7,717  | 16,049 | -2,486 | 13,742     | 0,362 | 0,189 | 47,792 |
| 1   | 3  | 101,384 | 113,137 | 66,572 | -0,055 | 0,148 | 0,055 | 0,079 | 0,167   | 75,143    | 0,290   | 20,442 | -7,461  | 15,768 | -2,306 | 13,783     | 0,354 | 0,186 | 47,334 |
| 1   | 4  | 98,774  | 119,878 | 65,120 | -0,097 | 0,188 | 0,097 | 0,137 | 0,169   | 83,124    | 0,312   | 21,397 | -9,948  | 17,378 | -4,481 | 15,541     | 0,438 | 0,293 | 33,229 |
| 2   | 1  | 112,947 | 118,534 | 66,338 | -0,024 | 0,139 | 0,024 | 0,034 | 0,177   | 66,424    | 0,332   | 21,802 | -6,481  | 17,711 | -0,778 | 15,406     | 0,296 | 0,069 | 76,659 |
| 2   | 2  | 117,306 | 123,467 | 75,025 | -0,026 | 0,124 | 0,026 | 0,037 | 0,188   | 67,629    | 0,287   | 22,808 | -6,375  | 16,684 | -0,907 | 15,070     | 0,309 | 0,092 | 70,171 |
| 2   | 3  | 98,908  | 119,990 | 64,039 | -0,096 | 0,191 | 0,096 | 0,136 | 0,167   | 82,610    | 0,321   | 21,272 | -9,910  | 17,606 | -4,383 | 15,633     | 0,425 | 0,298 | 29,810 |
| 2   | 4  | 96,386  | 118,251 | 62,256 | -0,102 | 0,197 | 0,102 | 0,143 | 0,164   | 83,429    | 0,325   | 20,879 | -10,087 | 17,535 | -4,559 | 15,456     | 0,425 | 0,294 | 30,753 |
| 3   | 1  | 101,199 | 113,994 | 68,781 | -0,059 | 0,146 | 0,059 | 0,087 | 0,168   | 76,979    | 0,273   | 20,454 | -7,569  | 15,243 | -2,549 | 13,456     | 0,376 | 0,204 | 45,772 |
| 3   | 2  | 94,353  | 115,371 | 59,560 | -0,100 | 0,200 | 0,100 | 0,140 | 0,160   | 82,595    | 0,336   | 20,454 | -9,937  | 17,582 | -4,376 | 15,292     | 0,433 | 0,287 | 33,742 |
| 3   | 3  | 95,519  | 115,167 | 62,964 | -0,094 | 0,185 | 0,094 | 0,133 | 0,163   | 82,235    | 0,310   | 20,454 | -9,443  | 16,711 | -4,082 | 14,664     | 0,416 | 0,283 | 32,610 |
| 3   | 4  | 91,004  | 116,136 | 60,552 | -0,121 | 0,210 | 0,121 | 0,171 | 0,159   | 87,130    | 0,321   | 20,454 | -10,823 | 17,306 | -5,320 | 15,243     | 0,439 | 0,359 | 18,316 |
| 4   | 1  | 115,627 | 121,564 | 68,459 | -0,025 | 0,138 | 0,025 | 0,035 | 0,180   | 66,708    | 0,328   | 22,110 | -6,574  | 17,778 | -0,852 | 15,580     | 0,299 | 0,084 | 71,785 |
| 4   | 2  | 99,243  | 116,791 | 61,923 | -0,081 | 0,183 | 0,081 | 0,114 | 0,165   | 79,190    | 0,332   | 20,774 | -9,118  | 17,507 | -3,580 | 15,260     | 0,376 | 0,246 | 34,671 |
| 4   | 3  | 106,634 | 117,548 | 67,659 | -0,049 | 0,149 | 0,049 | 0,070 | 0,174   | 73,130    | 0,304   | 21,375 | -7,443  | 16,723 | -2,052 | 14,747     | 0,334 | 0,163 | 51,130 |
| 4   | 4  | 85,284  | 110,198 | 59,369 | -0,127 | 0,207 | 0,127 | 0,183 | 0,152   | 89,409    | 0,301   | 19,269 | -10,566 | 16,061 | -5,254 | 13,951     | 0,445 | 0,374 | 16,010 |
| 6   | 1  | 115,508 | 116,985 | 67,845 | -0,006 | 0,121 | 0,006 | 0,009 | 0,178   | 61,804    | 0,322   | 21,556 | -5,420  | 17,107 | 0,195  | 14,766     | 0,258 | 0,027 | 89,451 |
| 6   | 2  | 98,096  | 108,987 | 61,687 | -0,053 | 0,154 | 0,053 | 0,075 | 0,160   | 73,817    | 0,311   | 19,623 | -7,358  | 15,991 | -2,137 | 13,608     | 0,354 | 0,163 | 54,074 |
| 6   | 3  | 80,770  | 99,688  | 53,909 | -0,105 | 0,194 | 0,105 | 0,149 | 0,140   | 84,795    | 0,310   | 17,312 | -8,862  | 14,953 | -3,741 | 12,262     | 0,418 | 0,305 | 27,065 |
| 6   | 4  | 100,923 | 114,439 | 59,043 | -0,063 | 0,177 | 0,063 | 0,086 | 0,162   | 74,640    | 0,354   | 20,442 | -8,260  | 17,842 | -2,621 | 15,210     | 0,363 | 0,164 | 54,810 |
| 7   | 1  | 97,242  | 111,088 | 59,898 | -0,066 | 0,171 | 0,066 | 0,093 | 0,159   | 76,230    | 0,330   | 19,760 | -8,128  | 16,746 | -2,732 | 14,240     | 0,381 | 0,178 | 53,266 |
| 7   | 2  | 94,971  | 113,564 | 63,362 | -0,089 | 0,178 | 0,089 | 0,128 | 0,162   | 82,223    | 0,301   | 20,214 | -9,135  | 16,234 | -3,876 | 14,235     | 0,407 | 0,287 | 29,502 |
| 7   | 3  | 93,096  | 110,689 | 60,977 | -0,087 | 0,179 | 0,087 | 0,124 | 0,157   | 81,338    | 0,309   | 19,579 | -8,871  | 16,125 | -3,602 | 13,883     | 0,405 | 0,260 | 36,453 |
| 7   | 4  | 87,075  | 107,414 | 59,670 | -0,105 | 0,188 | 0,105 | 0,151 | 0,150   | 85,560    | 0,296   | 18,764 | -9,349  | 15,395 | -4,199 | 13,173     | 0,427 | 0,314 | 26,591 |
| 8   | 1  | 100,127 | 108,032 | 66,484 | -0,038 | 0,129 | 0,038 | 0,056 | 0,164   | 71,420    | 0,274   | 19,598 | -6,363  | 14,682 | -1,462 | 12,616     | 0,329 | 0,164 | 50,085 |
| 8   | 2  | 117,792 | 123,798 | 76,342 | -0,025 | 0,121 | 0,025 | 0,036 | 0,189   | 67,594    | 0,280   | 22,892 | -6,345  | 16,445 | -0,939 | 14,929     | 0,301 | 0,117 | 61,157 |
| 8   | 3  | 90,575  | 109,548 | 63,953 | -0,095 | 0,173 | 0,095 | 0,139 | 0,156   | 84,968    | 0,273   | 19,269 | -8,933  | 14,912 | -3,942 | 13,001     | 0,419 | 0,303 | 27,787 |
| 8   | 4  | 106,809 | 116,947 | 69,845 | -0,045 | 0,139 | 0,045 | 0,066 | 0,174   | 72,915    | 0,286   | 21,169 | -7,097  | 15,978 | -1,881 | 14,130     | 0,328 | 0,180 | 44,953 |

|     |    |        |         |        |        |       |       | VAR   | IAVEIS | RGB - 91 | DAP (R | 2)     |        |        |        |            |       |       |        |
|-----|----|--------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|-------|-------|--------|
| Hib | BI | R      | G       | В      | SCI    | GLI   | NGRDI | VARI  | I      | н        | S      | L      | a*     | b*     | u*     | <b>v</b> * | GA    | GGA   | CSI    |
| 1   | 1  | 73,063 | 91,327  | 60,053 | -0,111 | 0,157 | 0,111 | 0,175 | 0,134  | 95,041   | 0,197  | 15,673 | -7,883 | 10,986 | -3,633 | 9,082      | 0,456 | 0,431 | 5,387  |
| 1   | 2  | 69,352 | 86,420  | 58,183 | -0,110 | 0,151 | 0,110 | 0,175 | 0,127  | 96,268   | 0,184  | 14,591 | -7,432 | 10,128 | -3,341 | 8,135      | 0,453 | 0,431 | 4,778  |
| 1   | 3  | 78,046 | 96,518  | 64,114 | -0,106 | 0,152 | 0,106 | 0,167 | 0,142  | 94,203   | 0,194  | 16,774 | -7,959 | 11,316 | -3,722 | 9,661      | 0,455 | 0,421 | 7,454  |
| 1   | 4  | 87,407 | 107,175 | 72,033 | -0,102 | 0,147 | 0,102 | 0,161 | 0,159  | 93,751   | 0,189  | 18,960 | -8,538 | 12,135 | -4,237 | 10,972     | 0,455 | 0,420 | 7,631  |
| 2   | 1  | 67,151 | 85,824  | 56,639 | -0,122 | 0,162 | 0,122 | 0,194 | 0,125  | 98,388   | 0,189  | 14,489 | -7,818 | 10,314 | -3,610 | 8,261      | 0,455 | 0,437 | 3,866  |
| 2   | 2  | 81,902 | 106,289 | 63,986 | -0,130 | 0,186 | 0,130 | 0,196 | 0,150  | 94,588   | 0,239  | 18,526 | -9,952 | 13,747 | -5,135 | 12,107     | 0,456 | 0,441 | 3,191  |
| 2   | 3  | 76,420 | 97,331  | 62,900 | -0,120 | 0,166 | 0,120 | 0,189 | 0,140  | 96,440   | 0,203  | 16,714 | -8,568 | 11,697 | -4,171 | 9,967      | 0,449 | 0,428 | 4,636  |
| 2   | 4  | 72,989 | 94,964  | 63,854 | -0,131 | 0,162 | 0,131 | 0,211 | 0,137  | 102,382  | 0,174  | 16,187 | -8,579 | 10,665 | -4,374 | 9,121      | 0,451 | 0,443 | 1,963  |
| 3   | 1  | 74,070 | 91,733  | 60,600 | -0,107 | 0,153 | 0,107 | 0,168 | 0,134  | 94,039   | 0,197  | 15,688 | -7,721 | 10,970 | -3,497 | 9,058      | 0,451 | 0,416 | 7,777  |
| 3   | 2  | 75,457 | 93,130  | 62,176 | -0,105 | 0,150 | 0,105 | 0,166 | 0,137  | 94,256   | 0,192  | 16,079 | -7,667 | 10,930 | -3,494 | 9,151      | 0,454 | 0,410 | 9,542  |
| 3   | 3  | 76,044 | 94,454  | 64,260 | -0,108 | 0,148 | 0,108 | 0,173 | 0,140  | 96,729   | 0,180  | 16,312 | -7,807 | 10,699 | -3,700 | 9,079      | 0,453 | 0,423 | 6,734  |
| 3   | 4  | 78,603 | 98,498  | 70,005 | -0,112 | 0,140 | 0,112 | 0,186 | 0,147  | 101,892  | 0,150  | 17,168 | -8,033 | 10,196 | -4,110 | 9,027      | 0,456 | 0,442 | 2,883  |
| 4   | 1  | 99,841 | 121,682 | 71,306 | -0,099 | 0,174 | 0,099 | 0,145 | 0,172  | 86,014   | 0,269  | 21,488 | -9,785 | 16,041 | -4,645 | 14,668     | 0,448 | 0,332 | 25,817 |
| 4   | 2  | 81,701 | 102,585 | 66,361 | -0,113 | 0,162 | 0,113 | 0,177 | 0,148  | 94,592   | 0,206  | 17,805 | -8,648 | 12,196 | -4,226 | 10,665     | 0,453 | 0,420 | 7,240  |
| 4   | 3  | 86,141 | 108,915 | 72,290 | -0,117 | 0,158 | 0,117 | 0,186 | 0,159  | 97,310   | 0,189  | 19,192 | -9,226 | 12,360 | -4,856 | 11,290     | 0,456 | 0,434 | 4,795  |
| 4   | 4  | 76,136 | 95,584  | 65,910 | -0,113 | 0,147 | 0,113 | 0,184 | 0,142  | 99,325   | 0,168  | 16,550 | -8,006 | 10,497 | -3,947 | 9,051      | 0,456 | 0,439 | 3,623  |
| 6   | 1  | 69,561 | 94,958  | 54,187 | -0,154 | 0,211 | 0,154 | 0,230 | 0,129  | 97,375   | 0,257  | 15,970 | -9,863 | 13,097 | -4,910 | 10,737     | 0,453 | 0,451 | 0,317  |
| 6   | 2  | 65,052 | 88,547  | 52,671 | -0,153 | 0,201 | 0,153 | 0,233 | 0,123  | 99,294   | 0,234  | 14,827 | -9,358 | 39,510 | -4,580 | 9,536      | 0,456 | 0,453 | 0,661  |
| 6   | 3  | 57,350 | 79,871  | 47,209 | -0,164 | 0,209 | 0,164 | 0,250 | 0,110  | 101,371  | 0,232  | 12,981 | -8,841 | 38,466 | -4,081 | 8,247      | 0,456 | 0,455 | 0,079  |
| 6   | 4  | 58,552 | 77,639  | 51,440 | -0,140 | 0,171 | 0,140 | 0,225 | 0,111  | 103,712  | 0,178  | 12,598 | -7,568 | 36,854 | -3,397 | 6,999      | 0,441 | 0,429 | 2,930  |
| 7   | 1  | 70,181 | 89,958  | 62,010 | -0,123 | 0,153 | 0,123 | 0,202 | 0,132  | 102,458  | 0,163  | 15,239 | -7,966 | 9,899  | -3,918 | 8,253      | 0,453 | 0,446 | 1,376  |
| 7   | 2  | 66,195 | 85,493  | 59,728 | -0,127 | 0,152 | 0,127 | 0,210 | 0,126  | 104,939  | 0,152  | 14,421 | -7,690 | 9,303  | -3,731 | 7,588      | 0,456 | 0,455 | 0,106  |
| 7   | 3  | 68,654 | 88,953  | 62,512 | -0,129 | 0,151 | 0,129 | 0,214 | 0,131  | 106,175  | 0,148  | 15,053 | -7,956 | 9,439  | -4,001 | 7,893      | 0,454 | 0,451 | 0,494  |
| 7   | 4  | 69,585 | 91,407  | 65,798 | -0,136 | 0,149 | 0,136 | 0,229 | 0,134  | 111,129  | 0,130  | 15,497 | -8,213 | 9,116  | -4,353 | 7,838      | 0,453 | 0,453 | 0,000  |
| 8   | 1  | 70,471 | 87,262  | 63,193 | -0,106 | 0,133 | 0,106 | 0,178 | 0,132  | 101,856  | 0,142  | 14,927 | -7,097 | 9,027  | -3,359 | 7,490      | 0,456 | 0,444 | 2,530  |
| 8   | 2  | 83,306 | 104,784 | 70,402 | -0,114 | 0,154 | 0,114 | 0,182 | 0,154  | 97,479   | 0,183  | 18,392 | -8,785 | 11,796 | -4,509 | 10,595     | 0,456 | 0,435 | 4,408  |
| 8   | 3  | 77,225 | 97,180  | 68,688 | -0,114 | 0,142 | 0,114 | 0,189 | 0,144  | 102,022  | 0,152  | 16,774 | -7,959 | 10,113 | -4,025 | 8,849      | 0,453 | 0,442 | 2,415  |
| 8   | 4  | 76,058 | 93,210  | 69,224 | -0,101 | 0,124 | 0,101 | 0,171 | 0,141  | 102,906  | 0,129  | 16,079 | -7,073 | 8,991  | -3,460 | 7,778      | 0,440 | 0,412 | 6,363  |

Tabela A2. Dados detalhados de índice de vegetação aos 91 DAP (R2).

|     |    |        |         |        |        |       |       | VARIA | AVEIS F | GB - 98 D | AP (R3 | -R4)   |        |        |        |            |       |       |        |
|-----|----|--------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|-------|-------|--------|
| Hib | BI | R      | G       | В      | SCI    | GLI   | NGRDI | VARI  | I       | н         | S      | L      | a*     | b*     | u*     | <b>v</b> * | GA    | GGA   | CSI    |
| 1   | 1  | 69,905 | 82,265  | 59,292 | -0,081 | 0,120 | 0,081 | 0,133 | 0,126   | 92,285    | 0,159  | 14,039 | -6,042 | 8,952  | -2,410 | 7,067      | 0,446 | 0,388 | 12,953 |
| 1   | 2  | 73,362 | 84,858  | 60,650 | -0,073 | 0,118 | 0,073 | 0,118 | 0,130   | 88,493    | 0,169  | 14,523 | -5,919 | 9,349  | -2,243 | 7,448      | 0,441 | 0,338 | 23,409 |
| 1   | 3  | 78,030 | 89,395  | 64,689 | -0,068 | 0,112 | 0,068 | 0,111 | 0,138   | 87,601    | 0,164  | 15,625 | -5,934 | 9,576  | -2,267 | 7,916      | 0,438 | 0,332 | 24,292 |
| 1   | 4  | 87,565 | 98,283  | 68,643 | -0,058 | 0,114 | 0,058 | 0,091 | 0,152   | 81,694    | 0,191  | 17,497 | -6,177 | 11,096 | -2,180 | 9,511      | 0,438 | 0,256 | 41,563 |
| 2   | 1  | 68,168 | 81,105  | 58,068 | -0,087 | 0,125 | 0,087 | 0,142 | 0,123   | 93,696    | 0,160  | 13,754 | -6,167 | 8,910  | -2,501 | 6,971      | 0,446 | 0,395 | 11,552 |
| 2   | 2  | 86,608 | 99,595  | 68,116 | -0,070 | 0,126 | 0,070 | 0,110 | 0,151   | 84,752    | 0,196  | 17,666 | -6,773 | 11,463 | -2,651 | 9,887      | 0,434 | 0,313 | 27,803 |
| 2   | 3  | 74,738 | 87,554  | 60,871 | -0,079 | 0,127 | 0,079 | 0,126 | 0,132   | 88,821    | 0,182  | 15,026 | -6,339 | 9,957  | -2,488 | 8,037      | 0,440 | 0,347 | 21,031 |
| 2   | 4  | 72,504 | 84,425  | 60,238 | -0,076 | 0,120 | 0,076 | 0,123 | 0,129   | 89,574    | 0,168  | 14,404 | -5,969 | 9,274  | -2,297 | 7,370      | 0,440 | 0,336 | 23,626 |
| 3   | 1  | 80,071 | 90,561  | 64,923 | -0,061 | 0,111 | 0,061 | 0,099 | 0,139   | 84,548    | 0,173  | 15,783 | -5,798 | 9,848  | -2,083 | 8,125      | 0,412 | 0,288 | 30,033 |
| 3   | 2  | 78,310 | 89,611  | 64,720 | -0,067 | 0,112 | 0,067 | 0,110 | 0,139   | 87,241    | 0,165  | 15,673 | -5,990 | 9,658  | -2,298 | 7,990      | 0,444 | 0,311 | 29,878 |
| 3   | 3  | 77,770 | 88,850  | 64,648 | -0,067 | 0,110 | 0,067 | 0,109 | 0,137   | 87,634    | 0,161  | 15,477 | -5,841 | 9,430  | -2,213 | 7,767      | 0,431 | 0,318 | 26,262 |
| 3   | 4  | 74,930 | 86,379  | 64,301 | -0,071 | 0,107 | 0,071 | 0,118 | 0,134   | 91,113    | 0,145  | 14,977 | -5,735 | 8,783  | -2,258 | 7,186      | 0,438 | 0,355 | 18,876 |
| 4   | 1  | 95,929 | 109,880 | 68,620 | -0,068 | 0,144 | 0,068 | 0,102 | 0,161   | 80,289    | 0,250  | 19,447 | -7,558 | 14,051 | -2,815 | 12,310     | 0,430 | 0,230 | 46,542 |
| 4   | 2  | 82,118 | 94,432  | 65,796 | -0,070 | 0,122 | 0,070 | 0,111 | 0,143   | 85,801    | 0,186  | 16,505 | -6,374 | 10,615 | -2,443 | 8,918      | 0,440 | 0,309 | 29,607 |
| 4   | 3  | 79,204 | 92,942  | 66,935 | -0,080 | 0,120 | 0,080 | 0,131 | 0,142   | 91,694    | 0,160  | 16,263 | -6,550 | 9,807  | -2,796 | 8,325      | 0,443 | 0,361 | 18,456 |
| 4   | 4  | 70,867 | 82,148  | 61,069 | -0,074 | 0,109 | 0,074 | 0,123 | 0,127   | 92,114    | 0,144  | 14,074 | -5,612 | 8,444  | -2,180 | 6,704      | 0,443 | 0,348 | 21,453 |
| 6   | 1  | 71,458 | 91,542  | 56,830 | -0,123 | 0,176 | 0,123 | 0,189 | 0,130   | 94,716    | 0,224  | 15,513 | -8,439 | 11,763 | -3,918 | 9,583      | 0,451 | 0,426 | 5,713  |
| 6   | 2  | 64,313 | 81,076  | 53,441 | -0,115 | 0,159 | 0,115 | 0,182 | 0,118   | 96,395    | 0,194  | 13,538 | -7,315 | 37,524 | -3,176 | 7,660      | 0,453 | 0,415 | 8,333  |
| 6   | 3  | 67,859 | 84,389  | 55,993 | -0,109 | 0,154 | 0,109 | 0,172 | 0,124   | 94,929    | 0,193  | 14,266 | -7,272 | 10,203 | -3,157 | 8,057      | 0,444 | 0,407 | 8,378  |
| 6   | 4  | 61,716 | 74,618  | 53,499 | -0,095 | 0,129 | 0,095 | 0,156 | 0,112   | 96,654    | 0,155  | 12,224 | -5,862 | 35,782 | -2,285 | 6,058      | 0,426 | 0,377 | 11,432 |
| 7   | 1  | 69,327 | 86,129  | 63,049 | -0,108 | 0,131 | 0,108 | 0,182 | 0,129   | 103,679   | 0,134  | 14,591 | -7,023 | 8,698  | -3,342 | 7,171      | 0,452 | 0,425 | 5,831  |
| 7   | 2  | 63,633 | 79,982  | 58,725 | -0,114 | 0,133 | 0,114 | 0,193 | 0,121   | 106,148   | 0,129  | 13,373 | -6,694 | 8,117  | -3,080 | 6,420      | 0,456 | 0,447 | 1,931  |
| 7   | 3  | 65,706 | 82,792  | 61,152 | -0,115 | 0,132 | 0,115 | 0,196 | 0,124   | 107,536   | 0,125  | 13,894 | -6,920 | 8,216  | -3,298 | 6,653      | 0,453 | 0,441 | 2,799  |
| 7   | 4  | 64,159 | 82,266  | 61,682 | -0,124 | 0,133 | 0,124 | 0,214 | 0,123   | 112,781   | 0,111  | 13,718 | -7,045 | 7,831  | -3,471 | 6,369      | 0,453 | 0,450 | 0,635  |
| 8   | 1  | 71,211 | 85,278  | 66,020 | -0,090 | 0,108 | 0,090 | 0,155 | 0,133   | 103,829   | 0,110  | 14,659 | -6,102 | 7,790  | -2,806 | 6,481      | 0,451 | 0,415 | 8,008  |
| 8   | 2  | 82,687 | 96,361  | 67,841 | -0,076 | 0,123 | 0,076 | 0,123 | 0,147   | 88,763    | 0,176  | 16,979 | -6,732 | 10,543 | -2,816 | 9,052      | 0,443 | 0,331 | 25,328 |
| 8   | 3  | 79,112 | 92,634  | 68,768 | -0,079 | 0,112 | 0,079 | 0,131 | 0,142   | 93,995    | 0,142  | 16,110 | -6,325 | 9,158  | -2,755 | 7,812      | 0,446 | 0,367 | 17,718 |
| 8   | 4  | 81,571 | 90,919  | 69,473 | -0,054 | 0,093 | 0,054 | 0,091 | 0,143   | 86,154    | 0,139  | 15,939 | -5,228 | 8,750  | -1,873 | 7,355      | 0,400 | 0,287 | 28,295 |

Tabela A3. Dados detalhados de índice de vegetação aos 98 DAP (R3-R4).

|         |    |         |         |        |        |       |       | VARIA | <b>VEIS</b> R | GB - 112 | DAP ( | R4–R5)    |        |        |        |            |       |       |        |
|---------|----|---------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|---------------|----------|-------|-----------|--------|--------|--------|------------|-------|-------|--------|
| Hi<br>b | BI | R       | G       | в      | SCI    | GLI   | NGRDI | VARI  | I             | н        | s     | L         | a*     | b*     | u*     | <b>v</b> * | GA    | GGA   | CSI    |
| 1       | 1  | 90,948  | 97,187  | 68,643 | -0,033 | 0,098 | 0,033 | 0,052 | 0,153         | 73,115   | 0,198 | 17,468    | -5,129 | 11,085 | -1,189 | 9,360      | 0,350 | 0,139 | 60,250 |
| 1       | 2  | 83,619  | 86,250  | 63,458 | -0,015 | 0,080 | 0,015 | 0,025 | 0,138         | 66,926   | 0,184 | 15,256    | -3,895 | 9,593  | -0,433 | 7,577      | 0,301 | 0,087 | 71,179 |
| 1       | 3  | 91,946  | 94,445  | 71,371 | -0,013 | 0,073 | 0,013 | 0,022 | 0,153         | 66,494   | 0,169 | 17,125    | -3,977 | 9,864  | -0,429 | 8,276      | 0,304 | 0,095 | 68,650 |
| 1       | 4  | 104,669 | 106,733 | 76,486 | -0,010 | 0,082 | 0,010 | 0,015 | 0,171         | 64,093   | 0,203 | 19,673    | -4,372 | 11,965 | -0,184 | 10,498     | 0,263 | 0,059 | 77,645 |
| 2       | 1  | 85,105  | 91,300  | 66,511 | -0,035 | 0,093 | 0,035 | 0,056 | 0,145         | 74,998   | 0,179 | 16,248    | -4,769 | 9,975  | -1,133 | 8,216      | 0,375 | 0,159 | 57,764 |
| 2       | 2  | 103,325 | 110,125 | 76,277 | -0,032 | 0,102 | 0,032 | 0,050 | 0,173         | 72,051   | 0,210 | 20,141    | -5,652 | 12,640 | -1,294 | 11,290     | 0,360 | 0,096 | 73,255 |
| 2       | 3  | 89,514  | 92,915  | 66,305 | -0,019 | 0,088 | 0,019 | 0,029 | 0,147         | 67,666   | 0,200 | 16,595    | -4,250 | 10,653 | -0,471 | 8,703      | 0,324 | 0,089 | 72,600 |
| 2       | 4  | 90,627  | 94,038  | 69,692 | -0,018 | 0,080 | 0,018 | 0,030 | 0,151         | 68,406   | 0,178 | 16,847    | -4,182 | 10,052 | -0,571 | 8,358      | 0,313 | 0,075 | 76,197 |
| 3       | 1  | 96,208  | 98,537  | 72,257 | -0,012 | 0,078 | 0,012 | 0,019 | 0,158         | 65,318   | 0,188 | 17,847    | -4,118 | 10,748 | -0,308 | 9,102      | 0,283 | 0,083 | 70,634 |
| 3       | 2  | 97,060  | 99,764  | 73,870 | -0,014 | 0,077 | 0,014 | 0,022 | 0,161         | 66,265   | 0,181 | 18,217    | -4,211 | 10,678 | -0,415 | 9,166      | 0,269 | 0,075 | 71,987 |
| 3       | 3  | 94,162  | 96,102  | 70,679 | -0,010 | 0,077 | 0,010 | 0,016 | 0,155         | 64,515   | 0,188 | 17,432    | -3,948 | 10,524 | -0,216 | 8,812      | 0,269 | 0,070 | 74,004 |
| 3       | 4  | 89,217  | 90,007  | 65,909 | -0,004 | 0,074 | 0,004 | 0,007 | 0,146         | 61,963   | 0,193 | 16,232    | -3,514 | 10,145 | 0,076  | 8,168      | 0,254 | 0,052 | 79,391 |
| 4       | 1  | 115,883 | 120,664 | 77,945 | -0,020 | 0,109 | 0,020 | 0,030 | 0,185         | 66,715   | 0,256 | 22,056    | -5,778 | 15,130 | -0,707 | 13,653     | 0,292 | 0,038 | 86,852 |
| 4       | 2  | 102,291 | 102,914 | 76,553 | -0,003 | 0,070 | 0,003 | 0,005 | 0,167         | 61,417   | 0,185 | 18,869    | -3,811 | 10,946 | 0,069  | 9,475      | 0,245 | 0,024 | 90,054 |
| 4       | 3  | 89,424  | 93,586  | 69,704 | -0,023 | 0,081 | 0,023 | 0,037 | 0,151         | 70,458   | 0,173 | 16,847    | -4,317 | 9,902  | -0,740 | 8,273      | 0,329 | 0,110 | 66,532 |
| 4       | 4  | 83,625  | 83,956  | 64,693 | -0,002 | 0,062 | 0,002 | 0,003 | 0,138         | 61,033   | 0,164 | 14,993    | -3,062 | 8,771  | 0,089  | 6,866      | 0,242 | 0,053 | 78,221 |
| 6       | 1  | 93,279  | 107,419 | 68,641 | -0,070 | 0,140 | 0,070 | 0,107 | 0,159         | 81,878   | 0,235 | 19,089    | -7,540 | 13,435 | -2,942 | 11,775     | 0,427 | 0,253 | 40,806 |
| 6       | 2  | 77,705  | 89,745  | 59,479 | -0,072 | 0,134 | 0,072 | 0,112 | 0,135         | 83,870   | 0,214 | 15,609    | -6,467 | 11,091 | -2,358 | 8,959      | 0,439 | 0,289 | 34,133 |
| 6       | 3  | 91,909  | 96,852  | 68,545 | -0,026 | 0,094 | 0,026 | 0,041 | 0,153         | 70,478   | 0,201 | 17,468    | -4,867 | 11,122 | -0,928 | 9,352      | 0,316 | 0,123 | 60,906 |
| 6       | 4  | 76,273  | 85,461  | 61,707 | -0,057 | 0,107 | 0,057 | 0,092 | 0,132         | 83,208   | 0,171 | 14,760    | -5,349 | 9,370  | -1,762 | 7,464      | 0,411 | 0,277 | 32,544 |
| 7       | 1  | 84,333  | 97,113  | 72,391 | -0,070 | 0,107 | 0,070 | 0,117 | 0,150         | 91,018   | 0,144 | 17,081    | -6,208 | 9,535  | -2,610 | 8,316      | 0,423 | 0,319 | 24,736 |
| 7       | 2  | 78,372  | 90,160  | 67,770 | -0,070 | 0,105 | 0,070 | 0,117 | 0,141         | 91,587   | 0,140 | 15,783    | -5,872 | 8,863  | -2,408 | 7,470      | 0,442 | 0,350 | 20,875 |
| 7       | 3  | 79,694  | 93,020  | 69,307 | -0,077 | 0,111 | 0,077 | 0,129 | 0,144         | 93,698   | 0,141 | 16,242    | -6,294 | 9,171  | -2,730 | 7,853      | 0,437 | 0,358 | 18,310 |
| 7       | 4  | 76,376  | 91,788  | 67,762 | -0,092 | 0,120 | 0,092 | 0,154 | 0,140         | 98,489   | 0,138 | 15,861    | -6,804 | 9,114  | -3,171 | 7,773      | 0,446 | 0,404 | 9,318  |
| 8       | 1  | 80,849  | 91,899  | 71,772 | -0,064 | 0,093 | 0,064 | 0,109 | 0,146         | 92,941   | 0,119 | 16,202    | -5,495 | 8,346  | -2,237 | 7,170      | 0,429 | 0,343 | 20,079 |
| 8       | 2  | 93,195  | 104,317 | 74,431 | -0,056 | 0,109 | 0,056 | 0,090 | 0,162         | 82,329   | 0,179 | 18,764    | -6,323 | 11,241 | -2,327 | 9,994      | 0,415 | 0,245 | 40,868 |
| 8       | 3  | 88,313  | 98,016  | 74,712 | -0,052 | 0,092 | 0,052 | 0,087 | 0,155         | 84,983   | 0,141 | 17,426    | -5,540 | 9,384  | -2,047 | 8,212      | 0,415 | 0,276 | 33,430 |
| 8       | 4  | 93,220  | 94,151  | 75,343 | -0,005 | 0,055 | 0,005 | 0,008 | 0,156         | 62,969   | 0,140 | 17052,000 | -3,270 | 8,705  | -0,094 | 7,349      | 0,278 | 0,112 | 59,644 |

Tabela A4. Dados detalhados de índice de vegetação aos 112 DAP (R4-R5).

|     |    |         |         |        |        |       | v      |        |       |        | 4F (K)- | -KO)   |        |        |        |            |       |       |        |
|-----|----|---------|---------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|------------|-------|-------|--------|
| Hib | BI | R       | G       | В      | SCI    | GLI   | NGRDI  | VARI   | I     | н      | S       | L      | a*     | b*     | u*     | <b>v</b> * | GA    | GGA   | CSI    |
| 1   | 1  | 91,767  | 92,048  | 68,439 | -0,002 | 0,069 | 0,002  | 0,002  | 0,150 | 60,711 | 0,186   | 16,699 | -3,478 | 10,061 | 0,096  | 8,235      | 0,227 | 0,075 | 66,879 |
| 1   | 2  | 96,673  | 92,679  | 72,962 | 0,021  | 0,044 | -0,021 | -0,034 | 0,155 | 49,892 | 0,166   | 16,979 | -2,302 | 9,324  | 1,014  | 7,646      | 0,148 | 0,041 | 72,472 |
| 1   | 3  | 99,706  | 96,733  | 75,424 | 0,015  | 0,050 | -0,015 | -0,025 | 0,162 | 52,650 | 0,168   | 17,888 | -2,671 | 9,800  | 0,834  | 8,253      | 0,171 | 0,051 | 70,160 |
| 1   | 4  | 103,390 | 98,562  | 71,858 | 0,024  | 0,059 | -0,024 | -0,037 | 0,163 | 50,815 | 0,213   | 18,325 | -2,601 | 11,465 | 1,416  | 9,528      | 0,153 | 0,028 | 81,985 |
| 2   | 1  | 87,129  | 87,989  | 66,179 | -0,005 | 0,069 | 0,005  | 0,008  | 0,144 | 62,366 | 0,177   | 15,830 | -3,464 | 9,491  | -0,065 | 7,615      | 0,259 | 0,072 | 72,264 |
| 2   | 2  | 96,532  | 96,913  | 70,634 | -0,002 | 0,074 | 0,002  | 0,003  | 0,157 | 60,875 | 0,198   | 17,721 | -3,705 | 10,930 | 0,144  | 9,140      | 0,220 | 0,037 | 83,242 |
| 2   | 3  | 103,135 | 98,791  | 74,866 | 0,022  | 0,052 | -0,022 | -0,034 | 0,164 | 50,780 | 0,189   | 18,257 | -2,552 | 10,609 | 1,211  | 8,906      | 0,143 | 0,021 | 85,219 |
| 2   | 4  | 100,982 | 101,377 | 74,362 | -0,002 | 0,072 | 0,002  | 0,003  | 0,164 | 60,876 | 0,194   | 18,539 | -3,827 | 11,130 | 0,100  | 9,520      | 0,245 | 0,052 | 78,595 |
| 3   | 1  | 98,911  | 96,399  | 73,638 | 0,013  | 0,055 | -0,013 | -0,021 | 0,159 | 54,037 | 0,179   | 17,666 | -2,833 | 10,114 | 0,760  | 8,442      | 0,188 | 0,043 | 77,134 |
| 3   | 2  | 103,002 | 100,110 | 76,369 | 0,014  | 0,055 | -0,014 | -0,023 | 0,166 | 53,486 | 0,180   | 18,592 | -2,857 | 10,503 | 0,887  | 8,957      | 0,174 | 0,039 | 77,596 |
| 3   | 3  | 99,946  | 96,384  | 73,523 | 0,018  | 0,053 | -0,018 | -0,029 | 0,160 | 51,981 | 0,183   | 17,794 | -2,614 | 10,258 | 1,020  | 8,547      | 0,164 | 0,034 | 79,566 |
| 3   | 4  | 97,925  | 92,644  | 70,562 | 0,028  | 0,047 | -0,028 | -0,044 | 0,155 | 48,421 | 0,189   | 17,125 | -2,153 | 10,158 | 1,412  | 8,243      | 0,129 | 0,021 | 83,966 |
| 4   | 1  | 103,279 | 100,289 | 67,698 | 0,015  | 0,080 | -0,015 | -0,022 | 0,160 | 54,959 | 0,251   | 18,285 | -3,335 | 12,794 | 1,052  | 10,516     | 0,171 | 0,012 | 93,201 |
| 4   | 2  | 102,056 | 98,283  | 76,935 | 0,019  | 0,047 | -0,019 | -0,031 | 0,164 | 50,987 | 0,168   | 18,135 | -2,449 | 9,816  | 1,069  | 8,295      | 0,166 | 0,025 | 84,939 |
| 4   | 3  | 95,884  | 90,186  | 71,556 | 0,031  | 0,037 | -0,031 | -0,050 | 0,153 | 45,948 | 0,167   | 16,655 | -1,821 | 9,164  | 1,414  | 7,394      | 0,116 | 0,020 | 82,997 |
| 4   | 4  | 98,766  | 91,922  | 73,050 | 0,036  | 0,034 | -0,036 | -0,058 | 0,157 | 44,032 | 0,169   | 17,081 | -1,581 | 9,356  | 1,729  | 7,600      | 0,090 | 0,012 | 86,801 |
| 6   | 1  | 93,357  | 101,453 | 67,083 | -0,042 | 0,117 | 0,042  | 0,063  | 0,155 | 74,133 | 0,232   | 18,135 | -5,934 | 12,536 | -1,583 | 10,648     | 0,358 | 0,147 | 59,005 |
| 6   | 2  | 88,428  | 96,500  | 67,205 | -0,044 | 0,107 | 0,044  | 0,069  | 0,150 | 76,532 | 0,200   | 17,240 | -5,606 | 11,145 | -1,620 | 9,395      | 0,380 | 0,171 | 54,900 |
| 6   | 3  | 113,467 | 109,932 | 85,383 | 0,016  | 0,050 | -0,016 | -0,026 | 0,184 | 52,449 | 0,170   | 20,668 | -2,904 | 10,860 | 1,031  | 9,733      | 0,181 | 0,057 | 68,339 |
| 6   | 4  | 89,636  | 96,546  | 69,857 | -0,037 | 0,095 | 0,037  | 0,059  | 0,152 | 75,535 | 0,181   | 17,211 | -5,147 | 10,492 | -1,363 | 8,884      | 0,369 | 0,168 | 54,426 |
| 7   | 1  | 91,159  | 100,512 | 76,714 | -0,049 | 0,090 | 0,049  | 0,081  | 0,159 | 83,582 | 0,142   | 17,971 | -5,481 | 9,567  | -1,961 | 8,472      | 0,379 | 0,244 | 35,478 |
| 7   | 2  | 85,250  | 93,923  | 71,996 | -0,048 | 0,089 | 0,048  | 0,081  | 0,150 | 83,733 | 0,140   | 16,744 | -5,166 | 9,063  | -1,763 | 7,767      | 0,402 | 0,252 | 37,429 |
| 7   | 3  | 87,899  | 98,374  | 74,516 | -0,056 | 0,096 | 0,056  | 0,094  | 0,155 | 86,138 | 0,143   | 17,511 | -5,719 | 9,506  | -2,187 | 8,345      | 0,401 | 0,273 | 32,122 |
| 7   | 4  | 87,289  | 100,688 | 74,838 | -0,071 | 0,108 | 0,071  | 0,118  | 0,156 | 91,101 | 0,146   | 17,819 | -6,510 | 9,888  | -2,837 | 8,796      | 0,422 | 0,323 | 23,459 |
| 8   | 1  | 83,919  | 91,152  | 72,614 | -0,041 | 0,076 | 0,041  | 0,071  | 0,147 | 83,417 | 0,121   | 16,232 | -4,632 | 8,181  | -1,505 | 6,956      | 0,376 | 0,249 | 33,668 |
| 8   | 2  | 90,526  | 95,646  | 70,475 | -0,028 | 0,086 | 0,028  | 0,044  | 0,153 | 72,204 | 0,176   | 17,226 | -4,677 | 10,258 | -0,983 | 8,666      | 0,322 | 0,153 | 52,454 |
| 8   | 3  | 107,885 | 110,370 | 87,977 | -0,011 | 0,060 | 0,011  | 0,019  | 0,181 | 66,658 | 0,138   | 20,358 | -3,929 | 9,797  | -0,383 | 8,992      | 0,280 | 0,128 | 54,243 |
| 8   | 4  | 100,640 | 98,025  | 79,235 | 0,013  | 0,043 | -0,013 | -0,022 | 0,165 | 52,671 | 0,145   | 18,053 | -2,583 | 9,040  | 0,694  | 7,730      | 0,197 | 0,055 | 71,954 |

Tabela A5. Dados detalhados de índice de vegetação aos 119 DAP (R5–R6).

## **APÊNDICE E: DADOS DETALHADOS - VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS**

Tabela A6. Dados detalhados de variáveis fisiológicas aos 98 DAP (R3–R4).

|     |    |        |       |       |        |       |       |       | V     |          | SFISI | OLOG   | CAS -  | 98 DA | AP (R3 | –R4)  |       |       |       |       |       |       |       |        |       |
|-----|----|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Hib | BI | Chl    | Flav  | Anth  | NBI    | NDVI  | φΡο   | φΕο   | φDo   | ABS/Cso  | Plabs | ARI1   | ARI2   | CRI1  | CRI2   | SIPI  | FRI   | CNDVI | Ge    | NDVIe | NPCI  | SRPI  | PRI   | PSRI   | WBI   |
| 1   | 2  | 41,066 | 1,376 | 0,165 | 30,412 | 0,743 | 0,757 | 0,467 | 0,243 | 3561,000 | 3,556 | -0,016 | -0,855 | 0,029 | 0,013  | 0,733 | 0,998 | 0,489 | 2,114 | 0,718 | 0,106 | 0,809 | 0,031 | -0,031 | 0,668 |
| 1   | 3  | 42,540 | 1,179 | 0,148 | 37,198 | 0,825 | 0,710 | 0,497 | 0,290 | 4088,750 | 3,895 | -0,017 | -0,848 | 0,027 | 0,010  | 0,729 | 0,930 | 0,494 | 2,007 | 0,713 | 0,107 | 0,808 | 0,040 | -0,031 | 0,701 |
| 2   | 2  | 36,995 | 1,546 | 0,210 | 24,166 | 0,733 | 0,725 | 0,455 | 0,275 | 4104,250 | 2,618 | -0,017 | -0,958 | 0,039 | 0,022  | 0,770 | 1,138 | 0,517 | 2,335 | 0,762 | 0,077 | 0,858 | 0,046 | -0,027 | 0,775 |
| 2   | 3  | 39,273 | 1,352 | 0,173 | 32,086 | 0,765 | 0,720 | 0,447 | 0,280 | 4122,500 | 2,794 | -0,017 | -0,864 | 0,028 | 0,010  | 0,730 | 0,915 | 0,495 | 2,031 | 0,719 | 0,093 | 0,831 | 0,039 | -0,034 | 0,691 |
| 3   | 2  | 44,190 | 1,631 | 0,188 | 28,340 | 0,715 | 0,697 | 0,440 | 0,304 | 4163,000 | 2,459 | -0,014 | -0,717 | 0,031 | 0,017  | 0,739 | 1,133 | 0,490 | 2,079 | 0,724 | 0,108 | 0,805 | 0,014 | -0,027 | 0,734 |
| 3   | 3  | 36,673 | 1,260 | 0,167 | 30,807 | 0,808 | 0,693 | 0,362 | 0,307 | 5055,000 | 1,332 | -0,016 | -0,930 | 0,029 | 0,013  | 0,747 | 1,094 | 0,502 | 2,187 | 0,734 | 0,100 | 0,819 | 0,039 | -0,031 | 0,680 |
| 4   | 2  | 39,310 | 1,342 | 0,190 | 31,775 | 0,748 | 0,737 | 0,435 | 0,263 | 4664,250 | 2,777 | -0,017 | -0,938 | 0,035 | 0,018  | 0,762 | 1,243 | 0,535 | 2,111 | 0,748 | 0,107 | 0,808 | 0,045 | -0,021 | 0,757 |
| 4   | 3  | 35,080 | 1,142 | 0,191 | 30,962 | 0,783 | 0,709 | 0,472 | 0,291 | 4235,000 | 2,407 | -0,020 | -1,056 | 0,028 | 0,011  | 0,731 | 1,100 | 0,497 | 2,207 | 0,720 | 0,092 | 0,831 | 0,049 | -0,033 | 0,704 |
| 6   | 2  | 44,049 | 1,142 | 0,163 | 39,924 | 0,563 | 0,731 | 0,457 | 0,269 | 5058,250 | 2,725 | -0,018 | -0,946 | 0,031 | 0,013  | 0,758 | 1,007 | 0,545 | 1,984 | 0,746 | 0,101 | 0,817 | 0,045 | -0,027 | 0,705 |
| 6   | 3  | 40,273 | 1,151 | 0,169 | 37,880 | 0,820 | 0,751 | 0,434 | 0,249 | 5321,000 | 2,333 | -0,017 | -0,876 | 0,029 | 0,012  | 0,747 | 1,006 | 0,519 | 1,998 | 0,733 | 0,103 | 0,813 | 0,045 | -0,027 | 0,729 |
| 7   | 2  | 40,428 | 0,993 | 0,140 | 40,127 | 0,490 | 0,603 | 0,367 | 0,397 | 4951,000 | 1,417 | -0,022 | -1,082 | 0,028 | 0,006  | 0,751 | 0,834 | 0,569 | 1,849 | 0,743 | 0,082 | 0,849 | 0,057 | -0,027 | 0,771 |
| 7   | 3  | 37,999 | 1,202 | 0,164 | 32,798 | 0,683 | 0,695 | 0,375 | 0,305 | 4627,000 | 1,249 | -0,009 | -0,507 | 0,017 | 0,008  | 0,657 | 1,262 | 0,422 | 1,749 | 0,625 | 0,144 | 0,749 | 0,022 | -0,026 | 0,662 |
| 8   | 2  | 43,461 | 1,446 | 0,170 | 30,851 | 0,633 | 0,758 | 0,492 | 0,242 | 4386,500 | 3,948 | -0,017 | -0,908 | 0,038 | 0,021  | 0,777 | 1,363 | 0,573 | 1,931 | 0,767 | 0,087 | 0,839 | 0,051 | -0,019 | 0,785 |
| 8   | 3  | 43,917 | 1,433 | 0,147 | 30,779 | 0,638 | 0,777 | 0,549 | 0,223 | 4164,500 | 3,970 | -0,024 | -1,217 | 0,023 | 0,006  | 0,745 | 0,939 | 0,580 | 1,809 | 0,735 | 0,088 | 0,838 | 0,057 | -0,031 | 0,688 |

|     |    |        |       |       |        |       |       |       | V     | ARIÁVEI  | s fisio | OLÓGI  | CAS -  | 112 D | AP (R4 | 4–R5) |       |       |       |       |       |       |        |        |       |
|-----|----|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|----------|---------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| Hib | BI | Chl    | Flav  | Anth  | NBI    | NDVI  | φΡο   | φΕο   | φDo   | ABS/Cso  | Plabs   | ARI1   | ARI2   | CRI1  | CRI2   | SIPI  | FRI   | CNDVI | Ge    | NDVIe | NPCI  | SRPI  | PRI    | PSRI   | WBI   |
| 1   | 2  | 33,675 | 1,480 | 0,236 | 23,168 | 0,545 | 0,761 | 0,442 | 0,239 | 4082,750 | 2,493   | -0,017 | -0,741 | 0,045 | 0,028  | 0,745 | 1,047 | 0,473 | 2,236 | 0,728 | 0,100 | 0,820 | 0,022  | -0,022 | 1,015 |
| 1   | 3  | 35,943 | 1,323 | 0,225 | 27,056 | 0,743 | 0,701 | 0,489 | 0,299 | 3829,000 | 2,914   | -0,016 | -0,766 | 0,045 | 0,028  | 0,759 | 1,010 | 0,493 | 2,247 | 0,750 | 0,075 | 0,861 | 0,023  | -0,022 | 0,917 |
| 2   | 2  | 32,175 | 1,507 | 0,235 | 22,079 | 0,790 | 0,758 | 0,470 | 0,242 | 4118,750 | 2,753   | -0,011 | -0,482 | 0,054 | 0,043  | 0,754 | 1,391 | 0,462 | 2,123 | 0,732 | 0,112 | 0,800 | 0,006  | -0,003 | 0,965 |
| 2   | 3  | 35,206 | 1,639 | 0,231 | 22,091 | 0,710 | 0,772 | 0,453 | 0,228 | 3829,750 | 3,098   | -0,012 | -0,554 | 0,041 | 0,028  | 0,750 | 1,024 | 0,490 | 1,997 | 0,733 | 0,102 | 0,816 | 0,024  | -0,012 | 1,005 |
| 3   | 2  | 41,615 | 1,440 | 0,203 | 29,739 | 0,735 | 0,741 | 0,436 | 0,259 | 4472,000 | 2,549   | -0,014 | -0,674 | 0,052 | 0,038  | 0,782 | 1,189 | 0,490 | 2,389 | 0,771 | 0,082 | 0,848 | 0,018  | -0,018 | 0,937 |
| 3   | 3  | 28,871 | 1,295 | 0,254 | 23,438 | 0,658 | 0,690 | 0,419 | 0,310 | 4594,250 | 2,098   | -0,017 | -0,795 | 0,050 | 0,033  | 0,769 | 0,988 | 0,474 | 2,451 | 0,759 | 0,073 | 0,865 | 0,020  | -0,022 | 0,944 |
| 4   | 2  | 29,088 | 1,620 | 0,261 | 19,656 | 0,697 | 0,772 | 0,447 | 0,228 | 4558,667 | 3,123   | -0,011 | -0,510 | 0,060 | 0,049  | 0,779 | 1,422 | 0,438 | 2,578 | 0,763 | 0,102 | 0,815 | -0,002 | -0,013 | 0,926 |
| 4   | 3  | 31,022 | 1,344 | 0,234 | 23,155 | 0,620 | 0,767 | 0,415 | 0,233 | 4285,500 | 1,921   | -0,015 | -0,679 | 0,046 | 0,031  | 0,754 | 0,928 | 0,466 | 2,307 | 0,742 | 0,081 | 0,850 | 0,023  | -0,020 | 0,896 |
| 6   | 2  | 37,333 | 1,244 | 0,203 | 30,656 | 0,748 | 0,751 | 0,455 | 0,249 | 4704,000 | 2,587   | -0,017 | -0,774 | 0,050 | 0,032  | 0,784 | 0,928 | 0,555 | 2,064 | 0,774 | 0,071 | 0,868 | 0,029  | -0,013 | 0,980 |
| 6   | 3  | 32,337 | 0,913 | 0,236 | 35,767 | 0,740 | 0,733 | 0,415 | 0,267 | 4692,500 | 1,636   | -0,012 | -0,532 | 0,047 | 0,035  | 0,761 | 1,172 | 0,457 | 2,295 | 0,746 | 0,098 | 0,822 | 0,017  | -0,017 | 0,960 |
| 7   | 2  | 37,691 | 1,278 | 0,167 | 30,914 | 0,593 | 0,759 | 0,459 | 0,241 | 4074,750 | 2,762   | -0,018 | -0,829 | 0,045 | 0,026  | 0,777 | 1,113 | 0,565 | 1,987 | 0,767 | 0,078 | 0,856 | 0,026  | -0,016 | 1,017 |
| 7   | 3  | 27,674 | 1,428 | 0,237 | 19,857 | 0,437 | 0,738 | 0,363 | 0,262 | 4262,333 | 1,482   | -0,008 | -0,396 | 0,037 | 0,029  | 0,707 | 0,957 | 0,398 | 2,169 | 0,691 | 0,084 | 0,845 | 0,004  | -0,017 | 0,991 |
| 8   | 2  | 39,391 | 1,595 | 0,206 | 24,945 | 0,470 | 0,792 | 0,526 | 0,208 | 4353,250 | 5,330   | -0,017 | -0,789 | 0,066 | 0,047  | 0,803 | 1,594 | 0,553 | 2,237 | 0,792 | 0,076 | 0,858 | 0,029  | -0,008 | 0,897 |
| 8   | 3  | 42,093 | 1,203 | 0,189 | 35,931 | 0,727 | 0,786 | 0,511 | 0,215 | 4424,000 | 5,186   | -0,014 | -0,664 | 0,045 | 0,031  | 0,759 | 0,973 | 0,480 | 2,223 | 0,745 | 0,086 | 0,842 | 0,021  | -0,017 | 1,033 |

Tabela A7. Dados detalhados de variáveis fisiológicas aos 112 DAP (R4-R5).

|     |    |        |       |       |        |       |       |       | V     | ARIÁVEIS | s fisio | DLÓGI  | CAS -  | 119 D. | AP (R | 5–R6) |       |       |       |       |       |       |        |        |       |
|-----|----|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|----------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| Hib | BI | Chl    | Flav  | Anth  | NBI    | NDVI  | φΡο   | φΕο   | φDo   | ABS/Cso  | Plabs   | ARI1   | ARI2   | CRI1   | CRI2  | SIPI  | FRI   | CNDVI | Ge    | NDVIe | NPCI  | SRPI  | PRI    | PSRI   | WBI   |
| 1   | 2  | 35,222 | 1,316 | 0,219 | 27,667 | 0,793 | 0,772 | 0,445 | 0,228 | 3594,500 | 2,991   | -0,012 | -0,585 | 0,026  | 0,014 | 0,700 | 1,048 | 0,411 | 2,193 | 0,692 | 0,087 | 0,840 | 0,026  | -0,051 | 0,682 |
| 1   | 3  | 35,779 | 1,414 | 0,226 | 25,356 | 0,653 | 0,733 | 0,375 | 0,267 | 3319,000 | 1,699   | -0,009 | -0,445 | 0,026  | 0,016 | 0,673 | 1,102 | 0,340 | 2,227 | 0,647 | 0,121 | 0,792 | 0,013  | -0,036 | 0,784 |
| 2   | 2  | 29,903 | 1,575 | 0,243 | 19,458 | 0,640 | 0,745 | 0,423 | 0,255 | 3443,750 | 2,295   | -0,014 | -0,680 | 0,038  | 0,024 | 0,735 | 1,190 | 0,421 | 2,523 | 0,729 | 0,076 | 0,859 | 0,020  | -0,044 | 0,794 |
| 2   | 3  | 35,901 | 1,448 | 0,232 | 24,994 | 0,773 | 0,719 | 0,443 | 0,281 | 5016,750 | 2,744   | -0,021 | -0,987 | 0,027  | 0,006 | 0,724 | 0,703 | 0,507 | 2,057 | 0,725 | 0,047 | 0,910 | 0,053  | -0,049 | 0,733 |
| 3   | 2  | 35,912 | 1,627 | 0,231 | 23,440 | 0,568 | 0,715 | 0,376 | 0,285 | 4510,000 | 1,402   | -0,011 | -0,570 | 0,028  | 0,017 | 0,713 | 1,182 | 0,407 | 2,299 | 0,704 | 0,089 | 0,837 | 0,016  | -0,049 | 0,746 |
| 3   | 3  | 20,149 | 1,188 | 0,266 | 16,715 | 0,490 | 0,735 | 0,398 | 0,265 | 4229,500 | 2,496   | -0,012 | -0,597 | 0,024  | 0,012 | 0,701 | 1,035 | 0,436 | 2,074 | 0,693 | 0,081 | 0,851 | 0,036  | -0,044 | 0,732 |
| 4   | 2  | 30,131 | 1,493 | 0,252 | 22,077 | 0,703 | 0,748 | 0,380 | 0,252 | 3560,333 | 1,991   | -0,010 | -0,518 | 0,032  | 0,022 | 0,711 | 1,102 | 0,371 | 2,451 | 0,700 | 0,087 | 0,843 | 0,008  | -0,045 | 0,700 |
| 4   | 3  | 28,112 | 1,485 | 0,260 | 18,724 | 0,675 | 0,722 | 0,435 | 0,279 | 3876,333 | 2,074   | -0,012 | -0,541 | 0,027  | 0,015 | 0,692 | 0,975 | 0,402 | 2,099 | 0,675 | 0,107 | 0,809 | 0,024  | -0,040 | 0,785 |
| 6   | 2  | 33,729 | 1,346 | 0,226 | 26,066 | 0,633 | 0,725 | 0,396 | 0,275 | 4546,000 | 1,394   | -0,012 | -0,612 | 0,032  | 0,020 | 0,731 | 0,959 | 0,448 | 2,207 | 0,722 | 0,086 | 0,842 | 0,028  | -0,037 | 0,769 |
| 6   | 3  | 27,211 | 1,200 | 0,271 | 22,041 | 0,633 | 0,560 | 0,264 | 0,440 | 3561,000 | 0,498   | 0,010  | 0,517  | 0,011  | 0,021 | 0,469 | 1,474 | 0,086 | 0,978 | 0,226 | 0,498 | 0,360 | -0,059 | 0,312  | 0,668 |
| 7   | 2  | 31,053 | 1,098 | 0,133 | 27,636 | 0,600 | 0,752 | 0,466 | 0,248 | 4349,000 | 2,591   | -0,002 | -0,093 | 0,016  | 0,013 | 0,583 | 1,466 | 0,293 | 1,237 | 0,423 | 0,353 | 0,554 | -0,013 | 0,190  | 0,741 |
| 7   | 3  | 23,763 | 1,181 | 0,150 | 20,519 | 0,453 | 0,768 | 0,391 | 0,232 | 4752,333 | 1,499   | -0,002 | -0,077 | 0,021  | 0,019 | 0,636 | 1,534 | 0,296 | 1,788 | 0,538 | 0,258 | 0,650 | -0,005 | 0,086  | 0,761 |
| 8   | 2  | 37,770 | 1,632 | 0,199 | 23,425 | 0,597 | 0,752 | 0,454 | 0,248 | 4695,250 | 2,416   | -0,017 | -0,815 | 0,037  | 0,020 | 0,744 | 0,984 | 0,520 | 1,958 | 0,738 | 0,069 | 0,872 | 0,035  | -0,028 | 0,825 |
| 8   | 3  | 38,678 | 1,498 | 0,208 | 27,161 | 0,623 | 0,745 | 0,354 | 0,255 | 4626,500 | 1,184   | 0,004  | 0,215  | 0,014  | 0,018 | 0,544 | 1,168 | 0,192 | 1,446 | 0,394 | 0,322 | 0,561 | -0,023 | 0,180  | 0,620 |

Tabela A8. Dados detalhados de variáveis fisiológicas aos 119 DAP (R5–R6).

| Hib | BI | AP 34 DAP<br>(V3–V4)<br>MDS | AP 91 (R2)<br>DAP MED | AP 98 DAP<br>(R3–R4)<br>MDS | AP 112 DAP<br>(R4–R5)<br>MDS | AP 119 DAP<br>(R5–R6)<br>MDS |
|-----|----|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1   | 1  | 0,572                       | 1,942                 | 1,970                       | 1,848                        | 2,167                        |
| 1   | 2  | 0,570                       | 1,766                 | 1,799                       | 1,622                        | 1,869                        |
| 1   | 3  | 0,523                       | 1,821                 | 1,876                       | 1,727                        | 1,963                        |
| 1   | 4  | 0,903                       | 1,972                 | 2,056                       | 1,884                        | 2,126                        |
| 2   | 1  | 0,491                       | 1,760                 | 1,806                       | 1,705                        | 1,935                        |
| 2   | 2  | 0,398                       | 1,934                 | 1,933                       | 1,758                        | 2,086                        |
| 2   | 3  | 0,685                       | 1,856                 | 1,879                       | 1,676                        | 1,952                        |
| 2   | 4  | 0,855                       | 1,946                 | 1,979                       | 1,591                        | 1,997                        |
| 3   | 1  | 0,656                       | 2,076                 | 2,063                       | 1,981                        | 2,310                        |
| 3   | 2  | 0,842                       | 2,047                 | 2,082                       | 1,936                        | 2,359                        |
| 3   | 3  | 0,996                       | 2,221                 | 2,146                       | 1,912                        | 2,360                        |
| 3   | 4  | 1,029                       | 2,205                 | 2,308                       | 2,065                        | 2,446                        |
| 4   | 1  | 0,630                       | 2,161                 | 2,167                       | 2,044                        | 2,314                        |
| 4   | 2  | 0,849                       | 2,333                 | 1,989                       | 1,914                        | 2,365                        |
| 4   | 3  | 0,619                       | 2,179                 | 2,185                       | 1,998                        | 2,368                        |
| 4   | 4  | 0,849                       | 2,150                 | 1,974                       | 1,335                        | 1,363                        |
| 6   | 1  | 0,362                       | 1,742                 | 1,810                       | 1,667                        | 2,006                        |
| 6   | 2  | 0,492                       | 1,919                 | 1,937                       | 1,889                        | 2,128                        |
| 6   | 3  | 0,758                       | 1,862                 | 1,822                       | 1,676                        | 1,874                        |
| 6   | 4  | 0,673                       | 1,833                 | 1,869                       | 1,656                        | 1,987                        |
| 7   | 1  | 0,658                       | 1,875                 | 1,936                       | 1,813                        | 2,088                        |
| 7   | 2  | 0,636                       | 1,864                 | 1,934                       | 1,867                        | 2,168                        |
| 7   | 3  | 1,055                       | 1,965                 | 2,036                       | 1,744                        | 1,950                        |
| 7   | 4  | 0,854                       | 2,017                 | 2,080                       | 1,983                        | 2,267                        |
| 8   | 1  | 0,490                       | 1,973                 | 2,046                       | 1,878                        | 2,168                        |
| 8   | 2  | 0,432                       | 1,922                 | 2,036                       | 1,917                        | 2,204                        |
| 8   | 3  | 0,712                       | 1,993                 | 2,002                       | 1,887                        | 2,163                        |
| 8   | 4  | 0,533                       | 1,883                 | 1,963                       | 1,795                        | 2,072                        |

APÊNDICE F: DADOS DETALHADOS - ALTURA DE PLANTA

Tabela A9. Dados detalhados de altura de planta.

## APÊNDICE G: DADOS DETALHADOS - COBERTURA VEGETAL SEM CORTE POR ALTURA

 

 Tabela A10. Dados detalhados de cobertura vegetal sem corte por altura aos 19 (V2–V3) e 34 DAP (V3–V4).

 Lib
 Total de
 Área da Barada
 19 DAP (V2–V3) Birele de
 19 DAP (V2–V3) Área de Vegetação
 34 DAP (V3–V4) Birele de
 34 DAP (V3–V4) Area de Vegetação

| Hib | BI | Total de<br>Pixels | Parcela<br>Amostral (m²) | Pixels de<br>Vegetação | 19 DAP (V2–<br>V3) %CV | Área de Vegetação<br>na Parcela<br>Amostral (m²) | Pixels de<br>Vegetação | 34 DAP (V3–<br>V4) %CV | Área de Vegetação<br>na Parcela<br>Amostral (m²) |
|-----|----|--------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|--|------------------------|------------------------|--|
| 1   | 1  | 11345              | 4,305                    | 905                    | 7,98%                  | 0,343  | 7332                   | 64,63%                 | 0,150  |
| 1   | 2  | 11345              | 4,305                    | 2216                   | 19,53%                 | 0,841  | 7850                   | 69,19%                 | 0,161  |
| 1   | 3  | 11345              | 4,305                    | 1582                   | 13,94%                 | 0,600  | 7375                   | 65,01%                 | 0,151  |
| 1   | 4  | 11345              | 4,305                    | 1939                   | 17,09%                 | 0,736  | 10034                  | 88,44%                 | 0,205  |
| 2   | 1  | 11345              | 4,305                    | 735                    | 6,48%                  | 0,279  | 5649                   | 49,79%                 | 0,116  |
| 2   | 2  | 11345              | 4,305                    | 282                    | 2,49%                  | 0,107  | 6012                   | 52,99%                 | 0,123  |
| 2   | 3  | 11345              | 4,305                    | 2468                   | 21,75%                 | 0,937  | 10033                  | 88,44%                 | 0,205  |
| 2   | 4  | 11345              | 4,305                    | 1276                   | 11,25%                 | 0,484  | 9851                   | 86,83%                 | 0,202  |
| 3   | 1  | 11345              | 4,305                    | 2134                   | 18,81%                 | 0,810  | 8191                   | 72,20%                 | 0,168  |
| 3   | 2  | 11345              | 4,305                    | 4027                   | 35,50%                 | 1,528  | 10003                  | 88,17%                 | 0,205  |
| 3   | 3  | 11345              | 4,305                    | 1514                   | 13,35%                 | 0,575  | 9900                   | 87,26%                 | 0,203  |
| 3   | 4  | 11345              | 4,305                    | 1971                   | 17,37%                 | 0,748  | 10523                  | 92,75%                 | 0,215  |
| 4   | 1  | 11345              | 4,305                    | 501                    | 4,42%                  | 0,190  | 5917                   | 52,16%                 | 0,121  |
| 4   | 2  | 11345              | 4,305                    | 2105                   | 18,55%                 | 0,799  | 8622                   | 76,00%                 | 0,177  |
| 4   | 3  | 11345              | 4,305                    | 2543                   | 22,42%                 | 0,965  | 6829                   | 60,19%                 | 0,140  |
| 4   | 4  | 11345              | 4,305                    | 3310                   | 29,18%                 | 1,256  | 10722                  | 94,51%                 | 0,220  |
| 6   | 1  | 11345              | 4,305                    | 394                    | 3,47%                  | 0,150  | 4457                   | 39,29%                 | 0,091  |
| 6   | 2  | 11345              | 4,305                    | 920                    | 8,11%                  | 0,349  | 7432                   | 65,51%                 | 0,152  |
| 6   | 3  | 11345              | 4,305                    | 890                    | 7,84%                  | 0,338  | 9473                   | 83,50%                 | 0,194  |
| 6   | 4  | 11345              | 4,305                    | 362                    | 3,19%                  | 0,137  | 7987                   | 70,40%                 | 0,164  |
| 7   | 1  | 11345              | 4,305                    | 1843                   | 16,25%                 | 0,699  | 8335                   | 73,47%                 | 0,171  |
| 7   | 2  | 11345              | 4,305                    | 3051                   | 26,89%                 | 1,158  | 9312                   | 82,08%                 | 0,191  |
| 7   | 3  | 11345              | 4,305                    | 2633                   | 23,21%                 | 0,999  | 10137                  | 89,35%                 | 0,208  |
| 7   | 4  | 11345              | 4,305                    | 1761                   | 15,52%                 | 0,668  | 9927                   | 87,50%                 | 0,203  |
| 8   | 1  | 11345              | 4,305                    | 337                    | 2,97%                  | 0,128  | 6741                   | 59,42%                 | 0,138  |
| 8   | 2  | 11345              | 4,305                    | 241                    | 2,12%                  | 0,091  | 5970                   | 52,62%                 | 0,122  |
| 8   | 3  | 11345              | 4,305                    | 1917                   | 16,90%                 | 0,727  | 9379                   | 82,67%                 | 0,192  |
| 8   | 4  | 11345              | 4,305                    | 220                    | 1,94%                  | 0,083  | 6957                   | 61,32%                 | 0,142  |
|     |    |                    |                          |                        |                        |  |                        |                        |  |

| Hib | BI | Total de<br>Pixels | Área da<br>Parcela<br>Amostral<br>(m²) | 91 DAP (R2)<br>Pixels de<br>Vegetação | 91 DAP (R2) %CV | 91 DAP (R2) Área<br>de Vegetação na<br>Parcela Amostral<br>(m²) | 98 DAP (R3–R4)<br>Pixels de<br>Vegetação | 98 DAP (R3–<br>R4) %CV | 98 DAP (R3–R4)<br>Área de<br>Vegetação na<br>Parcela Amostral<br>(m²) |
|-----|----|--------------------|--|---------------------------------------|-----------------|---|--|------------------------|---|
| 1   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11335                                 | 99,91%          | 4,301   | 10507                                    | 92,61%                 | 3,987   |
| 1   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11215                                 | 98,85%          | 4,256   | 10025                                    | 88,36%                 | 3,804   |
| 1   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11153                                 | 98,31%          | 4,232   | 9746                                     | 85,91%                 | 3,698   |
| 1   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 11166                                 | 98,42%          | 4,237   | 9338                                     | 82,31%                 | 3,543   |
| 2   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11234                                 | 99,02%          | 4,263   | 10506                                    | 92,60%                 | 3,987   |
| 2   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11344                                 | 99,99%          | 4,305   | 9682                                     | 85,34%                 | 3,674   |
| 2   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11148                                 | 98,26%          | 4,230   | 10304                                    | 90,82%                 | 3,910   |
| 2   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 11246                                 | 99,13%          | 4,267   | 9884                                     | 87,12%                 | 3,751   |
| 3   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11171                                 | 98,47%          | 4,239   | 8694                                     | 76,63%                 | 3,299   |
| 3   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11038                                 | 97,29%          | 4,189   | 9438                                     | 83,19%                 | 3,581   |
| 3   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11085                                 | 97,71%          | 4,206   | 7298                                     | 64,33%                 | 2,769   |
| 3   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 11248                                 | 99,14%          | 4,268   | 9801                                     | 86,39%                 | 3,719   |
| 4   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 10835                                 | 95,50%          | 4,111   | 9849                                     | 86,81%                 | 3,737   |
| 4   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11170                                 | 98,46%          | 4,239   | 9740                                     | 85,85%                 | 3,696   |
| 4   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11305                                 | 99,65%          | 4,290   | 10200                                    | 89,91%                 | 3,871   |
| 4   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 11272                                 | 99,36%          | 4,277   | 9778                                     | 86,19%                 | 3,710   |
| 6   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11345                                 | 100,00%         | 4,305   | 11273                                    | 99,37%                 | 4,278   |
| 6   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11343                                 | 99,98%          | 4,304   | 11035                                    | 97,27%                 | 4,187   |
| 6   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11344                                 | 99,99%          | 4,305   | 10794                                    | 95,14%                 | 4,096   |
| 6   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 10751                                 | 94,76%          | 4,080   | 9659                                     | 85,14%                 | 3,665   |
| 7   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11274                                 | 99,37%          | 4,278   | 11090                                    | 97,75%                 | 4,208   |
| 7   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11345                                 | 100,00%         | 4,305   | 11345                                    | 100,00%                | 4,305   |
| 7   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11331                                 | 99,88%          | 4,300   | 9766                                     | 86,08%                 | 3,706   |
| 7   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 11345                                 | 100,00%         | 4,305   | 11345                                    | 100,00%                | 4,305   |
| 8   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11240                                 | 99,07%          | 4,265   | 10772                                    | 94,95%                 | 4,088   |
| 8   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11293                                 | 99,54%          | 4,285   | 9932                                     | 87,55%                 | 3,769   |
| 8   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11333                                 | 99,89%          | 4,300   | 10309                                    | 90,87%                 | 3,912   |
| 8   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 10627                                 | 93,67%          | 4,033   | 8370                                     | 73,78%                 | 3,176   |

Tabela A11. Dados detalhados de cobertura vegetal sem corte por altura aos 91 (R2) e 98 DAP (R3-R4).

| Hib | BI     | Total de | Área da<br>Parcela | 112 DAP (R4–R5)<br>Pixels de | 112 DAP (R4– | 112 DAP (R4–R5)<br>Área de<br>Vegetação na | 119 DAP (R5–R6)<br>Pixels de | 119 DAP (R5- | 119 DAP (R5–R6)<br>Área de<br>Vegetação na |
|-----|--------|----------|--------------------|------------------------------|--------------|--|------------------------------|--------------|--|
|     |        | FIXEIS   | (m²)               | Vegetação                    | K3) %CV      | Parcela Amostral                           | Vegetação                    |              | Parcela Amostral                           |
| 1   | 1      | 113/15   | 4 305              | 570/                         | 51 07%       | 2 100                                      | 3331                         | 20 36%       | 1 264                                      |
| 1   | 1<br>2 | 11245    | 4,305              | 3060                         | 34 01%       | 2,199                                      | 1916                         | 16 01%       | 0.680                                      |
| 1   | 2      | 11345    | 4,305              | 4250                         | 37 /6%       | 1,505                                      | 2264                         | 19.96%       | 0,009                                      |
| 1   | 3<br>4 | 11345    | 4,305              | 3813                         | 33 61%       | 1,013                                      | 1905                         | 16 79%       | 0,009                                      |
| 2   | 4      | 11345    | 4,305              | 6454                         | 56 80%       | 2 440                                      | 3510                         | 31 0.2%      | 1 335                                      |
| 2   | 2      | 11345    | 4,305              | 6066                         | 53 /7%       | 2,443                                      | 2730                         | 24 14%       | 1,030                                      |
| 2   | 2      | 11345    | 4,305              | 4757                         | 41 93%       | 1 805                                      | 1463                         | 12 90%       | 0.555                                      |
| 2   | 4      | 11345    | 4,305              | 4/3/                         | 30 52%       | 1,000                                      | 3257                         | 28 71%       | 1 236                                      |
| 2   | 4      | 11345    | 4,305              | 4404                         | 36 15%       | 1,702                                      | 2285                         | 20,71%       | 0.867                                      |
| 3   | 2      | 11345    | 4 305              | 3910                         | 34.46%       | 1,000                                      | 2200                         | 19 56%       | 0,842                                      |
| 3   | 2      | 11345    | 4 305              | 1955                         | 17 23%       | 0.742                                      | 573                          | 5.05%        | 0,042                                      |
| 3   | 4      | 11345    | 4 305              | 3011                         | 26 54%       | 1 143                                      | 1391                         | 12 26%       | 0,217                                      |
| 4   | 1      | 11345    | 4 305              | 4834                         | 42 61%       | 1 834                                      | 1901                         | 16 76%       | 0,721                                      |
| 4   | 2      | 11345    | 4 305              | 2504                         | 22.07%       | 0.950                                      | 1663                         | 14 66%       | 0,721                                      |
| 4   | 3      | 11345    | 4,000              | 4959                         | 43 71%       | 1 882                                      | 1032                         | 9 10%        | 0.392                                      |
| 4   | 4      | 11345    | 4 305              | 2589                         | 22.82%       | 0.982                                      | 712                          | 6 28%        | 0.270                                      |
| 6   | 1      | 11345    | 4 305              | 9249                         | 81.52%       | 3,510                                      | 7023                         | 61.90%       | 2 665                                      |
| 6   | 2      | 11345    | 4,305              | 9532                         | 84.02%       | 3,617                                      | 7139                         | 62,93%       | 2,709                                      |
| 6   | 3      | 11345    | 4.305              | 5465                         | 48.17%       | 2.074                                      | 2508                         | 22.11%       | 0.952                                      |
| 6   | 4      | 11345    | 4.305              | 8339                         | 73.50%       | 3.164                                      | 6229                         | 54.91%       | 2.364                                      |
| 7   | 1      | 11345    | 4.305              | 8990                         | 79.24%       | 3.411                                      | 7076                         | 62.37%       | 2.685                                      |
| 7   | 2      | 11345    | 4.305              | 9694                         | 85.45%       | 3.679                                      | 7396                         | 65.19%       | 2.807                                      |
| 7   | 3      | 11345    | 4.305              | 471                          | 4.15%        | 0.179                                      | 166                          | 1.46%        | 0.063                                      |
| 7   | 4      | 11345    | 4,305              | 10669                        | 94.04%       | 4,048                                      | 9036                         | 79,65%       | 3,429                                      |
| 8   | 1      | 11345    | 4,305              | 9351                         | 82,42%       | 3.548                                      | 6725                         | 59,28%       | 2,552                                      |
| 8   | 2      | 11345    | 4,305              | 8416                         | 74,18%       | 3,194                                      | 5654                         | 49,84%       | 2,145                                      |
| 8   | 3      | 11345    | 4,305              | 8245                         | 72,68%       | 3,129                                      | 3987                         | 35,14%       | 1,513                                      |
| 8   | 4      | 11345    | 4,305              | 3562                         | 31,40%       | 1,352                                      | 2055                         | 18,11%       | 0,780                                      |

Tabela A12. Dados detalhados de cobertura vegetal sem corte por altura aos 112 (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6).

## APÊNDICE H: DADOS DETALHADOS - COBERTURA VEGETAL COM CORTE POR ALTURA

Tabela A13. Dados detalhados de cobertura vegetal com corte por altura aos 19 (V2–V3) e 34 DAP (V3–V4).

| Hib | BI | Total de<br>Pixels | Área da<br>Parcela<br>Amostral (m²) | 19 DAP (V2–V3)<br>Pixels de<br>Vegetação | 19 DAP (V2–<br>V3) %CV | 19 DAP (V2–V3)<br>Área de Vegetação<br>na Parcela<br>Amostral (m <sup>2</sup> ) | 34 DAP (V3–V4)<br>Pixels de<br>Vegetação | 34 DAP (V3–<br>V4) %CV | 34 DAP (V3–V4)<br>Área de Vegetação<br>na Parcela<br>Amostral (m²) |
|-----|----|--------------------|-------------------------------------|--|------------------------|---|--|------------------------|--|
| 1   | 1  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 6866                                     | 60,52%                 | 0,141  |
| 1   | 2  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 6910                                     | 60,91%                 | 0,141  |
| 1   | 3  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 6682                                     | 58,90%                 | 0,137  |
| 1   | 4  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 10034                                    | 88,44%                 | 0,205  |
| 2   | 1  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 4226                                     | 37,25%                 | 0,087  |
| 2   | 2  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 2095                                     | 18,47%                 | 0,043  |
| 2   | 3  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 9844                                     | 86,77%                 | 0,202  |
| 2   | 4  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 9850                                     | 86,82%                 | 0,202  |
| 3   | 1  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 7819                                     | 68,92%                 | 0,160  |
| 3   | 2  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 10003                                    | 88,17%                 | 0,205  |
| 3   | 3  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 9816                                     | 86,52%                 | 0,201  |
| 3   | 4  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 10523                                    | 92,75%                 | 0,215  |
| 4   | 1  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 4563                                     | 40,22%                 | 0,093  |
| 4   | 2  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 8475                                     | 74,70%                 | 0,174  |
| 4   | 3  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 4317                                     | 38,05%                 | 0,088  |
| 4   | 4  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 10722                                    | 94,51%                 | 0,220  |
| 6   | 1  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 613                                      | 5,40%                  | 0,013  |
| 6   | 2  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 5803                                     | 51,15%                 | 0,119  |
| 6   | 3  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 9350                                     | 82,42%                 | 0,191  |
| 6   | 4  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 7986                                     | 70,39%                 | 0,164  |
| 7   | 1  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 8335                                     | 73,47%                 | 0,171  |
| 7   | 2  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 7572                                     | 66,74%                 | 0,155  |
| 7   | 3  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 10137                                    | 89,35%                 | 0,208  |
| 7   | 4  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 9927                                     | 87,50%                 | 0,203  |
| 8   | 1  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 3937                                     | 34,70%                 | 0,081  |
| 8   | 2  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 3172                                     | 27,96%                 | 0,065  |
| 8   | 3  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 7310                                     | 64,43%                 | 0,150  |
| 8   | 4  | 11345              | 4,305                               | 0  | 0,00%                  | 0,000   | 5303                                     | 46,74%                 | 0,109  |

| Hib | BI | Total de<br>Pixels | Área da<br>Parcela<br>Amostral<br>(m²) | 91 DAP (R2)<br>Pixels de<br>Vegetação | 91 DAP (R2) %CV | 91 DAP (R2) Área<br>de Vegetação na<br>Parcela Amostral<br>(m²) | 98 DAP (R3–R4)<br>Pixels de<br>Vegetação | 98 DAP (R3–<br>R4) %CV | 98 DAP (R3–R4)<br>Área de<br>Vegetação na<br>Parcela Amostral<br>(m²) |
|-----|----|--------------------|--|---------------------------------------|-----------------|---|--|------------------------|---|
| 1   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11335                                 | 99,91%          | 4,301   | 10388                                    | 91,56%                 | 3,942   |
| 1   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11215                                 | 98,85%          | 4,256   | 9900                                     | 87,26%                 | 3,757   |
| 1   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11153                                 | 98,31%          | 4,232   | 9642                                     | 84,99%                 | 3,659   |
| 1   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 11166                                 | 98,42%          | 4,237   | 9214                                     | 81,22%                 | 3,496   |
| 2   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11234                                 | 99,02%          | 4,263   | 10368                                    | 91,39%                 | 3,934   |
| 2   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11344                                 | 99,99%          | 4,305   | 9561                                     | 84,28%                 | 3,628   |
| 2   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11148                                 | 98,26%          | 4,230   | 10184                                    | 89,77%                 | 3,864   |
| 2   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 11246                                 | 99,13%          | 4,267   | 9562                                     | 84,28%                 | 3,628   |
| 3   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11171                                 | 98,47%          | 4,239   | 8590                                     | 75,72%                 | 3,260   |
| 3   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11038                                 | 97,29%          | 4,189   | 9327                                     | 82,21%                 | 3,539   |
| 3   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11085                                 | 97,71%          | 4,206   | 7192                                     | 63,39%                 | 2,729   |
| 3   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 11248                                 | 99,14%          | 4,268   | 9674                                     | 85,27%                 | 3,671   |
| 4   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 10835                                 | 95,50%          | 4,111   | 9735                                     | 85,81%                 | 3,694   |
| 4   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11170                                 | 98,46%          | 4,239   | 9628                                     | 84,87%                 | 3,653   |
| 4   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11305                                 | 99,65%          | 4,290   | 10071                                    | 88,77%                 | 3,822   |
| 4   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 11272                                 | 99,36%          | 4,277   | 9658                                     | 85,13%                 | 3,665   |
| 6   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11345                                 | 100,00%         | 4,305   | 11134                                    | 98,14%                 | 4,225   |
| 6   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11343                                 | 99,98%          | 4,304   | 10892                                    | 96,01%                 | 4,133   |
| 6   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11344                                 | 99,99%          | 4,305   | 10678                                    | 94,12%                 | 4,052   |
| 6   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 8054                                  | 70,99%          | 3,056   | 7435                                     | 65,54%                 | 2,821   |
| 7   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11274                                 | 99,37%          | 4,278   | 10952                                    | 96,54%                 | 4,156   |
| 7   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11345                                 | 100,00%         | 4,305   | 11271                                    | 99,35%                 | 4,277   |
| 7   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11331                                 | 99,88%          | 4,300   | 9655                                     | 85,10%                 | 3,664   |
| 7   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 11345                                 | 100,00%         | 4,305   | 11319                                    | 99,77%                 | 4,295   |
| 8   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 11240                                 | 99,07%          | 4,265   | 10644                                    | 93,82%                 | 4,039   |
| 8   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 11293                                 | 99,54%          | 4,285   | 9840                                     | 86,73%                 | 3,734   |
| 8   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 11333                                 | 99,89%          | 4,300   | 10170                                    | 89,64%                 | 3,859   |
| 8   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 9174                                  | 80,86%          | 3,481   | 7154                                     | 63,06%                 | 2,715   |

Tabela A14. Dados detalhados de cobertura vegetal com corte por altura aos 91 (R2) e 98 DAP (R3-R4).

| Hib | BI | Total de<br>Pixels | Área da<br>Parcela<br>Amostral<br>(m²) | 112 DAP (R4–R5)<br>Pixels de<br>Vegetação | 112 DAP (R4–<br>R5) %CV | 112 DAP (R4–R5)<br>Área de<br>Vegetação na<br>Parcela Amostral<br>(m²) | 119 DAP (R5–R6)<br>Pixels de<br>Vegetação | 119 DAP (R5–<br>R6) %CV | 119 DAP (R5–R6)<br>Área de<br>Vegetação na<br>Parcela Amostral<br>(m²) |
|-----|----|--------------------|--|---|-------------------------|--|---|-------------------------|--|
| 1   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 5794                                      | 51,07%                  | 2,199  | 3331                                      | 29,36%                  | 1,264  |
| 1   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 3960                                      | 34,91%                  | 1,503  | 1306                                      | 11,51%                  | 0,496  |
| 1   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 4250                                      | 37,46%                  | 1,613  | 2264                                      | 19,96%                  | 0,859  |
| 1   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 3813                                      | 33,61%                  | 1,447  | 1905                                      | 16,79%                  | 0,723  |
| 2   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 6454                                      | 56,89%                  | 2,449  | 3519                                      | 31,02%                  | 1,335  |
| 2   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 6066                                      | 53,47%                  | 2,302  | 2739                                      | 24,14%                  | 1,039  |
| 2   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 4757                                      | 41,93%                  | 1,805  | 1463                                      | 12,90%                  | 0,555  |
| 2   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 4351                                      | 38,35%                  | 1,651  | 3213                                      | 28,32%                  | 1,219  |
| 3   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 4094                                      | 36,09%                  | 1,554  | 2084                                      | 18,37%                  | 0,791  |
| 3   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 3850                                      | 33,94%                  | 1,461  | 2172                                      | 19,14%                  | 0,824  |
| 3   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 1955                                      | 17,23%                  | 0,742  | 573                                       | 5,05%                   | 0,217  |
| 3   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 3011                                      | 26,54%                  | 1,143  | 1391                                      | 12,26%                  | 0,528  |
| 4   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 4834                                      | 42,61%                  | 1,834  | 1901                                      | 16,76%                  | 0,721  |
| 4   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 2450                                      | 21,60%                  | 0,930  | 1663                                      | 14,66%                  | 0,631  |
| 4   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 4949                                      | 43,62%                  | 1,878  | 971                                       | 8,56%                   | 0,368  |
| 4   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 2491                                      | 21,96%                  | 0,945  | 558                                       | 4,92%                   | 0,212  |
| 6   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 9249                                      | 81,52%                  | 3,510  | 7023                                      | 61,90%                  | 2,665  |
| 6   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 9532                                      | 84,02%                  | 3,617  | 7139                                      | 62,93%                  | 2,709  |
| 6   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 5465                                      | 48,17%                  | 2,074  | 2508                                      | 22,11%                  | 0,952  |
| 6   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 6208                                      | 54,72%                  | 2,356  | 3810                                      | 33,58%                  | 1,446  |
| 7   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 8990                                      | 79,24%                  | 3,411  | 7076                                      | 62,37%                  | 2,685  |
| 7   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 9694                                      | 85,45%                  | 3,679  | 7396                                      | 65,19%                  | 2,807  |
| 7   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 471                                       | 4,15%                   | 0,179  | 166                                       | 1,46%                   | 0,063  |
| 7   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 10669                                     | 94,04%                  | 4,048  | 9036                                      | 79,65%                  | 3,429  |
| 8   | 1  | 11345              | 4,305                                  | 9324                                      | 82,19%                  | 3,538  | 6664                                      | 58,74%                  | 2,529  |
| 8   | 2  | 11345              | 4,305                                  | 8416                                      | 74,18%                  | 3,194  | 5654                                      | 49,84%                  | 2,145  |
| 8   | 3  | 11345              | 4,305                                  | 8225                                      | 72,50%                  | 3,121  | 3746                                      | 33,02%                  | 1,421  |
| 8   | 4  | 11345              | 4,305                                  | 2577                                      | 22,71%                  | 0,978  | 1080                                      | 9,52%                   | 0,410  |

Tabela A15. Dados detalhados de cobertura vegetal com corte por altura aos 112 (R4–R5) e 119 DAP (R5–R6).