

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL KRAEMER ZATTI

**UTILIZAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS PARA O
MONITORAMENTO ESPECTRAL DA CULTURA DO MILHO EM FUNÇÃO DAS
DOSES DE NITROGÊNIO**

SANTA HELENA

2023

GABRIEL KRAEMER ZATTI

**UTILIZAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS PARA O
MONITORAMENTO ESPECTRAL DA CULTURA DO MILHO EM FUNÇÃO DAS
DOSES DE NITROGÊNIO**

**Use of remotely piloted aircraft for spectral monitoring of corn crop as a function
of nitrogen doses.**

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *Campus* Santa Helena, como requisito parcial para obtenção do título Bacharel em Agronomia.

Orientadora: Profa. Dra. Franciele Morlin Carneiro

SANTA HELENA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GABRIEL KRAEMER ZATTI

**UTILIZAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS PARA O
MONITORAMENTO ESPECTRAL DA CULTURA DO MILHO EM FUNÇÃO DAS
DOSES DE NITROGÊNIO**

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *Campus* Santa Helena, como requisito parcial para obtenção do título Bacharel em Agronomia.

Aprovada em: Santa Helena, 30 de junho de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Franciele Morlin Carneiro – Orientadora

UTFPR *Campus* Santa Helena

Prof. Dr. José Tobias Marks Machado

UTFPR *Campus* Santa Helena

Prof. Dr. Vinícius Amadeu Stuani Pereira

UTFPR *Campus* Santa Helena

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família que sempre me apoiou durante toda minha vida e minha graduação, minha mãe Marta, meu pai Gerson e meu irmão Daniel, que foram minha base sólida para a realização dos meus sonhos.

Agradecer à Deus pela dádiva da vida, e ter a possibilidade de estar vivendo momentos de conquista na minha vida.

Agradecimentos à minha orientadora Franciele pela sua orientação valiosa, paciência, dedicação e apoio ao longo de todo o processo, sua experiência e conhecimento foram essenciais para o sucesso deste trabalho.

Agradeço também aos membros da banca que dedicaram seu tempo para participar da banca de avaliação, contribuindo com observações e sugestões construtivas.

Minha gratidão a todas as pessoas que não mencionei acima, mas que de certa forma contribuíram com minha formação profissional e no desenvolvimento desse trabalho, dentre eles minha namorada, amigos, colegas de faculdade, demais professores, a todos vocês meu mais sincero agradecimento por contribuírem para o sucesso deste trabalho de conclusão de curso. Sou imensamente grato por ter contado com o apoio e o suporte de cada um de vocês ao longo dessa jornada.

RESUMO

As geotecnologias da Agricultura de Precisão (AP) auxiliam o profissional na avaliação de características agronômicas das plantas, otimizando o tempo e a tomadas de decisão. Dentre as geotecnologias, o Sensoriamento Remoto (SR) vem sendo bastante utilizado na agricultura. Por meio do imageamento aéreo, com aeronaves remotamente pilotadas é possível realizar o monitoramento agrícola, observando a sanidade da lavoura e as características biofísicas do cultivo (altura da planta, produtividade, etc.). Dessa forma, este trabalho teve como objetivo monitorar o comportamento espectral e as características biofísicas do cultivo de milho em função da variabilidade temporal e das doses de nitrogênio. O trabalho foi realizado na área experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Santa Helena, onde foi cultivado o milho. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso (DBC) com quatro tratamentos (0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de ureia) e quatro repetições. As variáveis analisadas foram: características biofísicas do milho (altura da planta, diâmetro do colmo, altura de inserção da primeira espiga, número de fileiras por espiga, comprimento da espiga, número de grãos por fileiras, teor de água no grão e produtividade), bandas espectrais (azul, verde e vermelho) e índices de vegetação – IVs (GLI - *Green Leaf Index*, VARI - *Visible Atmosphericly Resistant Index*, VEG - *Vegetativen Index* e GRVI - *Green-Red Vegetation Index*). O monitoramento do comportamento espectral foi realizado em doze épocas, por meio de imageamentos aéreos, desde a semeadura até a colheita, no qual foram gerados IVs. Quanto as análises estatísticas foram realizadas: análise descritiva, correlação de Pearson, análises de regressão, *box plot*, teste de normalidade, análise de variância (ANOVA). Para dados significativos ao teste F, foram feitos os testes de comparação de média: Kruskal-Wallis (dados não paramétricos) e o Tukey (dados paramétricos). Foi observado que plantas que absorvem mais nitrogênio possuem colorações das folhas mais escuras e com maiores valores dos IVs, havendo maior sanidade da lavoura. Concluiu-se que a melhor data para o monitoramento espectral da aplicação de diferentes doses de nitrogênio na cultura do milho é o imageamento realizado na semana 5, em que o milho se encontra no estágio de desenvolvimento V5-V6.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Adubação nitrogenada; Sensoriamento remoto; *Zea mays* L.

ABSTRACT

The geotechnologies of precision agriculture (PA) assist professionals in evaluating agronomic characteristics of plants, optimizing time and decision-making. Among these geotechnologies, remote sensing (RS) has been widely used in agriculture. Through aerial imaging with remotely piloted aircraft, agricultural monitoring can be carried out, observing crop health and biophysical characteristics (plant height, productivity, etc.). Thus, this study aimed to monitor the spectral behavior and biophysical characteristics of corn cultivation in relation to temporal variability and nitrogen doses. The study was conducted at the experimental area of the Federal Technological University of Paraná (UTFPR), Santa Helena campus, where corn was cultivated. The experimental design was randomized complete blocks (RCB) with four treatments (0, 40, 80, and 120 kg ha⁻¹ of urea) and four replications. The variables analyzed included biophysical characteristics of corn (plant height, stem diameter, first ear insertion height, number of rows per ear, ear length, number of grains per row, grain moisture content, and productivity), spectral bands (blue, green, and red), and vegetation indices (GLI - Green Leaf Index, VARI - *Visible Atmospherically Resistant Index*, VEG - *Vegetation Index*, and GRVI - *Green-Red Vegetation Index*). The monitoring of spectral behavior was carried out at twelve different times, through aerial imaging, from sowing to harvest, generating vegetation indices. Descriptive analysis, Pearson correlation, regression analysis, *box plot*, normality test, and analysis of variance (ANOVA) were performed for statistical analysis. For significant data according to the F-test, mean comparison tests were conducted: Kruskal-Wallis (non-parametric data) and Tukey (parametric data). It was observed that plants that absorb more nitrogen have darker leaf colors and higher values of vegetation indices, indicating greater crop health. It was concluded that the best date for spectral monitoring of different nitrogen doses in corn cultivation is in the week of mapping 5, when corn is in the V5-V6 growth stage.

Keywords: Precision agriculture; Nitrogen fertilization; Remote sensing; *Zea mays* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Assinatura espectral da vegetação.....	19
Figura 2. Representação esquemática da fase de coleta de dados do experimento.	23
Figura 3. Representação esquemática da fase de processamento de dados e análises estatísticas.....	24
Figura 4. Mapa de localização do experimento na área experimental da UTFPR campus Santa Helena.	25
Figura 5. Desenho esquemático do delineamento experimental de como foi conduzido o experimento.....	26
Figura 6. Doses de ureia (0, 40, 80 e 120 kg ha ⁻¹) utilizadas no experimento.	28
Figura 7. Nomenclatura atribuída para as parcelas do experimento.....	32
Figura 8 Comportamento espectral do cultivo no comprimento de onda na faixa do azul em função da variabilidade temporal.....	38
Figura 9 Comportamento espectral do cultivo no comprimento de onda na faixa do vermelho em função da variabilidade temporal.....	40
Figura 10 Comportamento espectral do cultivo no comprimento de onda na faixa do verde em função da variabilidade temporal.	42
Figura 11 Comportamento espectral do cultivo do índice de vegetação GLI (Green Leaf Index) da variabilidade temporal.....	44
Figura 12 Comportamento espectral do cultivo do índice de vegetação VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) da variabilidade temporal.....	46
Figura 13 Comportamento espectral do cultivo do índice de vegetação VEG (Vegetativen Index) da variabilidade temporal.	47
Figura 14 Comportamento espectral do cultivo do índice de vegetação GRVI (Green-Red Vegetation Index) da variabilidade temporal.....	49
Figura 15 Heat maps.....	55
Figura 16 Análise de regressão das bandas e índices de vegetação.....	59
Figura 17 Ortofotos.....	60
Figura 18 Banda espectral do vermelho.....	62
Figura 19 Banda espectral do verde.....	64
Figura 20 Índice de vegetação - VARI.....	66
Figura 21 Índice de vegetação - GRVI.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Valores de precipitação entre os imageamentos e de temperatura no dia do voo.	27
---	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Informações das datas do imageamento realizado com aeronave remotamente pilotada em doze épocas durante os estádios de desenvolvimento da cultura do milho.	30
Tabela 2 Índices de vegetação utilizados para as análises.....	34
Tabela 3 Dados sobre os parâmetros dos componentes biofísicos avaliados	50
Tabela 4 Comparação entre as médias ar tratamentos com as variáveis VARI e GRVI usando o teste Kruskal-Wallis.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Agricultura de precisão
DBC	Delineamento em blocos ao acaso
GDD	<i>Growing Degree Units</i>
GLI	<i>Ground Level Image Analysis</i>
GRVI	<i>Green Ratio Vegetation Index</i>
ha	Hectare
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IVs	Índices de vegetação
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
Kg	Quilograma
N	Nitrogênio
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
SR	Sensoriamento remoto
VARI	<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>
VEG	<i>Vegetative Index</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	14
	2.1 CULTURA DO MILHO.....	14
	2.2 AGRICULTURA DE PRECISÃO	15
	2.3 SENSORIAMENTO REMOTO NA AGRICULTURA.....	17
	2.3.1 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	20
	2.3.2 AERNOVES REMOTAMENTE PILOTADAS.....	21
3	MATERIAL E MÉTODOS	23
	3.1 CARACTERIZAÇÃO LOCAL.....	24
	3.2 INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO	26
	3.3 IMAGEAMENTO AÉREO POR AERONAVES	28
	3.4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS	31
	3.5 AVALIAÇÃO BIOFÍSICA DA CULTURA.....	33
	3.6 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	34
	3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	34
	3.8 ELABORAÇÃO DE MAPAS	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
	4.1 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO CULTIVO EM FUNÇÃO DA VARIABILIDADE TEMPORAL.....	37
	4.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA	50
	4.3 IDENTIFICAÇÃO DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS EM FUNÇÃO DA DATA IMAGEADA	53
	4.4 ANÁLISE DE REGRESSÃO.....	58
	4.5 VALIDAÇÃO DE DADOS POR MEIO DE MAPAS.....	60
5	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea Mays* L.) tem sua produção em muitos lugares do mundo e no Brasil a sua produção é dada por todo o território, sendo um dos principais cereais da produção nacional e uma dos mais produzidos e consumidos no mundo (CONTINI et al., 2019). O milho no Brasil é base para pequenas propriedades e movimentam o agronegócio nacional, sendo insumo para muitos produtos como exemplo pamonha, bolo, pão e amido de milho. O nutriente mais limitante para a cultura do milho é o nitrogênio (N), visto que quanto maior a disponibilidade de N maior é a produtividade alcançada pela cultura (OLIVEIRA et al., 2009).

A Agricultura de Precisão (AP) é uma prática que se tornou mais frequente nas propriedades rurais, em que busca-se ter uma melhor produtividade, reduzindo os custos de produção. A AP é utilizada como uma técnica para que sejam realizados os manejos adequados de acordo com a variabilidade temporal e espacial, podendo fazer aplicação de forma localizada em pontos críticos que sejam necessários a distribuição de corretivos, fertilizantes, inseticidas, fungicidas, herbicidas, e água, fazendo um uso racional de insumos (EZENNE et al., 2019).

Pensar em novas formas de manejos dentro da lavoura, com uso das novas tecnologias, e tratar a área cultivada como não homogênea, tomando conhecimento de suas variações é um conceito básico da AP, em vista disso, avaliar a propriedade de acordo com áreas de maior e menor produtividade por meio de zonas de manejo (ZM), faz com que seja possível extrair o potencial produtivo de cada área, resultando em maior rentabilidade. (HAUSCHILD, 2014)

O uso do sensoriamento remoto (SR) na agricultura vem sendo disseminado pelo seu potencial para o monitoramento das culturas agrícolas em tempo real, podendo assim fazer uma avaliação e a tomada de decisão o mais rápido possível aplicando as práticas de manejo que melhor se enquadram para aquela situação (BERNARDES et al., 2012). O SR fornece informações de forma rápida favorecendo uma avaliação precoce, eficiente e não destrutiva do comportamento das plantas em resposta às diferentes intempéries climáticas (GANG et al., 2010).

O uso de Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), também conhecida como Sistema de Aeronaves Não Tripuladas, Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) ou de forma coloquial Drone, tem aumentado com o avanço tecnológico. Seu uso permitiu o monitoramento da área e avaliação da lavoura de forma remota, possibilita identificar falhas de semeadura, locais em que as culturas estejam com baixo desenvolvimento ou que estejam sofrendo alguma injúria extrínseca. As aeronaves são uma opção para otimizar as tomadas de decisão e possibilitar o monitoramento da produção agrícola (BERNARDI et al., 2014).

O uso de aeronaves na agricultura é essencial para ter uma visão diferente do convencional (acompanhamento a nível de solo com avaliações pontuais), auxiliando na tomada de decisão ante um evento que está ocorrendo pontualmente no campo, ou em área total. A avaliação da absorção de nitrogênio pelas plantas, pode ser monitorado por meio de imagens aéreas, obtendo o manejo mais assertivo na área. (ANDRADE et al., 2019; ZHANG et al., 2020)

A partir de imageamentos realizados neste trabalho, esperamos identificar as relações entre as colorações das folhas em função de aplicação de doses gradativas de nitrogênio, e as bandas espectrais, correlacionados com dados biofísicos da planta, buscando avaliar a correspondência de verde mais escuros nas folhas, bem como maiores produtividade em aplicações de doses maiores de nitrogênio, por meio de avaliações com índices de vegetação a partir de imageamentos aéreos. Dessa forma, buscando apresentar quais índices de vegetação e quais dosagens retornam melhores correspondências com dados biofísicos das plantas como produtividade e altura das plantas.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho foi monitorar o comportamento espectral e as características biofísicas do cultivo de milho em função da variabilidade temporal e das doses de nitrogênio. Quanto ao objetivo específico foi identificar qual o índice de vegetação e banda espectral na região do visível RGB (R - vermelho, G - verde e B - azul), teve melhor correlação com a produtividade e os demais parâmetros biofísicos do cultivo (altura da planta, diâmetro do colmo, altura de inserção da primeira espiga, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileiras, teor de água no grão e comprimento da espiga),

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 CULTURA DO MILHO

O milho é o cereal mais cultivados em todo o mundo, com produção aproximada de 1,13 bilhões de toneladas na safra de 2020/2021, sendo, o Brasil um dos principais países produtores (CONAB, 2021). Nos últimos anos tem se percebido o crescimento do consumo desse produto no país, sendo que, para Favro et al., (2015) o milho é o “insumo básico para avicultura e suinocultura, dois setores extremamente competitivos em nível internacional e grandes geradores de receitas para o país, sobretudo via exportação”.

Nas últimas décadas a produção de milho no Brasil vem passando por um grande desenvolvimento, se destacando a comercialização no mercado interno e externo, principalmente no que se refere à sua produtividade (ABIMILHO, 2022). Trata-se de uma cultura muito importante para o Brasil, tanto no que se refere à alimentação humana, economia, o agronegócio, bem como social, pois para muitas propriedades rurais, principalmente para as micro e pequenas áreas agrícolas, o milho é um dos produtos de maior versatilidade no que se refere à sustentabilidade alimentar (MORAIS et al., 2015).

Conforme Chiodi (2006), até o final da década de 1980, no Brasil a produção de milho, era praticamente toda voltada, para atender a demanda interna do país, ou seja, era usado em grande parte como insumo para alimentação humana e animal. Em 1990 ocorreram transformações no mercado econômico, devido a decorrência da nova configuração ocasionada com a abertura da economia brasileira, que passou a incorporar o milho a competitividade do mercado internacional, gerando alterações no comércio e na formação de preços do milho brasileiro (FAVRO et al., 2015).

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias do Milho (2022), estão sendo apresentados resultados positivos por agricultores do Centro-Sul do país, em relação ao cultivo de milho. Com o uso de técnicas avançadas¹, passaram a registrar

¹ Uso de tecnologias na cultura de grãos. A chamada Agricultura 4.0, que se refere a Indústria 4.0 onde ocorre o envolvimento da inteligência artificial, internet das coisas e a *big data*, causando impactos positivos como, **aumento da produtividade e a redução de custos**, entre outros. Disponível em: <https://revistaanalytica.com.br/o-uso-de-tecnologias-inovadoras-na-producao-de-graos/> Acesso em: 15 mai. 2022.

produtividade recorde, por volta de 2,9 ton ha⁻¹. Isso confirma a efetividade dos dados de números de um estudo realizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), que apresenta uma estimativa de “um potencial de 40 milhões de toneladas para a atual área semeada com milho no Brasil. Para que isso seja possível, basta utilizar a tecnologia existente nas diversas etapas de produção: semente adequada ², cuidados com solo, cultivo, colheita e armazenamento. Mercado para o consumo deste grande volume de milho é o que não falta” (ABIMILHO, 2022).

2.2 AGRICULTURA DE PRECISÃO

Frente às inúmeras transformações que estão ocorrendo na agricultura, vem também se modificando o cotidiano do produtor rural e empresário rural, necessitando de tecnologias modernas, que venham oportunizar uma melhoria na sua produtividade para gerar maiores lucros na produção (CARNEIRO et al., 2016). Seu conceito surgiu dos termos em inglês, *Precision Agriculture*, *Precision Farming* ou *Site-specific Crop Management*, que denomina o uso de instrumentos de tecnologia de ponta, abrangendo desde;

[...] *hardware* (componentes físicos) próprios até os mais variados *softwares* (programas de computador) especializados e redes de telecomunicação (transmissão de dados), criando um sistema complexo que permite coletar dados para monitoramento e avaliação de determinadas áreas destinadas à agricultura, para posterior execução dos fatores de produção, como a aplicação de fertilizantes e fitofármacos, regulação da densidade da sementeira e plantação, controle do uso de água, entre outros coeficientes (SILVA; SILVA - MANN 2020).

Dessa forma a AP, surgiu para modificar a compreensão que o espaço da propriedade não é homogêneo, mas que na verdade, são partes diferenciadas no mesmo talhão, e deverá ser corrigido cada parte da linha de produção ou cada metro quadrado da sua propriedade conforme a necessidade da mesma (SILVA e SILVA-MANN, 2020; EZENNE et al., 2019).

² Com os avanços tecnológicos, os produtores de milhos como outros grãos podem contar com as tecnologias disponíveis, principalmente as relacionadas com a modificações genéticas nas sementes.

A AP trata-se de um procedimento de manejo que leva em consideração a variedade espacial e dessa forma possibilita aplicar “sítio-específico de insumos”, como corretivos, fertilizantes, pesticidas, sementes, água entre outros (PRADO, 2018). Leva em consideração a variedade temporal, permitindo assim a “utilização racional dos insumos, no momento, local e dose corretos, com potencial de benefícios econômicos e ambientais” (BASSOI et al., 2019). Isto posto, é interessante apresentar a definição de Coelho e Silva (2009) os quais ao definir AP em todos seus aspectos, apresentaram uma definição que resume o desenvolvimento da agricultura as transformações dos aparatos tecnológicas e o crescimento da preocupação com a responsabilidade ambiental, por parte dos agricultores.

A AP envolve a aplicação diferenciada e à medida dos fatores de produção, tendo em conta a variação espacial e temporal do potencial produtivo do meio e das necessidades específicas das culturas, de forma a aumentar a sua eficiência de utilização e, assim, melhorar o rendimento econômico e reduzir o impacto ambiental da atividade agrícola (COELHO; SILVA, 2009, p. 04).

Inicialmente a AP era vista como um conjunto de ferramentas, que eram usadas para o tratamento localizado da lavoura, mas ultimamente devido aos avanços tecnológicos a mesma passou a ter uma definição mais ampla. É acima de tudo, um novo gerenciamento ou logística da produção agrícola. Em 2014 a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão, órgão consultivo do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, definiu como sendo “um conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas para permitir um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva, visando ao aumento de retorno econômico e a redução do impacto ambiental” (BRASIL, 2013).

Foi, portanto nesse contexto, principalmente da incorporação das modernas tecnologias que surgiu a AP, que nada mais é do que uma maneira inovadora de realizar a análise do campo e retificar adversidades, levando em consideração as carências de cada área específica do espaço de cultivo e, à vista disso, a utilização correta e racional dos aspectos agrícolas (BORGES et al., 2022). Sendo assim, tanto para os técnicos como para os produtores rurais, a utilização das geotecnologias da AP já é uma realidade nas propriedades e “está difundindo-se progressivamente o

conhecimento de que existe uma variabilidade nas áreas de produção, que pode ser devido às variações do relevo, solos, vegetação e também do histórico de uso (BERNARDI et al., 2014).

Dentre as geotecnologias que vem se destacando, a principal é o SR. Dentre os sensores embarcados que está sendo bastante utilizado são os VANTs, pois com essa tecnologia é possível capturar imagens de alta precisão da área ou terreno, com alcance de cobertura de centenas de hectares em um único voo, devido a sua mobilidade e facilidade de acesso. Entre os pontos mais atrativos dos dados de aeronaves na AP, dependendo da altura estipulada do voo, fixação das condições das câmeras, a escala cartográfica de uma imagem aérea pode equivaler a uma resolução espacial de poucos centímetros a decímetros, o que tem mostrado potencial para as estimativas de parâmetros agrícolas (FERNANDEZ-GALLEGO et al., 2019).

O uso de informações obtidas de aeronaves necessita que a pessoa, tenha conhecimento preliminar de SR, devido ao envolvimento da natureza da radiação eletromagnética, técnicas de processamento, correções e metodologias de análise para a geração dos imageamentos e índices de vegetação - IV (GARRETT e ANDERSON, 2018). Entre as inúmeras vantagens de fazer uso de aeronaves são a facilidade de aquisição, imageamento de áreas agrícolas de diferentes tamanhos desde pequenas à grandes, qualidade da resolução espacial com escala de mapeamento detalhado, e dentre outras.

2.3 SENSORIAMENTO REMOTO NA AGRICULTURA

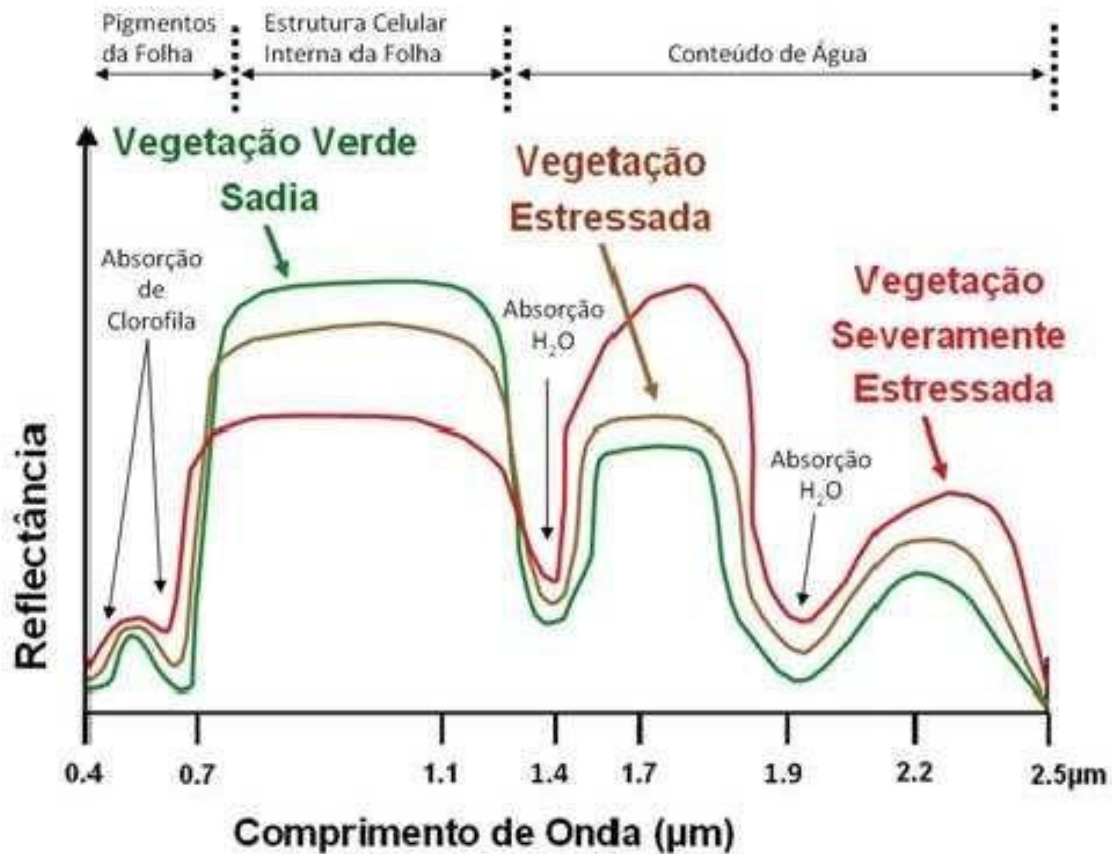
O SR clássico é aquele procedimento que se baseia quase que unicamente de dados oriundos de sensores não imageadores (radiômetros e espectrômetros) e imageadores (sensores aéreos e orbitais). Sensores imageadores são aqueles que as imagens são capturadas por meio de câmeras que estão instaladas em plataformas aéreas e orbitais, e pode ser estabelecida como uma ciência ou a arte de se conseguir determinadas informações sobre um objeto estipulado, área ou fenômeno, por meio dos dados coletados por um equipamento (sistema sensor) que não tem contato físico com o alvo (SHIRATSUCHI et al., 2014).

Em meados de 1999, surgiram as primeiras medições por SR realizadas por meio de câmeras acopladas em aeronaves, foguetes, pipas, balões, e até mesmo a pássaros. Atualmente as “imagens de sensores remotos podem ser obtidas a partir de diversas plataformas, como satélites, aviões, aeronaves remotamente não tripuladas e máquinas agrícolas autopropelidas (SHIRATSUCHI et al. 2014).

O SR na agricultura é utilizado para se estimar a quantidade de biomassa acumulada em uma cultura, como por exemplo, do milho, tendo como base a diferença de volume entre a superfície do solo e o topo do dossel das plantas. Esses dados, por exemplo, podem fornecer segundo os pesquisadores Molin et al., (2015), a estimativa da “produtividade de plantas forrageiras, as quais têm em sua massa vegetal o produto principal. Pode fornecer também subsídio para estimativas de produtividade, quando essa está relacionada com o vigor das plantas durante seu desenvolvimento”. Ainda para os autores, essas informações possibilitam, “entre outras finalidades, o refinamento das recomendações de fertilizantes e do controle gerencial sobre a lavoura”. E, entre as principais vantagens da utilização do SR é para a estimativa da biomassa e produtividade da cultura; o monitoramento de estresse hídrico e do vigor nas plantas e a avaliação do estágio fenológico da planta (BRANDÃO, 2009).

Por meio da assinatura espectral de uma folha de planta (Figura 1), é possível observar o comportamento quanto à reflectância da radiação, e identificar que no intervalo entre as regiões do visível (entre 0,4 e 0,7 μ m) o valor de reflectância da folha é mais baixo, mesmo se estiver sadia ou passando por alguns estresses fisiológicos, isso devido a absorção da radiação solar pelos pigmentos fotossintetizantes da folha, porém nesse intervalo entre 0,5 e 0,6 μ m que seria correspondente a banda do verde é onde observamos maior reflectância na banda do visível, seguido da faixa seguinte entre 0,6 e 0,7 μ m representada pela faixa do vermelho. No intervalo do comprimento de onda do infravermelho próximo (entre 0,7 e 1,0 μ m) a reflectância da folha é maior, sendo isso justificado em função do espalhamento da radiação nas partes interiores das folhas.

Figura 1 Assinatura espectral da vegetação



Fonte: Souza Filho et al. (2008).

Com o crescimento da AP em todo o território brasileiro, entre as muitas tecnologias e inovações dessa área, é a utilização do SR que tem ganhado espaço e importância, passando a ser cada vez mais comum e presente nesse meio (BERNARDES, 2012). Esse sistema consiste no tratamento, armazenamento e análise das informações coletadas, promovendo um maior conhecimento dos inúmeros e variados fenômenos existentes nas superfícies monitoradas, permitindo assim que o produtor rural tenha condições de identificar pragas, avaliar a área cultivada, e assim ser possível a tomada de decisões mais coerentes em benefício da melhoria da produtividade (BRANDÃO, 2009).

Uma das mais importantes áreas do SR é a radiometria espectral, que pode ser realizada as mensurações por imagens aéreas (SHIRATSUCHI et al., 2014). Essa prática faz a identificação da intensidade, com que cada material, seja um tipo de

vegetação, solo ou rocha, reflete a radiação eletromagnética em distintos comprimentos de onda do espectro (BRANDÃO et al., 2008). Isto posto, informações coletadas da refletância têm sido relacionadas às propriedades das plantas, entre elas o índice da área foliar, a biomassa ou a fração radiativa interceptada fotossinteticamente (ATZBERGER, 2013).

Sendo assim, na agricultura, as propriedades da refletância em cada faixa do espectro eletromagnético podem ser melhores avaliadas, por meio de combinações matemáticas de variadas bandas espectrais. Modificações essas, são as medidas da atividade da vegetação usando em especial as faixas do visível e infravermelho próximo e que são apresentados como índices de vegetação (SHIRATSUCHI et al., 2014).

2.3.1 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

O desenvolvimento vegetativo das plantas nas lavouras deve ser acompanhado para que não sejam perdidas informações importantes da cultura como parâmetros biofísicos, e para obter essas informações o uso de índices de vegetação é imprescindível para obter dados sobre o ciclo cultural. (BORÉM et al., 2021).

A vegetação é complexa para entendimento do ponto de vista de sensoriamento, pois uma mesma planta tem diferentes partes com diferentes refletâncias, e ainda as condições de luminosidade podem ser um fator contribuinte para a flutuação das propriedades de reflexão das plantas (EPIPHANIO et al., 1996).

Para obter os índices de vegetação são realizadas associação entre bandas de diferentes espectros, que acabam por evidenciar determinadas características na imagem, e essas associações de bandas espectrais pode ser variável de acordo com a finalidade necessária (CRUZ, 2020).

Os índices de vegetação são utilizados na agricultura para coleta de informações e monitoramento de culturas, para a identificação de locais com folhas, e nesse experimento foram utilizados os índice de vegetação (IV's), GLI (*Ground Level Image Analysis*), VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*), VEG (*Vegetative Index*) e GRVI (*Green Ratio Vegetation Index*) que estão apresentados na Tabela 2.

O índice de vegetação GLI significa “Análise de Imagens em Nível do Solo” no qual é eficiente no uso de imageamentos de alta resolução (LOUHAICHI et al. 2001).

O VARI significa ‘Índice Visível Resistente à Atmosfera’, e mesmo utilizando apenas as bandas do visível, foi projetado para melhorar os produtos por ter uma correção atmosférica, mas que serve como um índice complementar aos que utilizam o infravermelho próximo (GITELSON et al. 2002).

O VEG (*Vegetative Index*) ou “vegetativo”, é um modelo que foi encontrada a possibilidade de classificação das imagens RGB e transformação delas para histogramas bimodais (MARCHANT e ONYANGO, 2002).

O quarto índice de vegetação foi o GRVI (*Green Ratio Vegetation Index*) criado e também denominado por Tucker (1979) como NGRDI (*Normalized Green Red Difference Index*), que foi utilizado para avaliar a resposta das bandas verde e vermelha por meio desse índice para a vegetação.

2.3.2 AERNOVES REMOTAMENTE PILOTADAS


As aeronaves remotamente pilotadas são equipamentos de voos remotos de forma não tripulada, que são dotadas de componentes como sensores remotos imageadores, capazes de adquirir imagens de alta resolução espacial, sendo uma forma viável de aquisição de imagens pelo baixo custo do que imagens orbitais pagas, obtenção de dados confiáveis e precisos; Porém são dados brutos que necessitam de tratamentos realizados por mão-de-obra qualificada que vão transformar as imagens coletadas em números digitais para reflectância, havendo o cálculo do IVs bem como em produtos interpretativos sobre as características de interesse (CRUZ, 2020).

O uso das aeronaves na agricultura tem um crescimento exponencial mostrando a importância de obtenção de dados e monitoramento da cultura, resultando no aumento da eficiência do manejo e trazendo lucratividade aos produtores, por meio de diferentes usos, sendo os principais segmentos a varredura de campo com sensores compactos; criação de mapas georreferenciados; e monitoramento de gado (ANDRADE, 2019).

Existem vários tipos de drones, e na agricultura são utilizados os de asa fixa para grandes áreas, pela sua capacidade de realizar voos mais altos, e os drones multirrotores para áreas menores e também para uso civil em que geralmente tem capacidade de imagear uma área mais limitada (CAI et al., 2014).

Figura 2 Comparativo entre drones asa fixa e multirrotor

Tipos de Drones



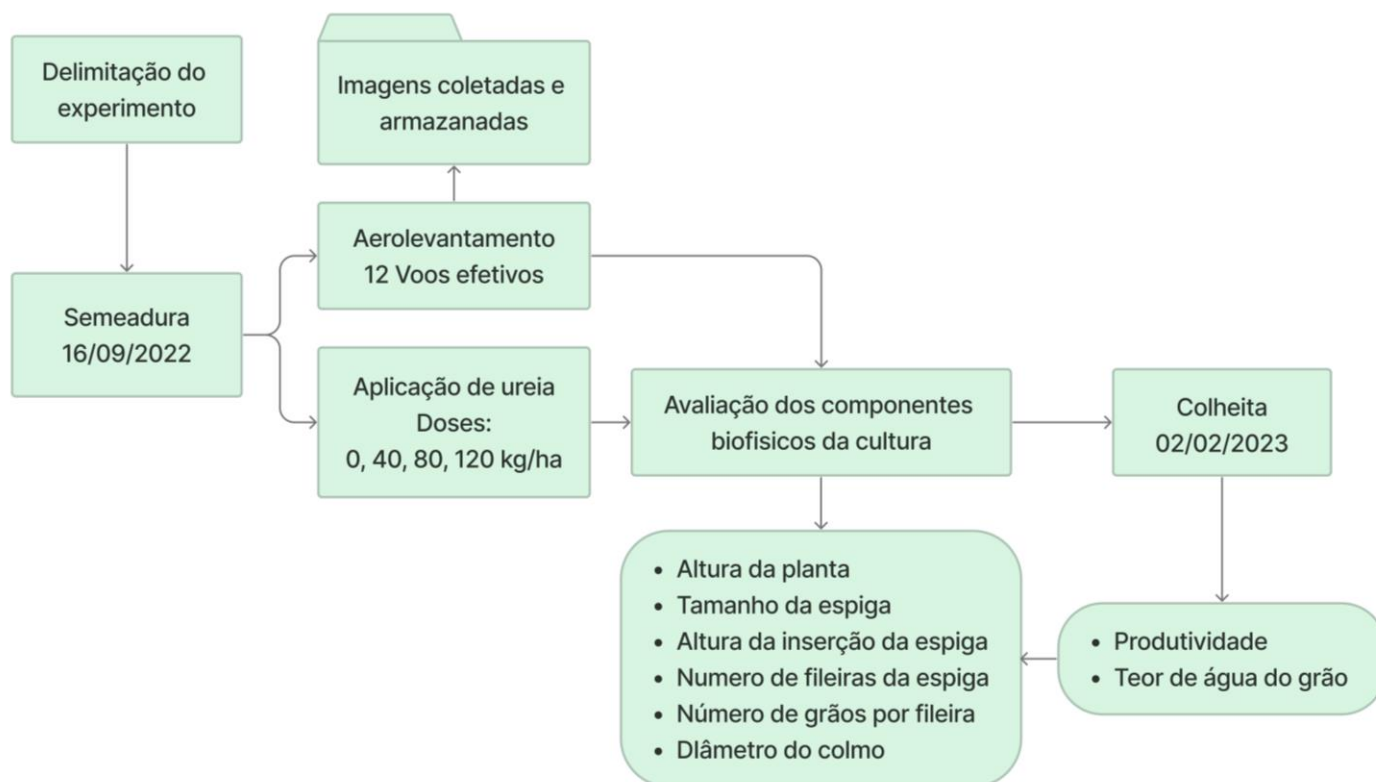
Multirrotor / Multicóptero	Asa fixa
<ul style="list-style-type: none">• Autonomia de voo (25 - 30 min)• Cobertura de áreas menores (60 ha / voo)• Pilotagem manual e automática• Uso recreativo, publicitário e mapeamento.	<ul style="list-style-type: none">• Autonomia de voo de 2 horas• Cobertura de áreas extensas (3000 ha / voo)• Voo automático• Uso Profissional - Mapeamento aéreo

Fonte: Blog aegro (2023)

3 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho foi realizado em duas partes, com a primeira fase de coleta de dados exemplificado pela sequência de execução (Figura 3), e a segunda com o processamento desses dados (Figura 4).

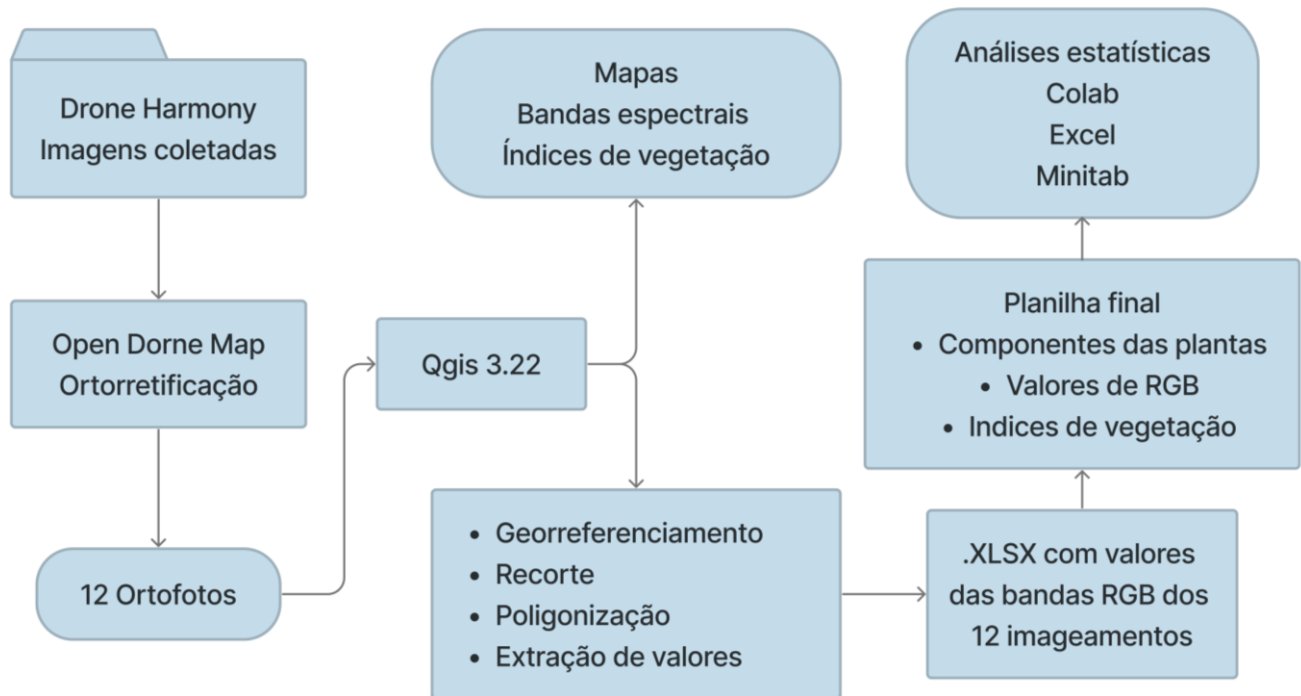
Figura 3. Representação esquemática da fase de coleta de dados do experimento.



Fonte: Autores (2023)

Nessa fase de coleta de dados foi delimitado o local do experimento, realizada a sementeira, e iniciado o mapeamento da área com o armazenamento das imagens para posterior processamento, e durante os mapeamentos foi realizada a aplicação de nitrogênio em doses crescentes, e ao fim dos mapeamentos realizada as avaliações do componentes biofísicos das plantas como altura da planta, diâmetro de colmo e parâmetros das espigas, e posterior colheita, que então foram coletados dados de produtividade e teor de água dos grãos.

Figura 4. Representação esquemática da fase de processamento de dados e análises estatísticas



Fonte: Autores (2023)

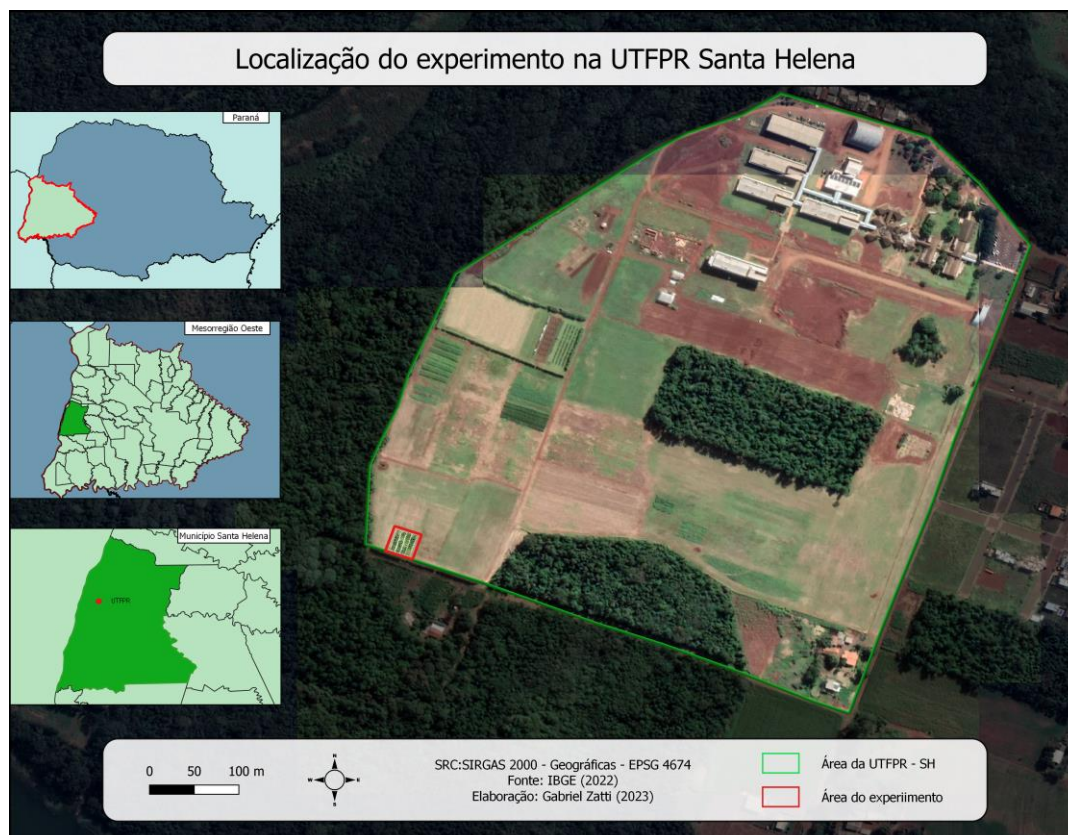
Nessa fase foi realizada a ortorretificação das imagens no Open Drone Map, que foram coletadas e armazenadas, e então com as ortofoto geradas foram importadas no QGIS 3.22 para as análises sendo gerados os índices de vegetação (IVs), e extraídos valores de pixels que foram transformados em pontos, para posterior avaliação com softwares de análises estatísticas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO LOCAL

A condução do experimento foi realizada na área experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* de Santa Helena, situado no extremo oeste do Paraná, nas coordenadas geográficas 24° 50' 58" e 54° 20' 48", a uma altitude média de 235 m acima do nível do mar. Segundo Zatti e Rocha (2022) o solo da área experimental é um Nitossolo Vermelho Distroférico Latossólico. O experimento fica próximo à área de reserva do Lago de Itaipu, sendo utilizado para

cultivo de lavoura com culturas temporárias, e o experimento foi implantado após a colheita de trigo no local, sendo representado na Figura 5.

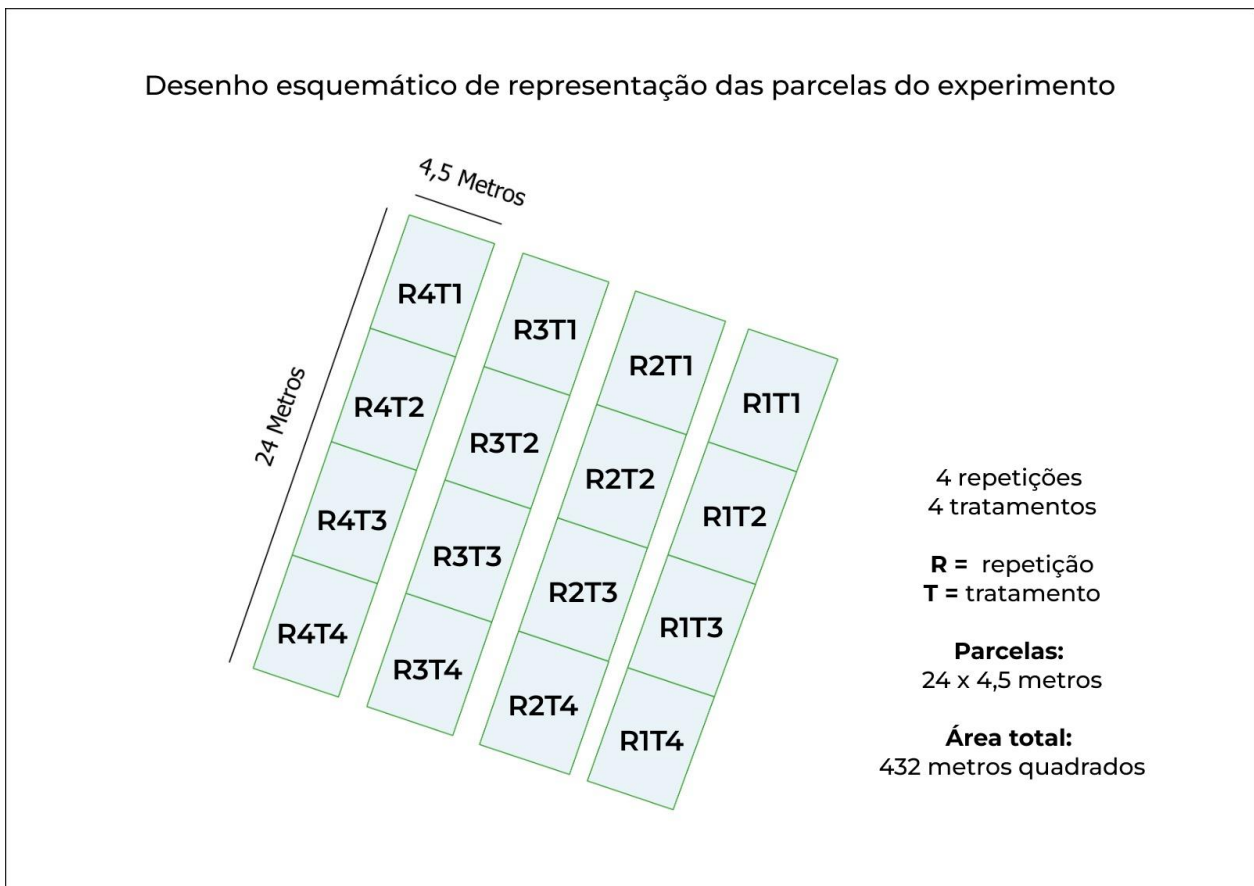
Figura 5. Mapa de localização do experimento na área experimental da UTFPR campus Santa Helena.



Fonte: Autores (2023)

A implantação do experimento foi realizada em parcelas, com delineamento em blocos ao acaso (DBC), de 24 m de comprimento por 4,5 m de largura cada uma, com 4 repetições para cada tratamento, totalizando uma área de 432 m² como representado no desenho esquemático da Figura 6.

Figura 6. Desenho esquemático do delineamento experimental de como foi conduzido o experimento.



Fonte: Autores (2023)

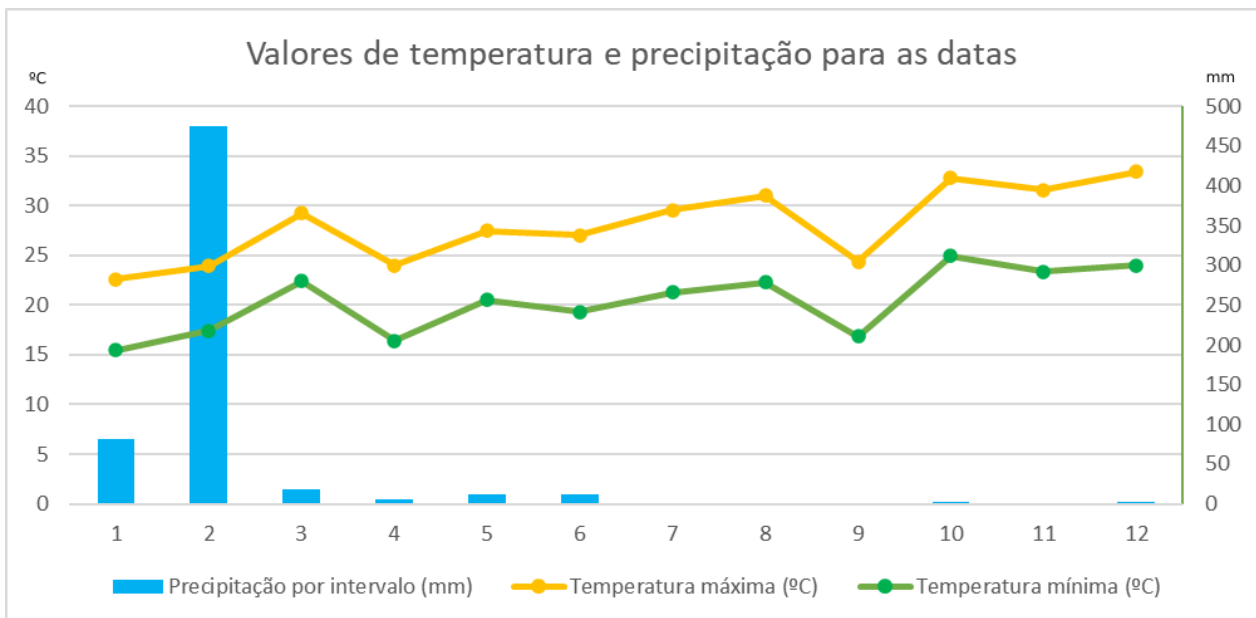
3.2 INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO

A semeadura do milho no experimento foi realizada na safra 2022/2023 no dia 16 de setembro de 2022 e colheita no dia 02 de fevereiro de 2023, totalizando um ciclo de 139 dias. A operação de semeadura foi realizada com o trator LS de 90 cv, modelo Plus 90, no qual foi acoplado a semeadora Netz, modelo PDN 7000, mecânica acoplada à barra de tração com 7 linhas e espaçamento de 0,50 m entre linhas, sendo realizada duas passadas com a semeadora por parcela, tendo apenas 5 linhas ativas em cada passada para totalização de 10 linhas em cada parcela. No experimento foi semeado o híbrido P3440 PWU® (recomendado para a região oeste do Paraná e para uso na safra), foi distribuído 3,2 sementes por metro. A adubação em sulco de

semeadura foi realizada com regulagem para distribuição de 300 kg ha⁻¹ do formulado NPK 6-30-10.

Após a semeadura, iniciou o acompanhamento da cultura e monitoramento de pragas e doenças com aplicação única do inseticida a base de Tiametoxan, visto que a pressão de pragas como cigarrinha do milho (*Dalbulus Maidis*) foi baixa devido a pouca precipitação como é observado no gráfico 1. A análise da precipitação foi realizada no intervalo entre os mapeamentos que foram 12 mapeamentos ao todo. A distribuição da chuva durante o ciclo da cultura foi prejudicial, pela distribuição não uniforme durante o ciclo, se concentrando no início do desenvolvimento da cultura, e a precipitação total do ciclo foi de 611 mm.

Gráfico 1 Valores de precipitação entre os imageamentos e de temperatura no dia do voo.



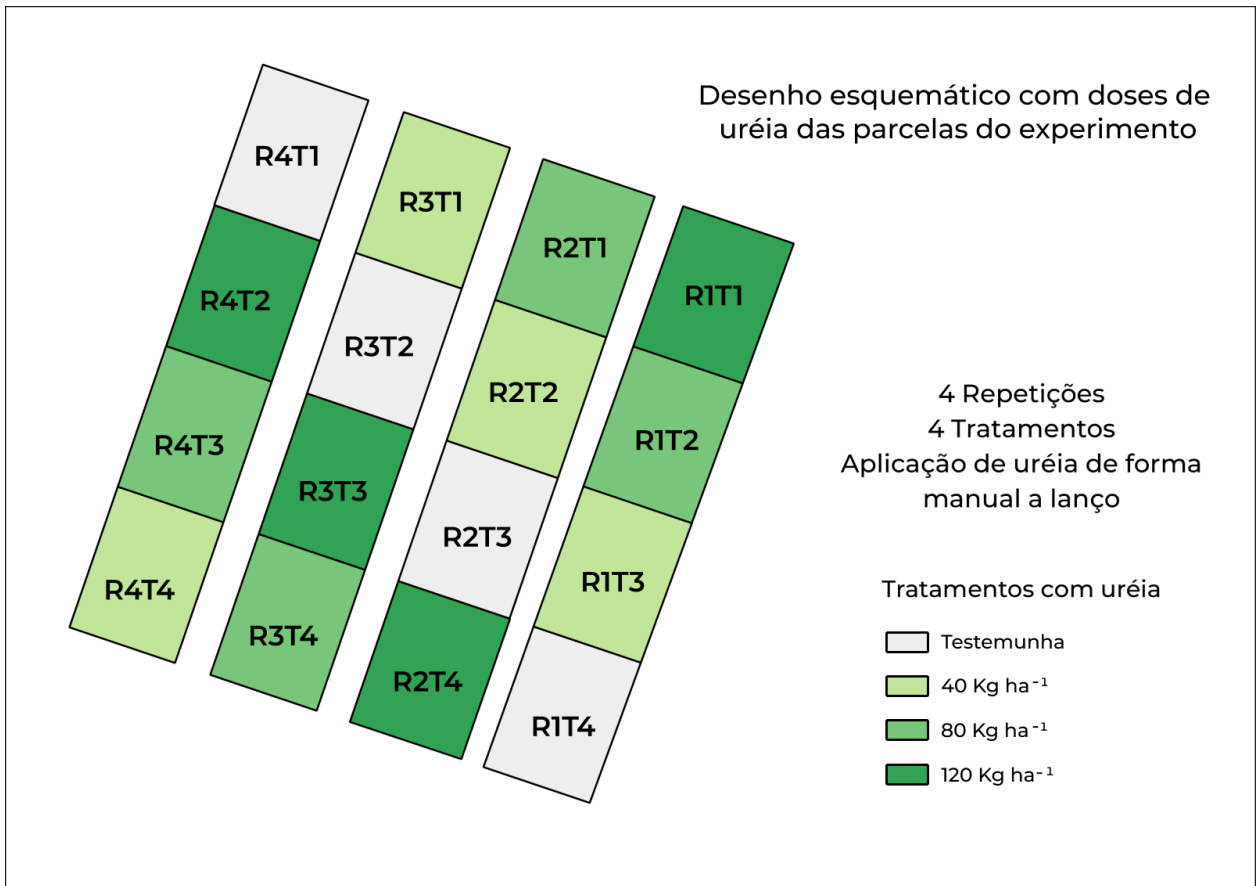
*Eixo x representa as datas imageadas, em que os valores de precipitação são representados pelo intervalo entre os voos, e os valores de temperatura são valores coletados no dia do imageamento.

Fonte: Autores (2023)

A adubação em cobertura com doses crescentes de nitrogênio, foi realizada com o milho em estágio de desenvolvimento V4, apresentado no mapeamento da data 4, tendo em cada bloco a aplicação de forma manual a lanço, com doses de 0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹, sendo que na parcela da testemunha (0 kg ha⁻¹) não foi realizada a aplicação de nitrogênio em cobertura, como é representado na Figura 7. As

nomenclaturas das parcelas são referentes a uma distribuição para extração dos valores por meio do sensoriamento remoto, e não em fator do tratamento com nitrogênio, dessa forma os tratamentos de nitrogênio e as nomenclaturas não tem correlação entre si, em que os “T” são referentes às parcelas para avaliação das variações entre os tratamentos.

Figura 7. Doses de ureia (0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹) utilizadas no experimento.



Fonte: Autores (2023)

3.3 IMAGEAMENTO AÉREO POR AERONAVES

As imagens aéreas foram realizadas com a aeronave multirrotor DJI Mavic Mini (Figura 8), equipado com uma câmera de 12 MP, na resolução 4:3, com tamanho de imagem de 4000x3000 pixels, e distancia focal de 4,49 mm fornecendo imagens com as bandas do espectro visível RGB (R - vermelho, G – verde e B - azul) nos formatos JPEG.

Figura 8 Drone utilizado para os mapeamentos



Fonte: Autores (2023)

Os voos foram realizados com um intervalo de aproximadamente uma semana, com as capturas iniciadas dia 07/10/2022 enquanto a cultura já havia emergido e se encontrava no estadio de desenvolvimento V2 e finalizadas no dia 06/01/2023, totalizando 12 voos realizados. Quanto as datas do imageamento, na tabela 1 está presente as datas que foram realizados os imageamentos, a nomenclatura de abreviação para cada mapa gerado.

Pelos estudos de Moreno et al. (2014) foi calculado o GDD (Growing Degree Units ou heat units), ou seja, a unidades de grau de crescimento apresentando na equação 1, que se refere a padronização dos resultados de uma mesma cultura em diferentes locais e climas que forem semeados.

$$GDD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - 50 \quad (1)$$

Em que:

GDD = Growing Degree Units

TMax = Temperatura máxima do ar (°F)

Tmin = Temperatura mínima do ar (°F)

Tabela 1. Informações das datas do imageamento realizado com aeronave remotamente pilotada em doze épocas durante os estádios de desenvolvimento da cultura do milho.

Épocas avaliadas	Abreviação	Data do imageamento	GDD	
			°F	°C
Data 1	F_S	16/09/2022	16,53	-8,59
Data 2	F_3	25/10/2022	27,32	-2,60
Data 3	F_4	30/10/2022	29,66	-1,30
Data 4	F_5	08/11/2022	23,32	-4,82
Data 5	F_6	13/11/2022	27,37	-2,57
Data 6	F_7	18/11/2022	23,90	-4,50
Data 7	F_8	25/11/2022	28,80	-1,78
Data 8	F_9	02/12/2022	33,20	0,67
Data 9	F_10	09/12/2022	39,59	4,22
Data 10	F_11	16/12/2022	33,79	0,99
Data 11	F_12	23/12/2022	31,50	-0,28
Data 12	F_13	06/01/2023	29,45	-1,42

Fonte: Autores 2023

O voo ocorreu de forma autônoma com o uso do *software Drone Harmony*[®], um aplicativo de planejamento de voo que gera as linhas orientação do voo com distância equivalente, que calcula os níveis de sobreposição de imagens de acordo com a altura que serão obtidas, utilizando-se sempre a mesma velocidade de captura das imagens, e, portanto, temos maior precisão na elaboração das ortofotos no processamento dessas imagens.

As imagens foram capturadas de forma semelhante com para que fosse possível realizar a comparação entre elas com horários de imageamento próximos das 15:00 horas. Para a realização dos voos o plano de voo foi configurado com uma velocidade de $2,0 \text{ m s}^{-1}$, a uma altura de voo foi 20 m com sobreposição frontal e lateral das imagens configuradas para 80%, com GSD de 0,80 cm.

3.4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

As imagens capturadas pela aeronave foram posteriormente processadas no *Open Drone Map*, um *software* de processamento de imagens de código livre, esse programa é utilizado para realizar a unificação das sequências de imagens capturadas, e por serem georreferenciadas nos dados de captura com a aeronave, podem ser sobrepostas por meio de interpolação de pixels semelhantes e gerar apenas uma única imagem denominada ortomosaico ou ortofotografia.

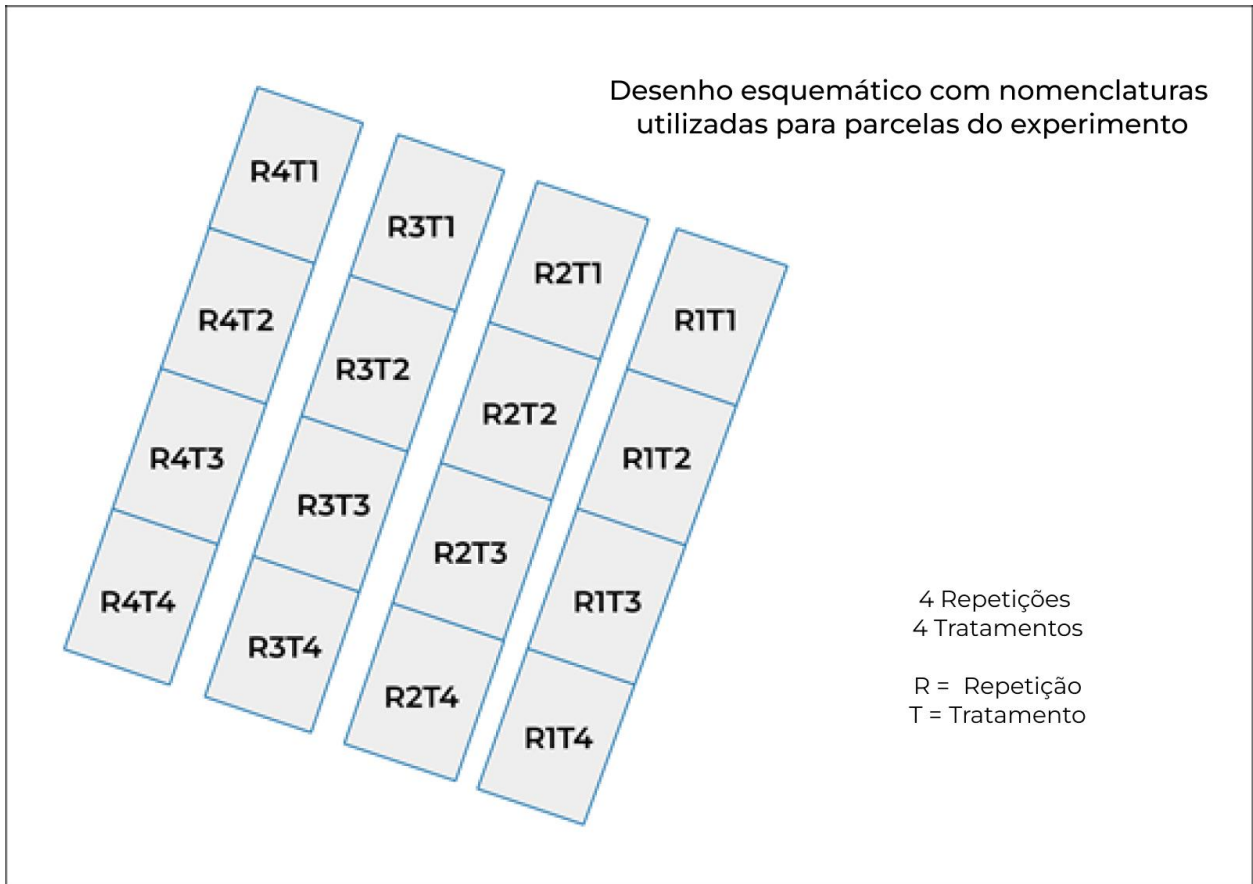
Os ortomosaicos foram inseridos no *QGIS 3.22*, um *software* de sistema de informações geográficas de código aberto, no qual é possível realizar manipulações sobre as imagens e aplicar modelos geoestatísticos e matemáticos por meio das bandas espectrais das imagens.

Foi realizada a correção de posicionamento dos 12 mapeamentos realizados, com a ferramenta 'georreferenciador' no *QGIS 3.22*[®], sendo acessada na barra de ferramentas, raster, e então inseridos os imageamentos e com ponto de correção selecionado, realizou-se a correção de posição dos mapeamentos. Posteriormente foram demarcados os limites externos do experimento e realizados os recortes dos 12 imageamentos com a ferramenta 'recortar raster pela camada de máscara', sendo acessado na barra de ferramentas, raster, extrair, e então selecionado o imageamento e a área de recorte.

Após os recortes, realizamos a conversão de pixels do arquivo raster para pontos vetoriais, com o uso da ferramenta acessada na caixa de ferramentas de processamento, criação de vetor, pixels de raster para pontos, que para a realização inserimos o raster a ser transformado e a banda de interesse na transformação, e assim obtemos as malhas de pontos dos imageamentos para cada uma das três bandas espectrais do visível RGB.

Com os pontos das bandas, delimitou-se no *software QGIS 3.22*[®] as parcelas dentro de cada bloco da repetição, para que fosse possível obter os valores de interesse de cada parcela, e foram atribuídas siglas de identificação para cada uma como mostra a Figura 9.

Figura 9. Nomenclatura atribuída para as parcelas do experimento



Fonte: Autores (2023)

Tendo delimitado as áreas de interesse, foram realizados os recortes por parcelas com a ferramenta recortar, sendo encontrada na barra de ferramentas em vetor, geoprocessamento.

Então foi realizada a exportação do conjunto de dados dos pontos de cada parcela em formato de planilha eletrônica com extensão .xlsx, e realizado o cálculo do valor médio de atributo para cada parcela avaliada, e nesse experimento para otimização do tempo, o cálculo de médias foi realizado com auxílio de um script em linguagem de programação Python, que retornou uma nova planilha com valores médios de cada uma das parcelas com as três bandas espectrais.

3.5 AVALIAÇÃO BIOFÍSICA DA CULTURA

A coleta de dados sobre as condições biofísicas da cultura foi realizada no dia 17/01/2023, em que foram avaliados aspectos da cultura dentre eles:

- Produtividade (kg ha^{-1});
- Altura da planta (cm);
- Diâmetro do colmo (cm);
- Altura da inserção da espiga (cm);
- Comprimento da espiga (cm);
- Número de fileiras por espiga;
- Número de grãos por fileira; e
- Teor de água do grão (%).

As medições de altura da planta, altura da inserção da espiga e comprimento da espiga foram realizadas com auxílio de uma trena, e para medir o diâmetro do colmo foi utilizado um paquímetro. A contagem de fileiras por espiga e grãos por fileira foi realizada de forma manual, e para os valores de umidade no milho foi utilizado o medidor de umidade de grãos.

O cálculo de produtividade foi realizado com área útil na colheita de 4 m^2 por parcela, e então convertido a produtividade para quilogramas por hectare, e posteriormente realizada a correção de produtividade considerando o teor de água do grão para 13%, essa correção foi realizada com uso da equação Equação 2.

$$\text{Correção de produtividade} = MT * \frac{100 - TAG}{100 - DU} \quad (2)$$

Em que:

MT = Massa total (Kg)

TAG = Teor de água no grão (%)

DU = Desconto de umidade padrão da cultura (13 %)

3.6 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Os índices de vegetação identificam locais com maior sanidade das plantas, um exemplo bem conhecido é o NDVI, porém utiliza a banda do infravermelho que sensores comuns não tem por ser um sensor com tecnologia de alto custo. Foram utilizados para a realização dos mapas e das análises os índices GLI, VARI, VEG e GRVI, que são índices que utilizam equações que englobam apenas as bandas do espectro do visível, como é observado na tabela 2, com os respectivos criadores dos índices de vegetação.

Tabela 2 Índices de vegetação utilizados para as análises

ÍNDICE	EQUAÇÃO	FONTE
GLI	$\frac{2GREEN - RED - BLUE}{2GREEN + RED + BLUE}$	Hunt et al. 2011
VARI	$\frac{GREEN - RED}{GREEN + RED - BLUE}$	Gitelson et al. 2002
VEG	$\frac{GREEN}{RED * 0,667 * -BLUE^{(1-0,667)}}$	Marchant e Onyango 2002
GRVI	$\frac{GREEN - RED}{GREEN + RED}$	Tucker 1979

GLI (*Ground Level Image Analysis*), VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index*), VEG (*Vegetative Index*) e GRVI (*Green Ratio Vegetation Index*), GREEN (verde), RED (vermelho), BLUE (azul).

Fonte: Autores (2023)

3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises estatísticas dos dados coletados no experimento foram feitas com diferentes tecnologias disponíveis para análises, que possibilitaram a realização de testes de regressão polinomial, análise de variância (ANOVA), e correlação de Pearson.

Uma das ferramentas utilizadas foi o Google Colaboratory ou também chamado Colab, que é um local de desenvolvimento em nuvem fornecido pelo Google para escrever e executar códigos em linguagem Python, que por meio desses códigos

obtemos dados como a correlação de Pearson e os resultados oriundos dessa correlação foram expressos em representações de Heat map.

O Minitab é um *software* estatístico que foi utilizado para fazer análise descritiva, teste de normalidade por Ryan-Joiner (RJ) em que o valor-P se maior que 0,10 (>10%) a distribuição foi normal, e se o valor-P for menor que 10 (<10%) a distribuição não foi normal. Além disso, foi realizado neste mesmo software, a análise de variância (ANOVA) por meio do General Linear model. Quanto aos testes de comparação de média, para os testes F significativos a nível de 5% foi usado os testes: *Kruskal-Wallis* (dados não paramétricos) e Tukey (dados paramétricos). Para a criação de *box plot* e realização de Regressão polinomial foi utilizado o *software* Excel.

3.8 ELABORAÇÃO DE MAPAS

Os mapas foram elaborados para realizar a representação visual dos dados gerados, e demonstrar as variáveis dos imageamentos, portanto, foram gerados os mapas para os seis mapeamentos mais representativos, que foram as datas 3, 4, 6, 7, 9 e 10, e como produtos foram elaborados mapas para as ortofotos, as bandas espectrais do vermelho e do verde, e também para os índices de vegetação VARI E GRVI que obtiveram maior representatividade.

As classificações para a representação das bandas espectrais partiram dos pontos vetoriais para cada uma das bandas, sendo utilizadas nessa amostragem apenas os pontos das bandas do verde e vermelho. Para a classificação foi selecionada a classificação de “graduado”, selecionando valores das bandas respectivas, para o gradiente de cor foi selecionado uma rampa de cores do vermelho para o verde com nome “RdYIGn”, e modo de “Iguar contagem (Quartil)” com “5 classes”.

Para os índices de vegetação VARI e GRVI por meio da “calculadora raster” foram aplicadas as equações dos IVs com as bandas das ortofoto, que gera um arquivo raster de banda única que é realizada a classificação. Para a classificação de ambas utilizamos os parâmetros de tipo de renderização em “Banda simples falsa-cor”, em interpolação foi utilizado “Método Discreto”, como gradiente de cores “RdYIGn”, o parâmetro Modo em “Quartil” com “5 classes”.

Por meio do “gerenciador de layout” foi inserido o mapa, escala, orientação norte, legenda e título para cada mapa gerado, totalizando 30 mapas gerados entre as ortofotos, índices de vegetação e bandas espectrais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão mostrados os resultados obtidos por meio da realização desta pesquisa, em que serão apresentados o comportamento espectral temporal por meio de análises estatísticas, como: a análise descritiva, *box plots*, ANOVA, correlação de Pearson, gráficos de regressão e avaliação visual dos mapas fazendo associação com os dados estatísticos apresentados.

4.1 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO CULTIVO EM FUNÇÃO DA VARIABILIDADE TEMPORAL

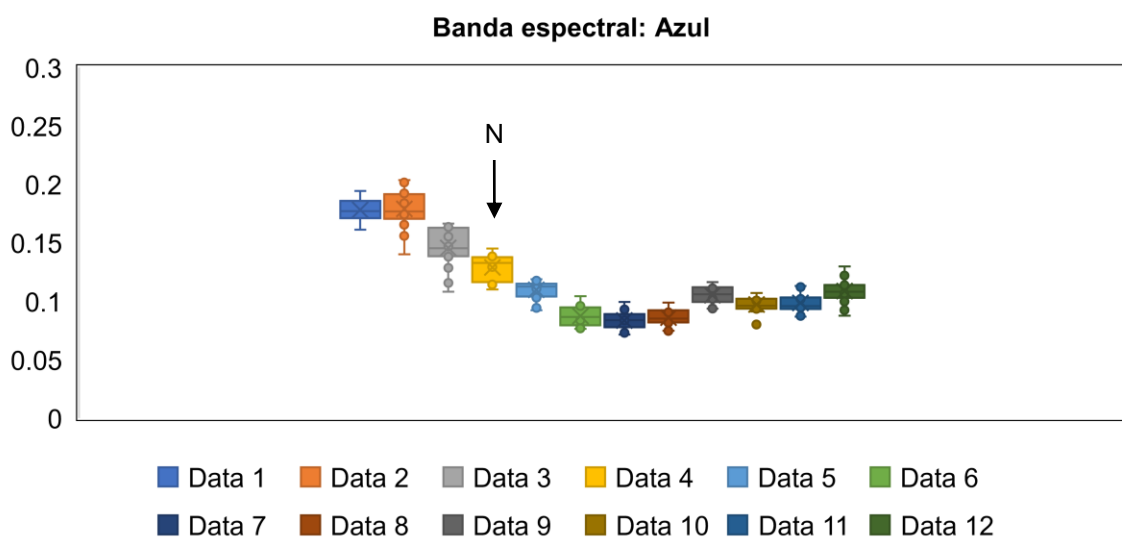
Nessa seção apresentamos os resultados obtidos por meio do *box plot* que mostra a variabilidade do monitoramento temporal de reflectância para cada data imageada, sendo apresentados dados para bandas espectrais do RGB e também para os índices de vegetação.

Essa análise conta com valores de média, erro padrão médio, desvio padrão, coeficiente de variação, mínima, mediana, máxima, teste de normalidade Ryan-Joiner (RJ) e P-valor do RJ, sendo que para distribuições normais o parâmetro de localização a ser usado é o valor da média, e em contrapartida para distribuição não normais é utilizado o valor da mediana.

Para a banda do azul podemos observar, na Figura 10, comportamento de maneira linear e uniforme na avaliação durante as datas, demonstrando queda nos mapeamentos das datas 1 a 6 e posterior aumento sutil até a data 12, o que mostra nessa queda a absorção da reflectância pelas folhas da cultura. Ao avaliar a variação dentro de cada data, identificamos a variação mais significativa nas datas 2, 3 e 4, apresentando também alguns *outliers* (pontos discrepantes), que mostram uma grande diferença de dados.

Segundo Cunha (2004) a reflectância é influenciada nos estádios de desenvolvimento iniciais, pois o dossel não está formado, sendo um bom parâmetro para a caracterização da formação do dossel, dessa forma não é possível avaliar somente a cultura em questão, sendo influenciados por valores do solo juntamente.

Figura 10 Comportamento espectral do cultivo no comprimento de onda na faixa do azul em função da variabilidade temporal



Épocas avaliadas	Média	SE Média	Desvio Padrão	CV	Min	Med	Max	RJ	P-valor
Data 1	0,178	0,003	0,010	5,860	0,161	0,177	0,194	0,985 ^N	>0,100
Data 2	0,179	0,004	0,017	9,570	0,140	0,177	0,204	0,978 ^N	>0,100
Data 3	0,146	0,004	0,018	12,070	0,108	0,145	0,166	0,963 ^N	>0,100
Data 4	0,129	0,003	0,011	8,880	0,110	0,133	0,145	0,963 ^N	>0,100
Data 5	0,110	0,002	0,008	7,490	0,092	0,113	0,119	0,942 ^{SN}	0,055
Data 6	0,087	0,002	0,008	9,540	0,076	0,086	0,104	0,980 ^N	>0,100
Data 7	0,084	0,002	0,008	9,600	0,071	0,084	0,099	0,988 ^N	>0,100
Data 8	0,086	0,002	0,007	7,850	0,075	0,085	0,099	0,987 ^N	>0,100
Data 9	0,105	0,002	0,008	7,200	0,094	0,106	0,116	0,983 ^N	>0,100
Data 10	0,097	0,002	0,006	6,680	0,080	0,096	0,107	0,955 ^N	>0,100
Data 11	0,098	0,002	0,008	8,020	0,087	0,096	0,113	0,980 ^N	>0,100
Data 12	0,109	0,003	0,011	9,680	0,088	0,108	0,130	0,987 ^N	>0,100

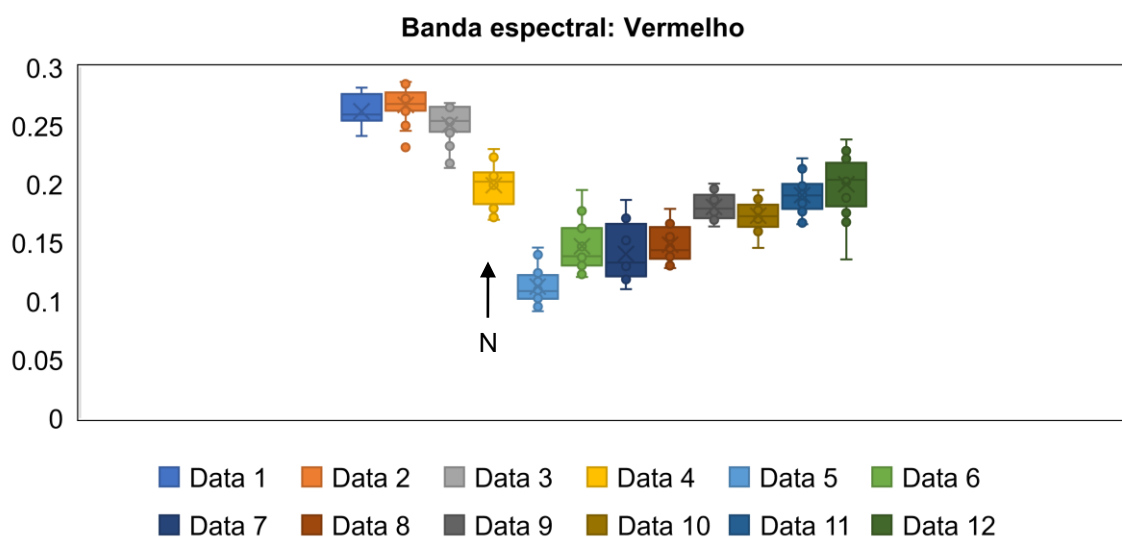
SE Média: erro padrão da média, CV: coeficiente de variação, min: mínimo, max: máximo, RJ: teste de normalidade Ryan-Joiner, ^N: Distribuição normal dos dados conforme o teste de RJ, ^{SN}: Distribuição não normal dos dados conforme o teste de RJ, N: data que foi realizada a aplicação de nitrogênio.

Fonte autores (2023)

No comportamento espectral da banda do vermelho na Figura 11, é observado que a absorção de reflectância dessa faixa é mais acentuada da data 1 até a 5, apresentando uma grande variação de dados em praticamente todas as datas imageadas, em especial datas as 6, 7 e 12 que mostram maiores variações devido aos estádios de desenvolvimento da cultura, estando em V6, V7 e R5 respectivamente, e portanto segundo Sousa (2015) a relação de maior quantidade de clorofila nas folhas da planta de milho é encontrada no estágio V7, o que pode estar associado a essa grande variabilidade, e para o estágio R5, pode ser a variabilidade decorrente da senescência natural, como também fatores extrínsecos como a seca que ocorreu durante o ciclo.

O fator dessa grande diferença na reflectância é devido ao comportamento da absorção da clorofila na planta, em que a radiação luminosa pode ser refletida, absorvida ou transmitida, e portanto quando a planta esta com bom nível de sanidade ela tem maior absorção dessa radiação, principalmente da banda do vermelho e do verde, e ao sofrer algum estresse fisiológico como exemplo o nutricional, ela acaba refletindo maior parte dessa radiação luminosa.

Figura 11 Comportamento espectral do cultivo no comprimento de onda na faixa do vermelho em função da variabilidade temporal.



Épocas avaliadas	Média	SE Média	Desvio Padrão	CV	Min	Med	Max	RJ	P-valor
Data 1	0,263	0,003	0,013	5,100	0,241	0,260	0,283	0,971 ^N	>0,100
Data 2	0,268	0,004	0,015	5,700	0,232	0,269	0,288	0,964 ^N	>0,100
Data 3	0,251	0,004	0,017	6,800	0,214	0,254	0,270	0,942 ^{SN}	0,056
Data 4	0,199	0,004	0,017	8,760	0,170	0,202	0,230	0,979 ^N	>0,100
Data 5	0,112	0,004	0,015	13,450	0,091	0,109	0,146	0,964 ^N	>0,100
Data 6	0,147	0,006	0,023	15,350	0,121	0,139	0,195	0,958 ^N	>0,100
Data 7	0,140	0,006	0,024	16,850	0,110	0,133	0,187	0,941 ^{SN}	0,049
Data 8	0,148	0,004	0,016	10,670	0,128	0,144	0,179	0,964 ^N	>0,100
Data 9	0,181	0,003	0,012	6,390	0,164	0,179	0,201	0,967 ^N	>0,100
Data 10	0,173	0,003	0,013	7,330	0,145	0,173	0,195	0,989 ^N	>0,100
Data 11	0,191	0,004	0,015	8,040	0,166	0,191	0,222	0,991 ^N	>0,100
Data 12	0,200	0,007	0,026	13,090	0,136	0,204	0,238	0,963	>0,100

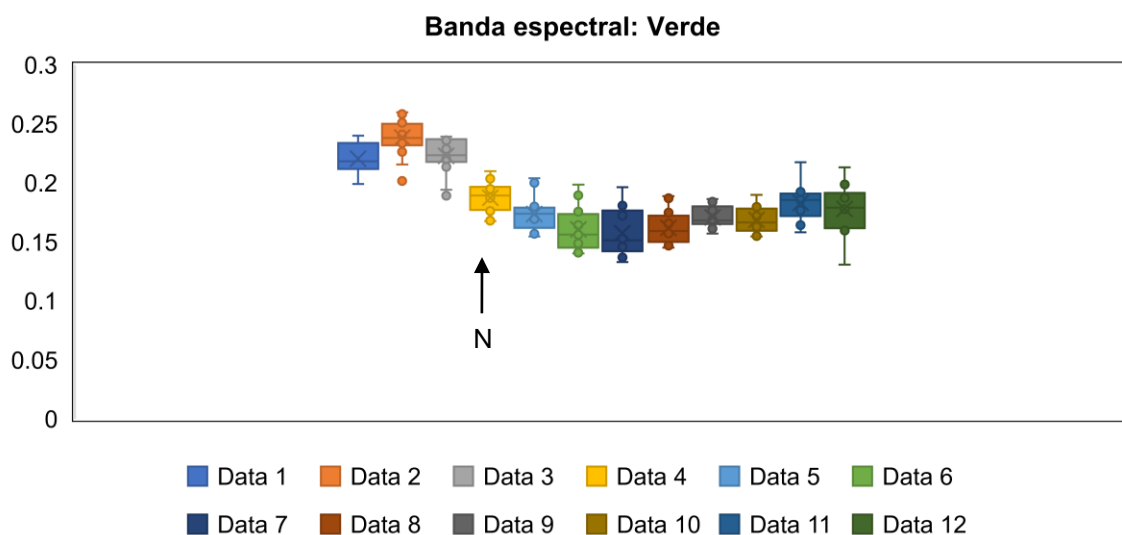
SE Média: erro padrão da média, CV: coeficiente de variação, min: mínimo, max: máximo, RJ: teste de normalidade Ryan-Joiner, ^N: Distribuição normal dos dados conforme o teste de RJ, ^{SN}: Distribuição não normal dos dados conforme o teste de RJ, N: data que foi realizada a aplicação de nitrogênio.

Fonte autores (2023)

Para a banda espectral do verde na Figura 12, é observado o comportamento temporal da reflectância é mais uniforme do que no vermelho, em que não são obtidas variações tão expressivas de reflectância, porém apresentam variações nos quartis dos imageamentos 6, 7 e 12. Com a aplicação do nitrogênio em forma de ureia, no estádio v4, essa maior variabilidade está atrelada ao fechamento do dossel pela planta e também pela relação da absorção de nitrogênio pela cultura.

Nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura possui a influência da reflectância do solo, afetando a leitura de reflectância da planta, devido a planta está com pequena altura, baixo índice de área foliar e por ainda o seu dossel não ter coberto totalmente o solo (Povh et al., 2008), por isso os valores médios nas datas iniciais imageadas foram altos. Com o passar do tempo foi verificado a diminuição da reflectância, fato esse que pode ser explicado devido ao crescimento da parte aérea, aumento da quantidade de cloroplastos sendo esses os responsáveis pela absorção e reflectância dos comprimentos de onda, que parte deles vão ser absorvidos e a outra parte refletida. O comprimento de onda na região do verde possui maior reflectância do que aos demais comprimentos de onda na região do visível (Figura 1), por isso o olho humano enxerga as plantas na coloração verde.

Figura 12 Comportamento espectral do cultivo no comprimento de onda na faixa do verde em função da variabilidade temporal.



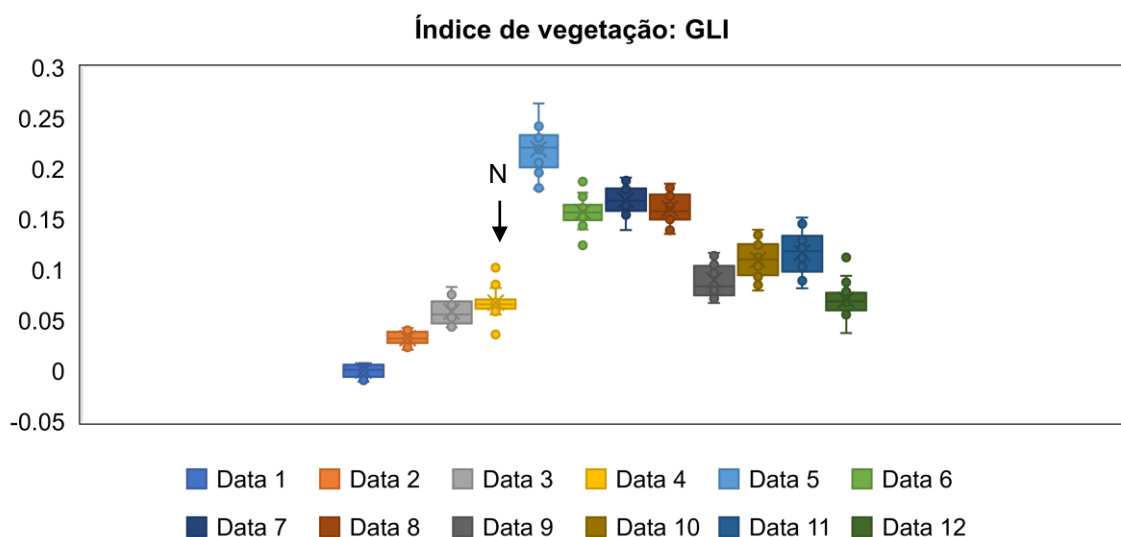
Épocas avaliadas	Média	SE Média	Desvio Padrão	CV	Min	Med	Max	RJ	P-valor
Data 1	0,221	0,003	0,012	5,530	0,199	0,218	0,240	0,978 ^N	>0,100
Data 2	0,238	0,004	0,016	6,570	0,202	0,238	0,260	0,971 ^N	>0,100
Data 3	0,223	0,004	0,015	6,650	0,189	0,224	0,239	0,939 ^{SN}	0,047
Data 4	0,188	0,003	0,013	6,730	0,168	0,189	0,210	0,986 ^N	>0,100
Data 5	0,174	0,003	0,014	7,910	0,155	0,174	0,204	0,953 ^N	0,100
Data 6	0,161	0,004	0,018	11,030	0,140	0,156	0,198	0,965 ^N	>0,100
Data 7	0,157	0,005	0,019	12,130	0,133	0,151	0,196	0,958 ^N	>0,100
Data 8	0,162	0,003	0,014	8,490	0,145	0,159	0,189	0,965 ^N	>0,100
Data 9	0,171	0,002	0,009	5,090	0,157	0,168	0,186	0,970 ^N	>0,100
Data 10	0,169	0,003	0,011	6,450	0,154	0,167	0,190	0,979 ^N	>0,100
Data 11	0,183	0,004	0,014	7,820	0,158	0,186	0,218	0,966 ^N	>0,100
Data 12	0,178	0,005	0,020	11,310	0,131	0,179	0,213	0,972 ^N	>0,100

SE Média: erro padrão da média, CV: coeficiente de variação, min: mínimo, max: máximo, RJ: teste de normalidade Ryan-Joiner, ^N: Distribuição normal dos dados conforme o teste de RJ, ^{SN}: Distribuição não normal dos dados conforme o teste de RJ, N: data que foi realizada a aplicação de nitrogênio.

Fonte autores (2023)

Nas avaliações dos índices de vegetação é possível observar que o comportamento é inverso, por se tratar de um índice normalizado, dessa forma, a diferença entre os mapeamentos foi maior. O que pode-se analisar do índice de vegetação GVI da Figura 13 é que nos mapeamentos das datas 1 até 4 houve acréscimo na reflectância, devido ao desenvolvimento da cultura e conseqüentemente aumento da área foliar, porém o valor de maior interesse está no mapeamento da data 5, no qual apresentou maior variação do que as demais datas, visto que a aplicação de nitrogênio ocorreu na data próximo ao imageamento da data 4 em estágio V4, mostrando que a maior variabilidade foi observado na semana posterior a aplicação de ureia, e os mapeamentos das datas 6, 7 e 8 apresentaram resultados muito semelhantes, e por fim, nas últimas datas 9, 10, 11 e 12 os valores tendem a diminuir em virtude da senescência natural e menores quantidades de cloroplastos da cultura ao final do ciclo.

Figura 13 Comportamento espectral do cultivo do índice de vegetação GLI (Green Leaf Index) da variabilidade temporal



Épocas avaliadas	Média	SE Média	Desvio Padrão	CV	Min	Med	Max	RJ	P-valor
Data 1	0,000	0,002	0,006	1373,870	-0,010	0,001	0,008	0,960 ^N	>0,100
Data 2	0,033	0,002	0,006	19,340	0,021	0,032	0,043	0,986 ^N	>0,100
Data 3	0,059	0,003	0,013	22,330	0,043	0,056	0,083	0,968 ^N	>0,100
Data 4	0,068	0,004	0,014	21,050	0,036	0,066	0,102	0,933 ^{SN}	0,038
Data 5	0,220	0,006	0,023	10,610	0,180	0,221	0,265	0,989 ^N	>0,100
Data 6	0,158	0,004	0,015	9,460	0,125	0,157	0,187	0,983 ^N	>0,100
Data 7	0,169	0,004	0,014	8,280	0,139	0,169	0,191	0,981 ^N	>0,100
Data 8	0,161	0,004	0,016	9,690	0,136	0,158	0,185	0,982 ^N	>0,100
Data 9	0,090	0,004	0,016	18,280	0,067	0,084	0,117	0,968 ^N	>0,100
Data 10	0,110	0,004	0,018	16,110	0,080	0,110	0,140	0,993 ^N	>0,100
Data 11	0,117	0,005	0,021	17,640	0,082	0,119	0,152	0,992 ^N	>0,100
Data 12	0,071	0,004	0,017	24,560	0,038	0,069	0,112	0,961 ^N	>0,100

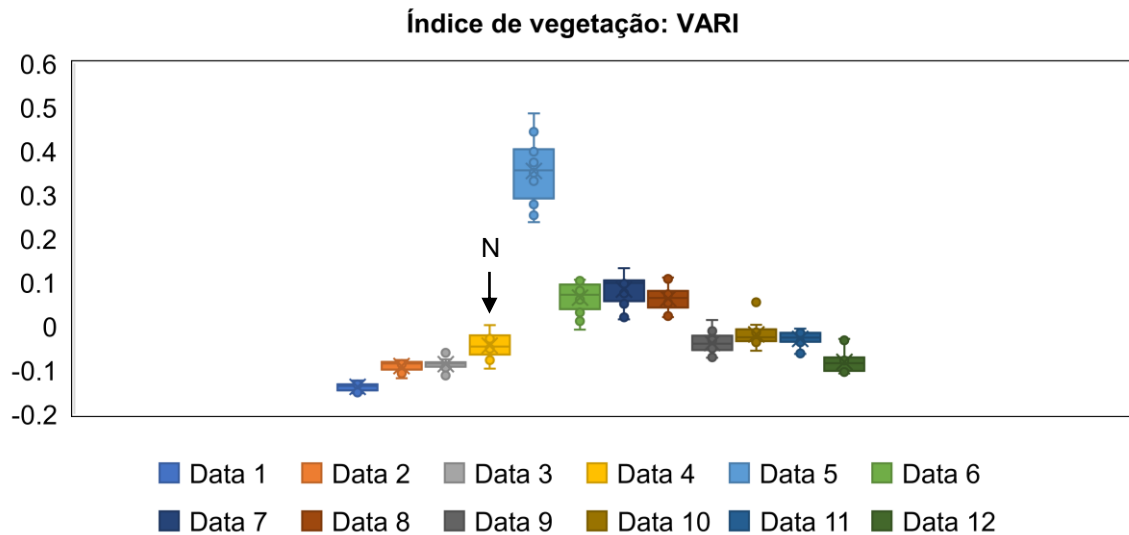
SE Média: erro padrão da média, CV: coeficiente de variação, min: mínimo, max: máximo, RJ: teste de normalidade Ryan-Joiner, ^N: Distribuição normal dos dados conforme o teste de RJ, ^{SN}: Distribuição não normal dos dados conforme o teste de RJ, N: data que foi realizada a aplicação de nitrogênio.

Fonte autores (2023)

Para o índice de vegetação VARI como visto na Figura 14, o comportamento é muito semelhante ao observado no índice anterior, com uma discrepância na variação dos valores médios do imageamento da data 5, as quatro datas iniciais imageadas (data 1 ao 4) não possui tanta variabilidade devido a pouca área foliar disponível. A data 5 se destacou devido ao aumento da variabilidade, como foi mencionado anteriormente, fato esse que pode ser explicado devido a adução nitrogenada, no qual sabe-se que o nitrogênio tem correlação direta com aumento da taxa fotossintética da planta bem como ocasiona o aumento da reflectância.

Além disso, pode-se observar que a partir da data 5 em diante ocorre crescente aumento nos valores de refletância, uma estabilização entre as datas 6 a 8 e por fim, valores tendem a diminuir no final do ciclo nas 4 últimas datas. Da mesma forma podemos observar que para o índice de vegetação VEG apresentado na Figura 15, a semelhança se mantém com o destaque da data 5 que apresenta grande diferença da data 4, e também é possível observar que a diferença dos quartis da data 5 é maior que de todas as demais datas.

Figura 14 Comportamento espectral do cultivo do índice de vegetação VARI (Visible Atmosphericly Resistant Index) da variabilidade temporal.

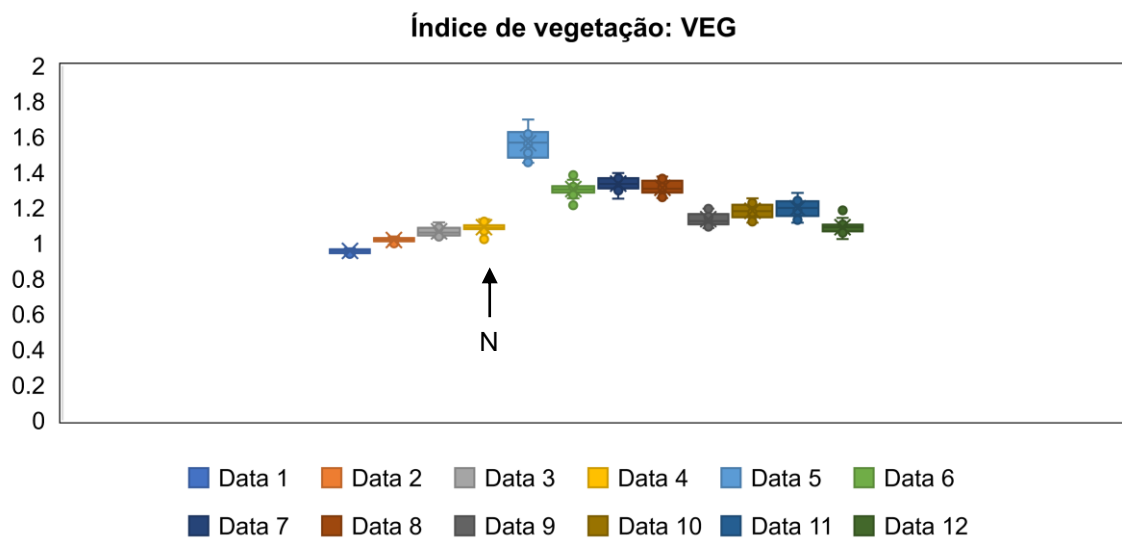


Épocas avaliadas	Média	SE Média	Desvio Padrão	CV	Min	Med	Max	RJ	P-valor
Data 1	-0,138	0,002	0,008	-6,100	-0,153	-0,136	-0,123	0,977 ^N	>0,100
Data 2	-0,090	0,003	0,012	-12,970	-0,118	-0,085	-0,077	0,945 ^{SN}	0,066
Data 3	-0,086	0,003	0,011	-12,540	-0,112	-0,084	-0,060	0,938 ^{SN}	0,045
Data 4	-0,044	0,006	0,026	-58,800	-0,096	-0,046	0,003	0,986 ^N	>0,100
Data 5	0,355	0,017	0,069	19,350	0,238	0,356	0,486	0,986 ^N	>0,100
Data 6	0,066	0,009	0,034	51,890	-0,007	0,072	0,107	0,957 ^N	>0,100
Data 7	0,084	0,009	0,035	41,240	0,016	0,099	0,133	0,934 ^{SN}	0,038
Data 8	0,064	0,007	0,026	41,120	0,021	0,065	0,111	0,985 ^N	>0,100
Data 9	-0,038	0,006	0,023	-59,630	-0,072	-0,040	0,014	0,982 ^N	>0,100
Data 10	-0,018	0,006	0,025	-137,440	-0,055	-0,025	0,055	0,910 ^N	<0,010
Data 11	-0,028	0,005	0,019	-65,950	-0,063	-0,026	-0,005	0,962 ^N	>0,100
Data 12	-0,081	0,006	0,024	-29,100	-0,107	-0,084	-0,029	0,929 ^{SN}	0,032

SE Média: erro padrão da média, CV: coeficiente de variação, min: mínimo, max: máximo, RJ: teste de normalidade Ryan-Joiner, ^N: Distribuição normal dos dados conforme o teste de RJ, ^{SN}: Distribuição não normal dos dados conforme o teste de RJ, N: data que foi realizada a aplicação de nitrogênio.

Fonte autores (2023)

Figura 15 Comportamento espectral do cultivo do índice de vegetação VEG (Vegetativen Index) da variabilidade temporal.



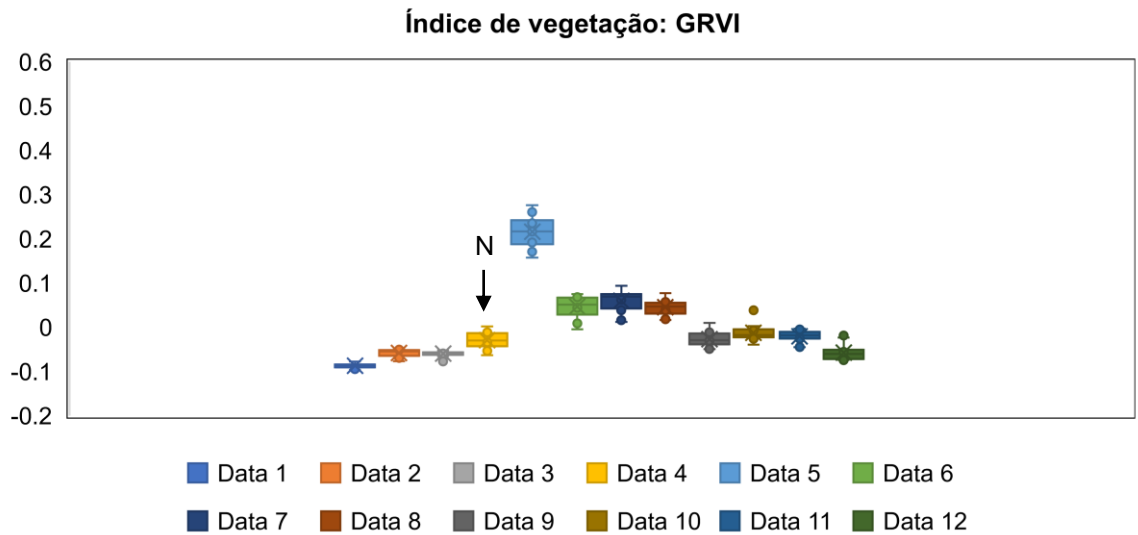
Épocas avaliadas	Média	SE Média	Desvio Padrão	CV	Min	Med	Max	RJ	P-valor
Data 1	0,956	0,003	0,011	1,180	0,937	0,957	0,971	0,957 ^N	>0,100
Data 2	1,018	0,003	0,012	1,170	0,993	1,019	1,038	0,977 ^N	>0,100
Data 3	1,066	0,007	0,027	2,510	1,032	1,059	1,118	0,972 ^N	>0,100
Data 4	1,091	0,008	0,031	2,880	1,023	1,086	1,165	0,946 ^{SN}	0,071
Data 5	1,563	0,019	0,076	4,860	1,453	1,567	1,698	0,983 ^N	>0,100
Data 6	1,305	0,010	0,041	3,120	1,214	1,304	1,384	0,983 ^N	>0,100
Data 7	1,336	0,010	0,039	2,920	1,252	1,335	1,396	0,979 ^N	>0,100
Data 8	1,313	0,010	0,038	2,920	1,256	1,307	1,375	0,981 ^N	>0,100
Data 9	1,136	0,009	0,036	3,180	1,084	1,124	1,195	0,970 ^N	>0,100
Data 10	1,182	0,011	0,042	3,540	1,115	1,180	1,253	0,990 ^N	>0,100
Data 11	1,197	0,012	0,050	4,160	1,116	1,200	1,284	0,992 ^N	>0,100
Data 12	1,091	0,009	0,038	3,450	1,023	1,091	1,184	0,956 ^N	>0,100

SE Média: erro padrão da média, CV: coeficiente de variação, min: mínimo, max: máximo, RJ: teste de normalidade Ryan-Joiner, ^N: Distribuição normal dos dados conforme o teste de RJ, ^{SN}: Distribuição não normal dos dados conforme o teste de RJ, N: data que foi realizada a aplicação de nitrogênio.

Fonte autores (2023)

Para o índice de vegetação GRVI visto na Figura 16, a semelhança com os demais índices se mantém, apresentando mesmo comportamento quanto a reflectância das bandas. Portanto, quando pensamos nas melhores datas a ser imageada na cultura do milho são as que demonstraram maiores variabilidade, pois quanto maior esse valor mais detalhamento tem-se na identificação de heterogeneidade na área. De forma geral, as datas que possuíram maiores variabilidade foram: 5, 7, 10, 11 e 12. Nas datas iniciais houve pouca variabilidade devido ao porte da planta.

Figura 16 Comportamento espectral do cultivo do índice de vegetação GRVI (Green-Red Vegetation Index) da variabilidade temporal.



Épocas avaliadas	Média	SE Média	Desvio Padrão	CV	Min	Med	Max	RJ	P-valor
Data 1	-0,087	0,001	0,005	-5,630	-0,096	-0,086	-0,078	0,982 ^N	>0,100
Data 2	-0,058	0,002	0,008	-14,190	-0,077	-0,055	-0,050	0,947 ^N	0,075
Data 3	-0,059	0,002	0,007	-12,000	-0,078	-0,059	-0,043	0,934 ^{SN}	0,040
Data 4	-0,029	0,004	0,017	-59,270	-0,063	-0,030	0,002	0,986 ^N	>0,100
Data 5	0,216	0,008	0,034	15,740	0,157	0,216	0,276	0,992 ^N	>0,100
Data 6	0,047	0,006	0,024	51,440	-0,005	0,051	0,075	0,957 ^N	>0,100
Data 7	0,060	0,006	0,024	40,310	0,012	0,069	0,094	0,936 ^{SN}	0,042
Data 8	0,045	0,004	0,017	38,360	0,016	0,046	0,077	0,982 ^N	>0,100
Data 9	-0,027	0,004	0,016	-59,850	-0,050	-0,029	0,010	0,981 ^N	>0,100
Data 10	-0,013	0,004	0,017	-133,750	-0,039	-0,017	0,038	0,915 ^N	<0,010
Data 11	-0,021	0,003	0,013	-64,660	-0,046	-0,019	-0,004	0,965 ^N	>0,100
Data 12	-0,058	0,004	0,017	-29,110	-0,074	-0,060	-0,019	0,923 ^{SN}	0,022

SE Média: erro padrão da média, CV: coeficiente de variação, min: mínimo, max: máximo, RJ: teste de normalidade Ryan-Joiner, ^N: Distribuição normal dos dados conforme o teste de RJ, ^{SN}: Distribuição não normal dos dados conforme o teste de RJ, N: data que foi realizada a aplicação de nitrogênio.

Fonte autores (2023)

4.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Os resultados para a análise de variância (Tabela 3) obtidos foram a partir de valores utilizados da última data imageada (data 12) devido aos parâmetros biofísicos da cultura terem sido coletados próximos dessa data, e foram analisados pelo teste F e quando significativo foi realizado teste de comparação de média conforme a distribuição de normalidade de dados que pode ser visto nas análises descritivas.

Tabela 3 Dados sobre os parâmetros dos componentes biofísicos avaliados (Continua)

Produtividade					
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	P-Valor
Blocos	3	360046	120015	1,24 ^{NS}	0,352
Tratamentos	3	25409	8470	0,09 ^{NS}	0,965
Resíduo	9	872913	96990		
Total	15	1258367			
Altura de plantas					
Blocos	3	93,66	31,22	0,17 ^{NS}	0,915
Tratamentos	3	281,14	93,71	0,50 ^{NS}	0,689
Resíduo	9	1675,12	186,12		
Total	15	2049,92			
Diâmetro do colmo					
Blocos	3	0,3871	0,129	0,78 ^{NS}	0,532
Tratamentos	3	0,3232	0,1077	0,65 ^{NS}	0,600
Resíduo	9	1,4805	0,1645		
Total	15	2,1908			
Altura de inserção da primeira espiga					
Blocos	3	124,75	41,58	0,24 ^{NS}	0,868
Tratamentos	3	91,92	30,64	0,18 ^{NS}	0,911
Resíduo	9	1575,58	175,06		
Total	15	1792,24			
Comprimento da espiga					
Blocos	3	0,3579	0,1193	0,21 ^{NS}	0,884
Tratamentos	3	1,4764	0,4921	0,88 ^{NS}	0,486
Resíduo	9	5,0221	0,558		
Total	15	6,8564			
Número de fileiras por espiga versus Tratamento,Bloco					
Blocos	3	0,3579	0,1193	0,31 ^{NS}	0,816
Tratamentos	3	1,0322	0,3441	0,90 ^{NS}	0,477
Resíduo	9	3,4321	0,3813		
Total	15	4,8222			
Número de grãos por fileiras					
Blocos	3	0,6779	0,226	1,17 ^{NS}	0,373
Tratamentos	3	0,8767	0,2922	1,52 ^{NS}	0,276
Resíduo	9	1,7338	0,1926		
Total	15	3,2883			

Tabela 3 Dados sobre os parâmetros dos componentes biofísicos avaliados (Conclusão)

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	P-Valor
Teor de água no grão					
Blocos	3	0,3805	0,1268	0,86 ^{NS}	0,494
Tratamentos	3	0,613	0,2043	1,39 ^{NS}	0,307
Resíduo	9	1,3214	0,1468		
Total	15	2,3148			
Banda espectral do azul					
Blocos	3	0,000507	0,000169	1,71 ^{NS}	0,234
Tratamentos	3	0,000264	0,000088	0,89 ^{NS}	0,482
Resíduo	9	0,00089	0,000099		
Total	15	0,001661			
Banda espectral do vermelho					
Blocos	3	0,003334	0,001111	2,84 ^{NS}	0,098
Tratamentos	3	0,003434	0,001145	2,93 ^{NS}	0,092
Resíduo	9	0,003515	0,000391		
Total	15	0,010283			
Banda espectral do verde					
Blocos	3	0,002369	0,00079	3,09 ^{NS}	0,083
Tratamentos	3	0,001398	0,000466	1,82 ^{NS}	0,213
Resíduo	9	0,002301	0,000256		
Total	15	0,006067			
GLI (<i>Green Leaf Index</i>)					
Blocos	3	0,001326	0,000442	1,64 ^{NS}	0,249
Tratamentos	3	0,00075	0,00025	0,92 ^{NS}	0,467
Resíduo	9	0,002432	0,00027		
Total	15	0,004508			
VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>)					
Blocos	3	0,001716	0,000572	2,79 ^{NS}	0,102
Tratamentos	3	0,004767	0,001589	7,75 ^{**}	0,007
Resíduo	9	0,001845	0,000205		
Total	15	0,008328			
VEG (<i>Vegetativen Index</i>)					
Blocos	3	0,006234	0,002078	1,71 ^{NS}	0,233
Tratamentos	3	0,004131	0,001377	1,14 ^{NS}	0,386
Resíduo	9	0,010915	0,001213		
Total	15	0,02128			
GRVI (<i>Green-Red Vegetation Index</i>)					
Blocos	3	0,000826	0,000275	3,00 ^{NS}	0,088
Tratamentos	3	0,002568	0,000856	9,33 ^{**}	0,004
Resíduo	9	0,000826	0,000092		
Total	15	0,00422			

F.V.: Fontes de Variação; G.L.: Grau de Liberdade; S.Q.: Soma dos Quadrados; Q.M.: Quadrado Médio; F: Teste de hipótese; ^{NS}: não significativo a nível de 5% de probabilidade (p-valor > 0,05); ^{**}: significativo a nível de 1% de probabilidade (p-valor < 0,01); ^{*}: significativo a nível de 5% (p-valor < 0,05).

Fonte: Autor (2023)

Pela análise de variância foi observado que não houve diferença estatística pelo teste F entre os tratamentos e blocos para as características biofísicas da cultura e as bandas espectrais da região do visível RGB (R – vermelho, G – verde e B - azul), mostrando que apenas uma aplicação de cobertura com nitrogênio não ocasionou impacto significativo entre os tratamentos mesmo em condições de chuva pós aplicação, e possivelmente não apresentou diferença significativa devido aos efeitos climáticos da escassez hídrica durante o desenvolvimento da cultura.

Quanto aos índices de vegetação os que tiveram resultados promissores foram o VARI e o GRVI no qual houve diferença estatística entre os tratamentos. Vale ressaltar que a data utilizada foi última por isso dificultou resultados melhores para as bandas espectrais e aos demais índices que deve ser investigado esse comportamento espectral ao longo do tempo como foi demonstrado nos *box plot*, resultados muito interessantes ao longo do desenvolvimento da cultura e ainda dando suporte ao produtor rural na tomada de decisões.

Na Tabela 4 é apresentado a comparação entre as médias dos tratamentos e variáveis VARI e GRVI, e como resultado obtemos que o valor-P no VARI foi 0,059 o que é maior que 0,05, portanto, ele não é significativo, já o valor-P do GRVI foi 0,03 que, portanto, é significativo, mostrando que no GRVI a diferença entre os tratamentos foi significativa e houve diferença entre eles. Para o presente cenário avaliado o índice que podemos recomendar ao produtor rural são o VARI, principalmente o GRVI.

Tabela 4 Comparação entre as médias dos tratamentos com as variáveis VARI e GRVI usando o teste Kruskal-Wallis

VARI (<i>Visible Atmospherically Resistant Index</i>)							
Tratamento	N	Median	Ave Rank	Z	H	DF	P-valor
1	4	-0.08283	8.5	0	7,43	3	0,059
2	4	-0.09416	6.5	-0.97			
3	4	-0.09799	5.3	-1.58			
4	4	-0.05008	13.8	2.55			
Overall	16						
GRVI (<i>Green-Red Vegetation Index</i>)							
1	4	-0.05759	9.3	0.36	8,93	3	0,030
2	4	-0.06772	5.8	-1.33			
3	4	-0.07003	5	-1.7			
4	4	-0.03565	14	2.67			
Overall	16		8.5				

Fonte: Autores (2023)

4.3 IDENTIFICAÇÃO DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS EM FUNÇÃO DA DATA IMAGEADA

As características biofísicas do cultivo (produtividade, teor de água do grão, altura da planta e da inserção da primeira espiga, tamanho da espiga entre outros), foram coletados, porém tivemos apenas dados quantitativos de apenas uma data referentes esses parâmetros, dessa forma, foram elaborados a correlação entre os parâmetros biofísicos e os valores das bandas espectrais dos imageamentos, e também entre as próprias características observadas das plantas.

Para essa análise portanto foram realizados os *Heat Map* como mostra a Figura 17, e com essas análises avaliamos as maiores correlações das variáveis analisadas com a produtividade em função do tempo.

Para relações entre os dados biofísicos, é possível observar uma correlação alta entre parâmetros de produtividade e altura de planta, mostrando quanto maior a planta maior a produtividade alcançada. Outra relação é correspondente ao tamanho do comprimento da espiga, que quanto maior seu tamanho, a correlação com número de fileiras e também de grãos por fileira também aumenta. A correlação entre a altura da planta e a altura da inserção da espiga é grande, portanto, quanto maior a planta maior a altura da inserção da espiga. E por fim, as relações do teor de água dos grãos, são maiores quando a altura da planta e da inserção da espiga é maior, mostrando que são plantas que demoram mais para secar pois realizaram o enchimento de grão por mais tempo.

Nas datas iniciais, Figuras 17 (a), (b), (c) e (d), as relações entre as bandas espectrais do verde, vermelho e azul com os demais componentes, é de que as correlações de maior interação inicialmente foram com a altura da planta e da inserção da espiga, porém a partir da data 4 quando foi realizada a aplicação de nitrogênio essa relação diminuiu, e mantiveram as relações do teor de água do grão em que valores da banda azul tiveram maior correlação com a umidade.

Nas Figuras 17 (e), (f), (g) e (h), foi possível observar a relação muito semelhantes aos das datas iniciais, porém os valores sofreram decréscimo de interação entre eles, assim passando a ser negativo em alguns, e mantendo a relação da banda azul com o teor de água dos grãos.

Nas datas finais, nas Figuras 17 (i), (j), (k) e (l), as correlações entre a produtividade e as bandas aumentaram, em que a banda do azul teve maior correlação com a altura das plantas e altura da inserção das espigas, se mantendo também a relação com a teor de água do grão.

No geral, as maiores correlações com produtividade que eram o foco para essa avaliação foram alcançadas pelas bandas do verde e vermelho, e para o os índices de vegetação a relação entre os GRVI e o VARI foi de maior valor, chegando próximo de 1. E também esses índices VARI e GRVI trouxeram maiores correlações com a altura das plantas.

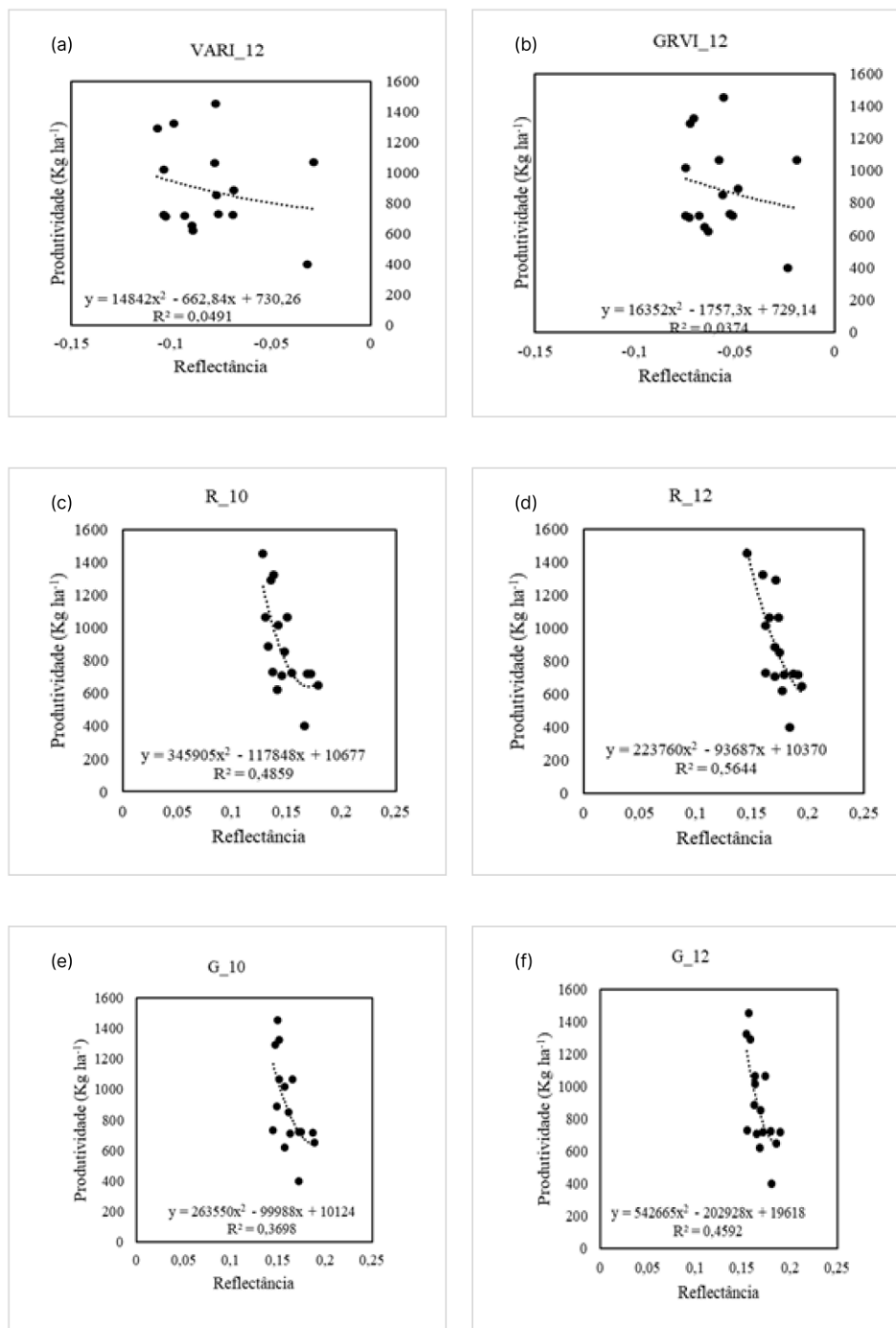
4.4 ANÁLISE DE REGRESSÃO

Com base nos dados observados nas Figuras 18(a) e 18(b), a relação da dispersão dos pontos e a linha de tendência para os índices de vegetação VARI e GRVI do imageamento 12, sendo avaliados a relação entre produtividade e reflectância, mostra que a correlação dos dados é baixa pois o R^2 (coeficiente de determinação) apresentou valor de correspondência de 4,9% e 3,7% respectivamente. Porém, apesar do coeficiente de determinação ter resultado um baixo, em sensoriamento remoto possui duas vertentes quando se tem esse cenário: (i) o valor do R^2 é bom indicador para a detecção da variabilidade presente na área; e (ii) normalmente os dados de SR não possui comportamento linear sendo mais indicado outros tipos de análises estatísticas como inteligência artificial (Random Forest, Multilayer Perceptron, Support Vector Machine, etc.) ou uso da multivariada.

Já ao avaliar as bandas espectrais de forma separada, nas Figuras 18(c) e 18(d), para a banda do vermelho dos imageamentos 10 e 12, para a mesma relação de dados anterior, foi constatado que a correlação entre os dados aumenta pois o valor de R^2 apresentam 48,5% e 56,4% de correspondência, mostrando uma dispersão menor de pontos ao ser observada a faixa do vermelho individualmente. Mesmo comportamento é observado ao avaliar a banda do verde na Figura 18(e) e 18(f) de forma separada para os imageamentos 10 e 12, na qual a correlação de reflectância e produtividade também aumenta, porém de forma não tão expressiva com valores de 36,9% e 45,9%.

Os resultados mostram que apesar dos índices de vegetação não demonstrarem valores tão expressivos, ao avaliar as bandas do verde e vermelho de forma individualizada, os valores da correlação entre a reflectância dessas bandas com a produtividade são expressivos, pois ao estar avaliando a reflectância de cada banda, conseguimos avaliar melhor a relação da reflectância e da produtividade.

Figura 18 Análise de regressão das bandas e índices de vegetação



VARI_12: VARI na data 12; GRVI_12: GRVI na data 12; R_10: comprimento de onda na faixa do vermelho na data 10; R_12: comprimento de onda na faixa do vermelho na data 12; G_10: comprimento de onda na faixa do verde na data 10; G_12: comprimento de onda na faixa do verde na data 12.

Fonte: Autores (2023)

4.5 VALIDAÇÃO DE DADOS POR MEIO DE MAPAS

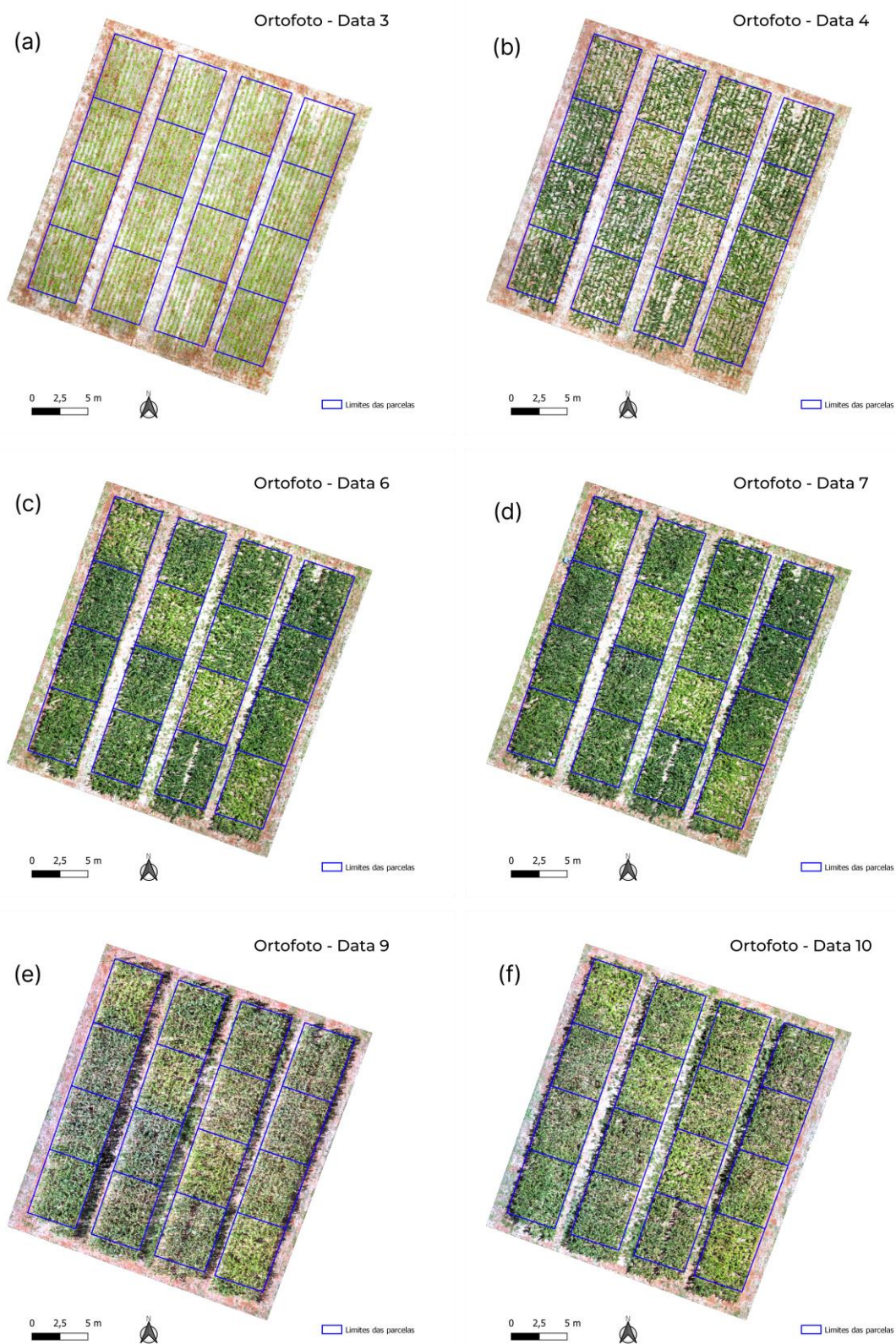
Os resultados gerados como mapas são essenciais para a validação visual dos valores obtidos, e na Figura 19 são observadas seis imagens ortorretificadas sendo consideradas as mais representativas, para a avaliação visual de correspondência aos dados obtidos nas análises estatísticas. Portanto para essa avaliação visual dos índices de vegetação e das bandas espectrais foram selecionados dois imageamentos iniciais das, nas datas 3 e 4; os outros dois imageamentos durante o desenvolvimento da cultura das datas 6 e 7; e por fim outros os dois da parte final do ciclo da cultura das datas 9 e 10, totalizando seis mapas para essa avaliação.

Na Figura 19 é possível observar que por meio das ortofotos a distribuição das parcelas com as diferentes doses aplicadas de nitrogênio, em que na Figura 19(a) ainda não havia sido realizada a aplicação de ureia com o milho em estágio de desenvolvimento V3, e na Figura 19(b) a aplicação foi realizada três dias antes da data do imageamento devido as condições favoráveis do teor de água do grão, e o milho se encontrava em estágio de desenvolvimento V4, e visualmente já é possível observar uma mudança de coloração das parcelas testemunhas nas quais não foi aplicado nenhuma outra fonte de nitrogênio.

Na Figura 19(c) e 19(d) com intervalo de aplicação de duas e três semanas respectivamente, já é possível observar a diferença grande entre as parcelas do tratamento, com destaque diagonal da testemunha, que se apresenta com colorações verdes mais claras, já demonstrando o ponto principal do déficit do nitrogênio que é a coloração verde mais fraca no limbo foliar, enquanto as demais parcelas apresentam colocações verdes escuras.

Nas datas mais próximas do final do ciclo, a diferença visual é reduzida, devido a senescência natural da cultura em que é perdido o potencial fotossintético da folha, e, portanto, a variação é menos evidente, como pode ser observado na Figuras 19(e) e 19(f).

Figura 19 Ortofotos



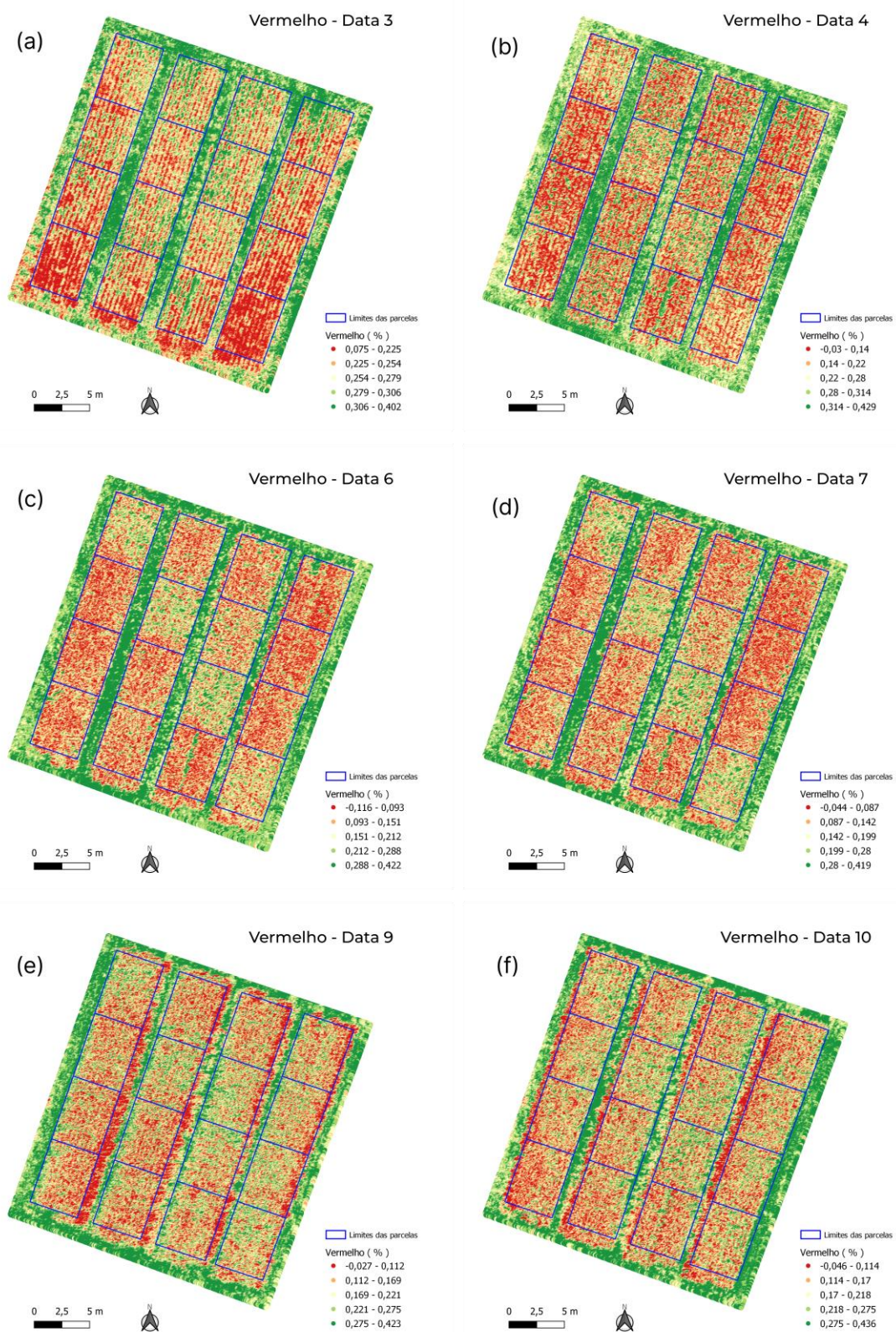
Fonte: Autores (2023)

Ao observar as Figuras 20 e 21 que são das bandas espectrais do vermelho e verde respectivamente, é notório a similaridade do comportamento de ambas, nas Figuras 20(a), 20(b), 21(a), 21(b) a reflectância das bandas é semelhante e entre as imagens das datas também, com uma certa diferença na testemunha em 20(b) e 21(b).

Já para as Figuras 20(c), 20(d), 21(c) e 21(d) é notório que para as parcelas de testemunha, os valores de reflectância são maiores, devido o comportamento da folha que ao estar em estresse nutricional, a reflectância aumenta e diminui a absorção dos espectros de luz.

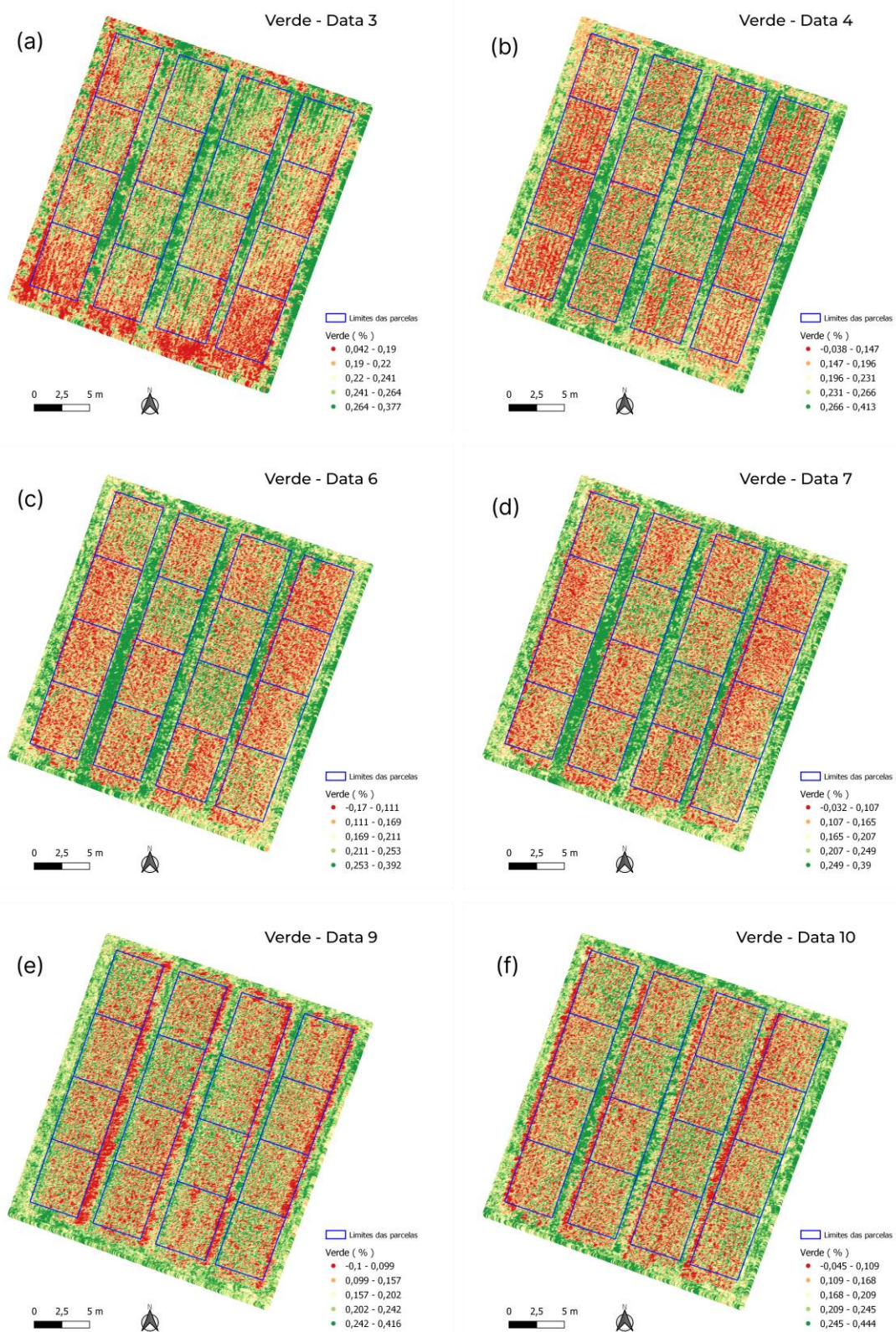
Portanto fica claro a diferença para as Figuras 20(e), 20(f), 21(e) e 21(f) em que a reflectância se distribui de forma uniforme entre todos os tratamentos, mostrando o aumento da reflectância e diminuição da absorção das folhas em função da senescência da cultura.

Figura 20 Banda espectral do vermelho



Fonte: Autores (2023)

Figura 21 Banda espectral do verde



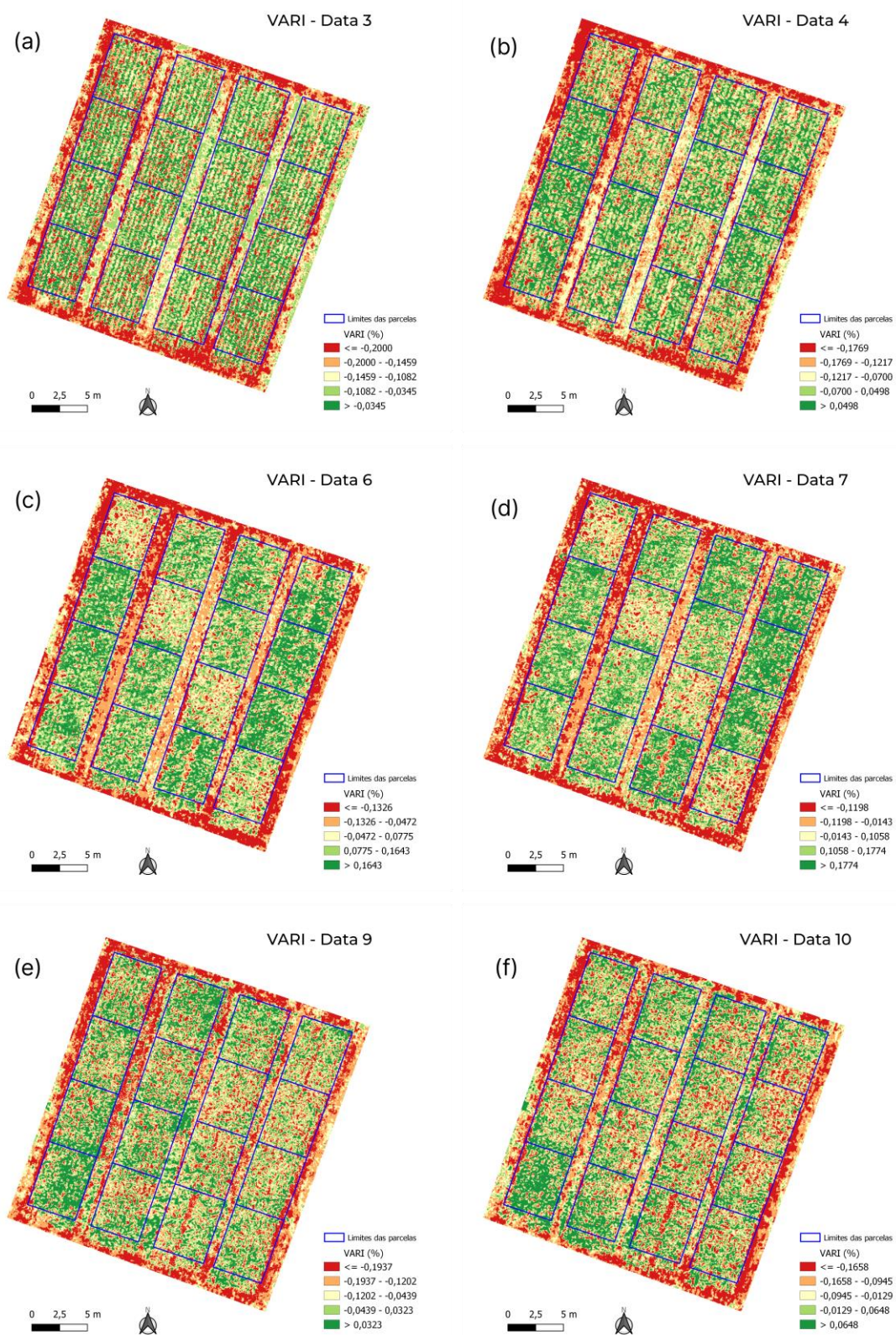
Fonte: Autores (2023)

Para os índices de vegetação VARI (Figura 22) e GRVI (Figura 23) a interpretação é diferente, visto que por serem índices normalizados os valores maiores correspondem a plantas com menor estresse e plantas com valores mais baixos apresentam algum estresse, e para a interpretação desse trabalho, os resultados de menores valores são parcelas que evidenciam um estresse nutricional do nitrogênio, e esse fator é visível nas Figuras 22(c), 22(d), 23(c) e 23(d), em que as parcelas na quais foram aplicadas fontes externas de nitrogênio a partir da ureia, mostram valores maiores com coloração verde e as parcelas testemunhas nas 4 repetições mostram valores menores de coloração amarela a vermelha.

Para as Figuras 22(a), 22(b), 23(a) e 23(b) a relação é a mesma, que sendo anterior a aplicação de ureia realiza próximo a data 4, não há diferenças entre as parcelas na data 3 e na data 4 já é possível observar indícios de uma diferença entre as parcelas, que ficam muito visíveis nas datas posteriores.

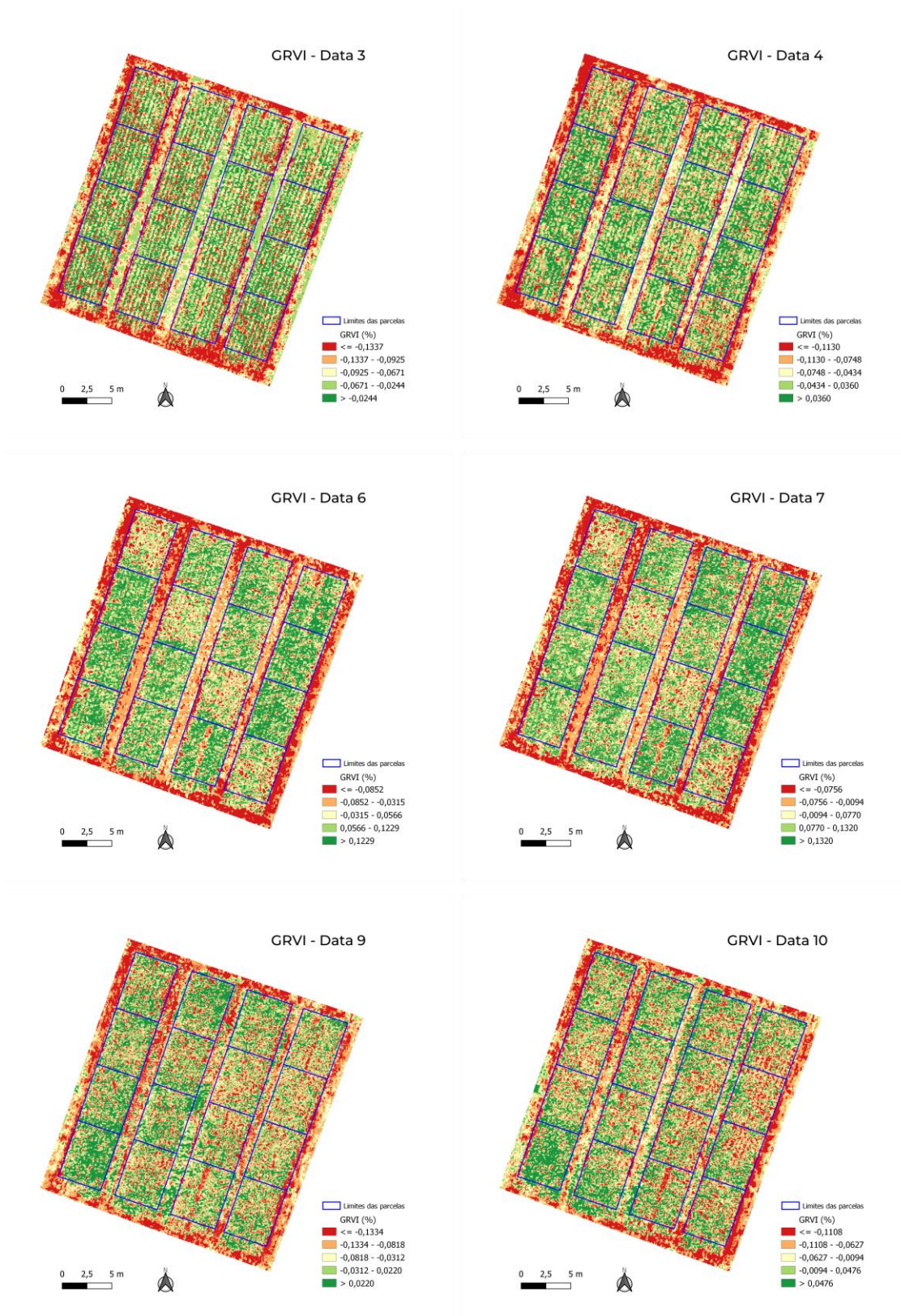
E por fim é observado nas Figuras 22(e), 22(f), 23(e) e 23(f) a maior homogeneidade entre as parcelas, com indício já apresentado da senescência da cultura, o que representa que a variação não é constatada quando a cultura está em final de ciclo a partir do estágio R3.

Figura 22 Índice de vegetação - VARI



Fonte: Autores (2023)

Figura 23 Índice de vegetação - GRVI



Fonte: Autores (2023)

Por meio dos resultados adquiridos na pesquisa, os imageamentos nas datas iniciais não são tão representativos, devido ao solo exposto e não desenvolvimento foliar da cultura, porém a partir do imageamento da data 3 os valores são de interesse, pois apresentam valores significativos sobre o desenvolvimento da cultura, e a absorção de nitrogênio pela cultura pode ser constatada a partir do imageamento da data 5, em que os valores entre as parcelas são mais discrepantes com o milho em estágio de desenvolvimento V5-V6, sendo o melhor momento para identificar pontos em que não houveram aplicação de nitrogênio, pois há uma maior variação de dados visuais e também estatísticos na avaliação.

Para os imageamentos das datas 6, 7 e 8 os valores são semelhantes, e, portanto, a realização do mapeamento dentro dessa janela de três semanas retornará valores equivalentes. Com os últimos voos das datas 8 a 12, devido o desenvolvimento do final de ciclo, e posterior início de senescência da cultura, os valores voltam a ser distribuídos de forma uniforme e equivalente entre as parcelas, independente das doses utilizadas nos tratamentos.

Os resultados apresentados por meio desta pesquisa podem sofrer diferenciação e alteração de acordo com cada fase do experimento em sua repetição, visto que a influência climática e precipitação foi um fator limitante no desenvolvimento e ciclo da cultura. Outro fator que foi apresentado foi a escassez nos meses em que decorreu a pesquisa, influenciando no resultado vegetativo final e reprodutivo, pois a distribuição hídrica concentrou nos meses de setembro e outubro, que são respectivamente na primeira e segunda data de imageamento, em que refletiu diretamente no desenvolvimento do milho, sendo assim impactando no período de enchimento de grãos fase em que ocorre uma maior demanda hídrica. Nesse contexto, os resultados de componentes biofísicos das plantas e também nas avaliações das bandas espectrais do RGB e dos índices de vegetação podem ter sofrido influências extrínsecas.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi identificar por meio de bandas espectrais e índices de vegetação qual a data de mapeamento apresenta a melhor resposta à variabilidade nas parcelas de aplicação de diferentes doses de nitrogênio, tendo a melhor correspondência com os dados de produtividade altura de planta, tamanho de espiga, diâmetro do colmo, quantidade de fileiras e de grãos por fileiras da espiga, e altura da inserção da espiga e teor de água no grão.

Com base nos métodos utilizados para a avaliação a partir dos imageamentos realizados com aeronaves remotamente pilotadas, e análise estatísticas utilizando as médias das bandas, para identificar qual a data de imageamento retorna a melhor responsividade do nitrogênio por meio da avaliação das bandas espectrais individualizadas e pelos índices de vegetação, portanto a identificação de maior variabilidade na data 5, mostra que o melhor momento para avaliar a efetividade da aplicação de nitrogênio nessa pesquisa foi na data 5, que é quando o milho se encontrava em estágio de desenvolvimento V5-V6. E para um mapeamento posterior a avaliação das datas 6, 7 e 8 mostraram valores semelhantes, portanto, seria necessário apenas a realização de um aerolevanteamento nesse período.

Dessa forma, ao identificar pontos de deficiência na lavoura, é possível realizar o manejo localizado por meio de ferramentas de Agricultura de Precisão, como aplicadores de taxa variável, que realizem a distribuição de nitrogênio em pontos específicos com maior déficit identificados a partir desse mapeamento.

É essencial a realização de pelo menos três voos, um anterior a aplicação do nitrogênio para ter valores de base comparativa, outro voo após uma a duas semanas da aplicação de fonte externa de nitrogênio, na qual será identificada a variabilidade, e se constatado falhas na distribuição, caracterizando essa como uma distribuição não homogênea, deve ser realizado a aplicação pontual nos locais com estresse nutricional, e realizar um novo mapeamento dentro de três semanas após a aplicação, para validação do manejo efetuado na cultura.

Portanto foi identificado por esse trabalho de pesquisa que a melhor data para a identificação de aplicação de doses diferentes de nitrogênio na cultura do milho é a data 5 em que o milho se encontra no estágio de desenvolvimento V5-V6.

Quanto as bandas espectrais e aos índices de vegetação, os que demonstraram resultados promissores para o monitoramento temporal foram: o comprimento de onda na faixa do vermelho e verde, VARI e o GRVI. Quanto aos demais índices avaliados e a banda espectral do azul não demonstraram significativos estatisticamente de detecção da variabilidade, principalmente em períodos de estiagem como foi o cenário encontrado nesse trabalho.

E para trabalhos futuros podemos estar reproduzindo este experimento com o auxílio de um sistema de irrigação, deixando os resultados menos vulneráveis aos efeitos climáticos da precipitação, fazendo a irrigação conforme a demanda hídrica da cultura.

Outra sugestão de trabalhos futuros seria a realização de avaliações de análise de variância para mais datas durante o desenvolvimento da cultura, bem como avaliar se há uma diferença significativa com apenas uma aplicação ou seria necessário realizar mais aplicações nitrogenadas, visto que os resultados nesse trabalho apresentaram resultados de diferenças não significativas devido à falta de chuva.

REFERÊNCIAS

- ABIMILHO. Associação Brasileira das Indústrias de Milho. Estatísticas. Disponível em: Acesso em: <http://www.abimilho.com.br/milho>. Acesso em: 8 mai. 2022.
- ANDRADE, Ricardo Guimarães et al. **Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) como plataforma para monitoramento da produção agropecuária: estudo de caso para o milho forrageiro**. Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, Documentos, 233, abr. 2019. 20p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.00619240721>.
- ATZBERGER, Clement. Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs. **Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 949–981, fev. 2013.
- BASSOI, Luís Henrique et al. Agricultura de precisão e agricultura digital. **Embrapa Pecuária Sudeste-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2019.
- BERNARDES, Tiago et al. Monitoring Biennial Bearing Effect on Coffee Yield Using MODIS Remote Sensing Imagery. **Remote Sensing**, v. 4, n. 9, p. 2492–2509, set. 2012.
- BERNARDI, Alberto Carlos de Campos et al. **Agricultura de Precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília -DF: 1, 2014. v. 1.
- BORÉM, Aluizio et al. **Agricultura Digital**. 2ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. Cap 5. p. 61,62.
- BORGES, Lino Carlos et al. **Agricultura de precisão: ferramenta de gestão na rentabilidade e produtividade de grãos**. Scientific Electronic Archives, [S. l.], v. 15, n. 3, 2022. DOI: 10.36560/15320221520. Disponível em: <https://sea.ufr.edu.br/SEA/article/view/1520>. Acesso em: 07 de maio. 2022.
- BRANDÃO, Ziany Neiva et al. Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. In: AZEVÊDO, D. M. P.; BELTRÃO, N. E. M. **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 1309 p. cap. 20. v. 2.
- BRANDÃO, Ziany Neiva. **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. 2009. 152 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- BRASIL, **Agricultura de Precisão** Boletim Técnico. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. – Brasília: Mapa/ACS, 2013. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br> Acesso em: 10 de mai. 2022.
- CAI, G.; DIAS, J.; SENEVIRATNE, L. A survey of small-scale unmanned aerial vehicles: Recent advances and future development trends. **Unmanned Systems**, v. 2, n. 2, p. 175-199, 2014.
- CARNEIRO, Jefferson Santana Silva da et al. Diagnóstico e manejo da variabilidade espacial da fertilidade do solo no cerrado do Piauí. **Revista de Ciências Agroambientais**, [S. l.], v. 14, n. 2, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5327/rcaa.v14i2.1469>

CHIODI, Luciane. **Integração espacial no mercado brasileiro de milho**. Mestrado em Economia Aplicada - Piracicaba: Universidade de São Paulo, 29 set. 2006

COELHO, José Pimentel Castro.; SILVA, José Rafael Marques da. **Agricultura de Precisão**. Lisboa: AJAP. 2009.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, 7º levantamento. v. 8, safra 2020/2021. Brasília: Conab, abr. 2021.

CONTINI, Elisio et al. **SÉRIE DESAFIOS DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO (NT2) Milho -Caracterização e Desafios Tecnológicos**. 1. ed. 1: 1, 2019. v. 1

CRUZ, A. C. **Estimativa da densidade de plantação de cana de açúcar utilizando o espaço de cor CIE LAB em imagens de alta resolução especial providas de VANTs**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual Paulista, Sorocaba (SP), 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/194254>. Acesso em: 02 jun. 2023.

CUNHA, Carlos Augusto Hungria da. **Relação entre comportamento espectral, índice de área foliar e produção de matéria seca em capim Tanzânia submetido a diferentes níveis de irrigação e doses de nitrogênio**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2004. 154 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

EPIPHANO, J.C.N. et al. **Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão**. Pesquisa agropecuária brasileira. Brasília. v. 31, n. 6, p. 445-454, Jun. 1996.

EZENNE, G. I et al. Current and potential capabilities of UAS for crop water productivity in precision agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 158–164, 1 jun. 2019.

FAVRO, Jackelline et al. Modelo de análise da oferta de exportação de milho brasileira: 2001 a 2012. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 53, n. 3, p. 455-476, 2015.

FERNANDEZ-GALLEGO, José A et al. Low-cost assessment of grain yield in durum wheat using RGB images. **European Journal of Agronomy**, 105, 146–156. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.007>.

FILHO, Carlos Roberto de Souza. Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 2, p. 228-243, 2008.

GANG, Li. et al. Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels. **Industrial Crops and Products**, v. 31, n. 1, p. 13–19, 2010.

GARRETT, Bradley.; ANDERSON, Karen. Dronemethodologies: Taking flight in human and physical geography. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 43(3), 341–359. <https://doi.org/10.1111/tran.12232>, 2018.

GITELSON, A.A. et al. **Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction**. *Remote Sensing of Environment*, São Paulo, v. 80, p. 76-87, 2002.

HAUSCHILD, Fabio Evandro Grub. **Técnicas de agricultura de precisão para definição de zonas de manejo de solo**. Revista de Agricultura de Precisão, v. 17, n. 1, p. 31-48, jan./fev. 2014.

HUNT, E.R. et al. **Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index**. Agronomy Journal, São Paulo, v. 103, p. 1090-1099, 2011.

JÚLIO DESORDI. Mapeamento agrícola com drone. Blog Aegro. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/mapeamento-agricola-com-drone/>. Acesso em: 5 jul. 2023.

LOUHAICHI, M.; BORMAN, M. M.; JOHNSON, D. E. **Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat**. Geocarto International, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 65-70, mar. 2001.

MARCHANT, J.A.; ONYANGO, C.M. **Shadow invariant classification for scenes illuminated by daylight**. Journal of the Optical Society of America, São Paulo, v. 17, p. 1952-1961, 2002.

MOLIN, José Paulo et al. **Agricultura de precisão**. Oficina de textos, 2015.

MORAIS, T. P et al. Aspectos morfofisiológicos de plantas de milho e bioquímico do solo em resposta à adubação nitrogenada e à inoculação com *Azospirillum brasilense*. **Revista Ceres**, v. 62, p. 589-596, 2015.

MORENO, Leonardo S.B. et al. **Base temperature determination of tropical Panicum spp. grasses and its effects on degree-day-based models**. Agricultural and Forest Meteorology, v. 186, p. 26-33, 2014. ISSN 0168-1923. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.013>.

OLIVEIRA, Francisco A et al. Crescimento do milho adubado com nitrogênio e fósforo em um Latossolo Amarelo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 3, p. 238–244, 2009.

POVH, Fabrício Pinheiro Et al. **Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 43, n. 7, p. 959-965, 2008. doi:10.1590/S0100-204X2008000800018

PRADO, Henrique. Precisão na agricultura. **Revista Fonte: Tecnologia da Informação na Gestão Pública**. Belo Horizonte, 15 (20), 46-48, 2018.

SHIRATSUCHI, Luciano Shozo et al. Sensoriamento remoto: conceitos e aplicações básicas na agricultura de precisão. **Embrapa Agrossilvi pastoril-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2014.

SILVA, Wanderson de Vasconcelos Rodrigues da.; SILVA-MANN, Renata. Agricultura de Precisão no Brasil: conjuntura atual, desafios e perspectivas. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 9, n. 11, pág. e1979119603-e1979119603, 2020.

SOUSA, R. et al. **Leituras de clorofila e teores de N em fases fenológicas do milho**. Colloquium Agrariae, v. 11, n. 1, p. 57-63, jan.-jun. 2015. DOI: 10.5747/ca.2015.v11.n1.a118.

TUCKER, C.J.; MAXWELL, E.L. **Sensor design for monitoring vegetation canopies**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 42, p. 1399-1410, 1976.

ZATTI, Gabriel Kraemer; 14690, Participante. **Caracterização físico-química dos solos da estação experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - campus Santa Helena.** In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais. Santa Helena (PR) UTFPR Santa Helena, 2022.

ZHANG, Meina et al. **Estimation of maize yield and effects of variable-rate nitrogen application using UAV-based RGB imagery.** Biosystems Engineering, v. 189, p. 24-35, 2020.