

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA MEIRELES FRAGATA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO MILHO (*Zea mays*) POR ÍNDICES DE
VEGETAÇÃO DURANTE SIMULAÇÃO DO IMPACTO DA GEADA E DO GRANIZO**

**DOIS VIZINHOS
2022**

BRUNA MEIRELES FRAGATA DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO MILHO (*Zea mays*) POR ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DURANTE SIMULAÇÃO DO IMPACTO DA GEADA E DO GRANIZO

Evaluation of the productivity of corn (*zea mays*) by vegetation indices during simulation of the impact of frost and hail

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Fabiani das Dores Abati Miranda.

Coorientador(a): Paulo Fernando Adami.

DOIS VIZINHOS

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/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). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

BRUNA MEIRELES FRAGATA DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO MILHO (*Zea mays*) POR ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DURANTE SIMULAÇÃO DO IMPACTO DA GEADA E DO GRANIZO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06 de dezembro de 2022.

Lucas da Silva Domingues
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Raoni Wainer Duarte Bosquilia
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fabiani das Dores Abati Miranda
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

DOIS VIZINHOS
2022

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãs e amigos
pelo amor, incentivo e apoio incondicionais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pela saúde e força necessárias para concluir este trabalho e encerrar esta etapa da minha história.

Aos meus pais e minha família, pelo amor, incentivo e apoio ao longo de toda a minha vida. Por serem minha base e meu exemplo. Sou grata por todo o esforço e dedicação usados para me proporcionar sempre o melhor.

À minha orientadora, Professora Fabiani das Dores Abati Miranda, e ao meu coorientador, Professor Paulo Fernando Adami, por todo conhecimento, paciência, auxílio e confiança destinados a mim e a elaboração deste trabalho.

À Universidade e aos professores responsáveis pelo Projeto do Grupo de Manejo e Conservação do Solo por terem cedido os equipamentos necessários para esta pesquisa. Ao Fagner Conceição, pelo empenho, interesse e tempo destinados à realização dos voos com drone, e por todo conhecimento compartilhado comigo.

Aos meus amigos, que me auxiliaram durante as avaliações deste trabalho e tornaram esse período mais leve e divertido. Sou grata pela amizade, companheirismo e carinho dedicados a mim.

“Qualquer tecnologia suficientemente avançada é
indistinguível da magia.”
(CLARKE, 1997).

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar o potencial de diferentes índices de vegetação no estabelecimento de uma correlação com a produtividade do milho durante avaliação da simulação do impacto da geada e do granizo, por meio do acompanhamento de um experimento de simulação realizado na fazenda da UTFPR-DV. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos ao acaso, em esquema fatorial com parcelas subdivididas (6 x 2) com 4 repetições. Onde, o primeiro fator representa as subparcelas, compostas pelos estádios em que foram feitos os cortes nas plantas (V1, V2, V3, V4, V5) mais testemunha (sem corte), e o segundo fator, correspondente as parcelas principais, representando as épocas de plantio do híbrido VYHR 3016, realizadas em 24/08 e 14/09/2021. As imagens para análise foram feitas com drone DJI Phantom 4, equipado com câmera multiespectral Mapir Survey 3W RGN, nos estádios V6 e R1 na primeira época de plantio; V6, V10 e R2 na segunda época. Os planos de voo foram elaborados no aplicativo DroneDeploy, considerando os parâmetros de 25 m de altura, 2 m s⁻¹ de velocidade, 80% de sobreposição frontal e 75% de sobreposição lateral. Foram instalados e georreferenciados 9 pontos de apoio na área experimental. O processamento digital das imagens foi realizado nos softwares Mapir Camera Control e Agisoft Metashape (licença de avaliação- 30 dias). O NDVI, NDWI, SAVI e IAF foram calculados no software QGIS. A produtividade foi obtida após coleta das espigas de cada parcela, pesagem dos grãos e correção para 13% de umidade. Para atribuir coordenadas aos valores de produtividade foram criados centroides nas parcelas e, posteriormente, foi utilizado a ferramenta Add Raster Values to Points para determinar os valores dos índices de vegetação referentes as coordenadas com valores de produtividade conhecidos. O mapa de produtividade foi gerado pelo método de interpolação IDW. Os dados dos índices e produtividade foram submetidos a correlação de Pearson e ao teste de significância T (1% de significância). Na primeira época de plantio, NDVI e SAVI apresentaram correlação de Pearson moderada e positiva, o NDWI e LAI apresentaram correlação negativa e moderada; o teste T foi significativo para todos os coeficientes de Pearson no voo de 08/10, em 10/11 apenas o NDWI apresentou significância no teste T. Para a segunda época, no voo de 22/10, o NDVI e SAVI apresentaram correlação positiva e forte, o NDWI negativa e fraca e o LAI negativa e forte; o resultado do teste T demonstrou significância para todos os coeficientes de Pearson. No voo de 10/11 NDVI e SAVI apresentaram correlação positiva e moderada, o NDWI e LAI apresentaram correlação negativa e moderada; o teste T não apresentou significância para nenhum dos coeficientes. Em 02/12 o NDVI e SAVI apresentaram correlação positiva e moderada, o NDWI e LAI negativa e fraca; o Teste T não apresentou significância para nenhum dos coeficientes. Os índices NDVI, NDWI e SAVI apresentaram relação com a produtividade apenas nos estádios iniciais da cultura; o LAI não foi capaz de representar adequadamente a área foliar das parcelas.

Palavras-chave: grãos; sensoriamento remoto; drone; climatologia agrícola.

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the potential of different vegetation indices in establishing a correlation with corn yield during the evaluation of the simulation of the impact of frost and hail, through the monitoring of a simulation experiment conducted on the farm of UTFPR-DV. The experiment was conducted in a randomized block design, in a factorial scheme with subdivided plots (6 x 2) with 4 repetitions. The first factor represents the subplots, composed of the stages in which the plants were cut (V1, V2, V3, V4, V5) plus the witness (without cutting), and the second factor, corresponding to the main plots, representing the planting seasons of hybrid VYHR3016, performed on 08/24 and 09/14/2021. The images for analysis were taken with a DJI Phantom 4 drone, equipped with a Mapir Survey 3w RGN multispectral camera, at the V6 and R1 stages in the first planting season; V6, V10 and R2 in the second season. The flight plans were prepared in the DroneDeploy application, considering the parameters of 25 m height, 2 m s⁻¹ speed, 80% forward overlap and 75% side overlap. Nine support points were installed and georeferenced in the experimental area. Digital image processing was performed in Mapir Camera Control and Agisoft Metashape software (evaluation license - 30 days). NDVI, NDWI, SAVI and IAF were calculated in QGIS software. The yield was obtained after collecting the ears from each plot, weighing the grains and correcting for 13% humidity. To assign coordinates to the yield values centroids were created in the plots and then the tool add raster values to points was used to determine the values of the vegetation indices referring to coordinates with known yield values. The yield map was generated by the IDW interpolation method. The data of the indices and productivity were submitted to Pearson's correlation and the significance test T (1% significance). For the first planting season, NDVI and SAVI showed moderate and positive Pearson's correlation, NDWI and LAI showed negative and moderate correlation; the T-Test was significant for all Pearson's coefficients in the 08/10 flight, in 10/11 only NDWI showed significance in the T-Test. For the second season, in the 10/22 flight, NDVI and SAVI showed positive and strong correlation, NDWI negative and weak and LAI negative and strong; the T-Test result showed significance for all Pearson's coefficients. On 10/11 flight NDVI and SAVI showed positive and moderate correlation, NDWI and LAI showed negative and moderate correlation; the T-Test result showed no significance for any of the coefficients. On 02/12 the NDVI and SAVI showed positive and moderate correlation, the NDWI and LAI negative and weak; the T-Test did not show significance for any of the coefficients. The NDVI, NDWI and SAVI indices showed a relationship with productivity only in the initial stages of the crop; LAI was not able to adequately represent the leaf area of the plots.

Keywords: grain; remote sensing; drone aircraft; crops and climate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Representação de matriz bidimensional de uma imagem relacionada a uma faixa específica de espectro	22
Figura 2 - Curva espectral da vegetação, solo e água	24
Figura 3 - Curvas espectrais de diferentes classes de solo em profundidade de 0,40- 0,60m da área de preservação ambiental do Pratigi- Bahia	25
Figura 4 - Comportamento espectral da água em rios turvos e limpos	25
Figura 5 - Curvas características de reflectância para diferentes camadas de folhas.....	26
Figura 6 - Espectro de reflectância obtido com sensor imageador hiperespectral AISAFenix de pastagem, mandioca, Eucalyptus spp., grama e milho.....	27
Figura 7- Localização da área experimental	31
Figura 8- Fluxograma da metodologia	32
Figura 9 - Distribuição espacial das parcelas na área experimental	33
Figura 10- Plantas de milho em estádio V1 sobre palhada de aveia	34
Figura 11- Presença de cigarrinha do milho	35
Figura 12- Dano de percevejo em folha de milho	35
Figura 13- Drone DJI Phantom 4	36
Figura 14- Distribuição dos pontos de controle na área experimental	37
Figura 15- Pontos de apoio utilizados no experimento	38
Figura 16- Rover sobre ponto de apoio.....	39
Figura 17- Receptor GPS sobre RN com coordenadas conhecidas (BASE).....	39
Figura 18- Alvo terrestre de calibração de reflectância	40
Figura 19- Pesagem dos grãos de milho.....	44
Figura 20- Determinação da umidade dos grãos.....	45
Figura 21 - Média de produtividade das duas épocas de semeadura	47
Figura 22- Precipitação e temperatura média registrados no campus UTFPR, Dois Vizinhos- PR entre março/2021 e fevereiro/ 2022	48
Figura 23- Índices de vegetação calculados para imagens do voo 08/10/2021 para E1-V6.....	49
Figura 24- Índices de vegetação calculados para imagens do voo 10/11/2021 E1-R1	51
Figura 25- Índices de vegetação calculados para imagens do voo 22/10/2021 para E2-V6.....	52
Figura 26- Índices de vegetação calculados para imagens do voo 10/11/2021 para E2-V10.....	54
Figura 27- Índices de vegetação calculados para imagens do voo 02/12/2021 para E2-R2.....	55
Figura 28- Presença de plantas daninhas em parcela da segunda época de semeadura	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Pontos de apoio usados no processamento digital das imagens.....	41
Tabela 2- Resolução espacial e erro total de posicionamento das imagens	42
Tabela 3- Média de produtividade dos tratamentos semeados em 24/08/2021 e 14/09/2021	47
Tabela 4- Coeficiente de correlação de Pearson e Teste T entre índices de vegetação e produtividade para voo realizado em 08/10/2021 para E1-V6	48
Tabela 5- Coeficiente de correlação de Pearson e Teste T entre índices de vegetação e produtividade para voo realizado em 10/11/2021 para E1-R1	50
Tabela 6- Coeficiente de correlação de Pearson e Teste T entre índices de vegetação e produtividade para voo realizado em 22/10/2021 para E2-V6	51
Tabela 7- Coeficiente de correlação de Pearson e Teste T entre índices de vegetação e produtividade para voo realizado em 10/11/2021 para E2-V10	53
Tabela 8- Coeficiente de correlação de Pearson e Teste T entre índices de vegetação e produtividade para voo realizado em 02/12/2021 para E2-R2	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Cultura do milho	15
2.1.1	Relação entre área foliar e produtividade na cultura do milho	16
2.2	Caracterização das geadas e efeitos na cultura do milho	17
2.3	Caracterização de granizo e efeitos na cultura do milho	18
2.4	Sensoriamento remoto	19
2.4.1	Uso de aeronaves remotamente pilotadas no sensoriamento remoto....	20
2.4.2	Imagens sub-orbitais	22
2.4.3	Comportamento espectral de objetos naturais	24
2.4.4	Índices de vegetação.....	27
2.5	Sensoriamento remoto aplicado à cultura do milho	29
3	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1	Caracterização da área experimental	31
3.2	Condução do experimento	32
3.3	Aquisição das imagens com drone	36
3.3.1	Implantação de pontos de controle.....	37
3.3.2	Utilização de alvo terrestre de calibração de reflectância.....	40
3.4	Processamento digital	40
3.4.1	Pré-processamento das imagens	40
3.4.2	Processamento das imagens	41
3.5	Cálculo dos índices de vegetação	42
3.5.1	Índice NDVI	42
3.5.2	Índice NDWI	43
3.5.3	Índice SAVI.....	43
3.5.4	Índice LAI	44
3.6	Determinação da produtividade da cultura do milho	44
3.7	Extração de centroides e aplicação da ferramenta Add raster values to points.....	45
3.8	Elaboração do mapa de produtividade.....	46

3.9	Análises estatísticas	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

A evolução da agricultura brasileira nas últimas décadas colaborou consideravelmente com o desenvolvimento econômico e social do país. Tanto pela geração de renda e emprego que a atividade proporciona, quanto pela contribuição do agronegócio no PIB nacional, que no ano de 2021 chegou a 27,6% e tem previsão de chegar a 26,24% em 2022 (CEPEA; CNA, 2022; EMBRAPA, 2018).

Segundo projeções do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2020, p. 28-33), a produção brasileira de milho deve passar de 102,3 milhões de toneladas na safra 2019/20 para 123,9 a 150,8 milhões de toneladas na safra de 2029/30, com uma variação de 21,2%. Esse incremento na produção deverá ser incentivado pelo aumento da exportação e crescimento do consumo no mercado interno, estimulado pelo setor da pecuária e produção de etanol. Ainda segundo o Ministério (2020, p. 85), o acréscimo na produção brasileira deverá ser resultado do aumento da produtividade por área, que exigirá maior infraestrutura, tecnificação da produção e investimentos em pesquisa e financiamentos.

A agricultura é uma atividade que apresenta grande dependência de recursos e fatores ambientais, o que acaba refletindo nos riscos que estão associados a esse setor, especialmente aqueles ligados à produção, que envolvem a possibilidade de ocorrência de perdas pelo ataque de pragas e doenças, erros operacionais e acontecimento de fenômenos climáticos (EMBRAPA, 2018, p. 97 e 99).

Na cultura do milho, os principais eventos climáticos que podem afetar e comprometer a produtividade das lavouras são a geada, granizo, seca, vento forte e chuvas excessivas, fazendo com que o uso de seguros agrícolas seja importante no auxílio da preservação de renda dos produtores (FARIAS; GONÇALVES; SIBALDELLI, 2019, p. 44; GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ, 2020).

Em meio a esse cenário, os conceitos de agricultura digital e de precisão se tornam significativos, uma vez que, atualmente as inovações tecnológicas são as principais responsáveis pelo desenvolvimento econômico, incremento na produtividade e aumento da sustentabilidade dos processos. Esses conjuntos de ferramentas e tecnologias agrícolas são capazes de melhorar o planejamento, gerenciamento e eficiência do uso de recursos naturais, tornando o sistema produtivo inteligente, preciso e mais sustentável (BASSOI *et al.*, 2019, p. 19-23).

A vista disso, o sensoriamento remoto e o geoprocessamento se tornam recursos essenciais na otimização da coleta, armazenamento e processamento de informações, podendo ser aplicados na definição de zonas de manejo, no planejamento ambiental e como ferramentas potencialmente úteis para empresas que prestam serviços de seguro agrícola, especialmente na área de avaliação de risco e monitoramento das safras (BASSOI *et al.*, 2019, p. 25-30; SILVEIRA, 2021).

Os índices de vegetação facilitam o processo de análise dos dados gerados pelos sensores, representando um papel fundamental na aplicação de técnicas do sensoriamento remoto na agricultura (FORMAGGIO e SANCHES, 2017, p. 95; TITTOTO, 2016, p.1). Contudo, cada índice de vegetação é influenciado de maneiras diferentes pelas propriedades de iluminação, visada, constituição do dossel vegetal e composição da superfície abaixo das plantas, fazendo com que sua resposta seja alterada e muitas vezes limitada em algumas circunstâncias. Esse fator justifica a necessidade da realização de estudos sobre a aplicação de índices de vegetação em ambientes e espécies vegetais distintas (ANTUNES; TANAJURA; UBERTI, 2005, p. 302; TITTOTO, 2016, p.1-2).

Desse modo, o objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de diferentes índices de vegetação no estabelecimento de uma correlação com a produtividade do milho, durante análise do impacto da geada e granizo em estádios fenológicos distintos da cultura, onde será feito o acompanhamento de um experimento baseado na simulação dos danos causados por esses dois eventos atmosféricos. Os resultados serão obtidos pela comparação entre os dados dos índices de vegetação, calculados a partir de imagens de drone, e relacionados com a produtividade registrada em campo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o potencial de diferentes índices de vegetação em relação a produtividade da cultura do milho (*Zea mays*) durante avaliação da simulação do impacto da geada e do granizo na cultura.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar o acompanhamento dos estádios fenológicos de uma safra de milho;
- b) Calcular os índices de vegetação NDVI, NDWI, SAVI e IAF por meio do software QGIS;
- c) Verificar a relação entre os dados dos índices de vegetação com a produtividade da cultura do milho;
- d) Produzir mapas de índice de área foliar e produtividade para avaliar o impacto das geadas e do granizo na cultura do milho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura do milho

O milho (*Zea mays*) é considerado o cereal mais cultivado no mundo, devido a sua importância agronômica, socioeconômica e pela possibilidade de plantio em diversos ambientes. Além disso, é uma cultura que apresenta grande versatilidade no seu uso, podendo ser destinada à alimentação humana e animal, produção de combustível (etanol), fabricação de produtos industriais e farmacêuticos (CARNEIRO *et al.*, 2002, p.2; COÊLHO, 2021b, p.1; MISOSUL, 2020, p.13; RICHETTI e FILHO, G., ca. 1998, p. 13 e 17).

De acordo com o 3º levantamento do USDA, durante a safra 2021/22 foram produzidas cerca de 1.217,9 milhões de toneladas de milho no mundo. Nessa mesma safra, os Estados Unidos lideraram a produção do cereal com 383,9 milhões de toneladas. Enquanto o Brasil, ocupou o terceiro lugar no ranking mundial de produção do grão, com valores aproximados de 116 milhões de toneladas e o segundo lugar no ranking de exportação, com 44,5 milhões de toneladas (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2022).

O milho é tido como a segunda maior cultura de relevância no cultivo agrícola nacional, ficando atrás apenas da soja. O grão é produzido em todas as regiões do país, com destaque para o estado do Mato Grosso, que lidera a produção brasileira, sendo seguido pelos estados do Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais (CÔELHO, 2021a, p. 2; SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA, 2016).

O cultivo do cereal no país é realizado em pequenas, médias e grandes propriedades, que empregam diferentes níveis tecnológicos na produção agrícola. Nas últimas décadas, o plantio de milho passou por alterações significativas, incluindo o deslocamento temporal da produção e expansão da fronteira agrícola. Resultando também, na diminuição do uso do grão na agricultura de subsistência e elevação da sua presença na agricultura comercial (BORGHI *et al.*, 2019, p.1; VISÃO AGRÍCOLA, 2015, p.10).

O aumento produtivo que ocorreu nas últimas décadas em lavouras de milho no Brasil é considerado extraordinário. A produção brasileira que era de menos de 20 milhões de toneladas na safra 1976/77 passou a ser de 97,8 milhões de toneladas na safra 2016/17 e de 116 milhões de toneladas na safra 2021/22, o que demonstra o

intenso dinamismo dos produtores rurais e a evolução tecnológica que a cultura sofreu ao longo dos anos. Ainda assim, o cultivo de milho é uma atividade que apresenta riscos altos, com destaque para o risco de preços, que sofrem oscilações entre as safras e entre as regiões produtoras; o risco climático, que abrange perdas por seca, granizo, geadas etc.; e os riscos de perdas pelo ataque intensivo de pragas e doenças (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2022; HENRIQUE, 2021; VISÃO AGRÍCOLA, 2015, p.6).

2.1.1 Relação entre área foliar e produtividade na cultura do milho

A área foliar possui forte correlação com a eficiência fotossintética e a taxa de transpiração de uma planta, refletindo na capacidade da cultura em interceptar a radiação solar e realizar as trocas gasosas com o ambiente. Por isso, em casos de ocorrência de estresses que causam a redução da área foliar, também há a diminuição na absorção de radiação (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2009, p. 245; GUIMARÃES; SANS; MORAES, A., 2002).

Dessa forma, é possível dizer que a área foliar influencia na produtividade da cultura. Visto que, a relação entre esse parâmetro e a interceptação da radiação afetam a produção de fotoassimilados e conseqüentemente o acúmulo de biomassa nos grãos. Portanto, plantas que atingem uma área foliar mais próxima do máximo potencial do seu genótipo e quanto mais tempo essa área foliar for capaz de permanecer ativa, maior deverá ser a produtividade da cultura (MANFRON *et al.*, 2005, p. 9, SANTOS, M., 2020).

Desse modo, levando em consideração a relevância da área foliar no milho e seu vínculo com a eficiência fotossintética, relação fonte- dreno e influência na produtividade da cultura, se torna importante determinar o índice de área foliar das lavouras, já que esse parâmetro representa a proporção de cobertura do solo e pode auxiliar na escolha das práticas de manejo mais indicadas para cada situação (ALVIM *et al.*, 2010, p. 1018; GUIMARÃES; SANS; MORAES, A., 2002).

Entre os fatores que podem causar alterações na área foliar do milho estão o ataque de pragas e doenças, estresse hídrico, disponibilidade de nutrientes e luz, características genéticas, espaçamento e população de plantas, presença de plantas daninhas e ocorrência de eventos adversos, como geada e granizo. A ocorrência de geada e granizo acontece de forma esporádica e podem abranger locais específicos,

mas que podem causar danos graves (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2009, p. 254; GUIMARÃES; SANS; MORAES, A., 2002; JUNIOR, 2011, p. 20).

2.2 Caracterização das geadas e efeitos na cultura do milho

Na meteorologia, segundo Carvalho, L., Dantas e Neto (2010, p. 152), as geadas são caracterizadas pela formação de gelo sobre a vegetação e quaisquer outros elementos que estejam desprotegidos em ambientes que favoreçam a perda de calor durante noites com resfriamento acentuado. Entretanto, agronomicamente, a geada é considerada um evento atmosférico que causa a morte da vegetação ou de partes dela, devido às baixas temperaturas, mesmo que não haja deposição de gelo sobre os tecidos vegetais.

As geadas podem ser classificadas quanto a sua origem, em geada de advecção, radiação ou mista; e quanto ao seu aspecto visual, em geada branca ou negra. Entre os fatores que interferem na formação desse fenômeno no Brasil, é possível citar os elementos macroclimáticos, incluindo a continentalidade, latitude, circulação de massas de ar e altitude; fatores topoclimáticos que abrangem elementos e características associadas à topografia do local; e fatores microclimáticos que envolvem a cobertura do terreno (ANGELOCCI; PEREIRA, A.; SENTELHAS, 2007, p. 153-156).

Os estados brasileiros de São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e parte dos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Rio de Janeiro e Goiás costumam ter geadas durante os meses de inverno, por terem latitudes maiores que 18°, o que causa uma limitação no plantio e cultivo de milho, visto que a cultura é sensível a esse fenômeno, principalmente quando as geadas ocorrem tarde na primavera afetando o início da safra de verão ou quando acontecem muito cedo no outono, prejudicando o final da safrinha (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2009, p. 256; VIEIRA, 201-, p. 7).

Os danos por geada são determinados pelo surgimento de cristais de gelo nos espaços intercelulares das plantas. A formação desses cristais pode ocasionar a desidratação celular, que é causada pela mudança de potencial hídrico e saída de água do interior das células, essa injúria pode ser reversível ou não. Além disso, os cristais de gelo também podem provocar danos estruturais nas células vegetais (CARVALHO, L.; DANTAS; NETO, 2010, p. 154-155). Nas primeiras 24h após as

geadas, as plantas de milho atingidas apresentam coloração escura nas folhas, isso ocorre por conta do rompimento das membranas celulares e extravasamento do seu conteúdo. Alguns dias depois da geada, as partes da planta que foram danificadas, passam a apresentar uma coloração marrom (FILHO, I., 2012).

Segundo um levantamento feito por Farias, Gonçalves e Sibaldelli (2019, p.25, 29 e 34), com dados do Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro), durante a safra de milho 2018/19, aproximadamente 145 produtores rurais, que se enquadram na categoria de pequenos e médios agricultores, precisaram acionar o seguro agrícola por perdas causadas pelas geadas em todo o país. Na safra de verão 2018/19, o estado mais atingido foi o Rio Grande do Sul, onde cerca de 467,04 ha precisaram ser assegurados contra danos por geada. Enquanto isso, durante a safrinha 2018/19, o Paraná foi o estado brasileiro mais afetado por perdas com esse evento climático, totalizando aproximadamente 2289,4 ha de lavouras de milho que precisaram acionar o seguro agrícola.

2.3 Caracterização de granizo e efeitos na cultura do milho

O granizo é considerado uma precipitação sólida de pedras de gelo e é formado por instabilidades atmosféricas localizadas, restringidas à presença de nuvens do tipo cumulonimbus, que possuem intensas correntes de ar ascendentes e descendentes no seu interior. O vapor de água ao ser carregado para a parte superior da nuvem pelas correntes ascendentes é sublimado e passa para o seu estado sólido, originando os grânulos de gelo (CALDANA *et al.*, 2019, p. 272).

Geralmente, os locais com precipitação de granizo regulares ficam situadas em regiões que apresentam latitudes médias, incluindo as planícies americanas e canadenses, o sul da China, Europa central, sudeste da Austrália, Himalaia e América do Sul, especialmente na Argentina e sul do Brasil (CUNHA; SCHEEREN; SILVA, M., 2001, p. 11). O estado brasileiro do Paraná, por estar situado em uma zona subtropical e com transição climática, é atingido por queda de granizo regularmente. Sendo que as regiões Oeste, Centro- Oeste, Sul e Sudoeste do estado são as que apresentam as características mais propícias para a ocorrência desse evento climático (CALDANA *et al.*, 2019, p.271).

O milho é extremamente sensível ao granizo durante a fase de pendoamento, quando a planta apresenta grande quantidade de área foliar jovem e a inflorescência

masculina fica exposta. Os estádios de florescimento e polinização também são momentos delicados para o milho, visto que é nessa época que as plantas determinam o número de espigas e de grãos das plantas. Já as precipitações de granizo em momentos em que o ponto de crescimento da cultura está abaixo do nível do solo não causam danos graves no milho (KUMUDINI *et al.*, 1998; RITCHIE *et al.*, 1993 apud BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2009, p. 255).

Segundo levantamento feito por Farias, Gonçalves e Sibaldelli (2019, p.30 e 35), com dados do Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro), na safra de verão 2018/19, o estado mais atingido por queda de granizo foi Santa Catarina, onde cerca de 454,9 ha precisaram ser assegurados contra danos causados por esse evento climático. Durante a safrinha 2018/19, o Paraná foi o estado brasileiro mais afetado por precipitações de granizo, totalizando aproximadamente 58 ha de lavouras de milho que precisaram acionar o seguro agrícola.

2.4 Sensoriamento remoto

Segundo Brandão *et al.* (2014, p. 59), “o sensoriamento remoto se caracteriza pela obtenção de informações de um objeto sem existir um contacto físico com o mesmo, e muitas vezes a longas distâncias”. Recentemente, as imagens de sensoriamento remoto podem ser obtidas com o auxílio de diferentes plataformas, incluindo o uso de veículos aéreos não tripulados, satélites, aeronaves etc. (BRANDÃO *et al.*, 2014, p. 59).

Para as técnicas aplicadas na obtenção remota de dados, o elemento essencial é a radiação eletromagnética (REM), o que torna a radiometria espectral uma das áreas mais relevantes no sensoriamento remoto. Uma vez que, são as medidas radiométricas que possibilitam o conhecimento da assinatura espectral de cada material, proporcionando uma explicação e compreensão de como cada objeto estudado deverá se comportar nas imagens (NOVO; PONZONI, 2001, p. 7; SILVA, P., 2006, p. 25).

O sensoriamento remoto pode atuar em diversos setores de serviço, incluindo a agricultura, urbanismo, área florestal e ambiental, cartografia, infraestrutura e logística. Podendo auxiliar no monitoramento de recursos hídricos, vegetais e catástrofes ambientais, no planejamento urbano, mapeamento geológico, mapeamento de redes de infraestrutura, elaboração de mapas, assistência em

pesquisas de impacto ambiental e reconhecimento de áreas de preservação (FURTADO *et al.*, 2014, p. 77-78).

Apesar de ter uma ampla aplicabilidade, o sensoriamento remoto possui limitações que devem ser consideradas de acordo com os objetivos e a metodologia a ser desenvolvida durante os projetos. Visto que, a obtenção de imagens por sensores remotos pode sofrer com interferências atmosféricas, imperfeições no desempenho dos detectores, existência de nuvens no momento do imageamento e deturpações ao longo do procedimento de registro que comprometem a qualidade dos dados adquiridos (FORMAGGIO; SANCHES, 2017, p. 29; LUIZ, 2002, p. 28).

Ainda que o uso de aeronaves remotamente pilotadas seja antigo e tenha sido aplicado inicialmente em áreas de inteligência militar, a utilização desses equipamentos para fins de sensoriamento remoto tem crescido nos últimos anos, principalmente pela possibilidade de obtenção de imagens em tempo real, com alta resolução espacial e temporal, com menor custo e em locais de difícil acesso (SOUZA, 2017, p. 328 e 330).

2.4.1 Uso de aeronaves remotamente pilotadas no sensoriamento remoto

No sensoriamento remoto, as aeronaves remotamente pilotadas ou drones são usados como plataformas para o transporte de diversos tipos de sensores, incluindo os multiespectrais, infravermelhos, na faixa do visível (RGB), de monitoramento de espectro de frequência e hiperespectrais. Os modelos de drones mais aplicados para o levantamento de informações geoespaciais no sensoriamento remoto, são os de asa fixa e os multi-rotor (KUX *et al.*, 202-?).

Para garantir a obtenção de dados geoespaciais de qualidade com a utilização de drones é necessário seguir alguns procedimentos mínimos. Sendo importante planejar previamente todos os voos de acordo com o objetivo de cada mapeamento, levando em consideração o tamanho do pixel e sobreposição das imagens, escolha do sensor e altura de voo. Durante a execução do plano de voo, é necessário estar alerta para as condições climáticas e o horário ideal para realização do imageamento. Depois dos dados terem sido coletados, é feito o processamento e análise das imagens, para que posteriormente possam ser feitas investigações a campo para validar as informações obtidas pelo sensoriamento remoto (AMARAL *et al.*, 2019, p. 11- 12).

Os drones podem ser utilizados no sensoriamento remoto para diversas aplicações, incluindo o monitoramento de obras, cadastro de propriedades, mineração, agricultura de precisão, monitoramento ambiental, na área de segurança etc. Na agricultura, esses equipamentos podem ser empregados na elaboração de projetos de irrigação, levantamentos topográficos, identificação de falhas de plantio conforme demonstra o trabalho de Preve (2021) com a cultura do arroz irrigado, presença de plantas daninhas como apresenta a pesquisa de Santos, C. (2019), monitoramento das lavouras para previsão de safras, identificação de zonas de manejo, pulverização agrícola, entre outros (GALATI, 2022; KUX *et al*, 202-?).

O uso de drones no sensoriamento remoto facilita a aquisição de imagens com um custo relativamente baixo. Além de gerar produtos de qualidade, com alta resolução espacial e temporal, permitindo uma escala de mapeamento extremamente detalhada e com voos frequentes. No entanto, esses equipamentos possuem autonomia e cobertura espacial baixas, exigem operadores especializados e apresentam alto custo para o processamento dos dados. Além disso, mudanças nas condições meteorológicas ao longo dos voos podem comprometer a qualidade dos produtos, a exemplo de contaminações por sombras causadas pela alteração na luminosidade do ambiente e variação no ângulo de visada da câmera, gerada pela mudança das condições do vento (BREUNIG; GALVÃO; NETO, 2019, p. 92, 93 e 102).

No Brasil, o uso de drones é regulamentado pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), pela Agência Nacional de Telecomunicações, pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo e pela Secretária da Receita Federal do Brasil. A legislação brasileira classifica as aeronaves remotamente pilotadas (RPA) em três grupos conforme seu peso máximo de decolagem, sendo que os documentos exigidos para o uso de drones varia de acordo com cada uma dessas categorias. As classes de RPA são (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, entre 2017 e 2021):

- a) Classe 1: peso máximo de 150 kg. Para essa categoria é exigido que o piloto possua licença, habilitação e certificado médico aeronáutico emitidos pela ANAC. Todos os voos devem ser registrados;
- b) Classe 2: peso entre 25 e 150 kg. Para esse grupo o piloto também deve possuir licença, habilitação e certificado médico aeronáutico emitidos pela ANAC. Todos os voos devem ser registrados também;

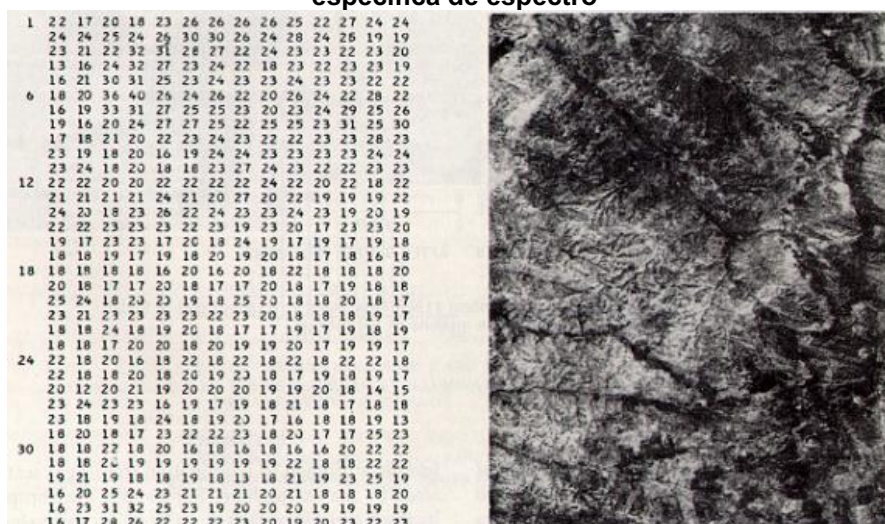
- c) Classe 3: peso máximo de 25 kg. A licença, habilitação e certificado médico aeronáutico para o piloto emitidos pela ANAC são dispensados desde que a altura de voo não ultrapasse 400 pés. Os voos não precisam ser registrados.

Para a operação de aeronaves remotamente pilotadas é necessário respeitar uma distância mínima de 30 metros horizontais de pessoas não envolvidas na atividade. Os pilotos de drone e seus auxiliares precisam ter idade mínima de 18 anos e só devem pilotar uma aeronave por vez (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, entre 2017 e 2021).

2.4.2 Imagens sub-orbitais

As imagens são elaboradas a partir de elementos de resolução, conhecidos como pixels, que correspondem ao valor médio da energia eletromagnética refletida pelos alvos dispostos em determinada superfície terrestre, são as características dos sensores e das plataformas que definem as dimensões da superfície imageada. Sendo assim, as imagens pictóricas são formadas por diversos pixels que estão dispostos um ao lado do outro formando uma matriz bidimensional composta por linhas e colunas, conforme mostrado na Figura 1 (NOVO; PONZONI, 2001, p. 58).

Figura 1- Representação de matriz bidimensional de uma imagem relacionada a uma faixa específica de espectro



Fonte: Sabins (1978) apud Novo e Ponzoni (2001)

De acordo com a altura de coleta, a aquisição de imagens para o sensoriamento remoto pode ocorrer em diferentes níveis, podendo ser feita em nível de laboratório,

campo, sub- orbital ou orbital. O nível sub- orbital se refere à obtenção de dados por meio de sensores a bordo de aeronaves e veículos aéreos não tripulados, possibilitando que o imageamento possa ser utilizado para delimitação de propriedades, planejamento urbano, estimativas de parâmetros biofísicos e uma série de outras funcionalidades (SHIMABUKURO; MAEDA; FORMAGGIO, 2009, p. 400).

Segundo Carvalho, E. e Araújo (2009, p. 9), as resoluções das imagens constituem atributos importantes que caracterizam a qualidade dos dados que estão à disposição. Essas resoluções podem ser classificadas em:

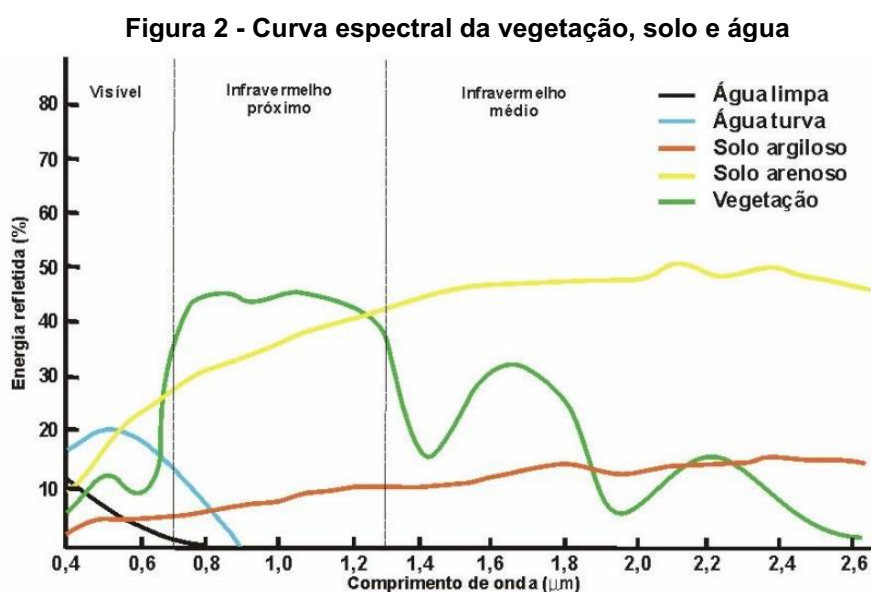
- a) Resolução espacial: se refere ao potencial que os sensores dispõem para assinalar as especificidades das superfícies e objetos de uma imagem, é expressa pela quantidade de pixels e representa a área da superfície que está sendo representada na imagem (CARVALHO, E.; ARAÚJO, 2009, p. 9).
- b) Resolução espectral: é definida pela largura das faixas espectrais e/ou pelo número de faixas que os sensores conseguem captar, quanto mais estreitas forem as bandas espectrais ou quanto maior o número de faixas reconhecidas pelos sensores, mais alta será a resolução espectral de uma imagem (FIGUEIREDO, 2005, p. 14).
- c) Resolução radiométrica: é definida pela capacidade dos sensores em identificar mudanças na energia que é refletida pelos alvos da imagem, está relacionada aos níveis de cinza da imagem e é medida em bits (FIGUEIREDO, 2005, p. 14; MORAES, E. 2002, p. 20).
- d) Resolução temporal: é caracterizada pela regularidade com que um sensor é capaz de gerar imagens de uma determinada região, pode ser medida em dias ou horas (SHIMABUKURO; MAEDA; FORMAGGIO, 2009, p. 401).

Antes que as imagens obtidas por meio do sensoriamento remoto possam ser processadas digitalmente, é necessário realizar um pré-processamento para fazer correções radiométricas, geométricas e atmosféricas, a fim de evitar a perda de qualidade dos trabalhos e produtos resultantes das informações utilizadas. Durante o processamento digital das imagens também é possível fazer o realce das cenas por meio da ampliação de contraste e da composição colorida, esses métodos são feitos por meio de funções matemáticas que alteram os níveis de cinza ou os valores digitais e facilitam a interpretação dos dados (FIGUEIREDO, 2005, p. 17-22).

2.4.3 Comportamento espectral de objetos naturais

O comportamento espectral de cada objeto é definido pela sua interação com a energia eletromagnética (REM), especialmente pela sua capacidade de absorver, refletir e transmitir a energia em relação ao espectro. Essa resposta à REM, está diretamente relacionada às características biofísicas dos materiais e perfaz a configuração da assinatura espectral individual dos objetos. Possibilitando a identificação, caracterização, localização e diferenciação de alvos no sensoriamento remoto (MAILLARD, 2000, p. 14- 16).

À vista disso, a compreensão da resposta espectral dos objetos é fundamental para direcionar a aquisição de dados sobre a região do espectro eletromagnético a ser trabalhado, em função da aplicação e objetivo do estudo. As características básicas da assinatura espectral de objetos naturais, incluindo solo, vegetação e água, já são conhecidas, conforme mostra a Figura 2 (MORAES, 2002, E., p. 16- 17).

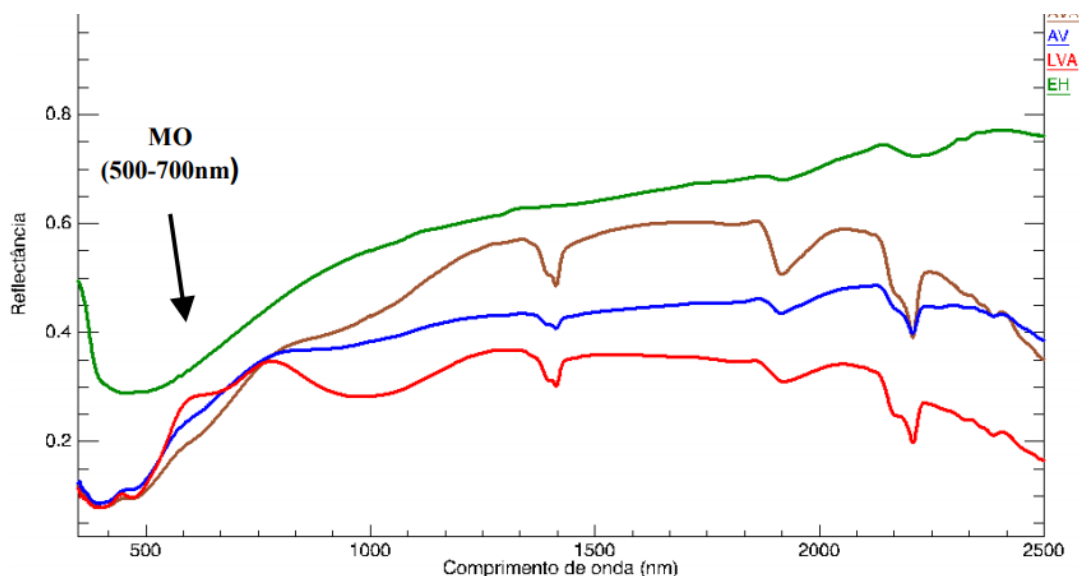


Fonte: Adaptado de Florenzano (2002) apud Camolez (2005)

A resposta espectral do solo é afetada pela sua cor, tamanho das partículas, composição e arranjo espacial dos seus elementos. Em solos argilosos, onde o tamanho das partículas é menor e há maior retenção de umidade no perfil, a absorvância é alta e a reflectância é baixa. O inverso ocorre em solos arenosos, que possuem partículas maiores e a retenção de umidade é menor, proporcionando uma maior reflectância e menor absorvância, o que caracteriza a curva espectral crescente

da faixa do visível para o infravermelho próximo (ALMEIDA; OLIVEIRA, 2010, p. 94). As curvas espectrais de diferentes classes de solo são representadas na Figura 3.

Figura 3 - Curvas espectrais de diferentes classes de solo em profundidade de 0,40-0,60m da área de preservação ambiental do Pratigi- Bahia

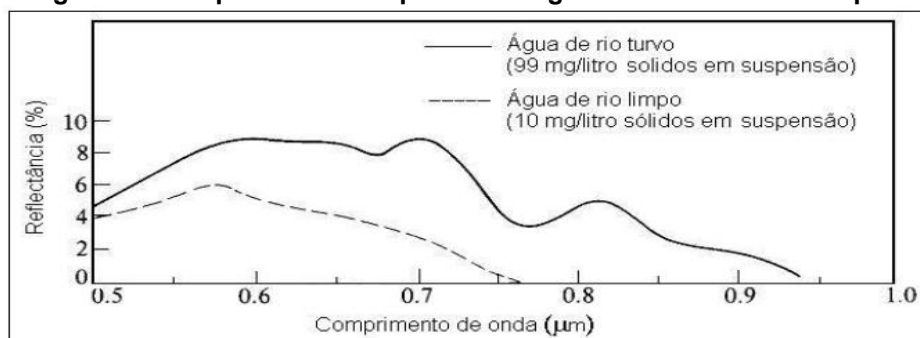


Legenda: AVA -Argissolo Vermelho (marrom); AA -Argissolo Amarelo (azul); LVA - Latossolo Vermelho Amarelo (vermelho); EH -Espodossolo Humilúvicos (verde).

Fonte: Mascarenhas *et al.* (2019)

O comportamento espectral da água líquida pura é caracterizado pela sua baixa capacidade de refletir a energia eletromagnética na faixa de 0,38 a 0,7 μm e absorção máxima em faixas acima de 0,7 μm , fazendo com que a água seja representada em imagens de satélite pela cor cinza escuro ou preta. A presença de materiais em suspensão na água influencia a reflectância e a absortância de corpos d'água, conforme mostra a Figura 4 (ALMEIDA; OLIVEIRA, 2010, p. 94; MORAES, E., 2002, p. 17).

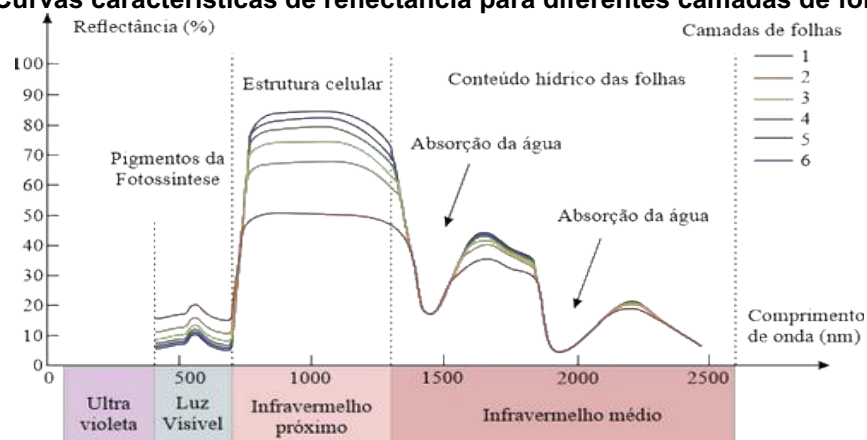
Figura 4 - Comportamento espectral da água em rios turvos e limpos



Fonte: Adaptado de Lillesand e Kiefer (1987) apud Ferreira, A. e Filho, W. (2009)

No comportamento espectral da vegetação, a folha é o principal elemento que interfere na resposta das plantas em relação a energia eletromagnética. A reação espectral das folhas saudáveis na região do visível do espectro é influenciada pela clorofila das plantas, resultando na alta reflexão de REM na faixa do verde e a alta absorção na faixa do azul e vermelho. Para a região do infravermelho próximo, a estrutura celular da vegetação é responsável por determinar a resposta espectral das plantas, o que proporciona a alta refletância da energia eletromagnética. A partir da região do infravermelho médio, é o conteúdo de água presente nas folhas que determina o comportamento espectral da vegetação. Portanto, quanto maior o conteúdo de água na folha maior é a sua absorção, esses comprimentos de onda são usados para determinar o conteúdo hídrico da vegetação (MORAES, E., 2002, p. 17; NOVO e PONZONI, 2001, p. 52; SANTOS, 2013, p. 22-24). A curva espectral característica da vegetação está representada na Figura 5.

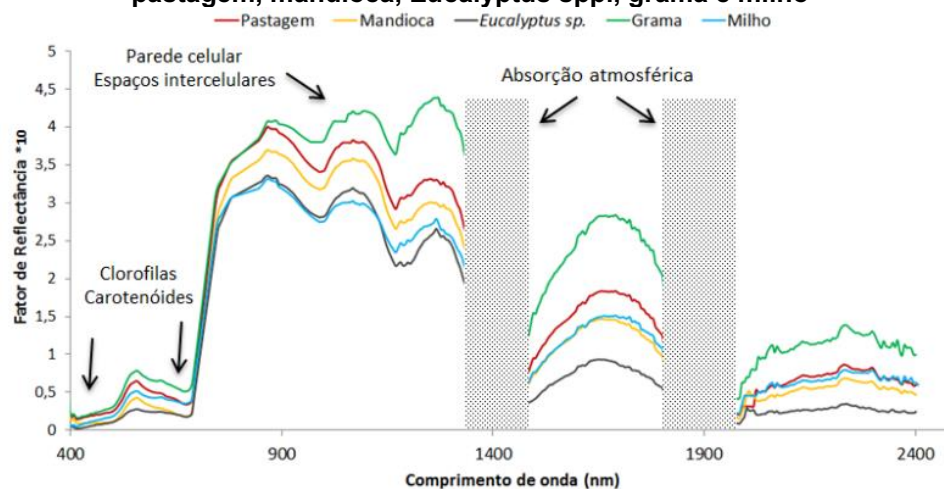
Figura 5 - Curvas características de reflectância para diferentes camadas de folhas



Fonte: Auster Tecnologia apud Pereira, V. (2019)

As propriedades espectrais das folhas variam de acordo com a estrutura interna, características morfológicas, composição química e estágio fisiológico das plantas, e com as condições climáticas que as culturas são submetidas ao longo do seu ciclo. Visto que essas propriedades podem ser alteradas ao longo do tempo, a resposta espectral da vegetação pode ser remodelada durante o seu período de sobrevivência. Além disso, as curvas espectrais de vegetação são modificadas pelos diferentes tipos de plantas, conforme observado no Figura 6, uma vez que a estrutura e organização celular variam conforme as espécies (SANTOS, 2013, p. 25-26 e 30).

Figura 6 - Espectro de reflectância obtido com sensor imageador hiperespectral AISAFenix de pastagem, mandioca, Eucalyptus spp., grama e milho



Fonte: Crusio *et al.* (2017)

A curva de reflectância de folhas verdes saudáveis isoladas são muito similares aquelas encontradas em dosséis vegetais, o que permite fazer previsões dos padrões de reflectância dos dosséis em imagens multiespectrais. A orientação, distribuição espacial e densidade das plantas determinam a arquitetura da vegetação e são responsáveis por influenciar o comportamento espectral dos dosséis (NOVO; PONZONI, 2001, p. 55).

2.4.4 Índices de vegetação

Os índices de vegetação são calculados seguindo os princípios de divisão de bandas e tem como objetivo principal evidenciar alterações de densidade na cobertura vegetal. Para a criação desses índices é importante conhecer a curva de reflectância da vegetação, sendo que para as plantas, a região que apresenta maior absorvância é a faixa da luz vermelha (650 nm) e a região com maior reflectância é a faixa do infravermelho próximo (BAPTISTA *et al.*, 2012, p. 147).

Esses índices não são qualificados para mensurar diretamente nenhum componente da vegetação, sua aplicação é reservada apenas para adquirir uma comparação relativa e especializada da característica de interesse entre as medições feitas, para que possa ser relacionada a outros elementos medidos a campo, a fim de atribuir valores integrais a um componente vegetal (IBARRA, 2020).

Existem inúmeros índices de vegetação descritos na literatura científica, entretanto poucos são realmente aplicados e possuem base biofísica considerável, os principais são o NDVI, SAVI, VARI, EVI, LAI, NDWI e o GNDVI. Cada índice tem suas limitações e é indicado para a avaliação de componentes vegetais específicos (EARTH OBSERVING SYSTEM, 2020a; IBARRA, 2020):

- a) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): é regularmente aplicado para fazer a aferição da intensidade da atividade clorofiliana, por isso, é amplamente usado na agricultura para fazer o mapeamento de áreas agrícolas e monitoramento das culturas, por meio da detecção de períodos de secas e danos causados por pragas, estimativas da produtividade agrícola e modelação hidrológica. Os valores do NDVI variam entre 1 e -1, sendo que 1 corresponde a áreas de vegetação mais densa, 0 áreas com solo exposto ou vegetação morta e valores menores que 0 representam ausência de vegetação (BAPTISTA *et al.*, 2012, p. 148).
- b) Índice SAVI: é uma modificação do NDVI, foi formulado para corrigir os efeitos dos ruídos gerados pelo solo. Portanto, é indicado para fazer análises de plantações novas e regiões com pouca vegetação (BORATTO e GOMIDE, 2013, p. 7348; EARTH OBSERVING SYSTEM, 2020a).
- c) Índice VARI: foi criado para realçar a vegetação na faixa do visível do espectro eletromagnético, além de minimizar diferenças de iluminação e interferências atmosféricas (EARTH OBSERVING SYSTEM, 2020a).
- d) Índice EVI: foi formulado para retificar os valores obtidos com o NDVI dos efeitos atmosféricos e ruídos causados pelo solo. É indicado para estudos de áreas com vegetação densa e com pouca interferência topográfica (EARTH OBSERVING SYSTEM, 2020a; KUPLICH; MOREIRA; FONTANA, 2013, p. 1117).
- e) Índice LAI: é usado para fazer avaliações da condição da lavoura e como parâmetro para previsão de produtividade. Os valores do índice podem variar de 0 a 3,5 (IBARRA, 2020).
- f) Índice NDWI: é usado no sensoriamento remoto para avaliar a quantidade de água líquida presente na vegetação. Ao contrário do NDVI que se baseia na utilização de uma banda no vermelho e outra no infravermelho próximo, o NDWI usa as duas bandas no infravermelho próximo, que são menos vulneráveis ao espalhamento atmosférico (FORMAGGIO e SANCHES, 2017, p. 105).

2.5 Sensoriamento remoto aplicado à cultura do milho

O desenvolvimento de estudos ligados ao sensoriamento remoto aplicado à agricultura vem acontecendo desde a década de 1970, quando os Estados Unidos lançaram o primeiro satélite da série Landsat. Uma das contribuições mais significativas do sensoriamento remoto para a atividade são os índices espectrais de vegetação, que são fundamentais no acompanhamento e na determinação de variáveis biofísicas das culturas agrícolas. Uma vez que, esses índices permitem realizar análises e estimativas da área foliar, atividade fotossintética e fitomassa das plantas (FORMAGGIO e SANCHES, 2017, p. 18 e 95).

Um exemplo do uso do sensoriamento remoto em estudos aplicados à cultura do milho, é a pesquisa feita por Oliveira (2017), no desenvolvimento de modelos de predição de produtividade do milho por meio do índice NDVI em diferentes densidades populacionais e arranjos espaciais. O projeto concluiu que o índice NDVI foi capaz de fornecer dados satisfatórios para os modelos criados para as densidades de 55 e 60 mil plantas ha^{-1} , semeados em linhas duplas e em espaçamento reduzido. Entretanto, para uma população de 65 mil plantas ha^{-1} semeado em linhas duplas, o modelo de predição foi comprometido por valores semelhantes de NDVI para produtividades distintas.

Enquanto isso, Demarchi e Piroli (2015), desenvolveram um trabalho que se baseou na aplicação dos índices de vegetação NDVI e NDWI para análise dos impactos das geadas ocorridas em 2011 na cobertura vegetal e em algumas culturas agrícolas, incluindo o milho, do município de Cândido Mota- SP. Os resultados obtidos com o estudo permitiram concluir que o uso dos índices NDVI e NDWI permitiram a aferição dos danos provocados pelas geadas. Além disso, o desempenho desses dois índices foi considerado semelhante para a determinação do vigor vegetativo, conteúdo de água da vegetação e para os efeitos causados pelas geadas.

De maneira geral, para o plantio e desenvolvimento das culturas agrícolas, incluindo o milho, as informações adquiridas por meio do sensoriamento remoto podem ser usadas como uma ferramenta suplementar no gerenciamento das lavouras e na tomada de decisão em relação ao manejo aplicado às espécies cultivadas. A partir desses dados é possível fazer o monitoramento da cultura, por meio da identificação de estresses fisiológicos, estimativa da produtividade, avaliação do

estado nutricional e de crescimento das plantas (BRANDÃO *et al.*, 2014, p. 65; SHIMABUKURO; MAEDA; FORMAGGIO, 2009, p. 403- 404).

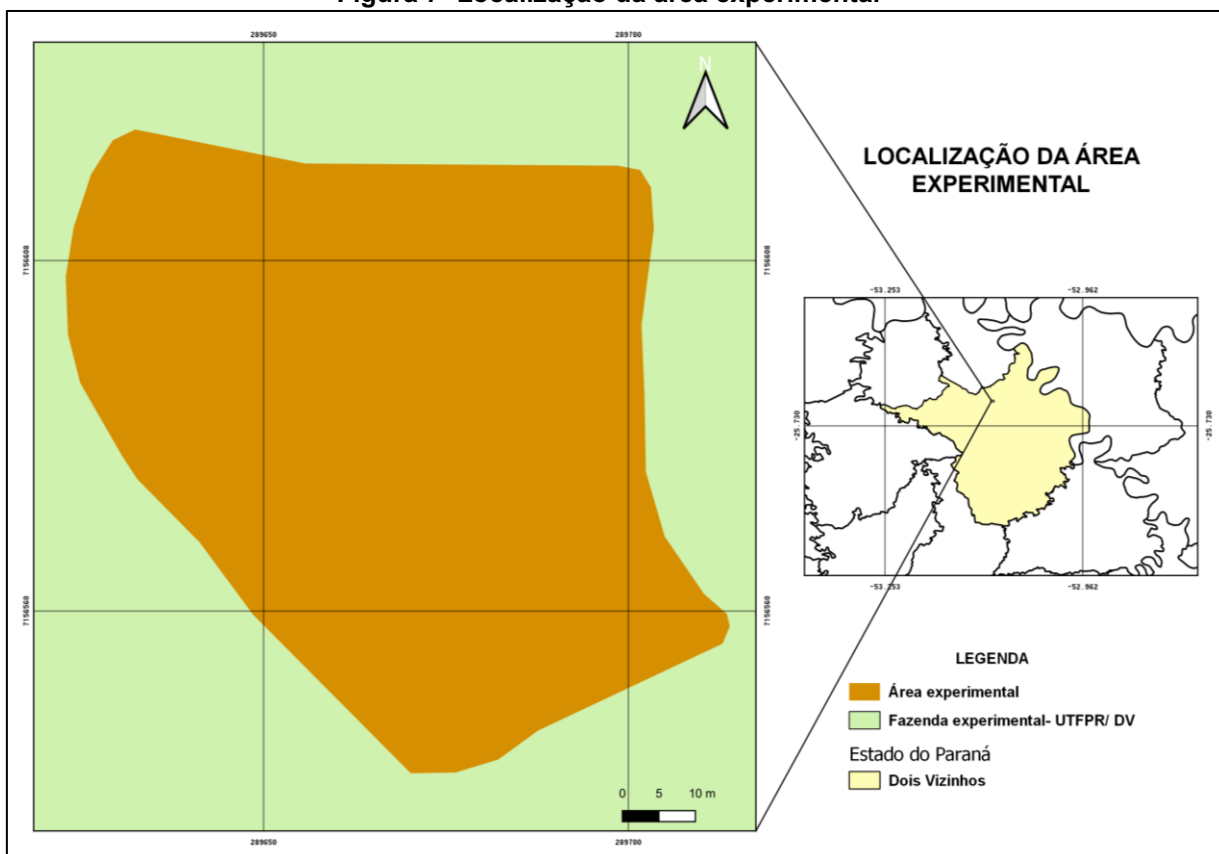
Mesmo com os benefícios e sua ampla aplicabilidade na agricultura, o sensoriamento remoto apresenta restrições, principalmente com a perda de qualidade das imagens obtidas com os sensores, devido a ruídos causados por interferências atmosféricas e presença de nuvens. Além disso, as informações adquiridas remotamente não excluem a necessidade de fazer coletas de dados à campo (LUIZ, 2002, p. 31; MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2013, p. 25).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

A área (Figura 7) em que foi conduzido o estudo está localizada na fazenda experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus Dois Vizinhos*. O mapa de localização da área está disposto no Anexo A. O solo é categorizado como Latossolo Vermelho Distroférico (ANJOS *et al.*, 2018) e segundo Köppen, o clima da região é classificado como Cfa, clima subtropical úmido, com temperaturas variando de -3°C e 18°C nos meses mais frios, com possibilidade de ocorrência de geadas e temperaturas acima de 22°C nos meses mais quentes (ALVARES *et al.*, 2013).

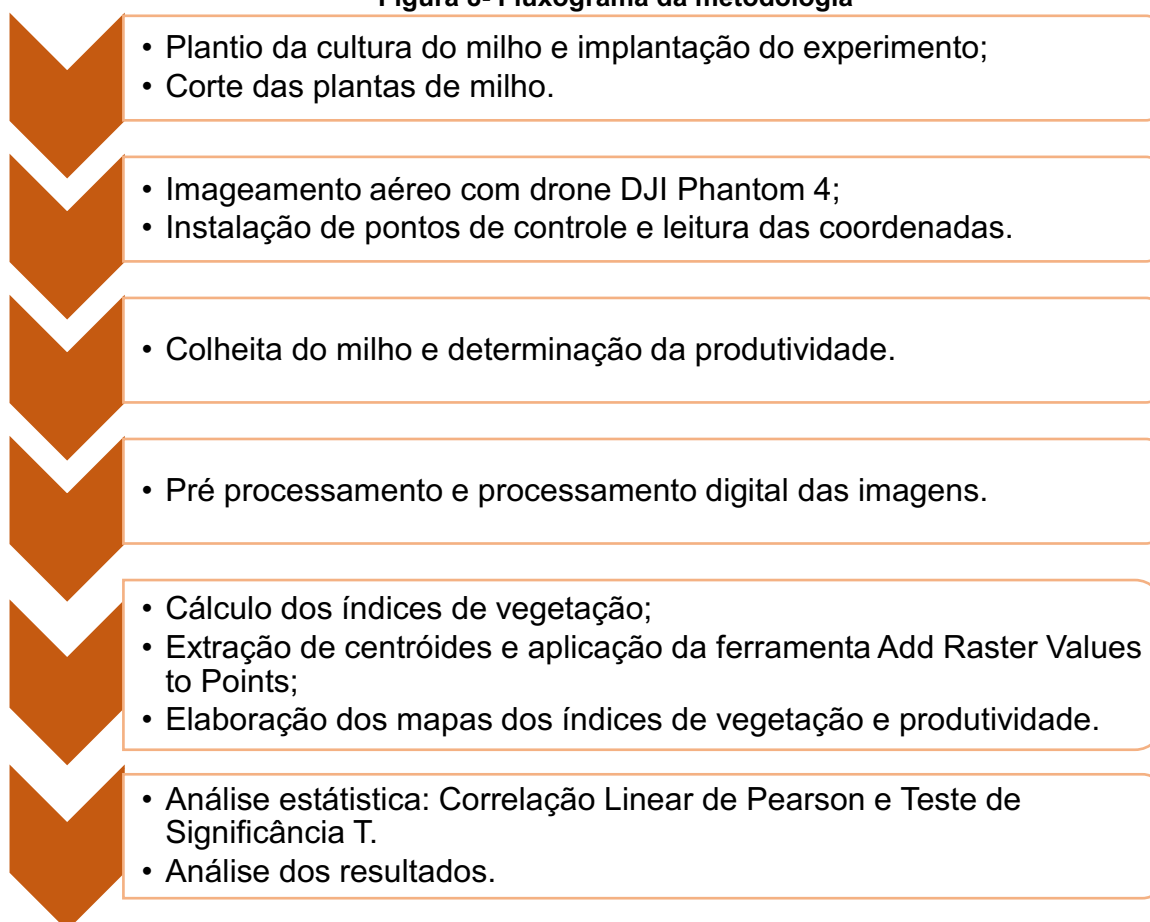
Figura 7- Localização da área experimental



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 8 é apresentado um fluxograma que descreve todas as etapas da metodologia aplicada para a realização deste trabalho.

Figura 8- Fluxograma da metodologia

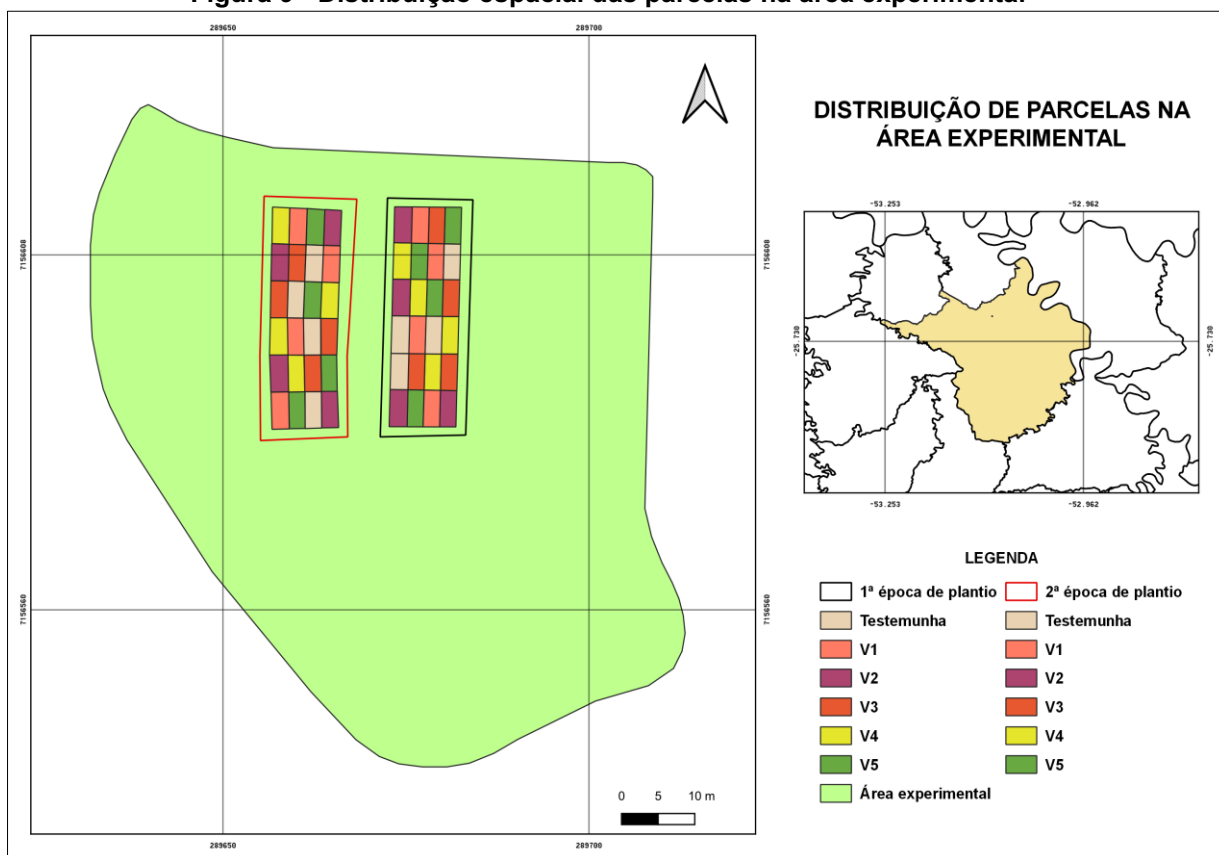


Fonte: Autoria própria (2022).

3.2 Condução do experimento

O estudo consistiu no acompanhamento de um experimento realizado com base na simulação dos danos de geada e granizo na cultura do milho, por meio do corte das plantas ao nível do solo em diferentes estádios fenológicos. O delineamento experimental usado foi o de blocos ao acaso, em esquema fatorial com parcelas subdivididas (6 x 2) com 4 repetições. Onde, o primeiro fator representa as subparcelas, que são compostas pelos estádios vegetativos em que foram feitos os cortes da planta de milho (estádio V1, V2, V3, V4, V5) mais testemunha (sem corte), e o segundo fator que diz respeito as parcelas principais, representando as épocas de plantio, que foram realizadas nos dias 24 de agosto de 2021 (primeira época) e 14 de setembro de 2021 (segunda época). A distribuição espacial das parcelas está descrita na Figura 9 e no mapa disposto no Anexo B.

Figura 9 - Distribuição espacial das parcelas na área experimental



Fonte: Autoria própria (2022)

A cultivar híbrida de milho utilizada foi a VYHR 3016 da Pioneer, semeada em sistema de plantio direto sobre palhada de aveia (*Avena sativa*) dessecada com glifosato 20 dias antes do plantio da cultura (Figura 10). O experimento teve 48 parcelas compostas por 5 linhas de plantio com espaçamento de 0,45m e comprimento de 5m, totalizando uma área de aproximadamente 540 m².

Figura 10- Plantas de milho em estágio V1 sobre palhada de aveia



Fonte: Autoria própria (2021)

Foi realizada adubação de base no sulco de semeadura com o fertilizante mineral NPK 8-20-20, em uma dose de 350 kg ha^{-1} , de acordo com análise de solo da área e o Manual de Adubação e Calagem da EMBRAPA para o Estado do Paraná (MOREIRA *et al*, 2017). Também foi feita aplicação de adubação de cobertura com ureia nos estádios V4 e V7 (considerando o estágio fenológico da parcela testemunha), em uma dose de 200 kg ha^{-1} . Ao longo do ciclo da cultura foi necessário realizar o controle de plantas daninhas com o herbicida Atrazina 900 WG, na dose de 5 L ha^{-1} , e o controle de cigarrinha do milho (*Dalbulus maidis*) e complexo de percevejos, com os inseticidas Connect e Lannate, com doses de $0,7 \text{ L ha}^{-1}$ e $0,6 \text{ L ha}^{-1}$, respectivamente (Figuras 11 e 12).

Figura 11- Presença de cigarrinha do milho



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 12- Dano de percevejo em folha de milho



Fonte: Autoria própria (2021).

3.3 Aquisição das imagens com drone

Os voos foram realizados utilizando um drone DJI Phantom 4 (Figura 13) equipado com uma câmera multiespectral Mapir Survey 3W RGN de 12 MP com lente de 19 mm e f/2.8 de abertura. Esse modelo de câmera multiespectral é capaz de captar as bandas espectrais do vermelho (660 nm), verde (550 nm) e infravermelho próximo (850 nm).

Figura 13- Drone DJI Phantom 4



Fonte: Autoria própria (2021)

Os planos de voo foram elaborados por meio do aplicativo DroneDeploy e os parâmetros estabelecidos foram: 25 m de altura, 2 m s^{-1} de velocidade, 80% de sobreposição frontal e 75% de sobreposição lateral.

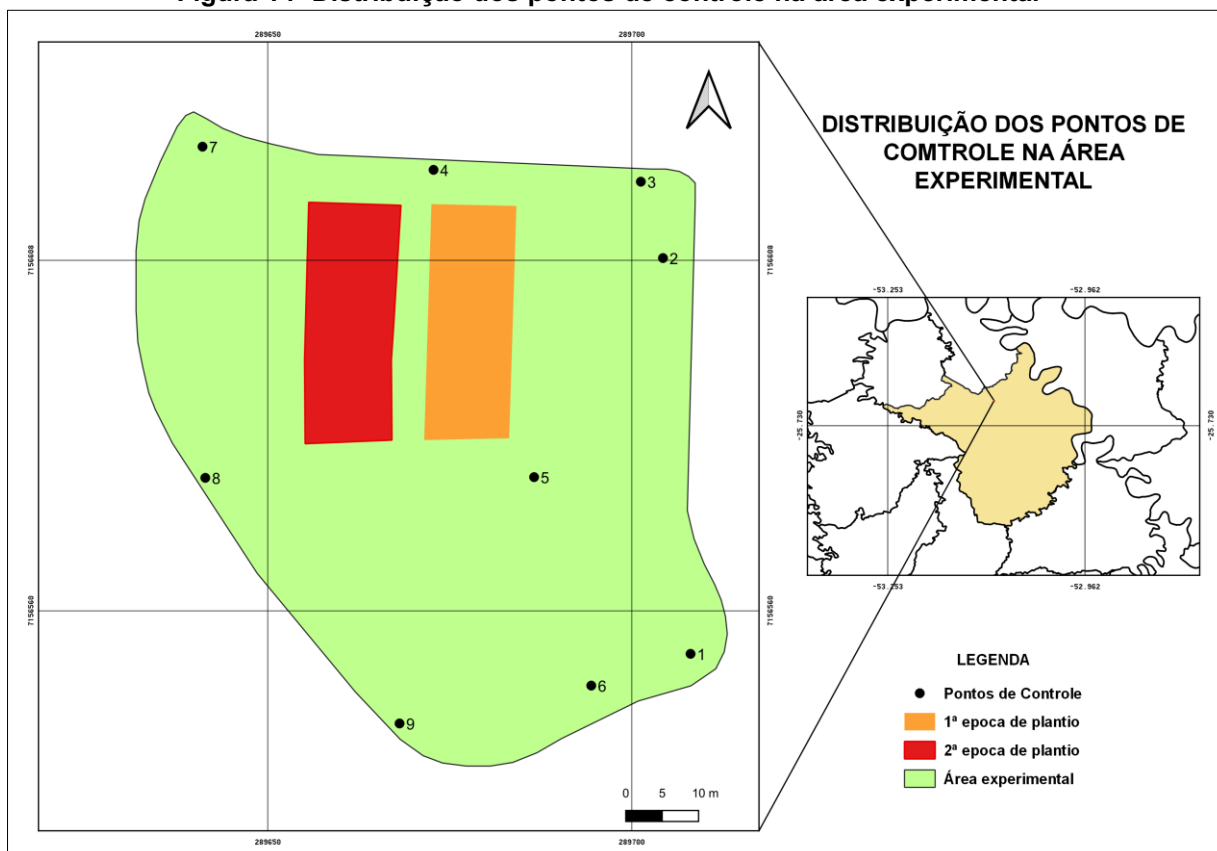
Para a primeira época de plantio os voos foram realizados nos estádios V6 (E1-V6), no dia 08/10/2021 e R1 (E1-R1) no dia 10/11/2021 e para a segunda época de plantio nos estádios V6 (E2-V6) no dia 22/10/2021, V10 (E2-V10) no dia 10/11/2021 e R2 (E2-R2) no dia 02/12/2021. Inicialmente, as avaliações seriam realizadas nos estádios V6, V10, V12, R1 e R2 para todas as épocas de semeadura. Entretanto, devido a ocorrência de chuva, ventos fortes, interferência magnética e nebulosidade

durante os horários e dias que seriam realizados os voos, não foi possível realizar a captura de imagens.

3.3.1 Implantação de pontos de controle

Levando em consideração que o drone utilizado para o imageamento possui apenas GPS de navegação, que apresenta uma precisão de suas coordenadas na ordem de metros, foram instalados 9 pontos de controle na área de estudo. A distribuição dos pontos foi feita levando em consideração a equidistância entre alvos e a existência de falhas no plantio, para evitar a eliminação de plantas de milho para materialização dos pontos de controle. Além disso, também foi priorizado a alocação dos pontos nas extremidades do terreno, onde a precisão tende a ser mais baixa por haver menor sobreposição de imagens. A distribuição dos pontos de controle está representada na Figura 14 e no mapa do Anexo C.

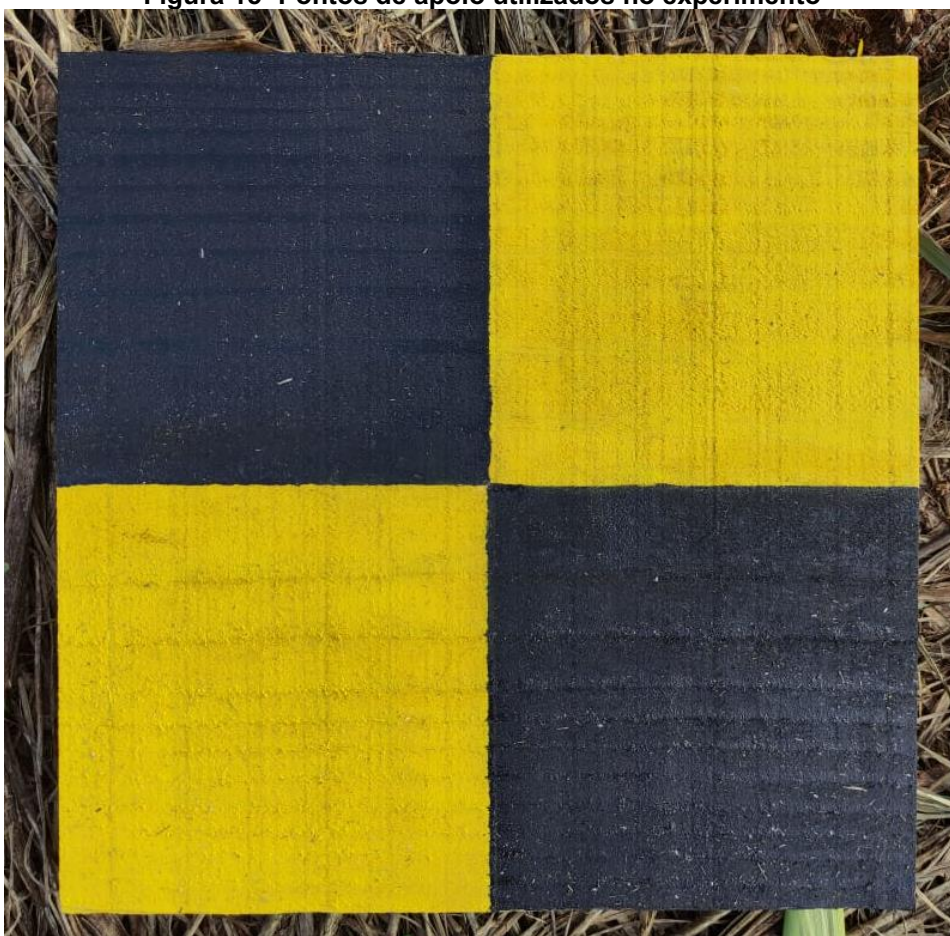
Figura 14- Distribuição dos pontos de controle na área experimental



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir da instalação dos pontos, foi possível realizar a correção geométrica das imagens, resultando em um controle de qualidade durante o processamento, bem como aumento da precisão posicional das imagens capturadas. As posições dos pontos de controle foram materializadas e demarcadas por alvos confeccionados em madeira, com dimensões de 0,30x0,30 m, nas cores preto e amarelo, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15- Pontos de apoio utilizados no experimento



Fonte: Autoria própria (2021)

Para determinar as coordenadas dos pontos de controle foram utilizados receptores GPS topográficos, que fornecem precisão em centímetros. O método de posicionamento adotado para o levantamento foi o relativo com a técnica estático rápido. Onde o receptor GPS (ROVER) ficou posicionado sobre os alvos que materializaram a posição dos pontos de controle, durante um período de 10 minutos (Figura 16) e o outro receptor GPS foi posicionado sobre uma RN de coordenadas conhecidas (BASE), situada atrás do Bloco K1 da UTFPR-DV (Figura 17).

Figura 16- Rover sobre ponto de apoio



Fonte: Aatoria própria (2021)

Figura 17- Receptor GPS sobre RN com coordenadas conhecidas (BASE)



Fonte: Aatoria própria (2021)

3.3.2 Utilização de alvo terrestre de calibração de reflectância

Para realizar a correção radiométrica das imagens obtidas com o levantamento aéreo, foi utilizado um alvo terrestre de calibração de reflectância de câmeras da Mapir (Figura 18). Antes da realização de cada voo, foram capturadas imagens do alvo, posicionado em pleno sol, com a câmera multiespectral.

Figura 18- Alvo terrestre de calibração de reflectância



Fonte: Autoria própria (2021)

3.4 Processamento digital

3.4.1 Pré-processamento das imagens

O pré-processamento das imagens obtidas com o drone foi realizado no software Mapir Camera Control, onde as imagens foram convertidas do formato RAW para o formato TIFF e, posteriormente, calibradas utilizando as imagens do alvo terrestre de calibração de reflectância.

3.4.2 Processamento das imagens

Os ortomosaicos foram criados por meio do software Agisoft Metashape (licença de avaliação de 30 dias) seguindo o fluxo de trabalho do próprio programa. Após as imagens calibradas terem sido importadas para o Agisoft foi realizada uma seleção, onde foram excluídas imagens capturadas além da área onde estavam localizadas as parcelas, com o objetivo de diminuir o tempo de processamento. Em seguida, foi realizada a conversão do sistema de coordenadas WGS 84 para o SIRGAS 2000 UTM 22S.

Durante a etapa de alinhamento, foi realizada a fototriangulação das imagens utilizando um nível de precisão elevado. As funções de pré-seleção genérica e pré-seleção de referência foram mantidas ativas, conforme pré-estabelecido pelo software. O produto do alinhamento das imagens foi a criação da nuvem esparsa de pontos (Tie Points). Após o alinhamento, foi feita a inserção das coordenadas dos pontos de controle levantadas em campo e o apontamento da localização desses pontos em relação aos seus respectivos alvos, identificados nas imagens com coordenadas correspondentes. A fim de melhorar o posicionamento da nuvem esparsa em relação aos pontos de controle, foi utilizado a ferramenta Optimize Cameras.

Devido a seleção de imagens para realização do processamento, nem todos os pontos de controle instalados na área foram utilizados. Na Tabela 1, estão descritos os pontos usados durante o processamento das imagens para cada voo.

Tabela 1- Pontos de apoio usados no processamento digital das imagens

Data do voo	Pontos de apoio
08/10/2021	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
22/10/2021	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
10/11/2021	2, 3, 4, 5, 7, 8
02/12/2021	2, 3, 4, 5, 7, 8, 9

Fonte: Autoria própria (2022).

Com base na nuvem esparsa de pontos, foi gerado uma nuvem densificada, a fim de permitir que o software aumentasse o número de pontos na nuvem, diminuindo os espaços vazios e melhorando a representação da área.

A partir da nuvem densa, foi criado um modelo tridimensional e, posteriormente, foi realizada uma texturização com o objetivo de melhorar o aspecto

visual do produto. O processamento foi finalizado com a criação do ortomosaico, resultado obtido a partir da ortorretificação e mosaicagem das imagens.

A resolução espacial e o erro total de posicionamento das imagens obtidas nos voos realizados com o drone estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2- Resolução espacial e erro total de posicionamento das imagens

Data do voo	Erro total de posicionamento (cm)	Resolução espacial (cm)
08/10/2021	13,87	1,43
22/10/2021	16,92	1,63
10/11/2021	13,77	1,54
02/12/2021	4,75	1,4

Fonte: Autoria própria (2022).

3.5 Cálculo dos índices de vegetação

Os cálculos dos índices de vegetação foram realizados utilizando as bandas do verde, vermelho e infravermelho próximo, por meio da ferramenta Calculadora Raster do software QGIS (versão 3.10), a partir das equações descritas nos Itens 3.5.1, 3.5.2, 3.5.3 e 3.5.4.

3.5.1 Índice NDVI

O índice NDVI é calculado a partir das bandas espectrais do infravermelho próximo e do vermelho, conforme mostra a Equação 1 (EARTH OBSERVING SYSTEM, 2020b):

$$NDVI = \left(\frac{NIR - VERMELHO}{NIR + VERMELHO} \right) \quad (1)$$

Onde, NIR representa a banda espectral do infravermelho próximo e Vermelho corresponde a faixa espectral do vermelho.

Os valores do índice NDVI podem oscilar entre 1 e -1, onde 1 representa áreas com alta atividade clorofiliana e, portanto, regiões com vegetação densa, 0 caracteriza espaços com vegetação morta ou solo exposto e valores menores que 0 se referem a locais com vegetação inexistente (BAPTISTA *et al.*, 2012, p. 148).

3.5.2 Índice NDWI

O cálculo do índice NDWI pode ser realizado a partir das bandas espectrais do verde e do infravermelho próximo, conforme descreve a Equação 2 (RODRIGUES; MORAIS; PASCHOAL, 2017):

$$NDWI = \left(\frac{VERDE - NIR}{VERDE + NIR} \right) \quad (2)$$

Onde, NIR equivale a banda do infravermelho próximo e o verde corresponde a banda espectral verde.

O índice NDWI possui valores que podem variar entre 1 e -1 conforme o conteúdo de água presente na folha e o tipo de cobertura vegetal da área. Sendo que 1 representa uma quantidade alta de água na vegetação e cobertura vegetal mais densa, e valores iguais e menores que 0 indicam baixo conteúdo de água nas plantas e baixa cobertura vegetal (EUROPEAN COMMISSION, 2011, p. 4, tradução nossa).

3.5.3 Índice SAVI

O índice SAVI (Índice de vegetação ajustado ao solo), utiliza no seu cálculo uma constante e as bandas espectrais do infravermelho próximo e do vermelho, conforme explicitado na equação 3 (GAMEIRO *et al.*, 2016, p. 17):

$$SAVI = (1 + L) * (piv - pv) / (L + piv + pv) \quad (3)$$

Onde, *piv* representa a banda do infravermelho próximo, *pv* caracteriza a banda do vermelho e *L* identifica a constante de fator de ajuste do índice, que pode variar de 0,25 a 1 de acordo com a densidade da vegetação. Sendo que 0,25 é usado quando há uma cobertura vegetal densa, 0,5 é indicado para áreas onde a cobertura de solo é intermediária e 1 quando a densidade vegetal for baixa. Valores de SAVI iguais a 0 equivalem aos valores do índice NDVI (HUETE, 1988 apud GAMEIRO *et al.*, 2016, p. 17). Neste trabalho, o valor adotado para a constante da fórmula foi de 0,5.

3.5.4 Índice LAI

O LAI leva em consideração a área foliar da vegetação e a área ocupada por essa vegetação, podendo ser calculado pela equação 4 (ALLEN *et al.*, 2002, p. 20, tradução nossa):

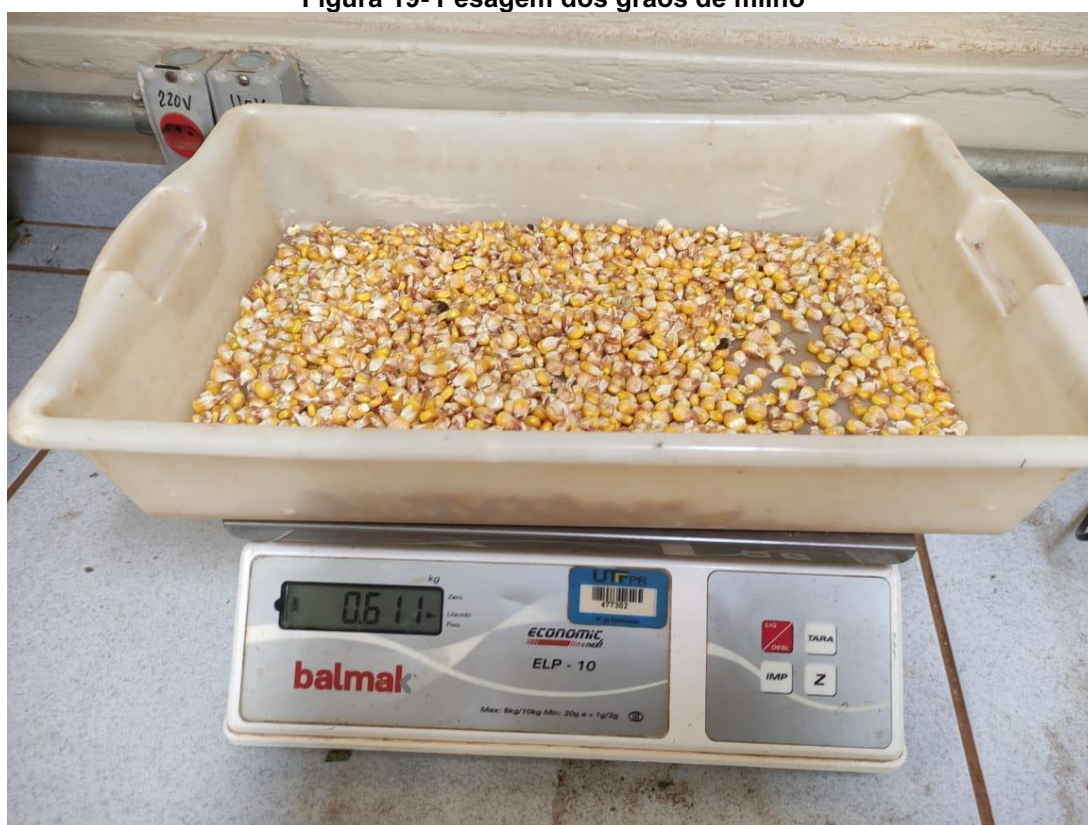
$$LAI = \ln((0,69 - SAVI/0,59)/0,91) \quad (4)$$

Para o cálculo do LAI, foram usados os valores de SAVI encontrados para cada imagem pela fórmula descrita no Item 3.5.3.

3.6 Determinação da produtividade da cultura do milho

A produtividade da cultura do milho foi determinada por meio da coleta manual de 30 espigas em cada parcela, que posteriormente foram trilhadas em uma trilhadeira cedida pela universidade. Os grãos foram pesados em uma balança de precisão (Figura 19).

Figura 19- Pesagem dos grãos de milho



Fonte: Autoria própria (2022)

Após a pesagem dos grãos, foi determinado a umidade utilizando um medidor de umidade portátil (Figura 20), o peso dos grãos foi corrigido para 13% de umidade, e depois extrapolado em kg ha^{-1} .

Figura 20- Determinação da umidade dos grãos



Fonte: Autoria própria (2022)

3.7 Extração de centroides e aplicação da ferramenta Add raster values to points

Levando em consideração que os dados de produtividade não foram coletados de forma georreferenciada, foi necessário realizar a extração dos centroides dos polígonos das parcelas para permitir a atribuição de uma coordenada aos valores de produtividade. Os centroides foram determinados utilizando o software QGIS (versão 3.10.5).

Em seguida, foi aplicada a ferramenta Add Raster Values to Points no QGIS utilizando o método de interpolação do vizinho mais próximo, a fim de atribuir os valores dos índices de vegetação às coordenadas com valores de produtividade conhecidos.

3.8 Elaboração do mapa de produtividade

Para elaboração do mapa de produtividade, foi realizado a importação do arquivo com os valores de produtividade de cada parcela no formato .csv para o software QGIS. Em seguida, esse mesmo arquivo foi exportado para o formato .shp e, posteriormente, foi realizada uma interpolação pelo método IDW, que faz uso de uma combinação linear ponderada dos pontos amostrados. O método IDW assume que pontos vizinhos possuem valores similares e pontos distantes são independentes (GIACOMIN *et al.*, 2014, p. 1318).

3.9 Análises estatísticas

Durante a análise estatística, foi realizado a condução da correlação linear de Pearson (r) entre os dados de produtividade e os valores dos índices de vegetação nos diferentes estádios fenológicos, por meio do uso do software R (R CORE TEAM, 2022). Para testar a significância dos coeficientes de correlação foi aplicado o Teste T, com 1% de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias de produtividade obtidas nos tratamentos da primeira época de semeadura foram maiores que as médias da segunda época. Sendo que, para ambos os períodos de plantio a produtividade foi maior no tratamento testemunha e nos tratamentos onde o corte da planta foi realizado nos primeiros estágios vegetativos, conforme demonstra a Tabela 3.

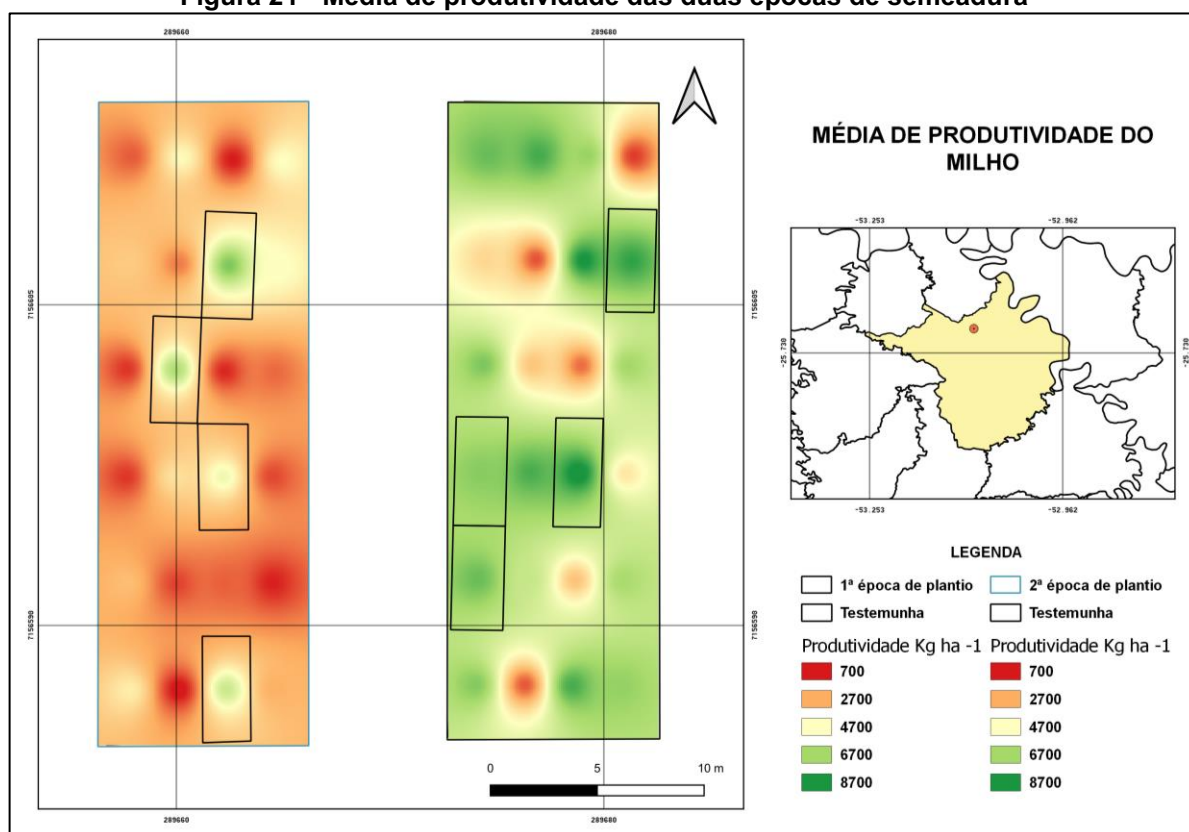
Tabela 3- Média de produtividade dos tratamentos semeados em 24/08/2021 e 14/09/2021

Tratamentos	24/08/2021 (Kg ha ⁻¹)	14/09/2021 (Kg ha ⁻¹)
Testemunha	8040,9	6168,67
1	8258,42	4407,89
2	7248,75	3514,19
3	6562,1	1525,39
4	3593,03	1435,2
5	1498,47	715,937

Fonte: Autorial própria (2022)

A produtividade das duas épocas de plantio está sendo representada na Figura 21 e no mapa do Anexo D.

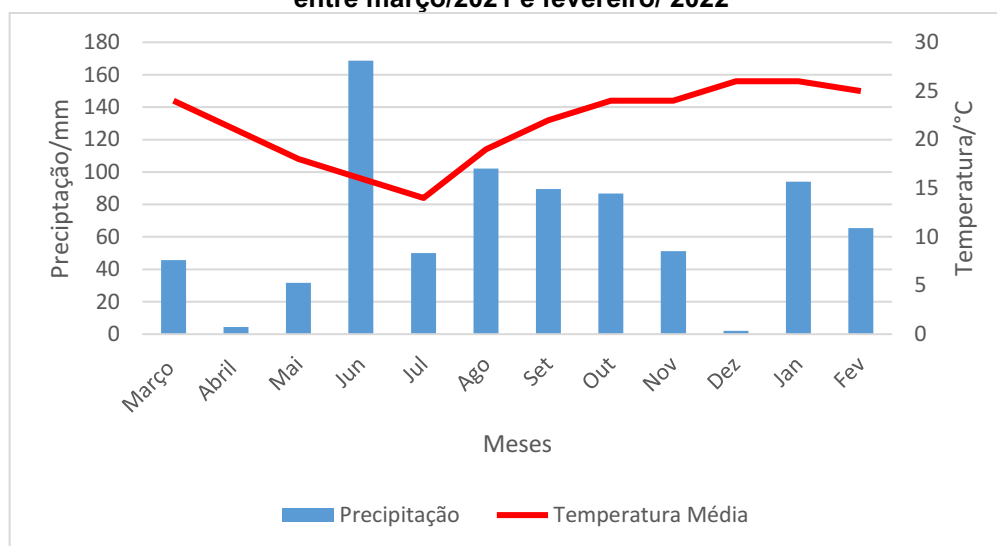
Figura 21 - Média de produtividade das duas épocas de semeadura



Fonte: Autorial própria (2022)

A redução da produtividade do milho semeado na segunda época de plantio foi agravada pelo estresse hídrico e térmico que a cultura sofreu entre o estágio V10 e a fase reprodutiva, devido a ocorrência de seca e ondas de calor entre os meses de novembro e dezembro. Segundo dados do Grupo de Pesquisa em Manejo e Conservação do Solo e Água da UTFPR - *Campus Dois Vizinhos*, durante esse período houve apenas 51,3 mm de precipitação no início do mês de novembro e 2 mm no final de dezembro, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22- Precipitação e temperatura média registrados no campus UTFPR, Dois Vizinhos- PR entre março/2021 e fevereiro/ 2022



Fonte: Grupo de Pesquisa em Manejo e Conservação do Solo e Água da UTFPR- Campus Dois Vizinhos (2022)

O resultado do coeficiente de correlação de Pearson entre produtividade e os índices de vegetação e o teste de significância aplicados para o voo realizado no dia 08/10/2021, que corresponde a E1-V6, estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4- Coeficiente de correlação de Pearson e Teste T entre índices de vegetação e produtividade para voo realizado em 08/10/2021 para E1-V6

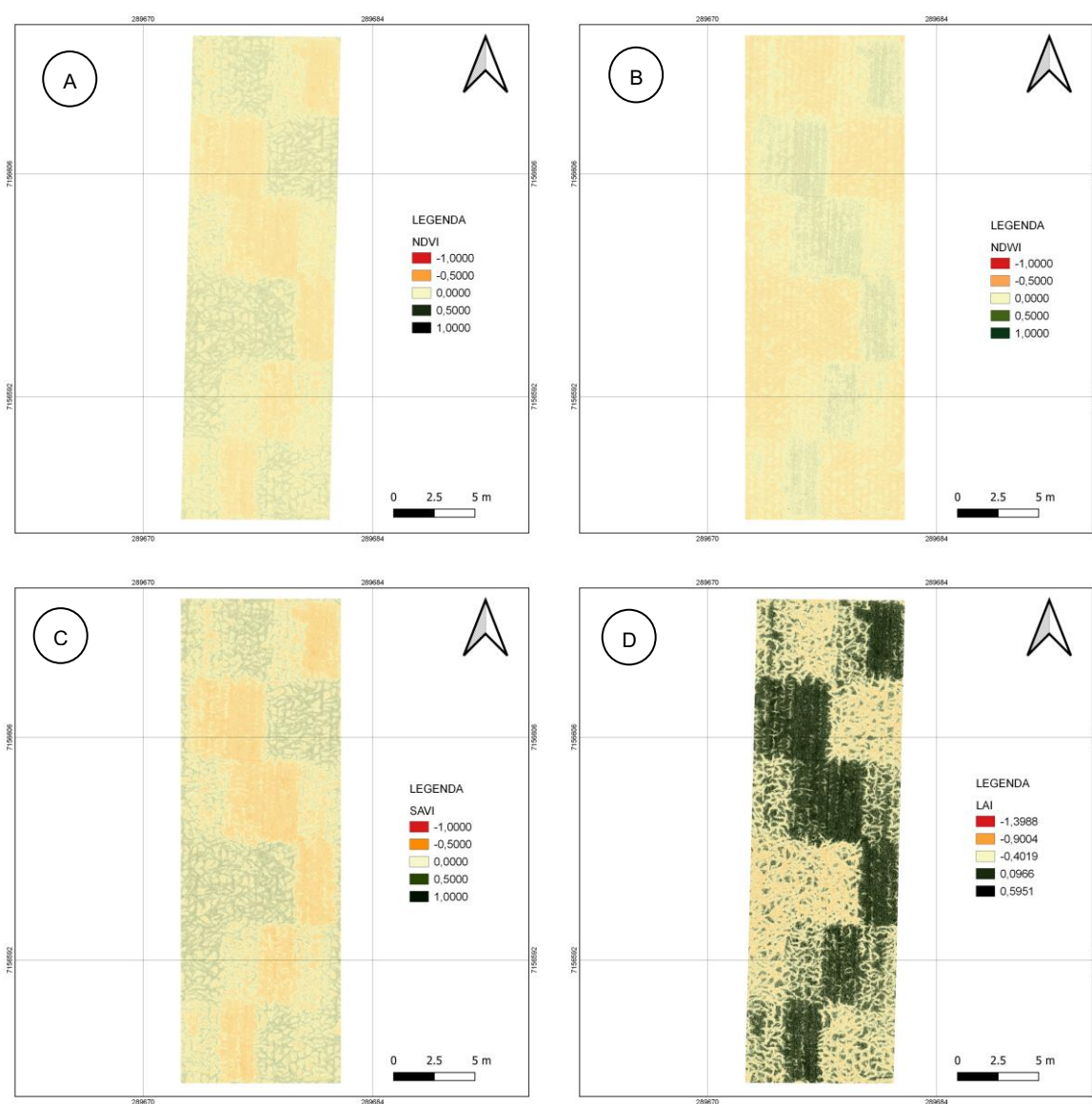
	Índices de vegetação			
	NDVI	NDWI	SAVI	LAI
Correlação de Pearson (r)	0,68	-0,75	0,68	-0,68
Teste T	4,58, p< 0,01	-5,59, p< 0,01	4,58, p< 0,01	-4,54, p< 0,01

Fonte: Autoria própria (2022)

Os índices NDVI e SAVI apresentaram correlação de Pearson moderada e positiva, indicando que as variáveis são dependentes e diretamente proporcionais. Enquanto os índices NDWI e LAI apresentaram correlação negativa e moderada,

demonstrando que as variáveis são dependentes e inversamente proporcionais. O teste T demonstrou que todos os coeficientes de Pearson encontrados são significativos. Os resultados dos índices podem ser visualizados na Figura 23, sendo que, para os índices NDVI e SAVI os valores abaixo de 0 representam solo exposto ou presença de plantas mortas, 0 a 0,5 área foliar reduzida e de 0,5 a 1 área foliar alta. Para o índice NDWI, os valores abaixo de 0 fazem referência as áreas com maior densidade de vegetação e valores acima de 0 as áreas com solo exposto ou plantas mortas. Para o índice LAI, valores abaixo de 0 indicam solo exposto ou presença de plantas mortas e acima de 0 presença de vegetação.

Figura 23- Índices de vegetação calculados para imagens do voo 08/10/2021 para E1-V6



Nota: Figura A corresponde ao índice NDVI, B índice NDWI, C índice SAVI e ao D índice LAI
Fonte: Autoria própria (2022)

Os coeficientes de Pearson e os resultados do teste T correspondentes ao voo realizado no dia 10/11/2021, que faz referência a E1-R1, estão descritos na Tabela 5.

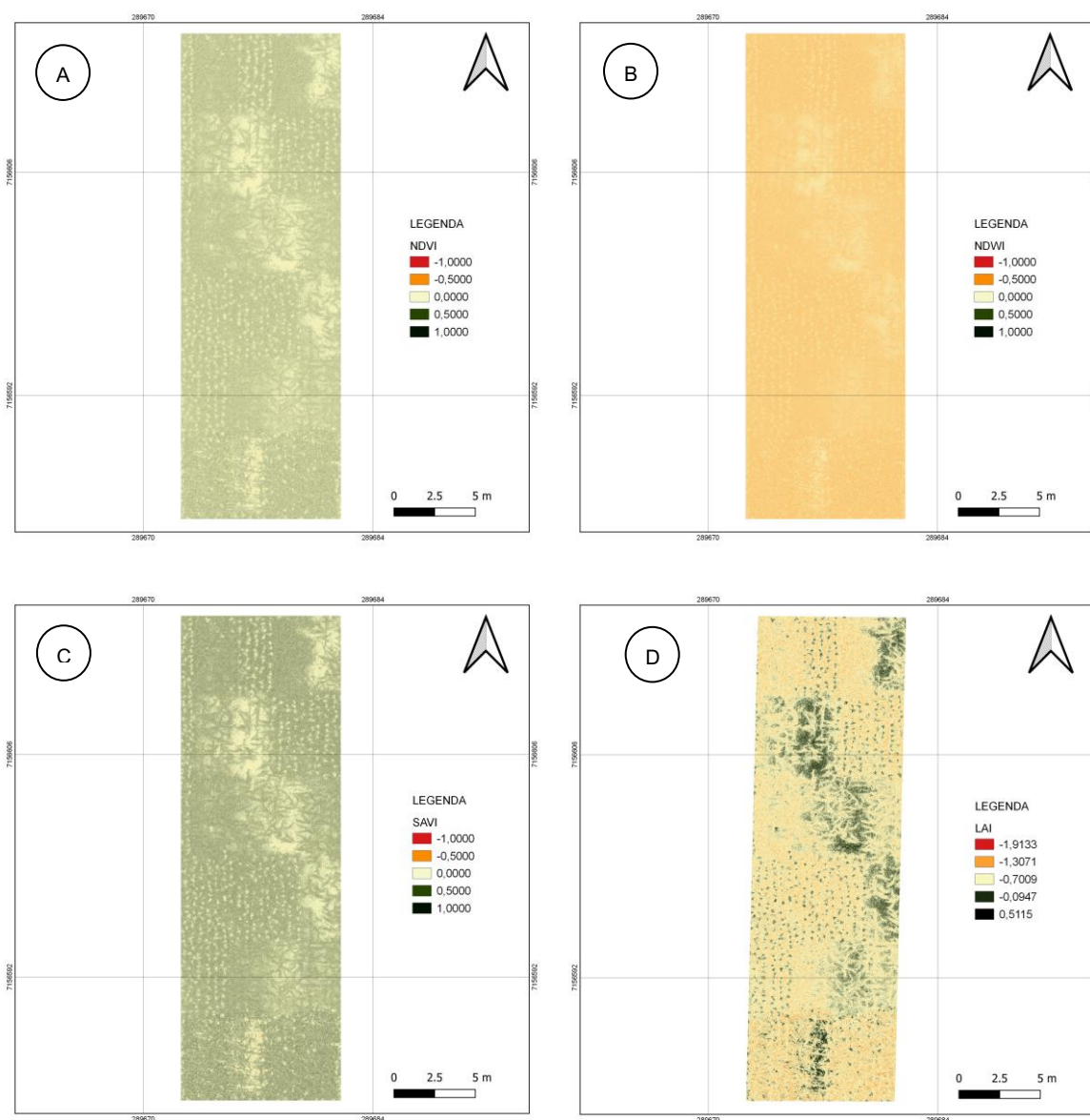
Tabela 5- Coeficiente de correlação de Pearson e Teste T entre índices de vegetação e produtividade para voo realizado em 10/11/2021 para E1-R1

	Índices de vegetação			
	NDVI	NDWI	SAVI	LAI
Correlação de Pearson (r)	0,44	-0,50	0,44	-0,44
Teste T	2,38, ns	-2,86, p< 0,01	2,38, ns	-2,38, ns

Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com esses resultados, o coeficiente de Pearson pode ser classificado como positivo e moderado para os índices NDVI e SAVI, demonstrando que as variáveis são dependentes e diretamente proporcionais. Para os índices NDWI e LAI, os índices se mantêm como negativos e moderados, indicando dependência e relação inversamente proporcional entre as variáveis. Entretanto, o teste T demonstrou significância apenas para o índice NDWI. O resultado do cálculo dos índices podem ser verificados pela Figura 24, sendo que, para os índices NDVI e SAVI os valores abaixo de 0 representam solo exposto ou presença de plantas mortas, 0 a 0,5 área foliar reduzida e de 0,5 a 1 área foliar alta. Para o índice NDWI, os valores abaixo de 0 fazem referência as áreas com maior densidade de vegetação e valores acima de 0 as áreas com solo exposto ou plantas mortas. Para o índice LAI, valores abaixo de 0 indicam solo exposto ou presença de plantas mortas e acima de 0 presença de vegetação.

Figura 24- Índices de vegetação calculados para imagens do voo 10/11/2021 E1-R1



**Nota: Figura A corresponde ao índice NDVI, B índice NDWI, C índice SAVI e ao D índice LAI
Fonte: Autoria própria (2022)**

Os resultados da análise estatística para os dados de produtividade e índice de vegetação calculado a partir do imageamento realizado no dia 22/10/2021, que corresponde a E2-V6 está descrito na Tabela 6.

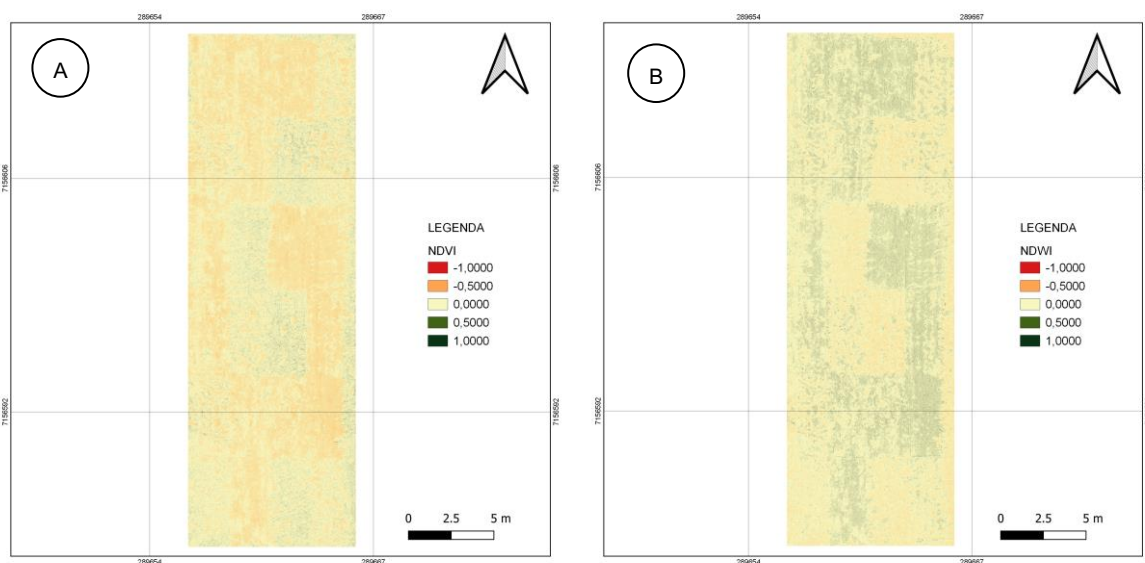
Tabela 6- Coeficiente de correlação de Pearson e Teste T entre índices de vegetação e produtividade para voo realizado em 22/10/2021 para E2-V6

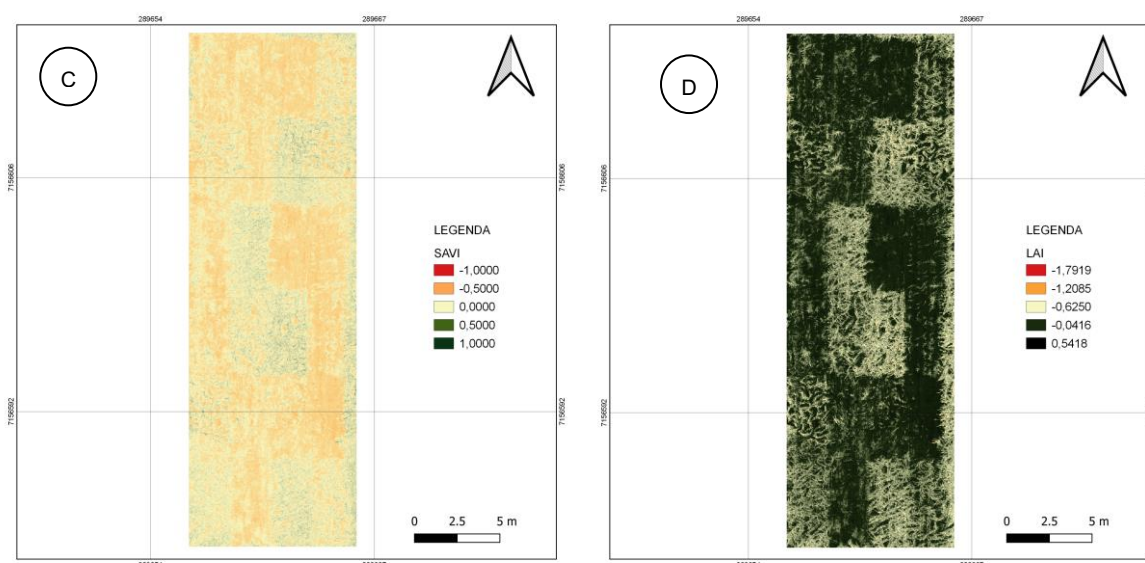
	Índices de vegetação			
	NDVI	NDWI	SAVI	LAI
Correlação de Pearson (r)	0,76	-0,59	0,76	-0,76
Teste T	5,79, p< 0,01	-3,61, p< 0,01	5,79, p< 0,01	-5,79, p< 0,01

Fonte: Autoria própria (2022)

Os índices NDVI e SAVI apresentaram correlação positiva e forte, indicando alto grau de dependência entre as variáveis e relação diretamente proporcional. Os índices NDWI e LAI demonstraram relação inversamente proporcional. No entanto, o índice NDWI apresentou relação fraca entre as variáveis e o índice LAI relação forte. O resultado do teste T demonstrou significância para todos os coeficientes de Pearson. O resultado do cálculo dos índices pode ser visualizado na Figura 25, sendo que, para os índices NDVI e SAVI os valores abaixo de 0 representam solo exposto ou presença de plantas mortas, 0 a 0,5 área foliar reduzida e de 0,5 a 1 área foliar alta. Para o índice NDWI, os valores abaixo de 0 fazem referência as áreas com maior densidade de vegetação e valores acima de 0 as áreas com solo exposto ou plantas mortas. Para o índice LAI, valores abaixo de 0 indicam solo exposto ou presença de plantas mortas e acima de 0 presença de vegetação.

Figura 25- Índices de vegetação calculados para imagens do voo 22/10/2021 para E2-V6





Nota: Figura A corresponde ao índice NDVI, B índice NDWI, C índice SAVI e ao D índice LAI
Fonte: Autoria própria (2022)

O resultado da correlação de Pearson entre produtividade e os índices de vegetação e o teste de significância aplicados para o voo realizado no dia 10/11/2021, referente a E2-V10, estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7- Coeficiente de correlação de Pearson e Teste T entre índices de vegetação e produtividade para voo realizado em 10/11/2021 para E2-V10

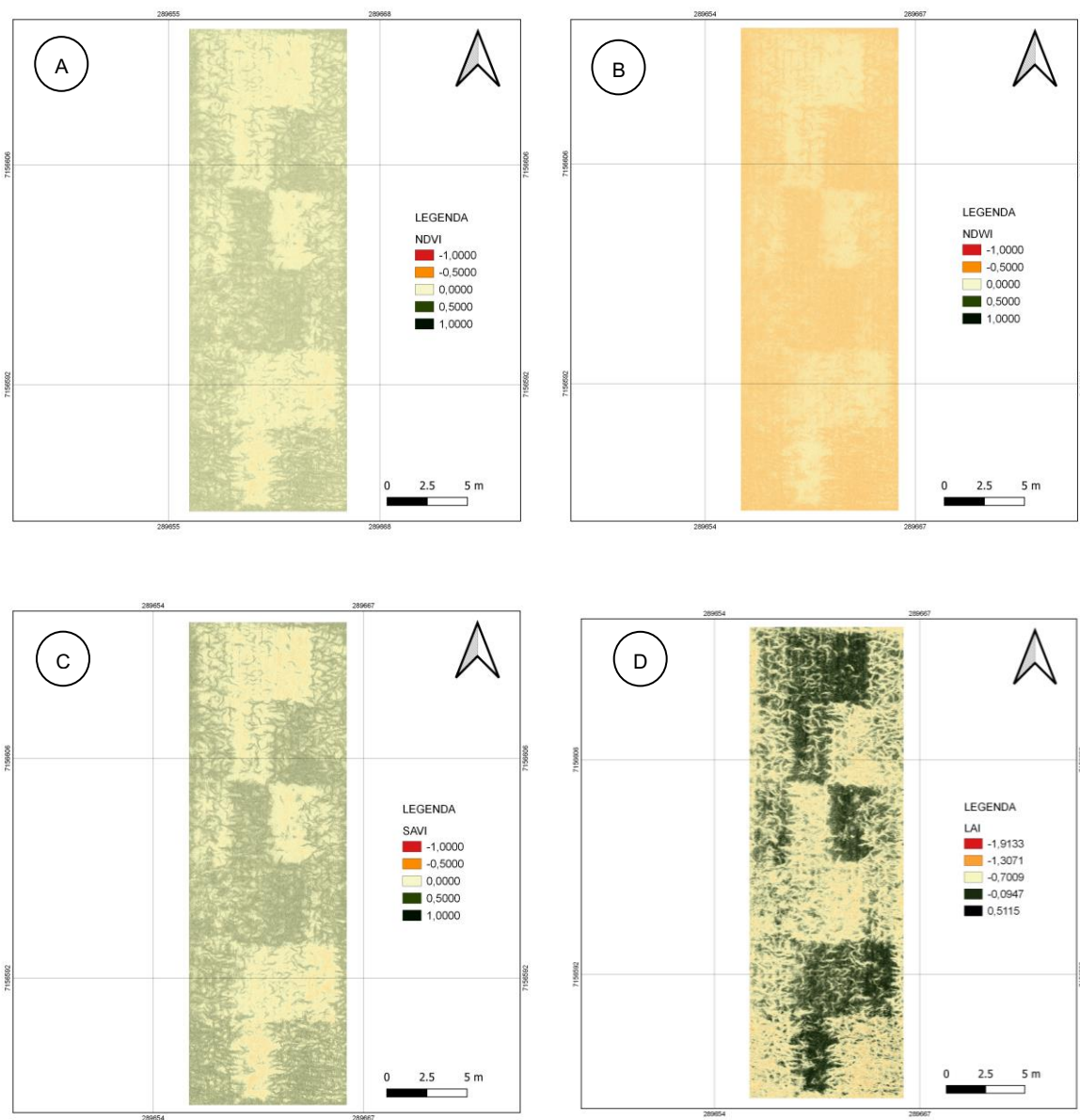
	Índices de vegetação			
	NDVI	NDWI	SAVI	LAI
Correlação de Pearson (r)	0,43	-0,40	0,43	-0,42
Teste T	2,34, ns	-2,13, ns	2,34, ns	-2,27, ns

Fonte: Autoria própria (2022)

A força da relação entre as variáveis índice de vegetação e produtividade diminuiu do estágio V6 para o estágio V10. Sendo que, os índices NDVI e SAVI apresentaram correlação positiva e moderada, indicando dependência e relação diretamente proporcional entre as variáveis. Já os índices NDWI e LAI apresentaram correlação negativa e moderada, demonstrando que as variáveis são dependentes e inversamente proporcionais. No entanto, o teste T não apresentou significância para nenhum dos coeficientes de Pearson calculados. Os resultados dos índices podem ser vistos na Figura 26, sendo que, para os índices NDVI e SAVI os valores abaixo de 0 representam solo exposto ou presença de plantas mortas, 0 a 0,5 área foliar reduzida e de 0,5 a 1 área foliar alta. Para o índice NDWI, os valores abaixo de 0 fazem referência as áreas com maior densidade de vegetação e valores acima de 0 as áreas com solo exposto ou plantas mortas. Para o índice LAI, valores abaixo de 0

indicam solo exposto ou presença de plantas mortas e acima de 0 presença de vegetação.

Figura 26- Índices de vegetação calculados para imagens do voo 10/11/2021 para E2-V10



**Nota: Figura A corresponde ao índice NDVI, B índice NDWI, C índice SAVI e ao D índice LAI
Fonte: Autoria própria (2022)**

Os resultados da análise estatística para a relação entre produtividade e os índices de área foliar calculados a partir das imagens geradas pelo voo do dia 02/12/2022, que corresponde a E2-R2, estão descritos na Tabela 8.

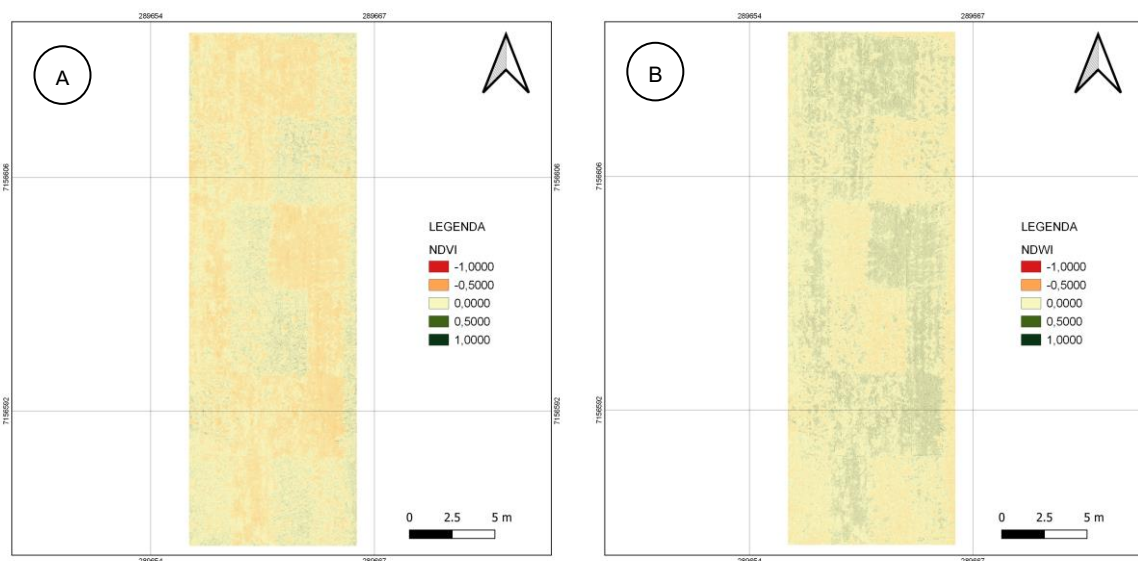
Tabela 8- Coeficiente de correlação de Pearson e Teste T entre índices de vegetação e produtividade para voo realizado em 02/12/2021 para E2-R2

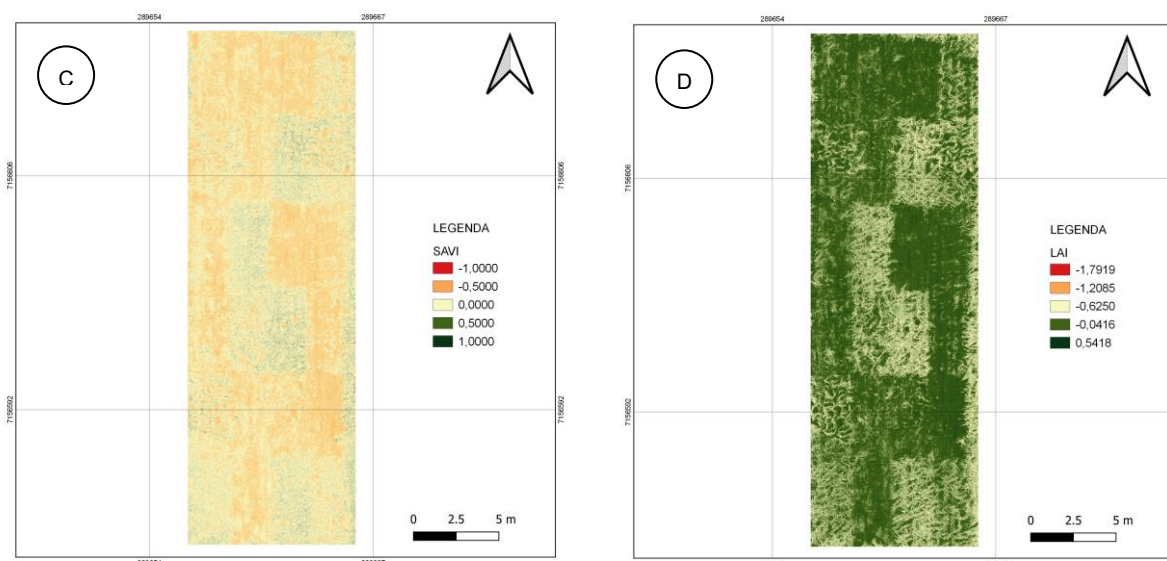
	Índices de vegetação			
	NDVI	NDWI	SAVI	LAI
Correlação de Pearson (r)	0,40	-0,31	0,40	-0,39
Teste T	2,13, ns	-1,58, ns	2,13, ns	-2,11, ns

Fonte: Autoria própria (2022)

Os índices NDVI e SAVI apresentaram correlação positiva e moderada, indicando dependência e relação diretamente proporcional entre as variáveis. Já os índices NDWI e LAI apresentaram correlação negativa e fraca, demonstrando que as variáveis são inversamente proporcionais e possuem pouca relação de dependência. O Teste T não apresentou significância para nenhum dos coeficientes de Pearson. Os resultados dos índices podem ser vistos na Figura 27, sendo que, para os índices NDVI e SAVI os valores abaixo de 0 representam solo exposto ou presença de plantas mortas, 0 a 0,5 área foliar reduzida e de 0,5 a 1 área foliar alta. Para o índice NDWI, os valores abaixo de 0 fazem referência as áreas com maior densidade de vegetação e valores acima de 0 as áreas com solo exposto ou plantas mortas. Para o índice LAI, valores abaixo de 0 indicam solo exposto ou presença de plantas mortas e acima de 0 presença de vegetação.

Figura 27- Índices de vegetação calculados para imagens do voo 02/12/2021 para E2-R2





**Nota: Figura A corresponde ao índice NDVI, B índice NDWI, C índice SAVI e ao D índice LAI
Fonte: Autoria própria (2022)**

A partir da análise estatística, é possível observar que para ambas as épocas de semeadura, os índices NDVI e SAVI apresentaram correlação com a produtividade apenas no estágio vegetativo inicial do milho, essa situação pode ser justificada pela saturação desses índices diante do aumento da densidade foliar da cultura. Segundo Gitelson (2004), isso ocorre quando os índices se tornam insensíveis as variações de reflectância do infravermelho próximo, quando ela é mais alta que a reflectância do vermelho. Resultados semelhantes foram observados por Oliveira (2017) na cultura do milho, por Cao *et al.* (2016) no arroz e por Peng *et al.* (2012) na soja, que observaram menor desempenho do índice NDVI nos estágios finais de desenvolvimento dessas culturas.

O índice LAI apresentou valores muito baixos para parcelas com maior densidade vegetal e valores altos para parcelas com pouca vegetação, não representando adequadamente o índice foliar das parcelas da área experimental. Resultados diferentes foram encontrados pelo trabalho realizado por Bilar, Cerqueira e Pimentel (2018), onde o índice LAI apresentou valores maiores para regiões com maior densidade vegetal.

A redução da relação entre os índices de vegetação e a produtividade para a segunda época de plantio ao longo do ciclo da cultura, também foi agravada pelo aumento da presença de plantas daninhas na área experimental, especialmente nas parcelas onde o milho foi cortado em estágios vegetativos mais avançados, o que

elevou o número de plantas mortas e a presença de falhas, conforme evidencia a Figura 28.

Figura 28- Presença de plantas daninhas em parcela da segunda época de semeadura



Fonte: Autoria própria, 2021

5 CONCLUSÃO

Desta forma, é possível concluir que os índices NDVI, NDWI e SAVI apresentaram melhor correlação com a produtividade nos estágios iniciais do desenvolvimento do milho. Para estabelecer maior relação entre essas duas variáveis em estágios mais avançados da cultura é recomendado utilizar outros índices de vegetação, Oliveira (2017) propõe o uso do GNDVI e o NDRE, que são calculados com base em bandas que apresentam maior reflectância que a do vermelho. O índice LAI não foi capaz de estabelecer uma relação adequada entre a área foliar e a produtividade neste trabalho.

Os índices NDVI, SAVI e NDWI foram sensíveis a variação da área foliar e presença de falhas de plantas nas parcelas das duas épocas de plantio nos estágios iniciais da cultura, onde não houve saturação dos índices e interferência de plantas daninhas, permitindo a visualização dos danos causados pela simulação da ocorrência de geada e granizo. O índice LAI não foi capaz de representar adequadamente a área foliar da cultura do milho neste trabalho.

A presença de plantas daninhas prejudica a análise da área foliar a partir dos índices de vegetação, uma vez que nesse cenário há um aumento inadequado da variável analisada, sendo difícil identificar quais resultados representam verdadeiramente a cultura de interesse. É importante que em trabalhos futuros sejam adotadas medidas que diminuam o efeito das plantas daninhas no resultado da análise de índices de vegetação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. *et al.* **Surface Energy Balance Algorithms for Land**. SEBAL. Idaho Implementation. 2002. versão 1. Disponível em: <http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- ALMEIDA, J. A. P.; OLIVEIRA, P. J. **Sensoriamento remoto I**. São Cristóvão: CESAD. Universidade Federal de Sergipe, 2010, p. 92- 99. Disponível em: [https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/18531616022012Sensoriamento Remoto I Aula 9.pdf](https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/18531616022012Sensoriamento_Remoto_I_Aula_9.pdf). Acesso em: 10 jul. 2021.
- ALVARES, C.A. *et al.* Köppen 's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 2013. vol. 22, n. 6, p. 711–728. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ALVIM, K. R. T. *et al.* Quantificação da área foliar e efeito da desfolha em componentes de produção de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 5, p. 1017-1022, maio 2010. ISSN 0103-8478. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010000500003>. Acesso em: 19 jul. 2022.
- AMARAL, L. R. *et al.* Drones: coletar, interpretar e agir. **Revista Cultivar**. [S. l.], 2019, p. 10- 14.
- ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola**. Piracicaba: Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007. 192 p. Disponível em: [http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/MeteorAgricola Apostila2007.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf). Acesso em: 15 jul. 2021.
- ANJOS, L. H. C. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Solos, 2018. 5 ed. 356 p. ISBN 978-85-7035-800-4.
- ANTUNES, M. A. H.; TANAJURA, E. L. X.; UBERTI, M. S. Avaliação de Índices de Vegetação Para a Discriminação de Alvos Agrícolas em Imagens de Satélites. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: INPE, 2005. p. 301-307. Disponível em: <http://www.ufrjr.br/institutos/it/deng/marlene/downloads/Artigos/301.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2021.
- BAPTISTA, G. M. M. *et al.* **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: Universidade de Brasília, 2012, 266 p. *E-book*. Disponível em: <http://memoria.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em: 11 jul. 2021.
- BASSOI, L. H. *et al.* Agricultura de precisão e agricultura digital. **TECCOGS – Revista Digital de Tecnologias Cognitivas**, [s. l.], n. 20, p. 17-36, Jul/ Dez 2019. ISSN 1984-3585. Disponível em: https://www.pucsp.br/pos/tidd/teccogs/edicao_completa/teccogs_cognicao_informacao-edicao_20-2019-completa.pdf. Acesso em: 28 jul. 2021.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. Milho. *In*: MONTEIRO, J. E. B. A. (org.). **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. 1. ed. Brasília: INMET, 2009, 530 p. ISBN: 978-85-62817-00-7. *E-book*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355291/37056285/Bases+climatol%C3%B3gicas+G.R.CUNHA+Livro+Agrometeorologia+dos+cultivos.pdf/13d616f5-cbd1-7261-b157-351eaa31188d?version=1.0>. Acesso em: 15 jul. 2021.

BILAR, A. B. C.; CERQUEIRA, M. A.; PIMENTEL, R. M. M. Monitoramento da cobertura vegetal através de índices biofísicos e gestão de áreas protegidas. **Geosul**, Florianópolis, v. 33, n. 68, p.236-259, dez 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5007/2177-5230.2018v33n68p236>. Acesso em: 15 nov. 2022.

BORATTO, I. M. P; GOMIDE, R. L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p. 7345- 7352.

BORGHI, E. *et al.* **Milho**: caracterização e desafios tecnológicos. Série desafios do agronegócio brasileiro. [S. l.], 45 p., 2019. *Versão online*. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/195075/1/Milho-caracterizacao.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2021.

BRANDÃO, Z. N. *et al.* Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão. *In*: BERNARDI, A. C. C. *et al* (ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Revisão de ferramentas. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2014. p. 58-73. ISBN 978-85-7035-352-8. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/114687/1/Agricultura-de-precisao-cap.4.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão**. Brasília : Mapa/ACS, 2013. ed. 3. p. 1-36. ISBN 978-85-99851-90-6. *E-book*. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/boletim-tecnico-agricultura-de-precisao-2013.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2021.

BRASIL. Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio**: Brasil 2019/20 a 2029/30, projeções de longo prazo. Brasília, 2020. ed. 11. 104 p. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/ao-completar-160-anos-ministerio-da-agricultura-preve-crescimento-de-27-na-producao-de-graos-do-pais-na-proxima-decada/ProjecoesdoAgronegocio2019_20202029_2030.pdf. Acesso em: 28 jul. 2021.

BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; NETO, R. P. M. Drones na agricultura de precisão. *In*: BREUNIG, F. M.; PRUDKIN, G. (org.). **Drones e ciência**: teoria e aplicações metodológicas. Santa Maria: FACOS- UFSM, 2019. v. 1, cap. 6, p. 91- 110. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/18774/DRONES%20e%20CIENCIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 jul. 2022.

CALDANA, N. F. S. *et al.* Caracterização das ocorrências de precipitação de granizo e seus impactos socioeconômicos no estado do Paraná. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 27, p. 271- 284, dez. 2019. ISSN 2526-7043. DOI: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v27i2.26455>. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/agrometeoros/article/view/26455/14625#>. Acesso em: 16 jul. 2021.

CAMOLEZ, A. A. C. **Curva espectral da vegetação, solo e água**. 2005. il. color. *In*: CAMOLEZ, A. A. C. Uso da terra nos arredores da represa Billings e em Bertioga: o sensoriamento remoto na avaliação da expansão urbana em áreas de mata atlântica e de proteção de mananciais. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005. 177 p.

CAO, Q. *et al.* Improving in-season estimation of rice yield potential and responsiveness to topdressing nitrogen application with Crop Circle active crop canopy sensor. **Precision Agriculture**, New York, v. 17, n. 2, p. 136–154, 2016.

CARNEIRO, N. P. *et al.* **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas: Circular Técnica 22, Embrapa, 2002. ISSN 1679-1150. *E-book*. Disponível em: <http://docsagencia.cnptia.embrapa.br/milho/circul22.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2021.

CARVALHO, E. A; ARAÚJO, P. C. **Interpretação de imagens de satélite**. Natal: EDUFRN, 2009. v. 12. 244 p. ISBN: 978-85-7273-525-4. Disponível em: http://www.ead.uepb.edu.br/arquivos/cursos/Geografia_PAR_UAB/Fasciculos%20-%20Material/Leituras Cartograficas II/Le Ca II A11 MZ GR 260809.pdf. Acesso em: 24 jul. 2021.

CARVALHO, L. G.; DANTAS, A. A. A.; NETO, P, C. **Agrometeorologia**. Lavras: UFLA, 2010, 172 p. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/30452/1/TEXT0%20ACAD%20C3%8AMICO_GNE%20109%20Agrometeorologia.pdf. Acesso em: 16 jul. 2021.

CEPEA; CNA. **PIB do agronegócio brasileiro**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.cepea.org.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 13 jul. 2022.

CLARKE, C. A. **3001: A odisseia final**. [S. l.]: Nova Fronteira. 1997. 297 p. ISBN 978-8520908334.

CÔELHO, J. D. Milho: produção e mercados. **Caderno Setorial Etene**. [s. l.], ano 6, n. 182, 11 p., ago. 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/910/1/2021_CDS_182.pdf. Acesso em: 13 jul. 2021.

CÔELHO, J. D. Trigo: produção e mercados. **Caderno Setorial Etene**. [s. l.], ano 5, n. 151, 9 p., jan. 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/636/3/2021_CDS_151.pdf. Acesso em: 06 jul. 2021.

CRUSIO, L. G. T. *et al.* **Espectro de reflectância obtido com sensor imageador hiperespectral AISA Fenix de pastagem, mandioca, Eucalyptus spp., grama e milho**. 2017. il. color. *In*: CRUSIO, L. G. T. *et al.* Comportamento espectral de diferentes tipos de vegetações obtido pelo sensor hiperespectral AisaFENIX em

aerolevanteamento. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18., 2017. Santos. Anais [...]. Santos: INPE, 2017. p. 2876- 2883.

CUNHA, G. R.; SCHEEREN, P. L.; SILVA, M. S. **Granizo e cereais de inverno no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001, n. 33, ed. 1, 24 p. ISSN 1516-5582. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/pdf/granizo/granizo.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2021.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L. Análise dos efeitos de geadas na cobertura vegetal do município de Cândido Mota – SP, Brasil, por meio de índices de vegetação. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 3, p. 554-574, 2015. ISSN: 1984-8501.

EARTH OBSERVING SYSTEM. **Índices de vegetação**: uma análise de vegetação completa. 2020. *Online*. Disponível em: <https://eos.com/pt/blog/indices-de-vegetacao/>. Acesso em: 11 jul. 2021.

EARTH OBSERVING SYSTEM. **NDVI Faq**: tudo o que você precisa saber sobre o índice. 2020. Disponível em: <https://eos.com/pt/blog/ndvi-faq/>. Acesso em: 26 jul. 2021.

EMBRAPA. **Visão 2030**: o futuro da agricultura brasileira. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 212 p. ISBN 978-85- 7035-799- 1. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030+-+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829?version=1.1>. Acesso em: 28 jul. 2021.

EUROPEAN COMMISSION. **NDWI**: Normalized Difference Water Index. 2011, vol. 1, p. 6. Disponível em: https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/factsheets/factsheet_ndwi.pdf. Acesso em: 26 jul. 2021.

FARIAS, J. R. B.; GONÇALVES, S. L.; SIBALDELLI, R. N. R. **Eventos climáticos adversos e seus impactos para as culturas de soja, milho e trigo no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, Documentos 420, Dez. 2019, n. 420, ed. 1, 48 p. ISSN 2176-2937. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1117026/1/Doc420OLfinal.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2021.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Safra mundial de milho 2022/23: 3º levantamento do USDA. **Federação das Indústrias do Estado de São Paulo**, [s. l.], jul 2022. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-milho-2/attachment/file-20220713172835-boletimmilhojulho2022/>. Acesso em: 13 jul. 2022.

FERREIRA, A. B.; FILHO, W. P. **Comportamento espectral da água em rios turvos e limpos**. 2009. il. p&b. *In*: FERREIRA, A. B.; FILHO, W. P. Avaliação da reflectância espectral de corpos d'água em santa maria-rs por meio de espectrorradiometria de campo. Jataí: Geoambiente online, 2009. UFG. n. 13. p. 194-207. ISSN: 1679-9860.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. [S. l.]. 2005. 32 p. Disponível em: https://www.clickgeo.com.br/wp-content/uploads/2013/04/conceitos_sm.pdf. Acesso em: 24 jul. 2021.

FILHO, I. N. **Danos causados pela geada na cultura do milho**. *Pioneer*. [S. l.]. 2012. Disponível em: <http://www.pioneersementes.com.br/media-center/download-center/122/danos-causados-pela-geada-na-cultura-do-milho>. Acesso em: 15 jul. 2021.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. A. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Texto, 2017, 285 p. ISBN 978-85-7975-277-3. Disponível em: <http://ofitexto.arquivos.s3.amazonaws.com/Sensoriamento-Remoto-em-Agricultura-DEG.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2021.

FURTADO, A. L. S. *et al.* Geotecnologias e geoinformação: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 2014. 248 p. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas). ISBN 978-85-7035-321-4. *E-book*.

GALATI, B. Confira as vantagens do uso de drones para o agronegócio. Startupi. [S. l.]. 2022. Disponível em: <https://startupi.com.br/confira-as-vantagens-do-uso-de-drones-para-o-agronegocio/#:~:text=%C3%89%20poss%C3%ADvel%20analisar%20a%20sa%C3%BAde,%C3%A1reas%20que%20precisam%20ser%20tratadas>. Acesso em: 19 jul. 2022.

GAMEIRO, S. *et al.* Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. *Terrae*, 2016, n. 13, p. 15-22. ISSN 1679-2297. Disponível em: <https://www.ige.unicamp.br/terrae/V13/PDFv13/TE067-2.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.

GIACOMIN, G. *et al.* Análise comparativa entre métodos interpoladores de modelos de superfícies. **Revista Brasileira de Cartografia**. Rio de Janeiro, RJ. 2014. n. 66/6, p. 1315- 1329. ISSN: 1808-0936.

GITELSON, A. A. Wide Dynamic Range Vegetation Index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology**, Muenchen, v. 161, n. 2, p. 165–173, 2004. Disponível em: <https://calmit.unl.edu/people/agitelson2/pdf/JPP-04.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2022.

GUIMARÃES, D. P.; SANS, L. M. A.; MORAES, A. V. C. Estimativa da área foliar de cultivares de milho. *In*: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 26., 2002, Florianópolis. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/34888/1/Estimativa-area.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2022.

HENRIQUE, N. Evolução da produtividade do milho no Brasil. **Sensix**, [s. l.], ago. 2021. Disponível em: <https://blog.sensix.ag/evolucao-da-produtividade-do-milho-no-brasil/>. Acesso em: 14 de jul. 2022.

IBARRA, L. **Além do NDVI: um panorama sobre os índices de vegetação na agricultura**. Santa Maria: Auster Tecnologia, 2020. *Online*. Disponível em: <https://www.austertecnologia.com/single-post/indices-de-vegeta%C3%A7ao-na-agricultura>. Acesso em: 11 jul. 2021.

JUNIOR, G. J. P. **Adubação nitrogenada como estratégia para minimizar estresses ocasionados pela desfolha e fitotoxicidade foliar em milho (*Zea mays* L.)**. 2011. Dissertação (Pós-graduação em Produção Vegetal) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2011. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1349/dissertacao_gilmar_jose_picoli_15676052883806_1349.pdf. Acesso em: 19 jul. 2022.

KUPLICH, T. M.; MOREIRA, A.; FONTANA, D. C. Série temporal de índice de vegetação sobre diferentes tipologias vegetais no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.17, n.10, p. 1116–1123, 2013. *Online*. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/vQ8skdpBK6CjdrnyvymqZTh/?lang=pt>. Acesso em: 21 jul. 2021.

KUX, H. *et al.* **Drones**. Coordenação Geral de Observação da Terra, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. [S. l.]. 202-?. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/DSR/areas-de-atuacao/sensores-plataformas/drones>. Acesso em: 19 jul. 2022.

LUIZ, A. J. B. **Sensoriamento remoto agrícola**. São José dos Campos: INPE, 2002. 98 p. INPE-8858-PUD/57. *E-book*. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/210738/1/2002-Luiz-Sensoriamento-7086.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2021.

MAILLARD, P. **Geoprocessamento 2000**: introdução ao sensoriamento remoto. Departamento de Cartografia, Universidade Federal de Minas Gerais. [S. l.]. 2000. Disponível em: <http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/cursoisr.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2021.

MANRON, P. A. *et al.* Modelo para estimativa do índice de área foliar na cultura do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**. [S. l.]. 2005. vol. 4. n. 1. p. 8-13. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v4n1p8-13>. Acesso em: 16 jul. 2022.

MASCARENHAS, R. B. *et al.* **Curvas espectrais de diferentes classes de solo em profundidade de 0,40- 0,60m da área de preservação ambiental do Pratigi-Bahia**. 2019. il. color. *In*: MASCARENHAS, R. B. *et al.* Caracterização do comportamento espectral da matéria orgânica em diferentes classes de solo e profundidades de coleta. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 19., 2019. Santos. Anais [...]. Santos: INPE, 2019. p. 2244- 2247.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. Agência Nacional de Aviação Civil. **Drones**. [S. l.]: Agência Nacional de Aviação Civil, [entre 2017 e 2021]. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones>. Acesso em: 21 jul. 2022.

MISOSUL, 2020, Sete Lagoas. **Informações técnicas para o cultivo do milho e sorgo na região subtropical do Brasil: safras 2019/20 e 2020/21**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2020. Disponível em: http://www.abms.org.br/misosul/documentos_para_download/MISOSUL%20INFORMACOES%20TECNICAS%20PARA%20O%20CULTIVO%20DO%20MILHO%20E%20SORGO%20NA%20REGIAO%20SUBTROPICAL%20DO%20BRASIL%20-%20SAFRAS%202019-20%20E%202020-21.pdf. Acesso em: 06 jul. 2021.

MORAES, E. C. **Fundamentos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 2002. Cap. 1. 22 p. Disponível em: http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf. Acesso em: 09 jul. 2021.

MOREIRA, A. *et al.* **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Paraná: Embrapa Florestas; Embrapa Instrumentação; Embrapa Soja. 482 p. 2017. Disponível em: [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=1084623&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22PAULETTI,%20V.%20\(Ed.\).%22&qFacets=autoria:%22PAULETTI,%20V.%20\(Ed.\).%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=1084623&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22PAULETTI,%20V.%20(Ed.).%22&qFacets=autoria:%22PAULETTI,%20V.%20(Ed.).%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1). Acesso em: 23 de jul de 2021.

NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F. J. **Introdução ao sensoriamento remoto**. São José dos Campos: 2001. *E-book*. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/Miguel/AlunosPG/Jarvis/SR_DPI7.pdf. Acesso em: 07 jul. 2021.

NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F. J. **Representação de matriz bidimensional de uma imagem relacionada a uma faixa específica do espectro**. São José dos Campos. 2001. il. p&b.

OLIVEIRA, M. F. **Modelos de predição de produtividade da cultura do milho por meio de NDVI em arranjos espaciais**. 2017. 44 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2017. *E-book*. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/151597/oliveira_mf_me_jabo.pdf?sequence=3. Acesso em: 23 jul. 2021.

PARANÁ. Governo do Estado do Paraná. **Agricultura reforça importância do seguro rural para o produtor**. [S. l.]. 2020. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=106929>. Acesso em: 29 jul. 2021.

PENG, Y.; GITELSON, A. A. Remote estimation of gross primary productivity in soybean and maize based on total crop chlorophyll content. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 117, p. 440–448, 2012.

PEREIRA, V. S. Curvas características de reflectância para diferentes camadas de folhas. Auster Tecnologia, 2019. il. color.

PREVE, M. B. **Utilização de drones para identificação de falhas no plantio**. 2021.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2021.

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RICHETTI, A.; FILHO, G. A. M. **Aspectos socioeconômicos do milho**. [S. l.], [ca. 1998]. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/253920/1/CT597Milho.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2021.

RODRIGUES, W. B.; MORAIS, F; PASCHOAL, L. G. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) calculado para estações chuvosas e secas na bacia do Córrego Barreiro, Lagoa da Confusão- TO. *In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 17.; Congresso Nacional de Física, 1., 2017, Campinas. Artigo [...]*. Campinas: Instituto de Geociências- Unicamp, 2017. p. 254- 263. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.1794>. Acesso em: 15 jul. 2022.

SANTOS, A. R. **Comportamento espectral dos alvos**. UFES. [S. l.]. 2013. cap. 3. p. 25- 36. Disponível em: <http://www.mundogeomatica.com.br/sr/transparenciasapostilateoricasr/capitulo3.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2021.

SANTOS, C. G. **Monitoramento aéreo e diagnóstico de plantas daninhas de difícil controle no sudoeste goiano**. 2019. Dissertação (Mestrado em Bioenergia e Grãos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 2019. Disponível em: https://sistemas.ifgoiano.edu.br/sqursos/uploads/anexos_13/2019-11-21-04-02-55Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Claiton%20Gomes%20dos%20Santos.pdf. Acesso em: 13 set. 2022.

SANTOS, M. S. Perda de área foliar e a produtividade na cultura da soja. Mais Soja. [S. l.]. 2020. Disponível em: <https://maissoja.com.br/perda-de-area-foliar-e-a-produtividade-na-cultura-da-soja/#:~:text=Os%20autores%20ainda%20destacam%20que,ac%C3%BAculo%20e%20biomassa%20nos%20gr%C3%A3os..> Acesso em: 16 jul. 2022.

SHIMABUKURO, Y. E.; MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao estudo dos recursos agrônômicos e florestais. **Revista Ceres**. Viçosa, MG. 2009. vol. 56, n. 4, p. 399-409. ISSN: 0034-737X. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=305226808006>. Acesso em: 13 jul. 2021.

SILVA, P. R. **Técnicas de sensoriamento remoto e radiometria aplicadas a vinhedos em duas regiões do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2006. 88p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento remoto)- Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 2006. *E-book*. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8888/000590316.pdf?sequen>. Acesso em: 07 jul. 2021.

SILVEIRA, C. Sensoriamento remoto por satélite reduz riscos para concessão de crédito rural. **Revista Cultivar**, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.grupocultivar.com.br/noticias/sensoriamento-remoto-por-satelite-reduz-riscos-para-concessao-de-credito-rural>. Acesso em: 29 jul. 2021.

SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA. **Milho é uma das principais fontes de alimento do brasileiro com importância estratégica no agronegócio**. [S. l.]. 2016. Disponível em: <https://www.sna.agr.br/milho-e-uma-das-principais-fontes-de-alimento-do-brasileiro-com-importancia-estrategica-no-agronegocio/>. Acesso em: 06 jul. 2021.

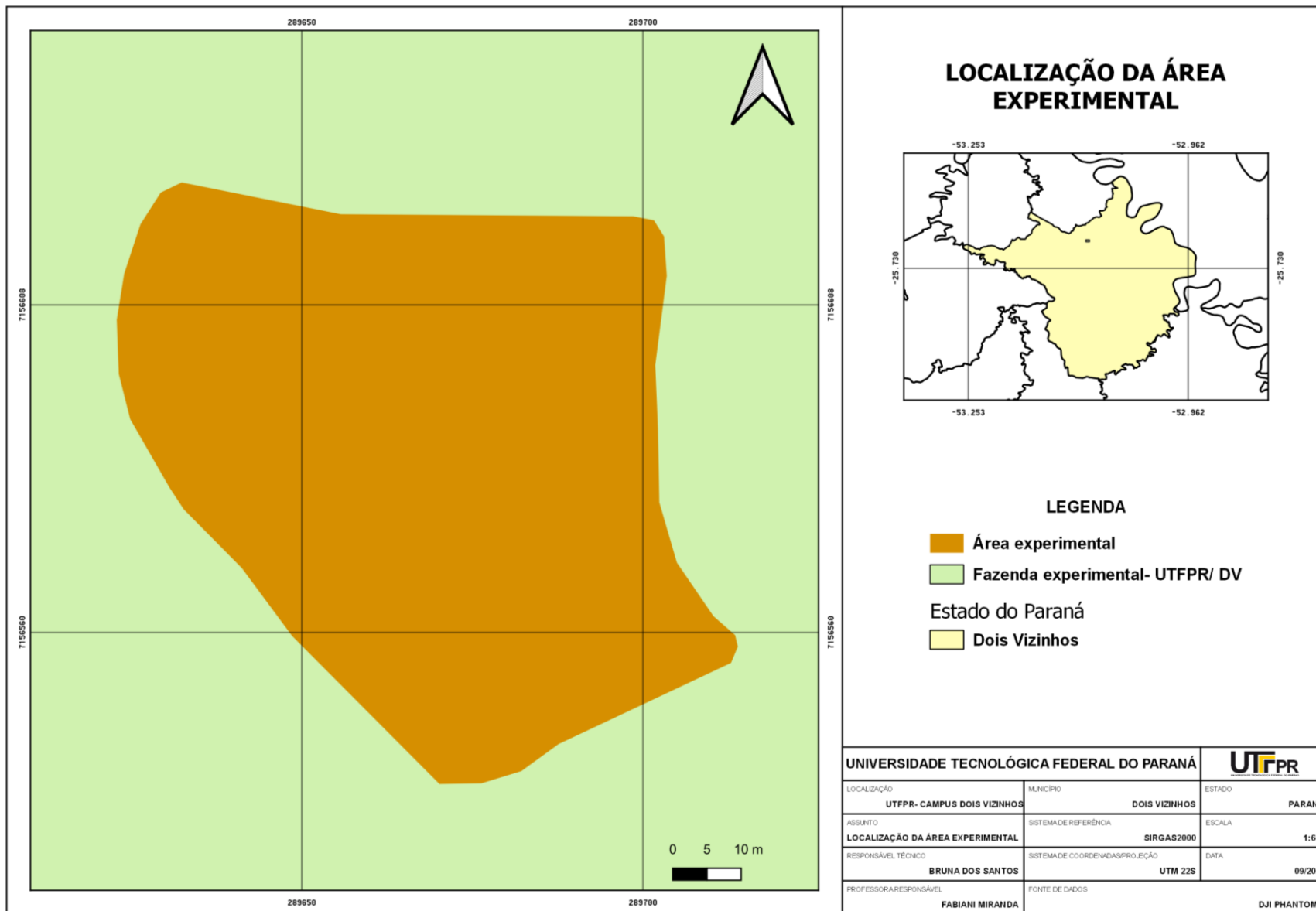
SOUZA, H. L. Sensoriamento Remoto com VANTs: uma nova possibilidade para a aquisição de geoinformações. **Revista Brasileira de Geomática**, Curitiba, v. 5, n. 3, p. 326-342, 2017. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/viewFile/5511/4312>. Acesso em: 13 set. 2022.

TITTOTO, P. L. **Índices de vegetação na estimativa de parâmetros biométricos da cultura da cana-de-açúcar**. Universidade Estadual de Campinas- Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2016, 19 p. Disponível em: <https://www.feagri.unicamp.br/gitap/images/artigos/IC-Tittoto.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2021.

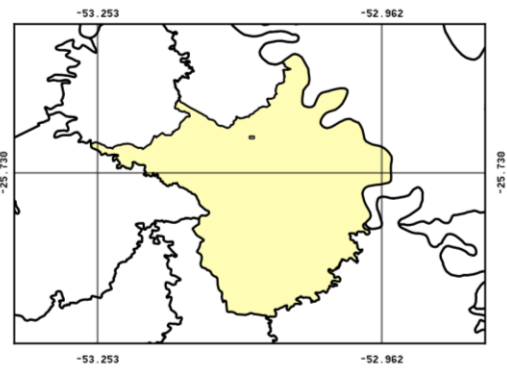
VIEIRA, F. M. C. **Conceitos e efeitos da geada**. Agroclimatologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. [Dois Vizinhos], 201-. 10 p. Disponível em: http://climautfpr.com.br/wp-content/uploads/2017/08/GEADA_AGROCLIMATOLOGIA.pdf. Acesso em: 21 jul. 2021.

VISÃO AGRÍCOLA. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, [s. l.], ano 9, n. 13, 176 p. ISSN 1806-6402. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/Esalq-VA13-Milho.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2021.

Anexo A – Localização da área experimental



LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

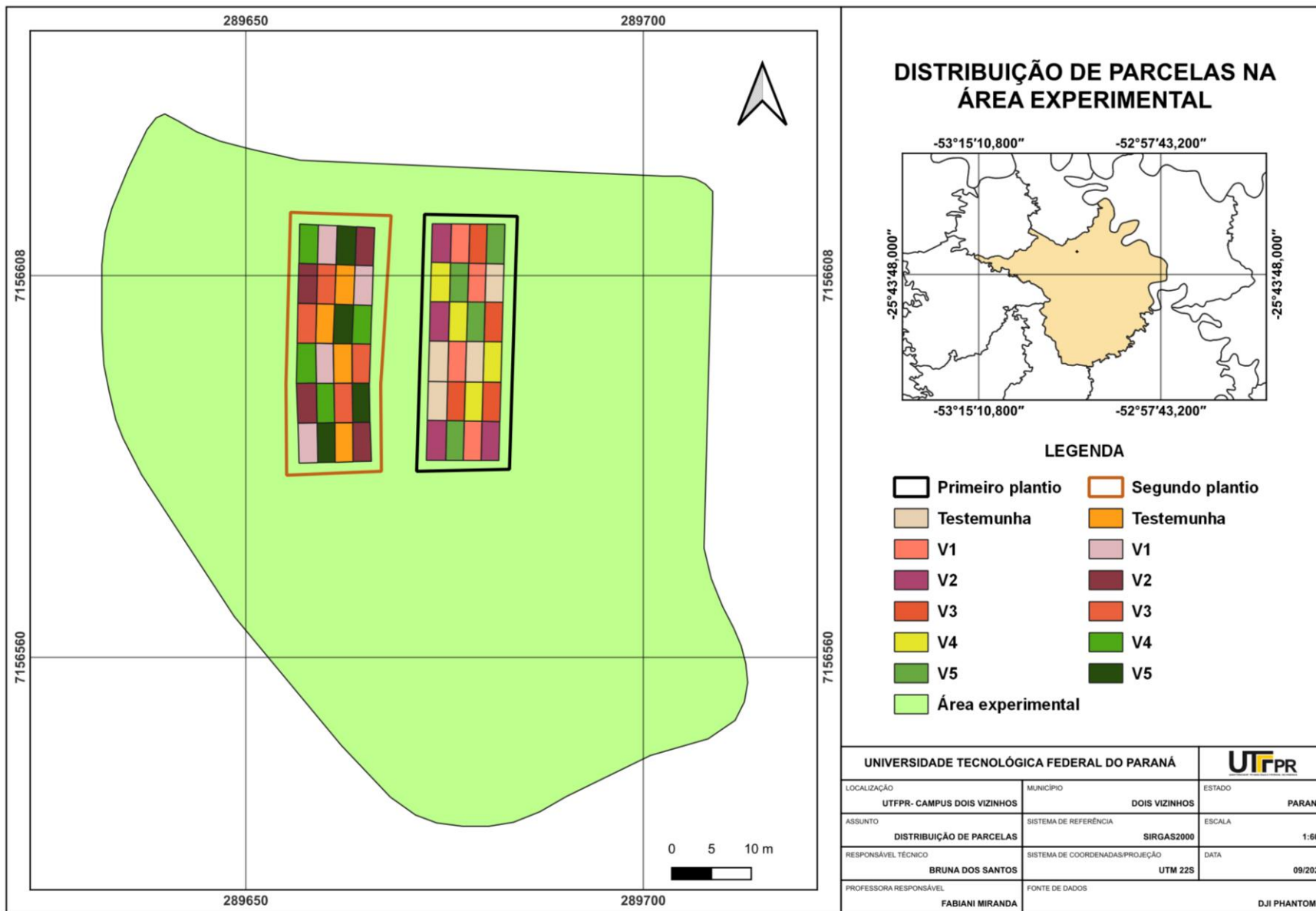


LEGENDA

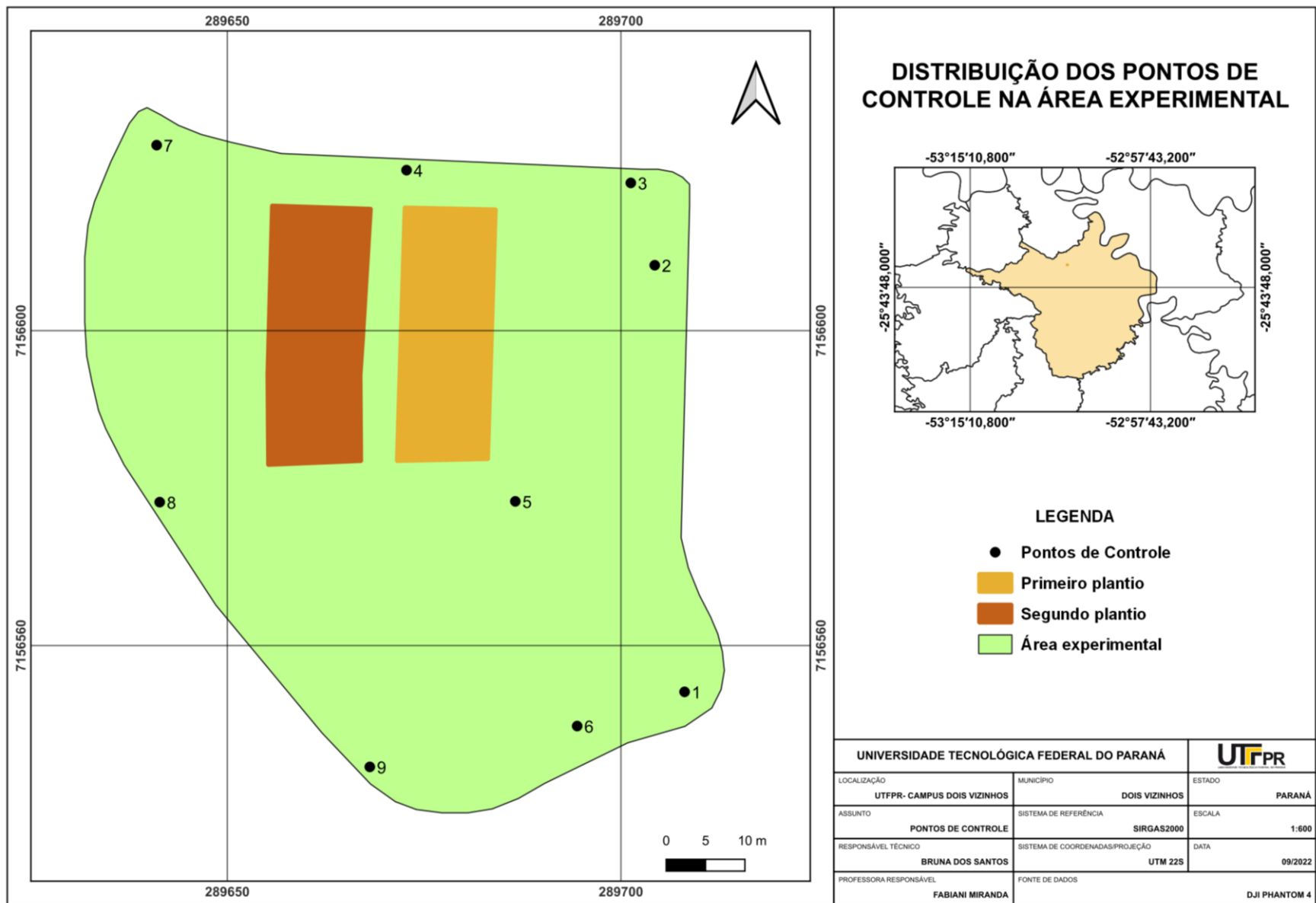
- Área experimental
- Fazenda experimental- UTFPR/ DV
- Estado do Paraná
- Dois Vizinhos

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			
LOCALIZAÇÃO	MUNICÍPIO	ESTADO	
UTFPR- CAMPUS DOIS VIZINHOS	DOIS VIZINHOS	PARANÁ	
ASSUNTO	SISTEMA DE REFERÊNCIA	ESCALA	
LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	SIRGAS2000	1:600	
RESPONSÁVEL TÉCNICO	SISTEMA DE COORDENADAS PROJEÇÃO	DATA	
BRUNA DOS SANTOS	UTM 22S	09/2022	
PROFESSORA RESPONSÁVEL	FORNTE DE DADOS		
FABIANI MIRANDA			DJI PHANTOM 4

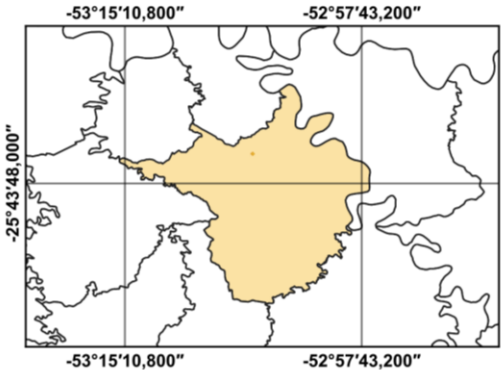
Anexo B – Distribuição espacial das parcelas na área experimental



Anexo C – Distribuição dos pontos de controle na área experimental



DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE NA ÁREA EXPERIMENTAL



LEGENDA

- Pontos de Controle
- Primeiro plantio
- Segundo plantio
- Área experimental

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ		UTFPR
LOCALIZAÇÃO	MUNICÍPIO	ESTADO
UTFFPR- CAMPUS DOIS VIZINHOS	DOIS VIZINHOS	PARANÁ
ASSUNTO	SISTEMA DE REFERÊNCIA	ESCALA
PONTOS DE CONTROLE	SIRGAS2000	1:600
RESPONSÁVEL TÉCNICO	SISTEMA DE COORDENADAS/PROJEÇÃO	DATA
BRUNA DOS SANTOS	UTM 22S	09/2022
PROFESSORA RESPONSÁVEL	FONTE DE DADOS	
FABIANI MIRANDA		DJI PHANTOM 4

Anexo D- Média de produtividade do milho

