

HELOÍSA GOMES

**COMPARAÇÃO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS UTILIZANDO SENTINEL-2,
CBERS-4, LANDSAT-8 E VANT PARA A ANÁLISE DE DEFICIÊNCIA DE
NITROGÊNIO NO MILHO**

Botucatu

2024

HELOÍSA GOMES

**COMPARAÇÃO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS UTILIZANDO SENTINEL-2,
CBERS-4, LANDSAT-8 E VANT PARA A ANÁLISE DE DEFICIÊNCIA DE
NITROGÊNIO NO MILHO**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Fernando Ferrari Putti
Coorientador: Juliano Carlos Calonego

Botucatu

2024

G633c	Gomes, Heloisa COMPARAÇÃO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS UTILIZANDO SENTINEL-2, CBERS-4, LANDSAT-8 E VANT PARA A ANÁLISE DE DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO NO MILHO / Heloisa Gomes. -- Botucatu, 2024 111 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Fernando Ferrari Putti Coorientador: Juliano Carlos Calonego 1. Imagens multiespectrais. 2. Sensoriamento remoto. 3. Satélites artificiais em sensoriamento remoto. 4. Nitrogênio na agricultura. 5. Milho Nutrição. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: COMPARAÇÃO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS UTILIZANDO SENTINEL-2, CBERS-4, LANDSAT-8 E VANT PARA A ANÁLISE DE DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO NO MILHO

AUTORA: HELOÍSA GOMES

ORIENTADOR: FERNANDO FERRARI PUTTI

COORIENTADOR: JULIANO CARLOS CALONEGO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Agrícola, pela Comissão Examinadora:

Fernando Ferrari

Putti:36984799821

Assinado de forma digital por
Fernando Ferrari
Putti:36984799821
Dados: 2024.03.04 07:54:57 -03'00'

Prof. Dr. FERNANDO FERRARI PUTTI (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciencia e Engenharia UNESP

Profa. Dra. ISABÔ MELINA PASCOALOTO (Participação Virtual)

Coordenadoria do Curso de Agronomia / Universidade de Marília - UNIMAR - Marília/SP

Documento assinado digitalmente

Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participação Virtual)

Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia / FCA UNESP Botucatu



ISABO MELINA PASCOALOTO
Data: 05/03/2024 08:58:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente



ALEXANDRE DAL PAI
Data: 06/03/2024 11:10:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Botucatu, 01 de março de 2024

Dedico,

Aos meus amados pais Marco e Eridan, sou imensamente grata pelo extraordinário cuidado e amor incondicional, terei admiração constante e eterna por todo o apoio e dedicação.

Agradecimentos

À Deus e Nossa Senhora da Aparecida, por intercederem por mim e proporcionarem direcionamento e força nos momentos mais desafiadores.

Aos meus pais Marco e Eridan por me proporcionarem todo amor, cuidado, dedicação e apoio incondicional em todos os momentos.

Ao meu orientador Fernando Ferrari Putti pela extraordinária orientação, dedicação, paciência e pelo apoio na condução deste trabalho.

Ao meu coorientador Juliano Carlos Calonego pelo auxílio e apoio na condução deste trabalho.

Ao meu amigo Gustavo Ferreira da Silva por todo o apoio, orientação e auxílio na condução deste trabalho em campo.

A Faculdade de Ciências Agronômicas, aos servidores, aos alunos e professores pela extraordinária qualidade de ensino, prestação de serviços e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Osvaldo Ramos Soares, Aline Oliveira da Silva, Matheus Fróes de Moraes, Ciro Venancio de Oliveira e Ricardo Rabelo de Arruda Filho pelo auxílio na condução deste trabalho.

Ao Vicente Cornago, responsável pelo levantamento aéreo, fornecimento de equipamentos e imagens no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia da Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP) de Botucatu - São Paulo - Brasil pelo fornecimento de dados coletados na Estação Meteorológica.

A Fazenda Experimental Lageado, aos servidores pela prestação de serviços e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O sensoriamento remoto está cada vez mais presente nas práticas agrícolas, a atribuição de imagens multiespectrais tem permitido supervisionar o manejo no campo, a partir da manipulação de índices espectrais, obtendo indicadores do estado da cultura. Contudo as fontes para adquirir imagens multiespectrais são numerosas, e estudos comparativos das fontes de sensoriamento remoto na agricultura são escassos. O presente trabalho teve como finalidade comparar imagens multiespectrais das plataformas de sensoriamento remoto do SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT para determinar se quaisquer fontes de sensoriamento remoto multiespectral permitem detectar com precisão distintas doses de nitrogênio em cobertura em diferentes estádios fenológicos na cultura do milho, utilizando os índices espectrais greenNDVI, MCARI2, MGRVI, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI, SR, VARI e WDRVI. O experimento foi conduzido em campo Fazenda Experimental Lageado, localizado na Faculdade Ciências Agronômicas, no município de Botucatu, São Paulo. O delineamento experimental foi casualizado, com 4 repetições, sendo 6 doses de nitrogênio (N) em cobertura (0, 36, 84, 132, 180 e 228 kg ha⁻¹), integrando 9 avaliações multiespectrais ao longo do ciclo. Foram avaliadas determinações biométricas, diagnose foliar, índices espectrais e fontes de sensoriamento remoto multiespectral. Os dados foram submetidos à análise de variância, teste de comparações múltiplas de Fisher a 5% de probabilidade e análise de componentes principais. De forma geral, os índices MCARI2, MGRVI, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI, SR e WDRVI apresentaram êxito na detecção das doses de N em cobertura, independentemente da fonte de sensoriamento remoto no estágio V7. Para o estágio VT os índices MCARI2, MGRVI, MTVI2 e VARI apresentaram êxito na detecção das doses de N em cobertura independentemente fonte de aquisição das imagens, diferentemente dos índices greenNDVI, MSAVI, NDVI, SAVI, SR e WDRVI que obtiveram êxito na detecção das doses de N apenas para as fontes SENTINEL-2 e CBERS-04A. Nos estádios fenológicos R3, R4 e R5 não foi possível detectar distintas doses de N em cobertura na cultura. A PCA proporcionou verificar o comportamento dos dados obtidos pelas fontes de sensoriamento remoto, assim como a influência dos índices espectrais, data de aquisição das imagens e as doses de N em cobertura na cultura. A análise de correlação de Pearson constata que o coeficiente de correlação mais elevado é entre o satélite SENTINEL-2 e o satélite

CBERS-04A de ($r = 0,94$), seguidamente do SENTINEL-2 e VANT de ($r = 0,91$) e a correlação do CBERS-04A e VANT de ($r = 0,86$), evidenciando que de fato há similaridade entre as fontes de sensoriamento remoto. Para os índices espectrais foi constatado que o êxito na detecção das doses de N, pode variar conforme o período de aquisição das imagens e pela fonte de sensoriamento remoto.

Palavras Chaves: câmera multiespectral; satélite multiespectral; índice espectral; drone; cultura do milho.

ABSTRACT

Remote sensing is increasingly present in agricultural practices, the attribution of multispectral images has made it possible to supervise management in the field, through the manipulation of spectral indices, obtaining indicators of the state of the crop. However, the sources for acquiring multispectral images are numerous, and comparative studies of remote sensing sources in agriculture are scarce. The present work aimed to compare multispectral images from the SENTINEL-2, CBERS-04A and UAV remote sensing platforms to determine whether any multispectral remote sensing sources allow the accurate detection of specific doses of toxicity in coverage at different phenological stages in the crop corn, using the spectral indices greenNDVI, MCARI2, MGRVI, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI, SR, VARI and WDRVI. The experiment was conducted in the Fazenda Experimental Lageado field, located at the Faculty of Agricultural Sciences, in the municipality of Botucatu, São Paulo. The experimental design was randomized, with 4 replications, with 6 doses of nitrogen (N) in coverage (0, 36, 84, 132, 180 and 228 kg ha⁻¹), integrating 9 multispectral assessments throughout the cycle. Biometric determinations, leaf diagnostics, spectral indices and multispectral remote sensing sources were evaluated. The data were subjected to analysis of variance, Fisher's multiple comparison test at 5% probability, and principal components' analysis. In general, the MCARI2, MGRVI, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI, SR and WDRVI indices were successful in detecting N doses in coverage, regardless of the remote sensing source at stage V7. For the VT stage, the MCARI2, MGRVI, MTVI2 and VARI indices were successful in detecting N doses in coverage regardless of the image acquisition source, different from the greenNDVI, MSAVI, NDVI, SAVI, SR and WDRVI indices, which were successful in detecting of N doses only for the SENTINEL-2 and CBERS-04A sources. At phenological stages R3, R4 and R5, it was not possible to detect different doses of N in crop coverage. The PCA proposes to verify the behavior of data obtained through remote sensing sources, as well as the influence of spectral indices, image acquisition data and N doses on crop coverage. Pearson's brightness analysis finds that the highest representation coefficient is between the SENTINEL-2 satellite and the CBERS-04A satellite of ($r = 0.94$), followed by the SENTINEL-2 and UAV of ($r = 0.91$) and the transparency of the CBERS-04A and UAV of ($r = 0.86$), showing that there is indeed similarity between the remote sensing

sources. For the spectral indices to be verified, the success in detecting N doses may vary depending on the image acquisition period and the remote sensing source.

Keywords: multispectral camera; multispectral satellite; spectral index; drone; corn culture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Dados Meteorológicos referentes ao período de estudo de janeiro a julho de 2023.....	42
Figura 2	- Mapa do Brasil, São Paulo, Botucatu e da Área Experimental.....	43
Figura 3	- (a) Gráfico scree plot. (b) Correlação entre as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT com as dimensões da PCA. (c) Gráfico de barras das variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT explicadas na componente PC1. (d) Gráfico de barras das variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT explicadas na componente PC2...	61
Figura 4	- Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT.....	62
Figura 5	- Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT em relação ao conjunto de dados das doses de N em cobertura submetidos à cultura do milho.....	63
Figura 6	- Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT em relação ao conjunto de dados dos índices espectrais.....	64
Figura 7	- Gráfico de correlação entre as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT	65
Figura 8	- (a) Gráfico scree plot. (b) Correlação entre as variáveis dos parâmetros dos índices espectrais com as dimensões da PCA. (c) Gráfico de barras das variáveis dos parâmetros dos índices espectrais explicados na componente PC1. (d) Gráfico de barras das variáveis dos parâmetros dos índices espectrais explicados na componente PC2.....	67
Figura 9	- (a) Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para os índices espectrais. (b) Gráfico de correlação entre índices espectrais	69
Figura 10	- Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 com as variáveis dos parâmetros dos índices espectrais em relação ao conjunto de dados das fontes de aquisição de dados SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT.	70
Figura 11	- Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para os índices espectrais em relação ao conjunto de dados das doses de N em cobertura submetidos à cultura do milho.....	71

Figura 12 - (a) Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT em relação ao período de aquisição de imagens. (b) Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para as variáveis dos parâmetros dos índices espectrais em relação ao período de aquisição de imagens.....	72
Figura 13 - Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para os índices espectrais em relação ao período de aquisição de imagens e a fonte de aquisição de imagem.....	73
Figura 14 - Mapas do índice espectral MTVI2.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Resultado da análise química do solo de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm..	41
Tabela 2	- Resultado da análise granulométrica do solo de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 60 cm.....	41
Tabela 3	- Estabelecimento dos Tratamentos/doses em função da recomendação de adubação nitrogenada.....	43
Tabela 4	- Resumo da análise de variância da Produtividade ($t\ ha^{-1}$), Peso de milho das parcelas (kg), Média do Peso de milho de 1000 grãos (g), Média do Número de Grãos por espiga e Média do Número de Fileiras por espiga para a cultura do milho	56
Tabela 5	- Resumo da análise de variância do Número de Plantas, Número de Espigas, Média da Altura da Planta e Média da Altura de Espigas para a cultura do milho.....	57
Tabela 6	- Resumo da análise de variância do teor relativo de Clorofila A, Clorofila B e Clorofila Total para a cultura do milho.....	58
Tabela 7	- Resumo da análise de variância de para as variáveis: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn) e Teste LSD para as folhas do milho	60
Tabela 8	- Resumo da ANOVA dos índices espectrais com 2 fatores (Doses de N em cobertura e Fontes Imageadoras) e teste LSD para o período de aquisição de imagens 1.....	77
Tabela 9	- Resumo da ANOVA dos índices espectrais com 2 fatores (Doses de N em cobertura e Fontes Imageadoras) e Teste LSD para o período de aquisição das imagens 2.....	80
Tabela 10	- Resumo da ANOVA dos índices espectrais com 2 fatores (Doses de N em cobertura e Fontes Imageadoras) e Teste LSD para o período de aquisição das imagens 3.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAST	Academia Chinesa de Tecnologia Espacial
CVI	Índice de Vegetação da Clorofila
DVI	Índice de Vegetação de Diferença
EOSDA	EOS Data Analytics
EVI	Índice de Vegetação Melhorado
GARI	Índice Verde de Resistência Atmosférica
GLI	Índice de Folha Verde
greenNDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde
greenRVI	Índice de Vegetação da Razão Verde
GSAVI	Índice de Vegetação Ajustada ao Solo Verde
IFA	Associação Internacional de Fertilizantes
SR	Razão Simples no Infravermelho
MCARI1	Índice de Taxa de Absorção de Clorofila Modificada 1
MCARI2	Índice de Taxa de Absorção de Clorofila Modificada 2
MGRVI	Índice de Vegetação Verde Vermelha Modificado
MNLI	Índice de Vegetação Não-Linear Modificado
MSAVI	Índice de Vegetação Modificado Ajustado ao Solo
MSR	Razão Simples Modificada
MTVI1	Índice de Vegetação Triangular Modificado 1
MTVI2	Índice de Vegetação Triangular Modificado 2
MUX	Câmera Multiespectral Regular
NDRE	Diferença Normalizada Índice de Borda Vermelha
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizado
NIR	Espectroscopia de Infravermelho Próximo
NLI	Índice de Vegetação Não-Linear
OSAVI	índice de vegetação otimizado ajustado ao solo
PCDs	Plataformas de Coleta de Dados
R1	Estádio reprodutivo apresenta florescimento
R3	Estádio reprodutivo apresenta Grão Leitoso
R4	Estádio reprodutivo apresenta Grão Pastoso
R5	Estádio reprodutivo apresenta Formação de dente
RDVI	Índice de Vegetação por Diferença Renormalizada

RGB	Red, Green and Blue (Vermelho, Verde e Azul)
RGBVI	Índice de Vegetação Vermelho-Verde-Azul
RVI	Índice de Vegetação
SARVI	Índice de Vegetação Atmosfericamente Resistente do Solo
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
SR	Índice Razão Simples
TVI	Índice de Vegetação Triangular
USGS	United States Geological Survey
V3	Estádio vegetativo apresenta terceira folha
V7	Estádio vegetativo apresenta sétima folha
V10	Estádio vegetativo apresenta décima folha
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VARI	Índice Resistente à Atmosfera na Região Visível
VE	Estádio vegetativo de emergência
VT	Estádio vegetativo apresenta pendoamento
WDRVI	Índice de Vegetação de Ampla Faixa Dinâmica
WFI	Câmera de Campo Largo
WPM	Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura

LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
Al	alumínio
B	boro
Ca	cálcio
CAN	Nitrato de amônio de cálcio composto
Co	cobalto
CO(NH ₂) ₂	Ureia
Cu	cobre
DAP	Fosfato Diamônico
Fe	ferro
K	potássio
Kg ha ⁻¹	quilograma por hectare
m	metro
MAP	Fosfato monoamônico
Mg	magnésio
Mn	manganês
Mo	molibdênio
m ²	metro quadrado
N	nitrogênio
Na	sódio
NH ₄ CO ₃	Nitrato de amônio
(NH ₄) ₂ SO ₄	Sulfato de amônio
Ni	níquel
P	fósforo
S	enxofre
Se	selênio
Si	silício
Zn	zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	26
2.1	O milho.....	26
2.2	Adubação nitrogenada.....	28
2.3	Agricultura de precisão e Sensoriamento remoto.....	31
2.4	VANT.....	32
2.5	Satélites.....	33
2.5.1	SENTINEL-2.....	34
2.5.2	CBERS-04A.....	35
2.6	Índices Espectrais.....	36
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	40
3.1	Área de estudo.....	40
3.2	Características físicas e químicas do solo utilizado no experimento.....	40
3.3	Condições meteorológicas.....	41
3.4	Condução da cultura.....	42
3.5	Características avaliadas.....	44
3.5.1	Altura de planta e da Inserção de espiga.....	44
3.5.2	Número de plantas e Número de espigas.....	44
3.5.3	Amostragem e Diagnose foliar.....	45
3.5.4	Análise do teor de clorofila.....	45
3.5.5	Peso médio de 1000 grãos e Peso de grãos por área experimentada...	45
3.5.6	Número médio de grãos por espiga e Número de fileiras por espiga.....	46
3.5.7	Produtividade.....	46
3.5.8	VANT.....	46
3.5.9	Satélite CBERS-04A.....	47
3.5.10	Satélite SENTINEL-2.....	48
3.5.11	Índices Espectrais para VANT, SENTINEL-2 e CBERS-04A.....	48
3.5.11.1	<i>Fórmulas Matemáticas dos Índices Espectrais.....</i>	<i>49</i>
3.6	Análises estatísticas.....	51
3.6.1	Análise de variância.....	51

3.6.2	Análise de Componentes Principais para as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT.....	52
3.6.3	Análise de Componentes Principais para as variáveis dos Índices espectrais.....	53
3.6.4	Análise de variância.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1	Análise de variâncias e Teste de Comparação de médias LSD.....	55
4.2	Análise de Componentes Principais para as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT.....	60
4.3	Análise de Componentes Principais para as variáveis dos parâmetros dos Índices Espectrais.....	65
4.4	Análise de Variância dos Índices Espectrais com 2 fatores (Doses de N em cobertura e Fontes Imageadoras) e Teste de Comparação de médias LSD.....	74
4.5	Análise dos Mapas.....	82
5	CONCLUSÃO.....	86
	REFERÊNCIAS.....	87
	APÊNDICE A - Mapas do índice greenNDVI.....	102
	APÊNDICE B - Mapas do índice MCARI2.....	103
	APÊNDICE C - Mapas do índice MGRVI.....	104
	APÊNDICE D - Mapas do índice MSAVI.....	105
	APÊNDICE E - Mapas do índice MTVI2.....	106
	APÊNDICE F - Mapas do índice NDVI.....	107
	APÊNDICE G - Mapas do índice SAVI.....	108
	APÊNDICE H - Mapas do índice SR.....	109
	APÊNDICE I - Mapas do índice VARI.....	110
	APÊNDICE J - Mapas do índice WDRVI.....	111

1 INTRODUÇÃO

O milho possui grande importância mundial, de acordo com o USDA (2023) a produção mundial de 2023/2024 foi de aproximadamente 1,230 bilhões de toneladas de grãos e produção de milho no Brasil alcançou 124 milhões de toneladas no mesmo período, portanto a produção brasileira encontra-se na terceira posição na produção mundial de milho, sendo os maiores produtores, respectivamente Estados Unidos, China, Brasil e União Europeia, representando em torno de 70% da produção mundial do grão.

A produção de milho no Brasil, de acordo com o levantamento SIDRA do IBGE (2023) no período entre setembro de 2006 e setembro de 2023, teve uma redução de 11% da produção na primeira safra e um crescimento de 979% na segunda safra, portanto nos últimos 17 anos a produção do milho se intensificou na segunda safra, apresentando a tendência expansão da área da segunda safra, também apresentou reflexo dos ganhos com o aumento de 88% de rendimento médio (kg ha^{-1}) refletindo a melhoria das práticas de manejo, enquanto a área colhida cresceu apenas 5,22% ha no mesmo período. O consumo de *commodities* dos grãos de milho (FSI *commodity*) aumentou 76% no mesmo período, de acordo com USDA (2023). As exportações realizadas por todo o mundo duplicaram e as exportações realizadas pelo Brasil quintuplicaram, no mesmo intervalo de tempo, conforme IBGE (2023).

Nos últimos anos, a cultura do milho no Brasil vem passando por importantes mudanças tecnológicas, resultando em aumentos significativos da produtividade e da produção. Essa melhoria na qualidade dos solos está geralmente relacionada ao manejo adequado, o qual inclui, entre outras práticas, a rotação de culturas, o plantio direto, o manejo da fertilidade através da calagem e a adubação equilibrada. Para que o objetivo do manejo racional da fertilidade do solo seja atingido, é imprescindível a utilização de uma série de instrumentos de diagnose, para detectar possíveis problemas nutricionais que, uma vez corrigidos, aumentarão as probabilidades de sucesso na agricultura (Coelho, 2007).

Conforme Pereira Filho (2015) do ponto de vista econômico e ambiental, a dose de N a aplicar é, para muitos, a mais importante decisão no manejo do fertilizante na cultura do milho brasileira, sendo que as recomendações atuais para a adubação nitrogenada em cobertura são realizadas com base em curvas de

resposta, histórico da área e produtividade esperada. Na tomada de decisão sobre a necessidade de adubação nitrogenada, alguns fatores devem ser considerados, tais como: condições edafoclimáticas, sistema de cultivo, época de semeadura, responsividade do material genético, rotação de culturas, época e modo de aplicação, fontes de nitrogênio, aspectos econômicos e operacional. E tudo isso enfatiza como as recomendações de nitrogênio devem ser cada vez mais específicas e não generalizadas.

Para realizar o manejo racional da adubação, é preciso identificar a disponibilidade nutricional do solo, podendo ser efetuado por meio das plantas. Ferramentas como medidores de clorofila e medições de reflectância da cultura por meio de equipamentos que avaliam o espectro de reflectância dos objetos, como os radiômetros ou câmeras digitais, têm sido empregados para identificar essa disponibilidade nutricional nas plantas (Silva Júnior *et al.*, 2007). Conforme Osborne *et al.* (2002) o uso de técnicas de sensoriamento remoto para estimar o status de nutrientes poderia diminuir a quantidade de mão de obra necessária para a amostragem e poderia reduzir o custo associado à amostragem e análise.

O avanço tecnológico na área de sensoriamento remoto é percebido com os novos sensores, estejam eles em plataformas orbitais ou a bordo de aeronaves. Estes sensores possibilitam a captação de dados que geram informações em diversas resoluções: espacial, espectral, temporal e radiométrica (Leonardi; Ortiz; Fonseca, 2005). Portanto, é de extrema importância compreender as diferenças entre as plataformas de sensoriamento remoto e avaliar a aplicabilidade de imagens multiespectrais consoante com o desempenho dos resultados obtidos conforme as plataformas para o monitoramento agrícola, contudo estudos comparativos neste segmento ainda são escassos.

A importância deste estudo se dá a estudos comparativos da análise de imagens multiespectrais de importantes fontes de sensoriamento remoto na agricultura para detecção de deficiência nutricional, exclusivamente de nitrogênio, pois no ano de 2021 os produtores sofreram com o aumento dos preços dos fertilizantes, principalmente o aumento dos fertilizantes nitrogenados em 2021, consequentemente, torna-se inacessível para muitos produtores utilizar a maior concentração recomendada de nitrogênio para obter maior produtividade da cultura.

Desta forma, nosso trabalho hipotetizou comparar e avaliar distintas plataformas de sensoriamento remoto e como as mesmas podem contribuir na

predição de deficiência nutricional de nitrogênio na cultura do milho. Assim o objetivo deste trabalho é comparar imagens multiespectrais das plataformas de sensoriamento remoto do satélite SENTINEL-2, satélite CBERS-04A e VANT para determinar se quaisquer fontes de sensoriamento remoto multiespectral conseguem detectar com precisão distintas doses de nitrogênio em cobertura em diferentes estádios fenológicos em cultura do milho analisando os índices espectrais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O milho

O milho (*Zea mays L.*) é uma planta que pertence à família Gramineae/Poaceae (Magalhães, 2002). O milho encontrado junto às múmias da cultura Pré-incaica Paracas há cerca de 7 mil anos, encontra-se intacto e conservado no Museu Antropológico de Lima. Quando Hermán Cortés conquistou o império Tenochtitlán, fundado em 1325, no lago Texcoco-Cidade do México e Francisco Pizarro, o império Tahuantinsuyo, no Peru, ambos encontraram o milho não só como alimento, mas estreitamente vinculado às tradições (Filho, 2000). Domesticado há mais de dez 10 mil anos, o milho (*Zea mays L.*) é uma cultura que representa a base da alimentação de povos americanos e africanos. É o cereal mais cultivado na atualidade em todo o globo e o segundo grão mais produzido no território brasileiro (Embrapa, 2023). Conforme Nevis (2018) mesmo o milho sendo uma cultura não originária do Brasil, o mesmo é um dos insumos mais produzidos da cadeia agrícola nacional e utilizado para o consumo humano e animal, em formas de farinha de milho, fubá, quirera, farelos, óleos, farinha integral, entre outra.

As lavouras de milho estão presentes por toda a extensão territorial nacional com área plantada em aproximadamente 22.316.300 (ha) na safra 2022/2023, sendo a região do Centro-Oeste corresponde a 49,88% de área plantada do país, e a região sul com 19,79%, em seguida do nordeste, 14,79% da área plantada, entretanto a participação da área plantada no âmbito nacional não é indicativo de produtividade do milho, a região sudeste corresponde ao total de 10,03% da área plantada, porém o rendimento médio da produtividade é de 5.284 kg ha⁻¹, com alta produtividade em uma menor extensão territorial quando comparada ao nordeste com 14,79% da área plantada com o rendimento médio da produção de 3.466 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023).

A importância do milho deriva-se do seu alto valor nutricional e por consequência da sua relevância econômica. Assim, o cereal apresenta uso intenso na alimentação animal e humana, e é também matéria-prima em vários processos industriais. Por ser um alimento de baixo custo e de cultivo viável, tanto em grande quanto em pequena escala, é a base de diversas cadeias agroindustriais, como a da proteína animal. Atualmente, é uma matéria-prima de crescente relevância para a

produção de bioenergia (Embrapa, 2023). De uma forma geral, o consumo mundial de milho vem crescendo em decorrência do aumento do consumo per capita de proteína animal, já que o milho continua sendo o ingrediente com maior participação na produção de ração. É importante destacar o crescimento constante no consumo de milho no Leste da Ásia, sobretudo na China, além do cenário de possível expansão nas exportações do Brasil durante os próximos anos (Eicholz, *et al.*, 2020).

O milho é uma cultura que permite duas safras por ano no Brasil, uma denominada de 1ª safra (safra de verão) e outra denominada de 2ª safra, realizada normalmente em sucessão à cultura da soja (Tibola *et al.*, 2018). Em conformidade com Filho, Cruz e Garcia (2021) a 1ª safra é o período de plantio realizado com maior incidência das chuvas, também atribui-se a este período temperaturas mais elevadas e maior luminosidade. A safrinha também conhecida como 2ª safra é realizado o cultivo logo após a colheita da primeira safra, em condições de sequeiro, plantado extemporaneamente, quase sempre depois da soja precoce, predominantemente na região Centro-Oeste e nos estados do Paraná, São Paulo e Minas Gerais.

Ao iniciar o plantio do milho de acordo com Cruz (2011) o agricultor deve realizar o planejamento da cultura, sempre levando em consideração a diagnose adequada dos possíveis problemas no campo, análise de solo, histórico de calagem, adubação das glebas, nutrientes necessários na semeadura, nutrientes considerados como particular da cultura, quantidade de nutrientes removidos pela cultura, determinar qual fonte e quantidade de nitrogênio deverá ser aplicada e analisar a possibilidade de lixiviação de nitrogênio em solos arenosos.

Carbono, oxigênio e hidrogênio contidos em plantas têm origem na água e no ar, constituindo em torno de 90% do peso seco das plantas. Os demais elementos essenciais, em geral, têm origem do solo e são denominados nutrientes minerais. Esses são os de maior interesse no que se refere às aplicações em nutrição de plantas, os quais são classificados em: Macronutrientes primário - nitrogênio, fósforo e potássio; Macronutrientes secundários - cálcio, magnésio e enxofre; Micronutrientes - boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio, níquel e zinco (Raji, 2019).

Em conformidade com Nevis (2018) o N é o elemento que mais limita o crescimento vegetal e sua baixa disponibilidade tem sido associada à redução da

divisão e expansão celular, da área foliar da fotossíntese, consequentemente é fundamental no metabolismo das plantas e está associado à síntese de proteínas e compostos orgânicos. Sendo assim as recomendações de adubação na cultura do milho usualmente avaliam a curva de resposta de quantidade produzida de grão com relação às doses de nitrogênio aplicado, sempre visando a maior produtividade possível, seja ela grão, silagem ou ambos, portanto esta orientação pode não ser a recomendação mais viável para produtores que não pretendem realizar um alto investimento com fertilizantes nitrogenados, devido ao aumento dos custos destes produtos.

As fases fenológicas do milho correspondem aos estádios de desenvolvimento da planta denominados, vegetativo (V) e reprodutivo (R), como Magalhães (2006) descreve, os estádios vegetativos apresentam subdivisões designados VE, V1, V2, V3 até V(n); em que (n) representa a última folha emitida até o pendoamento (VT) e os estádios reprodutivos também apresentam subdivisões R1 (Embonecamento e Polinização), R2 (Grão Bolha D'água), R3 (Grão Leitoso), R4 (Grão Pastoso), R5 (Formação de dente) e R6 (Maturidade Fisiológica).

2.2 Adubação nitrogenada

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes absorvidos em maior quantidade pela cultura do milho, sendo os fertilizantes nitrogenados possuem alto custo e estão sujeitos a grandes perdas no ambiente (Dias, 2016). De acordo com as projeções da Associação Internacional de Fertilizantes (2021) o consumo de fertilizantes nitrogenados no Brasil foi de 4 358.0000 (t de N) em 2019, dentre todas as fontes de nitrogênio as mais utilizadas no Brasil são respectivamente Ureia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$], Fosfatos de amônio (MAP e DAP), Sulfato de amônio [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$], Nitrato de amônio (NH_4CO_3), Nitrato de amônio de cálcio (CAN), composto NPK e composto NP. Conforme o IFA (2021) a Ureia (45%) é o principal fertilizante nitrogenado utilizado no Brasil. Esta fonte de nitrogênio é muito utilizada na adubação de cobertura no milho, no entanto, apresenta prejuízos por ter elevada suscetibilidade às perdas por volatilização, mesmo com este malefício ainda é a fonte mais utilizada no comércio brasileiro por apresentar o menor custo e conter alto teor de N.

De acordo com Coelho (2007) a utilização de N é dividida em várias aplicações com doses pequenas, variando geralmente de 10 a 30 kg ha⁻¹, pois a

demanda inicial deste nutriente pelo milho após a semeadura é muito baixa, este procedimento de delimitar as doses de nitrogênio pode evitar o excesso de sais no sulco de semeadura, perdas por lixiviação e perdas por volatilização, as aplicações de nitrogênio devem ocorrer em conjunto com semeadura do milho e durante o estágio V4 ao estágio V12, pois este é o período de maior consumo de N pela planta. Coelho (2007) descreve que a absorção de N pelo milho é intensa no período compreendido entre 40 dias após a semeadura (estádio V6) e o florescimento masculino (emissão do pendão), quando a planta absorve mais de 70 % da sua necessidade total.

De acordo com a Vasconcellos (2002) não existe um método de análise do nitrogênio, em rotina, para medir sua disponibilidade em solos de forma fácil e rápida, gerando grande dificuldade na obtenção de resultados ligados às transformações de N no solo, que são bastante influenciadas pelas condições ambientais. Consequentemente a análise de deficiência de nitrogênio em rotina são realizadas de acordo com a aparência da cultura, onde se avalia a aparência das folhas e os indícios de deficiência de nitrogênio. A proteólise das proteínas nestas condições e a redistribuição dos aminoácidos, resultam no colapso dos cloroplastos e assim ocorre um decréscimo no conteúdo de clorofila. Por esta razão, o amarelecimento das folhas velhas é o primeiro sintoma de uma inadequada nutrição da planta em nitrogênio (Faquin, 2005). Embora o medidor de clorofila seja um bom indicador do estado de N durante a estação, a técnica requer tempo e trabalho para a recolha de dados. O uso do sensoriamento remoto poderia ajudar a eliminar a necessidade de amostragem extensiva de campo, ao mesmo tempo, em que proporciona uma boa detecção de deficiências (Osborne *et al.*, 2002).

O alto custo de fertilizantes nitrogenados e os efeitos de sua alta dosagem é um assunto recorrente citado por Purcino *et al.* (2015) que apresentou a possibilidade de uma nova abordagem para o desenvolvimento de cultivares sob baixa disponibilidade de nitrogênio sugerindo o aumento de produtividade com doses crescentes de N. Deste modo muitos produtores realizam a observação de deficiência de nitrogênio, este método de diagnose visual na lavoura consiste em observar a coloração das folhas do milho, principalmente o amarelecimento das folhas velhas, apesar deste procedimento ser muito utilizado ele apresenta muitas desvantagens, pois segundo Romualdo (2013) estas análises têm que ser realizada por técnicos qualificados e estão sujeitas a erros de interpretação, em razão da

ocorrência simultânea de deficiências de vários nutrientes, associados também ao ataque de pragas e à presença de doenças. Também é citada a análise química das folhas, que requer épocas e estádios fenológicos específicos. Portanto, observando estas dificuldades de monitoramento que os produtores estão sofrendo, algumas tecnologias podem nos fornecer melhores análises visuais e estimativas viáveis, aplicando as inovações da agricultura de precisão para a cultura do milho.

Conforme Lima Filho (2014) a diagnose visual também é utilizada para avaliar uma possível desordem nutricional, entretanto, deve ser tratado com cautela e embasado por padrões visuais bem definidos para cada espécie ou, mesmo, variedade, pois outros fatores, como ataque de pragas, incidência de doenças, extremos climáticos, aplicação de agrotóxicos ou deficiências múltiplas, podem dificultar a interpretação do sintoma observado.

Polidoro (2022) afirma que o Brasil, nos últimos 40 anos, ficou sem políticas estratégicas para o setor de fertilizantes e de insumos agrícolas em geral, e a consequência disso é que o Brasil se desindustrializou. Onde a cadeia de fertilizantes nacional encolheu 33% nos últimos 20 anos, enquanto a demanda por fertilizantes explodiu 400% nesse mesmo período, tornando a nossa dependência destes insumos sair de 20% para mais de 80% de dependência de fertilizantes importados. De acordo com o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (2021) a cotação de adubos e fertilizantes no mês de outubro de 2021 apresenta uma cotação exorbitante de 188,9% apresentando uma variação absoluta de U\$ 1,36 Bilhões de dólares, identificando um pico descomunal em comparação aos últimos anos. A Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) (2023) revela que as entregas de fertilizantes ao mercado brasileiro encerraram o mês de outubro de 2022 com 3,8 milhões (t), registrando uma redução de 17,8% em relação o mesmo de 2021, quando o volume foi de 4,7 milhões (t). No acumulado de janeiro a outubro de 2022, foram 33,96 milhões (t), com redução de 11,4% na comparação com igual período de 2021, no qual se registraram 38,33 milhões (t).

Confirmou Bezzon (2021) que 85% dos fertilizantes utilizados no Brasil são importados, a origem destes insumos são países como a China, Rússia, Canadá e Belarus, entretanto dois dos maiores importadores de fertilizantes estão reduzindo a produção e exportação. A China é a maior produtora global de fertilizantes, entretanto enfrenta uma importante crise na disponibilidade e distribuição energética, para atender as políticas de demanda que estão reduzindo a produção de

fertilizantes. Diante do cenário de crise criado pela guerra na Ucrânia, temos sentido o impacto significativo dos suprimentos de fertilizantes importados que colocam em risco a agropecuária nacional e a segurança alimentar. Onde a Rússia, normalmente responsável por 40% do suprimento do gás natural, reduziu o fornecimento para focar no abastecimento do seu mercado interno durante a guerra, este impacto elevou o preço da energia elétrica no continente europeu, levando fábricas de fertilizantes a suspenderem parte de suas atividades. Além da geração de energia, o gás natural também é um importante insumo na produção de fertilizantes nitrogenados, em meio a toda essa turbulência, o Brasil vem estudando medidas que possam contornar a crise dos fertilizantes (Nastari, 2022).

2.3 Agricultura de precisão e Sensoriamento remoto

A agricultura de precisão oferece uma infinidade de benefícios potenciais em rentabilidade, produtividade, sustentabilidade, qualidade da cultura, proteção ambiental, qualidade de vida, segurança alimentar e desenvolvimento econômico rural. E abordando as tecnologias de informação para uma produção agrícola inteligente, as técnicas de sensoriamento remoto, em que as informações da lavoura são obtidas de forma não-destrutiva, rápida e por vezes à distância, têm se tornado de fundamental importância na obtenção e tratamento dos dados de campo (Bernardi *et al.*, 2014).

Albert (2020) menciona que o sensoriamento remoto é o conjunto de atividades que permite a obtenção de informação de objetos que se encontram na superfície terrestre, as aquisições e análises da energia eletromagnética podem ser emitidas ou refletidas pelo objeto estudado, esta energia utilizada para a obtenção de dados de sensoriamento remoto é também conhecida como radiação eletromagnética. Santos (2021) cita que existem muitos tipos de dados orbitais por meio de sensoriamento remoto, com diferentes resoluções espaciais, radiométricas, temporal e espectrais obtidas que são utilizados em diversos tipos de monitoramentos.

De acordo com Valência (2020) a aplicação do sensoriamento remoto na agricultura de precisão são oriundos de diferentes plataformas para aquisição de dados, que podem ser classificadas como áreas terrestres e espaciais. Dentre as plataformas terrestres, temos maquinário agrícola autônomo como colheitadeiras

georreferenciadas, tratores, pulverizadores entre outros. As plataformas espaciais e aeroespaciais incluem satélites, aviões e drones.

Conforme Albert (2020) os dados obtidos por sensoriamento remoto permitem de maneira eficiente e rápida a coleta de dados de grandes áreas agrícolas, e juntamente com os drones vieram complementar ainda mais as informações obtidas via satélite. Valencia (2020) cita o obstáculo da utilização das plataformas espaciais, pois a limitação pela quantidade de nuvens pela atmosfera terrestre pode interferir nos resultados. E o mesmo autor ressalta que cada uma das plataformas apresenta vantagens e desvantagens em certa área, sendo as mais mencionadas suas resoluções espaciais, espectrais e temporais. Aliado a isso, operações de sensoriamento de remoto utilizando câmaras multiespectrais acopladas em VANT's diminuem o custo dessas operações e tornam-se um meio rápido e preciso para avaliar o ciclo de desenvolvimento das plantas a campo (Furlanetto *et al.*, 2017)

2.4 VANT

Conforme o Diálogo Setorial União Europeia-Brasil (2016) VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) é a terminologia oficial prevista pelos órgãos reguladores brasileiros do transporte aéreo para definir este tipo de plataforma. Segundo a legislação pertinente (Circular de Informações Aéreas AIC N 21/10), caracteriza-se como VANT toda aeronave projetada para operar sem piloto a bordo. Esta, porém, há de ser de caráter não recreativo e possuir carga útil embarcada. Em outras palavras, nem todo “drone” pode ser considerado um VANT, já que qualquer plataforma não tripulada utilizada como atividade de lazer ou esporte enquadra-se, por definição legal, na legislação pertinente aos aeromodelos e não à de VANT.

Até recentemente, a forma mais avançada de monitoramento utilizava imagens de satélite, extremamente caras e imprecisas. Hoje, a tecnologia dos drones oferece uma grande variedade de possibilidades de monitoramento de safra por um menor custo, e pode ser integrada em todas as fases do ciclo de vida da lavoura com o objetivo detalhar de forma mais precisa o gerenciamento da produção agrícola (Diálogo Setorial União Europeia-Brasil, 2016).

De acordo com Andrade (2019) as plataformas VANTs são aeronaves leves e de baixo custo que podem ser operadas a partir do solo e podem embarcar diversos sensores. Em concordância com Santos (2021) o uso dos drones tem sido crescente

em monitoramentos ambientais e em estudos agrícolas, pois proporcionam melhorias na qualidade das informações adquiridas sendo possível controlar desde a altitude até as repetições dos voos, dependendo das condições ambientais, resultando em melhor escala espacial e temporal.

Conforme os estudos de Lang (2019) imagens obtidas por meio de VANT permitem a detecção do teor de clorofila no dossel do milho, mostrando a diferença na distribuição de clorofila da parcela de forma não destrutiva, e fornecer um suporte para a avaliação da cultura e manejo de precisão no campo. Assim como Santana (2021) avalia o uso de índices espectrais (VIs) com veículo aéreo não tripulado para o monitoramento de variedades de milho submetidas a diferentes doses de N, conforme os resultados obtidos altos níveis de N em cobertura proporcionam correlação positiva entre os índices espectrais e o rendimento de grãos no milho.

Zhang (2020) afirma que imagens obtidas por veículo aéreo não tripulado (VANT) possuem potencial para estimar a produtividade de milho (*Zea mays L.*) e os efeitos da aplicação de nitrogênio (N) em dose variável nas culturas. Segundo Maresma *et al.* (2020) veículos aéreos não tripulados (VANTs) têm o potencial de auxiliar na tomada de decisão rápida e precisa para o manejo da fertilidade do milho (*Zea mays L.*) com adubação inicial com baixa dose ($<30 \text{ kg de N ha}^{-1}$) recomenda-se que o início da detecção deve ser adiada até que as deficiências iniciais de N se tornem visíveis e caso necessário realizar adubação posterior a análise de imagens, a adubação no estágio V10 resultando no aumento de rendimento além dos rendimentos apenas com N inicial.

2.5 Satélites

O uso de imagens de satélite Landsat para monitoramento agrícola global começou quase imediatamente após o lançamento do Landsat 1 em 1972, tornando o monitoramento agrícola uma das aplicações operacionais mais antigas para o programa Landsat (Leslie; Serbina; Miller, 2017). Atualmente, são muitos os sistemas de sensores remotos orbitais em operação voltados para o estudo dos recursos naturais da superfície terrestre. Destacam-se os Satélites Multiespectrais, a exemplo do Terra/Modis, Landsat 8, SPOT 6, Rapideye, Ikonos 2, QuickBird, Worldview 2 e o Pléiades 1A e 1B. Estes satélites têm possibilitado uma rápida atualização de mapas e bases cartográficas em diferentes escalas, bem como,

graças aos seus aspectos multiespectrais e hiperespectrais tem favorecido diversos estudos ambientais (desmatamento, análise de bacias hidrográficas, degradação de solos, etc.) e de uso e ocupação do solo (expansão urbana, atualização cadastral e rodoviária, na prevenção de riscos em áreas de encosta)(Borges; Pachêco; Santos, 2015).

De acordo com Sampaio (2020) as imagens de satélite comerciais com alta resolução espacial são geralmente comercializadas cobrindo grandes produções agrícolas com áreas acima de 2.500 ha, com alto custo de aquisição. Portanto, para monitoramento constante da produção, pode ser inviável a utilização de imagens de alta resolução devido a grande necessidade de avaliação constante e os altos custos de obtenção das imagens, tornando as imagens de resolução média as mais utilizadas por serem gratuitas.

De acordo com Dastagiri e Pv (2020) Japão, a China, os EUA, a Índia e a Europa contribuem efetivamente com o uso de satélites na agricultura. Conforme Jarman e Dimmock (2018) muito é prometido no que diz respeito ao uso de novas tecnologias, como as oferecidas por meio de satélites, para ajudar os produtores a estimar o momento da colheita, prever os rendimentos da estação, detectar e controlar pragas e doenças, compreender o estado da água e dos nutrientes, planejar a colheita programas de nutrição e informação sobre irrigação durante a estação.

De acordo com EOSDA (2021) os dados obtidos de satélites permitem o monitoramento de múltiplos campos de vez, estudos de correlação com o clima, monitoramento dos estádios de crescimento, rotação de cultura e outros dados. Segundo Valencia (2020) as imagens do SENTINEL-2 podem contribuir na avaliação do estado nutricional do N das culturas, quantificar a variabilidade espacial do vigor e produtividade da cultura.

2.5.1 SENTINEL-2

De acordo com a European Space Agency (2021) a missão Copernicus SENTINEL-2 funciona por meio de satélites gêmeos, SENTINEL-2A e SENTINEL-2B, faseados a 180° um do outro, com o objetivo de monitorar a variabilidade nas condições da superfície terrestre como monitoramento da terra e

mudanças climáticas, com o tempo de revisita de 10 dias (The European Space Agency, 2023).

O SENTINEL-2 é equipado com o sensor SAR que opera na banda C (entre 8 a 4 GHz ou 3,8 – 7,5 cm) e o sensor multiespectral MSI que possui 13 bandas espectrais sendo respectivamente quatro bandas a 10 m, seis bandas a 20 m e três bandas a 60 m de resolução espacial. O período para percorrer o trajeto é de 5 dias no Equador com a constelação de 2 satélites, SENTINEL 2A e 2B. As bandas espectrais do SENTINEL-2 correspondem a 0,49 μm (B), 0,56 μm (G), 0,705 μm (R) e 0,842 μm (NIR) (The European Space Agency, 2023).

2.5.2 CBERS-04A

O satélite do programa CBERS-04A (China-Brazil Earth Resources Satellite), sexto satélite da família CBERS, sucedeu uma parceria conjunta entre Brasil e China no setor técnico-científico espacial, foi lançado dia 20 de dezembro de 2019 com a colaboração do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e da Academia Chinesa de Tecnologia Espacial (CAST) e do Centro de Controle de Satélites de Xian (XSCC), portanto a divisão de responsabilidades entre Brasil e China foi e permanecerá sendo de 50% para cada país. Os satélites do programa CBERS fazem parte do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais (SBCDA), que baseado na utilização de satélites e plataformas de coleta de dados (PCDs) distribuídas pelo território nacional, objetiva fornecer ao país dados ambientais diários coletados nas diferentes regiões do território nacional (INPE, 2020; INPE, 2019).

Os instrumentos relacionados com a aquisição dos dados científicos são MUX (Câmera Multiespectral Regular) com resolução de 16m e faixa de imageamento de 95 km, WFI (Câmera de Campo Largo) com resolução de 55m e faixa de imageamento de 684 km, WPM (Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura) com resolução espacial pancromática é de 2 m e a multiespectral de 8 m. As bandas espectrais da câmera WFI correspondem a 0,45-0,52 μm (B), 0,52-0,59 μm (G), 0,63-0,69 μm (R) e 0,77-0,89 μm (NIR) (INPE, 2020). A repetição do ciclo em torno do ponto fixado é de 31 dias (INPE, 2019).

2.6 Índices Espectrais

A partir dos dados obtidos por sensores multiespectrais é necessário realizar o processamento digital de imagens, onde de acordo com Valência (2020) por serem modelos matemáticos ou algoritmos, obtidos por características de superfície imaginada, os índices são descritos por meio de equações, determinadas em base à banda (faixa do espectro) que apresenta interesse. Portanto, tem muitos métodos para determinar os índices espectrais para realizar análise vegetal, estimar a produtividade, prever a biomassa, detectar imperfeições no campo, detectar deficiências hídricas e detectar a deficiência nutricional na cultura apenas utilizando o processamento digital de imagens.

O índice CVI de banda larga pode ser usado como um estimador de clorofila foliar para plantas planófilas na maioria das condições de solo (Vincini; Frazzi; D'Alessio, 2008).

O índice DVI indica solo descoberto, água e vegetação (Richardson; Wiegand, 1977).

O índice EVI fornece sensibilidade aprimorada em regiões de alta biomassa, minimizando as influências do solo e da atmosfera (Jiang *et al.*, 2008). O índice GARI deve ser adicionado para detectar a concentração de clorofila, para medir a taxa de fotossíntese e o monitoramento do estresse das plantas (Gitelson; Kaufman; Merzlyak, 1996).

O índice GLI é indicado para mapeamento do tamanho do campo, dos impactos das pastagens e pode ser aplicado num formato modificado a outras culturas e à vegetação natural em pastagens (Louhaichi; Borman; Johnson, 2001).

O greenNDVI ou GNDVI é muito preciso para avaliar o conteúdo de Chl no nível do dossel e reconhecer diferenças nas espécies, iluminação, arquitetura do dossel e outros fatores podem potencialmente diminuir a correlação entre os índices desenvolvidos e o conteúdo de Chl (Gitelson; Kaufman; Merzlyak, 1996).

O índice greenRVI determina com precisão e exatidão a concentração foliar de nitrogênio na base da matéria seca para cada estágio de crescimento (Xue *et al.*, 2004). O índice GRVI torna-se um efetivo limiar para distinguir entre vegetação verde e outros tipos de coberturas do solo (Motohka *et al.*, 2010).

O GSAVI é utilizado para estudar as relações entre as leituras dos medidores de clorofila e as imagens multiespectrais (Moura, 2013).

O índice ISR auxilia no monitoramento de vegetação, a quantidade fotossintética ativa presente na copa da planta e estimar a biomassa (Compton, 1979).

O MNLI pode ser usado para estimar o índice de área foliar florestal em ambientes semiáridos, pois pode linearizar relações com parâmetros de superfície que tendem a ser não lineares (Gong *et al.*, 2003).

O MCARI1 pode ser índices bastante promissores não só para predição de produtividade, mas também para predição da biometria da Estatura Média dos Colmos (Costa, 2021). Já o índice MCARI2 é considerado um dos melhores preditores do IAF verde, considerado um dos índices mais robustos, desenvolvido como estimadores do IAF verde (Haboudane *et al.*, 2004).

O MCARI2 mostrou-se o melhor preditores do IAF verde, menos sensíveis às variações na concentração de clorofila, têm a melhor relação linear com a reflectância do dossel no infravermelho próximo, na avaliação qualitativa da discriminação entre vegetação e solo (Barbosa *et al.*, 2019).

O MSAVI pode ser considerado um indicador mais sensível da quantidade de vegetação em relação ao SAVI (Qi *et al.*, 1994).

O MSR é proposto para extrair parâmetros biofísicos de florestas boreais, é uma versão melhorada do RDVI com o propósito de linearizar suas relações com parâmetros biofísicos (Chen, 1996).

O MTV1 é um índice que pode ser menos sensível às variações do teor de clorofila e linearmente relacionado ao IAF verde (Haboudane *et al.*, 2004). Já o MTVI2, por outro lado, é um índice de razão de absorção de clorofila modificado e são melhores preditores do IAF verde (Haboudane *et al.*, 2004).

O NDVI, um dos primeiros produtos analíticos de sensoriamento remoto, é agora o índice mais popular usado para avaliação da vegetação. Embora estudos tenham descoberto que o NDVI é eficaz para expressar o status da vegetação e atributos de vegetação quantificados (Huang *et al.*, 2021).

O NLI revelou capacidade para explicar a variabilidade na densidade, biomassa, índice de Shannon e índice de Simpson (Kumar *et al.*, 2018).

O OSAVI deve ser adotado para aplicações agrícolas, e oferece melhores resultados para coberturas de copas homogêneas, como gramíneas e culturas agrícolas em latitudes médias (Rondeaux; Steven; Baret, 1996).

O RDVI combina as vantagens do DVI e do NDVI, adequado para pequenas coberturas vegetais e copas mais densas (Roujean; Breon, 1995).

O RGBVI tem potencial para a estimativa da biomassa combinando a altura das plantas e os índices de vegetação em faixa visível (Bendig *et al.*, 2015).

O RVI é bastante sensível às mudanças na vegetação durante o período de pico de crescimento e não é muito sensível quando a cobertura vegetal é escassa (Jackson; Huete, 1991).

O SARVI é uma combinação dos índices SAVI e ARVI do NDVI, que pode realizar a discriminação da vegetação verde e minimizar o ruído do solo e atmosférico e resultar em uma equação variante de NDVI mais estável (Huete; Justice; Liu, 1994).

O SAVI pode descrever sistemas dinâmicos de solo-vegetação, sendo um método pelo qual índices espectrais podem ser refinados ou “calibrado” para que as variações do substrato do solo sejam efetivamente normalizadas e não influenciados a medida da vegetação (Huete, 1988).

O índice SR pode ser utilizado para avaliar a área foliar de uma floresta, medindo a relação entre a luz a 800 m e a luz a 675 m, no solo da floresta, este índice baseia-se no princípio de que as folhas absorvem relativamente mais luz vermelha do que a luz infravermelha e, portanto, quanto mais folhas estiverem presentes no dossel, maior será a taxa (Jordan, 1969).

O índice TVI é calculado como a área do triângulo definida pelo pico verde, o mínimo de absorção de clorofila e o ombro NIR no espaço espectral, baseia-se no fato de que tanto a absorção de clorofila, causando uma diminuição da reflectância vermelha quanto a abundância de tecido foliar, causando aumento da reflectância NIR, aumentarão a área total do triângulo (Broge; Leblanc, 2001).

Já o índice VARI foi considerado minimamente sensível aos efeitos atmosféricos, permitindo a estimativa de fração de vegetação (Gitelson *et al.*, 2002). Por fim, o WDRVI permite uma caracterização mais robusta das características fisiológicas e fenológicas da cultura indicado para monitoramento do estado da vegetação em condições de densidade moderada a alta (Gitelson, 2004).

Os estudos de Blossfeld (2018) demonstraram que quando ocorre alta variabilidade espacial da produtividade, há uma tendência a coeficientes de correlação maiores, estando também fortemente relacionado a baixa produtividade,

evidenciando a relação entre os índices espectrais e as condições de sanidade do milho. E o índice NDRE mostrou-se mais representativo que o NDVI, possivelmente devido ao fato que ele é capaz de medir mais a fundo do dossel e como a cultura do milho apresenta várias camadas de folhas.

Conforme os estudos de Henriques, Cortez e Schwambach (2020) os índices espectrais NDRE, GNDVI, PNDVI, PRENDVI, GRENDVI e GRNDVI podem ser utilizados para estimar a produtividade do milho a campo. Assim como Luna Neto *et al.* (2023) observaram em seu estudo sobre índices espectrais de vegetação no monitoramento do milho (*Zea mays L.*) submetidos a bioestimulantes, pontuou correlação entre o índice NGRDI e SAVI e o teor de clorofila total.

Albert (2020) cita alguns índices que são capazes de detectar as alterações das diferentes doses de N aplicadas na cultura do milho, podendo ser capaz de contribuir com a quantificação de adubação nitrogenada na cultura do milho. Assim como Fernandes (2023) cita que os índices espectrais NDVI e VARI foram eficazes para detectar o estado nutricional da cultura no campo em relação ao N, sendo possível analisar as diferenças nos valores dos índices espectrais para cada dose de N testado nas fases V4, V8 e R2 da cultura do milho. Fernandes (2016) afirma que, especificamente por meio do índice de vegetação NDVI e região do espectro eletromagnético do infravermelho termal, proporcionam o monitoramento da produtividade de milho antecipadamente a sua colheita.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado instalada atualmente Faculdade de Ciências Agronômicas, localizada no município de Botucatu, São Paulo, com localização geográfica definida pelas coordenadas 22° 48' 50" S, 48° 25' 51" W e altitude de 778m, determinados pelo Garmin GPSmap 60CSx. O experimento ocorreu durante os meses de janeiro a julho do ano de 2023.

De acordo com Franco *et al.* (2023) a classificação climática de Köppen (Koppen, Geiger, 1928) para o município de Botucatu, a região dispõe de clima do tipo Aw (Clima de savana tropical), o clima de Botucatu é caracterizado por verão quente e chuvoso e inverno frio e seco, com temperaturas médias de 21,34 °C, umidade relativa do ar de 70% no ano e precipitação acumulada anual de aproximadamente 1.500 mm, ocorrendo, em média, precipitação em 107 dias do ano.

3.2 Características físicas e químicas do solo utilizado no experimento

O solo coletado o foi posteriormente conduzido para análise química de macronutrientes e micronutrientes (Raij *et al.*, 2001). Os resultados da análise química do solo de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm estão apresentados na Tabela 1.

A classificação de solo de acordo com Embrapa (2018) é Nitossolo Vermelho Distrófico Latossólico, apresentando estrutura muito argilosa, as características físicas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 - Resultado da análise química do solo de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm

Análise química de macronutrientes														
Profundidade	pH CaCl ₂	pH H ₂ O	M.O	P resina	Al ³⁺	H+Al	Na	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	S
			g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol dm ⁻³ -----									
0-20 cm	5	-	21	23	0	51	-	3,4	50	24	77	128	60	12
20-40 cm	5	-	21	27	0	56	-	2,9	56	26	85	140	60	12

Análise química de micronutrientes					
Profundidade	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----mg dm ⁻³ -----				
0-20 cm	0,52	14,6	30	163,6	3
20-40 cm	0,52	15,1	31	175,8	3,5

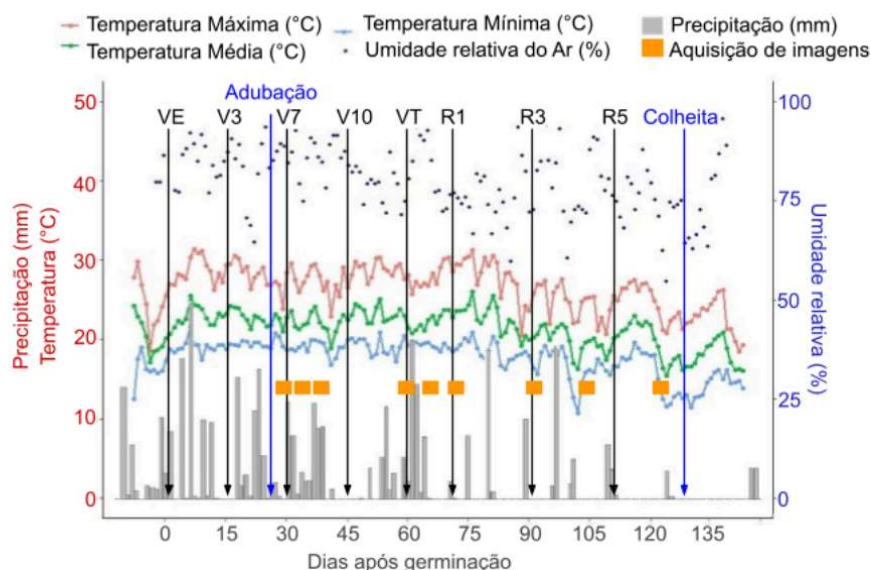
Tabela 2 - Resultado da análise granulométrica do solo de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 60 cm

Profundidade	Areia	Silte	Argila
	g kh ⁻¹		
0-10 cm	107	238	655
10-20 cm	100	245	655
20-40 cm	84	211	705
40-60 cm	66	204	730

3.3 Condições meteorológicas

Os dados meteorológicos referentes aos períodos de estudo (janeiro a julho de 2023) foram coletados na Estação Meteorológica da Faculdade de Ciências Agrônomicas, os dados fornecidos pelo Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia da Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) de Botucatu - São Paulo - Brasil (Figura 1). Durante este estudo, a média da temperatura máxima e a média da temperatura mínima foram de 26,52 °C e 17,73 °C respectivamente. A temperatura média foi de aproximadamente 21,33 °C. A média da umidade relativa máxima e a média da umidade relativa mínima foram de 92,46% e 57,19%, respectivamente. Com umidade relativa média de 78,86% aproximadamente. A precipitação pluviométrica diária foi de 5,64mm e a precipitação pluviométrica total durante o estudo foi de 845,55mm, respectivamente.

Figura 1 - Dados Meteorológicos referentes ao período de estudo de janeiro a julho de 2023, na região de Botucatu/SP



3.4 Condução da cultura

No experimento, foi conduzido um ciclo da cultura do milho primeira safra. Em campo experimental foi realizado o preparo mínimo do solo com gradagem mecânica. A adubação antecedente a semeadura foi realizada por máquinas de aplicação de corretivos e adubos com 12 kg ha⁻¹ de N, 42 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 24 kg ha⁻¹ de K₂O. A semeadura foi realizada dia 09 de janeiro de 2023 com 0,90m de espaçamento entre linhas.

O delineamento experimental foi realizado com o auxílio do Garmin GPSmap 60CSx para coordenadas geográficas previamente determinadas pelo software QGIS.

A adubação em cobertura foi realizada manualmente a lanço no estágio vegetativo V6 com ureia (45% de N), os tratamentos submetidos à cultura do milho foram determinados em função das porcentagens da recomendação total de nitrogênio, sendo 0%, 30%, 60%, 90%, 120% e 150% da dose total recomendada de N em cobertura. A dose total adotada foi de 160 kg ha⁻¹ de N recomendada pelo BOLETIM 100 (2022), sendo 100% da dose total recomendada de N (Tabela 3). Após a adubação em cobertura realizada no estágio V6, não foi aplicado nenhum fertilizante adicional.

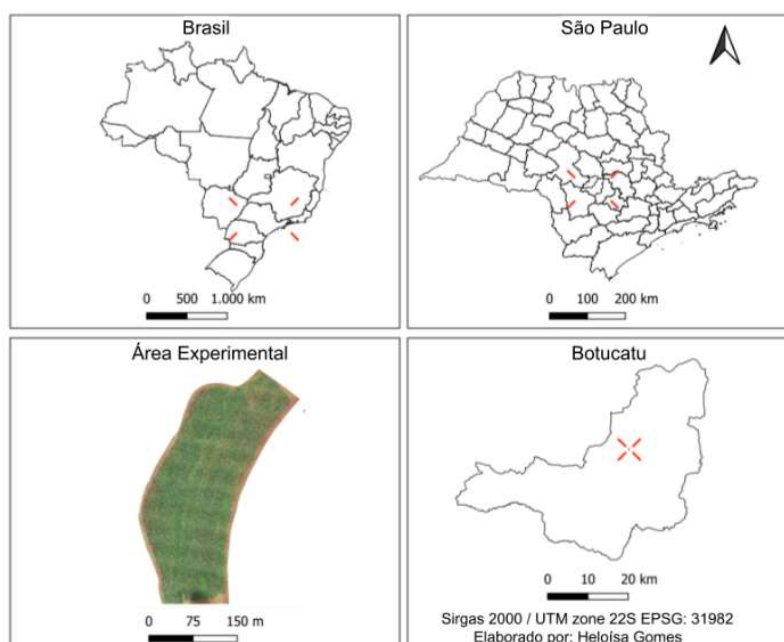
Tabela 3 - Estabelecimento dos Tratamentos/Dose em função da recomendação de adubação nitrogenada

Dose de N em cobertura (kg ha ⁻¹)	Porcentagem das doses de N (% de N)	Dose Total de N (kg ha ⁻¹ de N)	Dose de N em plantio (kg ha ⁻¹ de N)	Dose de N em cobertura (kg ha ⁻¹ de N)
0	0%	0	0	0
36	30%	48	12	36
84	60%	96	12	84
132	90%	144	12	132
180	120%	192	12	180
228	150%	240	12	228

O experimento teve uma área total de 40.600 m². Cada parcela experimental possui área de 900 m² e o espaçamento entre parcelas de 10 metros lineares, sendo que, no espaçamento entre parcelas. Para cada tratamento, houve quatro repetições cada, totalizando 22 parcelas experimentais como amostras-alvo, portanto para cada dose de N submetida à cultura em cobertura, com área total de 3.600 m². As dimensões das parcelas são de 30 m de norte a sul e 30 m de leste a oeste.

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, pois as posições das parcelas foram previamente estabelecidas para comportar um número mínimo de pixels e o deslocamento de grade que cada câmera multiespectral possui, tal deslocamento de parcelas inviabiliza a presença de blocos homogêneos em campo conforme a disposição das parcelas e estreitamento da região inferior da área conforme (Figura 2).

Figura 2 - Mapa do Brasil, São Paulo, Botucatu e da Área Experimental



3.5 Características avaliadas

Em uma parcela amostral, os estudos forneceram cinco tipos de avaliações, sendo variáveis biométricas, diagnóstico foliar, clorofila foliar, colorimetria foliar e imagens multiespectrais. As avaliações das variáveis biométricas associadas diretamente às plantas de milho são altura de planta, altura de espiga, número de plantas. As avaliações associadas às variáveis biométricas das espigas e grãos de milho, como número de espigas, peso médio de 1000 grãos, teor de umidade dos grãos, peso de grão por área experimentada, número médio de grãos por espiga e número de fileiras por espiga. Determinação eletrônica de teor de clorofila das folhas com o clorofiLOG CFL1030 (Falker). Análise de macronutrientes e micronutrientes a partir do tecido vegetal coletado. As avaliações associadas às imagens multiespectrais da área total, adquiridos por VANT, satélite CBERS-04A e satélite SENTINEL-2 e a manipulação de índices espectrais pelo software Qgis.

3.5.1 Altura de planta e da Inserção de espiga

A medição da altura do milho foi obtida usando uma fita métrica fixada a uma haste rígida alta, permitindo a aferição da altura da planta desde a superfície do solo até a base do ápice superior da panícula. O mesmo método foi utilizado para aferição da altura da interseção de espigas, utilizando a haste rígida alta desde a superfície do solo até a base da gema de emergência da espiga principal. As avaliações ocorreram antecipadamente à colheita.

3.5.2 Número de plantas e Número de espigas

O número de plantas e número de espigas foi determinado por contagem manual em uma área previamente delimitada de 4m² com o auxílio de trena. A contagem inclui todas as plantas contidas na mesma área, independentemente do estado físico da planta e da presença ou ausência de espigas, ou plantas. Plantas com mais de uma espiga também foram atribuídas aos dados. As avaliações ocorreram antecipadamente à colheita.

3.5.3 Amostragem e Diagnose foliar

A coleta de tecido vegetal fresco foi realizada na época do aparecimento da inflorescência feminina, coletando a folha oposta, abaixo da espiga principal rente ao colmo, retirando-se uma folha por planta de acordo com as recomendações de amostragem e diagnose foliar (Cravo; Viegas; Brasil, 2020), coletando 30 folhas de plantas intercaladas e distribuídas na parcela. Posteriormente as folhas acondicionadas em sacos de papel, encaminhadas à estufa de circulação de ar forçada, a 65 °C, até a massa constante, seguidamente trituradas por moinho de facas tipo Wiley (malha 1mm), encaminhadas ao Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente, a prestação de serviços de análise em tecido vegetal para determinação completa de macronutrientes e micronutrientes.

3.5.4 Análise do teor de clorofila

A análise da folha com o medidor eletrônico de teor de clorofila clorofiLOG CFL1030 (Falker) foi realizada na época do aparecimento da inflorescência feminina, posicionando o equipamento sobre a folha oposta e abaixo da espiga principal. Foram realizadas 16 repetições por tratamento, obtendo uma análise detalhada da presença de clorofila dos tipos A e B por folha avaliada.

3.5.5 Peso médio de 1000 grãos e Peso de grãos por área experimentada

A colheita do milho foi realizada em uma área delimitada de 20m² com o auxílio de trena, a colheita foi realizada manualmente, as espigas coletadas foram armazenadas em sacos de ráfia e encaminhadas para debulhagem, com o auxílio de uma debulhadeira de cereais BCI 300 Compacta (Itapireense), em seguida os grãos armazenados foram pesados por uma balança industrial com precisão de três casas decimais. O peso médio de 1000 grãos foi obtido por meio da contagem manual de subamostras de 100 grãos, posteriormente encaminhados a uma balança analítica de precisão de quatro casas decimais, foram realizadas 32 amostragens por tratamento. O teor de umidade dos grãos foi mensurado para realizar o desconto do peso devido à secagem, obtendo o peso dos grãos com umidade corrigida (13 e 15,5% de umidade dos grãos). O teor de umidade foi determinado com o auxílio de

medidor de umidade G600 (GEHAKA), foram realizadas 12 amostragens por tratamento.

3.5.6 Número médio de grãos por espiga e Número de fileiras por espiga

O número médio de grãos por espiga foi realizado por enumeração manual de grãos bem desenvolvidos, com três repetições em cada espiga, e 10 espigas avaliadas por parcela experimental, totalizando 40 espigas amostradas por tratamento.

O número de fileiras por espiga foi realizado também por enumeração manual do número de fileiras em cada espiga, 10 espigas avaliadas por parcela experimental, totalizando as mesmas 40 espigas amostradas para obter número médio de grãos por espiga por tratamento.

3.5.7 Produtividade

O método de estimativa de produtividade de milho determinado proposto por Reetz (1987) é indicado para realizar comparações em estimativas de ensaios de híbridos/variedades, verificando a variabilidade de rendimento em um campo ou entre campos, ou comparando diferentes tratamentos de manejo.

A produtividade estimada foi obtida da média de 10 espigas por parcela, provenientes de cada sub-amostra, utilizando a seguinte expressão:

$$\text{Produtividade (t ha}^{-1} \text{ a 15,5\% de umidade)} = A \times B \times C \times 0,01116 \times 0,063 \quad (1)$$

Onde o A é o número de espigas em 4m², B é o número de fileiras de grãos da espiga, C é o número de grãos por fileira (utilizando uma média de 3 fileiras de grãos por espiga, desconsiderando os grãos menores que a metade de um grão normal, presentes na extremidade da espiga), 0,01116 é o fator de correção do método, 0,063 é o valor para transformação de bushels por acre para (t ha⁻¹).

3.5.8 VANT

O VANT utilizado para estudo foi o Phantom 4 Pro (DJI) com 4 hélices e motor

elétrico. A faixa de precisão do foco da aeronave (com posicionamento GPS) é de aproximadamente 0.5 m verticalmente e aproximadamente 1.5 m horizontalmente, com peso (bateria e hélices incluídas) de 1388 gr e tamanho diagonal (hélices excluídas) de 350 milímetros. Associado a câmera RGB (Modelo da câmera FC6310, distância focal de 8.8 e resolução de 5472x3648) que fornece o tamanho do píxel de 0.02321000000000000146, -0.02321000000000000146 e bandas vermelha, verde e azul (Phantom 4 Pro, 2023), e câmera RGN (Modelo da câmera Survey3W_RGN distância focal 3.4 e resolução de 4000x3000) (MAPIR) que fornece o tamanho do Pixel de 0.04024816913688834125, -0.04024816334703229526 deste modelo Red+Green+NIR (RGN) permite luz infravermelha próxima 850nm, vermelha 660nm, e verde 550nm (MAPIR, 2023). O tempo médio de voo da aeronave foi de aproximadamente 12m:18s sobrevoando uma área de aproximadamente 13 ha, a uma altura de 80 m acima do solo. Os dados obtidos pelas câmeras RGB e RGN foram processados pelo software PIX4Dmapper para transformar as imagens terrestres, processando a sobreposição de várias imagens em ortomosaico e a geração de resultados em aquisição de mapas digitais. A coleta de imagens multiespectrais ocorreu nas datas 10/02/2023, 05/03/2023 e 08/04/2023.

3.5.9 Satélite CBERS-04A

As imagens de satélite de sensoriamento remoto de média resolução CBERS-04A, são obtidas por atuação do Centro de Dados de Sensoriamento Remoto (CDSR) responsável pela recepção, armazenamento e processamento de imagens de satélites. A aquisição de tais imagens pode ser realizada pelo site (<http://cdsr.dpi.inpe.br/catalogo/explore>), através da divisão de geração de imagens INPE | CGOBT | DIDGI.

Para realizar a coleta de dados foi necessário selecionar as imagens da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM) coletadas pelo CBERS-04A durante todo o período do experimento implementado de janeiro a julho de 2023, independentemente da cobertura de nuvens sobre as imagens. Posteriormente as imagens foram analisadas pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG) de Código Aberto QGIS versão 3.22.10 para verificar presença de nuvens que poderiam impossibilitar a visualização da área experimental e seguidamente editar, analisar os dados e manipulação dos índices espectrais. A

coleta de imagens multiespectrais ocorreram nas datas 04/02/2023, 07/03/2023 e 08/05/2023.

3.5.10 Satélite SENTINEL-2

As imagens de satélite de sensoriamento remoto obtidas pela constelação de satélites SENTINEL-2, são obtidas pelo Ecossistema Espacial de Dados Copernicus, responsável pelo fornecimento de imagens, exibição de navegação e exportação de metadados. A aquisição de tais imagens pode ser realizada pelo site (<https://dataspace.copernicus.eu/browser/>), através do serviço de distribuição de dados das missões Copernicus SENTINEL-2s.

Para realizar a coleta de dados, foi necessário selecionar a identificação do satélite SENTINEL-2, escolher missão (S2B) e o produto MSIL1C denota o nível de produto Level-1C durante todo o período do experimento implementado de janeiro a julho de 2023, independentemente da cobertura de nuvens sobre as imagens. A coleta de imagens multiespectrais ocorreu nas datas 08/02/2023, 20/03/2023 e 19/04/2023.

3.5.11 Índices Espectrais para VANT, SENTINEL-2 e CBERS-04A

Posteriormente a coleta de imagens multiespectrais com o VANT, satélite SENTINEL-2 e satélite CBERS-04A foram analisadas pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG) de Código Aberto QGIS versão 3.22.10 para verificar presença de nuvens que poderiam impossibilitar a visualização da área experimental e seguidamente as bandas espectrais foram utilizadas nas formulações matemáticas dos índices espectrais, foi determinada a extração dos valores obtidos por cada índice, conforme a média dos pixels contidos nas parcelas experimentais, sendo que VANT forneceu o número mínimo de 1515339 pixels e máximo de 1671849 pixels por parcela, esta quantidade de pixels é possível devido à baixa resolução espacial da câmera multiespectral utilizada, contribuindo com uma maior quantidade de pixels para obter a média dos índices espectrais. A média obtida pelo satélite SENTINEL-2 foi estabelecida por 4 pixels contidos dentro da parcela, localizados no centro das parcelas, esta quantidade de pixels é possível devido ao posicionamento estratégico da disposição das parcelas, portanto conforme a posição dos pixels estabelecidas

previamente foi determinado a posição das parcelas, como esta câmera multiespectral possui a maior resolução espacial, a variabilidade do número de pixels contidos na média das parcelas é reduzido. A média obtida pelo satélite CBERS-04A foi determinada por 6 ou 9 pixels centralizados na parcela, esta variação do número de médias de pixels contidos na parcela ocorreu devido ao deslocamento do pixel que excedeu as parcelas, e como a resolução espacial da câmera é menor comparada ao SENTINEL-2 tem-se a possibilidade de obter uma média com uma boa variabilidade de pixels contidos dentro das parcelas.

3.5.11.1 Fórmulas Matemáticas dos Índices Espectrais

O greenNDVI é considerado muito mais sensível à concentração de Chl em uma ampla gama de variações de Chl do que o NDVI original, e permite uma estimativa precisa da concentração de pigmento. A fórmula matemática do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde (greenNDVI) consiste em (Gitelson; Kaufman; Merzlyak, 1996):

$$\text{greenNDVI} = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{GREEN})}{(\rho_{NIR} + \rho_{GREEN})} \quad (2)$$

O MCARI2 foi criado visando reduzir os efeitos da contaminação do solo, adicionando um fator de ajuste do solo, otimizado com a restrição de preservar a sensibilidade ao IAF, bem como a resistência à influência da clorofila. A fórmula matemática do índice de Taxa de Absorção de Clorofila Modificada 2 (MCARI2) consiste em (Haboudane et al., 2004):

$$\text{MCARI2} = 1,5 [2,5 (R_{800} - R_{670}) - 1,3 (R_{800} - R_{550})] (2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5R_{670}) - 0,5 \quad (3)$$

O GRVI modificado (MGRVI) é definido como a diferença normalizada da reflectância verde quadrada e da reflectância vermelha quadrada, para capturar diferenças de reflectância devido à absorção de clorofila a e b. A fórmula matemática do Índice de Vegetação Verde Vermelha Modificado (MGRVI) consiste em (Bendig et al., 2015):

$$\text{MGRVI} = \frac{(R_{GREEN})^2 - (R_{RED})^2}{(R_{GREEN})^2 + (R_{RED})^2} \quad (4)$$

Um SAVI modificado (MSAVI) substitui a constante L por uma função variável, é utilizado para aumentar a faixa dinâmica do sinal de vegetação, minimizando ainda mais as influências de fundo do solo, resultando em maior sensibilidade da vegetação. A fórmula matemática do Índice de Vegetação Modificado Ajustado ao Solo (MSAVI) consiste em (Qi et al., 1994):

$$\text{MSAVI} = \frac{2\rho_{\text{NIR}} + 1 - \sqrt{(2\rho_{\text{NIR}} + 1)^2 - 8(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}})}}{2} \quad (5)$$

O MTVI2, assim como o MCARI2 foi criado visando reduzir os efeitos da contaminação do solo, adicionando um fator de ajuste do solo, otimizado com a restrição de preservar a sensibilidade ao IAF, bem como a resistência à influência da clorofila. A fórmula matemática do Índice de Vegetação Triangular Modificado 2 (MTVI2) consiste em (Haboudane et al., 2004):

$$\text{MTVI2} = 1,5 [1,2 (R_{800} - R_{550}) - 2,5 (R_{670} - R_{550})] (2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5R_{670}) - 0,5 \quad (6)$$

O NDVI envolve relacionar a refletância na faixa vermelha (perto de 675 nm) e NIR com variáveis da vegetação, como índice de área foliar, cobertura, e a concentração da clorofila total. A fórmula matemática do índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) consiste em (Gitelson; Kaufman; Merzlyak, 1996):

$$\text{NDVI} = \frac{(L_{\text{NIR}} - L_{\text{Red}})}{(L_{\text{NIR}} + L_{\text{Red}})} \quad (7)$$

O SAVI é um método pelo qual os índices espectrais podem ser refinados ou “calibrados” para que as variações do substrato do solo sejam efetivamente normalizadas e não influenciam a medida da vegetação. O L atua como fator de ajuste, ideal para as interações solo-vegetação, e o mesmo é determinado conforme a densidade da vegetação e ruídos do solo. A fórmula matemática do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) consiste em (Huete, 1988):

$$\text{SAVI} = \left[\frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)} \right] * (1 + L) \quad (8)$$

O SR índice baseia-se no princípio de que as folhas absorvem relativamente mais luz vermelha do que a luz infravermelha e, portanto, quanto mais folhas estiverem presentes no dossel, maior será a taxa de área foliar determinando-se a

relação entre a luz a 800 m e a luz a 675 m. A fórmula matemática do índice Razão Simples (SR) consiste em (Jordan., 1969):

$$SR = \frac{800}{675} \quad (9)$$

O VARI é recomendado para corrigir os efeitos atmosféricos, tal correção ocorre subtraindo o azul ao efeito no vermelho e no verde. A fórmula matemática do Índice Resistente à Atmosfera na Região Visível (VARI) consiste em (Gitelson et al., 2002):

$$VARI = \left[\frac{(R_{GREEN} - R_{RED})}{(R_{GREEN} + R_{RED} - R_{BLUE})} \right] \quad (10)$$

O WDRVI permite uma caracterização mais robusta das características fisiológicas e fenológicas da cultura, especialmente valiosas para a agricultura de precisão e o monitoramento do estado da vegetação em condições de densidade moderada a alta. O coeficiente de ponderação (a) varia 0,1 – 0,2, aumenta a correlação com a fração da vegetação, linearizando a relação para as copas típicas de trigo, soja e milho. A fórmula matemática do Índice de Vegetação de Ampla Faixa Dinâmica (WDRVI) consiste em (Gitelson., 2004):

$$WDRVI = (a * \rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (a * \rho_{NIR} + \rho_{RED}) \quad (11)$$

3.6 Análises estatísticas

Buscando-se atender os objetivos propostos, foram realizadas quatro análises estatísticas diferentes dos dados aferidos, utilizando cada análise estudada um conjunto de dados de acordo com a necessidade de responder cada esfera dos fenômenos sucedidos à cultura do milho.

3.6.1 Análise de variância

Esta análise foi realizada buscando-se estabelecer a avaliação do impacto da adubação de cobertura de N sobre a cultura, verificar se existe uma diferença significativa entre as doses de N submetidas para as variáveis analisadas:

Produtividade ($t\ ha^{-1}$), Peso de milho das parcelas (kg), Média do Peso de milho de 1000 grãos (g), Média do Número de Grãos, Média do Número de Fileiras por espiga, Número de Plantas, Número de Espigas, Média da Altura da Planta, Média da Altura de Espigas, Clorofila A, Clorofila B, Clorofila Total e análise de macronutrientes e micronutrientes da folha.

As devidas análises foram realizadas por meio do software RStudio, versão 2022.07.1+554 "Spotted Wakerobin". Analisou-se previamente, no conjunto de dados, o teste de normalidade dos dados realizado por meio do teste de Shapiro-Wilk utilizando o pacote "MVN", e o teste de homogeneidade de variâncias realizado por meio do teste de Bartlett utilizando o pacote "stats". Para os conjuntos de dados que não apresentaram distribuição normal e/ou homogeneidade de variância constatada, foi realizado o teste de Box-Cox ou Johnson utilizando o pacote estatístico "bestNormalize" para realizar a transformação adequada aos dados. Atendendo os pressupostos normalidade e homogeneidade das variâncias, posteriormente o teste de análise de variâncias foi conduzido utilizando o pacote estatístico "ExpDes.pt." verificando a diferença significativa estatisticamente entre a medida de médias das variáveis obtidas avaliando as diferentes doses de N em cobertura, quando o p-valor evidencia a diferença entre a medida de médias, rejeita-se a hipótese nula H_0 e considera-se que as doses de N influenciaram na variável em questão. Para os conjuntos de dados que apresentaram significância na análise de variâncias, o teste de comparações múltiplas pelo método de Fisher (LSD) é estabelecido para determinar concomitantemente a diferença entre as médias correspondentes às diferentes doses de N em cobertura. A significância a ser adotada integralmente nos testes estatísticos foi de 5%.

3.6.2 Análise de Componentes Principais para as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT

Esta análise foi realizada buscando-se estabelecer a avaliação do impacto da adubação de cobertura de N sobre a cultura sobre as diferentes fontes de sensoriamento remoto, verificar se existe uma diferença significativa entre as doses de N submetidas para as variáveis analisadas: SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT.

As devidas análises foram realizadas por meio do software RStudio, versão 2022.07.1 + 554 "Spotted Wakerobin", utilizando os pacotes estatísticos

“FactoMineR”, “factoextra” e “corrplot” para análise de componentes principais (PCA), extrair e visualizar as variáveis quantitativas e categóricas e visualização das informações graficamente.

3.6.3 Análise de Componentes Principais para as variáveis dos Índices espectrais

Esta análise foi realizada buscando-se estabelecer a avaliação do impacto da adubação de cobertura de N sobre a cultura empregando distintos índices espectrais, verificar se existe uma diferença significativa entre as doses de N submetidas para as variáveis analisadas: greenNDVI, MCARI2, MGRVI, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI, SR, VARI e WDRVI.

As devidas análises foram realizadas por meio do software RStudio, versão 2022.07.1+554 "Spotted Wakerobin", utilizando os pacotes estatísticos “FactoMineR”, “factoextra” e “corrplot” para análise de componentes principais (PCA), extrair e visualizar as variáveis quantitativas e categóricas e visualização das informações graficamente.

3.6.4 Análise de variância

Esta análise foi realizada buscando-se estabelecer a avaliação do impacto da adubação de cobertura de N sobre a cultura conforme os estádios fenológicos do milho em função dos períodos de aquisição de imagens, verificar se existe uma diferença significativa entre as doses de N submetidas para as variáveis analisadas: Índices espectrais (greenNDVI, MCARI2, MGRVI, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI, SR, VARI e WDRVI) e fontes de sensoriamento remoto multiespectral (SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT).

As devidas análises foram realizadas por meio do software RStudio, versão 2022.07.1+554 "Spotted Wakerobin". Analisou-se previamente, no conjunto de dados, o teste de normalidade dos dados univariada e multivariada foi realizado por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Royston utilizando o pacote “MVN”, e o teste de homogeneidade de variâncias foi realizado por meio do teste de Bartlett pelo pacote “stats”. Para os conjuntos de dados que não apresentaram distribuição normal e/ou homogeneidade de variância constatada, foi realizado o teste de Box-Cox ou

Johnson utilizando o pacote estatístico “bestNormalize” para realizar a transformação adequada aos dados. Atendendo os pressupostos que as variáveis apresentam normalidade e homogeneidade, posteriormente o teste de análise de variâncias com 2 fatores foi realizado, utilizando o pacote estatístico “ExpDes.pt.” verificando há diferença significativa estatisticamente entre a medida de médias dos fatores avaliados e a sua interação, quando o p-valor evidencia a diferença entre a medida de médias, rejeita-se da hipótese nula H_0 , o fator em questão ou a interação dos fatores é significativa. Para o fator(es) do conjunto de dados que apresentaram significância na análise de variâncias, o teste de comparações múltiplas pelo método de Fisher (LSD) é estabelecido para determinar concomitantemente a diferença entre as médias correspondentemente às doses de N em cobertura e/ou fonte de sensoriamento remoto, ou a interação das doses de N em cobertura com as fonte de sensoriamento remoto. A significância a ser adotada integralmente nos testes estatísticos foi de 5%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de variâncias e Teste de Comparação de médias LSD

No teste de variância realizado para as variáveis avaliadas, o p-valor oscilou entre 0,9928 e 0,00001 e a média dos valores do teste de variância foi 0,4622. Ao nível de 5% de significância, valor comumente utilizado, o teste estatístico permite verificar se há diferença significativa entre a medida de médias das variáveis obtidas avaliando as diferentes doses de N em cobertura fornecidas a cultura do milho, portanto quando o p-valor evidenciar que existe diferença entre a medida de médias, rejeita-se da hipótese nula H_0 que declara a proposição de que não há efeito ou relação entre as diferentes doses de N em cobertura com a variável em questão.

O teste de comparação adotado foi o método de Fisher conhecido como LSD (diferença menos significativa) que executa todas as comparações entre as médias de grupo sem ajustamento na taxa de erros para comparações múltiplas. Este teste controla a taxa de erro ao nível de significância $\alpha=5$ para cada comparação dos tratamentos, dois a dois, sem controlar a taxa de erro do experimento (Silva; Santos; Bello, 2022). O teste LSD não divergiu do teste de análise de variâncias, ou seja, os testes acusaram concomitantemente a diferença entre as médias correspondentemente às diferentes doses de N em cobertura. Portanto, em 100% dos casos analisados pela análise de variâncias em que houve rejeição da hipótese nula, o teste LSD aponta a diferença entre as diferentes doses de N em cobertura, ambos ao nível de significância de 5% e por este motivo este método foi adotado, diferentemente do teste de Tukey que apresentou maior incidência de erro do tipo 1.

Na análise de variância da produtividade ($t\ ha^{-1}$), peso de milho das parcelas (kg), média do peso de milho de 1000 grãos (g), média do número de grãos e média do número de grãos por fileiras, verificou-se que nenhuma variável apresentou diferença significativa estatisticamente ($\alpha=0,05$) (Tabela 4). Corroborando com os resultados obtidos por Cassim (2020), constatando que não foi observada diferença estatística significativa na produtividade da cultura entre a testemunha sem aplicação de N e ureia convencional (dose de $200\ kg\ ha^{-1}$ de N) em todas as safras. Assim como os estudos de Erbetta (2021) onde o fornecimento de nitrogênio não influenciou a produtividade de grãos sob a ausência de irrigação. Conforme os resultados obtidos nos estudos de Cabezas, Korndorfer e Motta (1997) em que não

houve diferença significativa na produtividade do milho em sistema de plantio direto e convencional, independentemente das fontes nitrogenadas.

Ao analisar o efeito das variáveis peso de milho das parcelas (kg), média do peso de milho de 1000 grãos (g), média do número de grãos por espiga e média do número de fileiras por espiga, não apresentaram diferença significativa estatisticamente entre diferentes doses de N em cobertura ($\alpha=0,05$) (Tabela 5). Os resultados encontrados nesse trabalho corroboram positivamente com os apresentados no trabalho de Cassim (2020) no qual não foi observada diferença estatística significativa nos componentes de número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, número de grãos por espiga, nitrogênio foliar, mil grãos em massa e produtividade, em função dos tratamentos testemunha, ureia convencional e fertilizantes foliares Hexion à base de ureia-formaldeído e triazona (N-Hexion) no milho primeira safra. Assim como o estudo de Sadeghi (2018) que não mostrou efeito significativo da adubação nitrogenada sobre as características de altura da planta, altura da espiga, peso de 1000 sementes, rendimento de grãos, exceto para o comprimento de grão, além disso, a adubação nitrogenada não apresentou melhora nas principais características econômicas.

Tabela 4 - Resumo da análise de variância da Produtividade ($t\ ha^{-1}$), Peso de milho das parcelas (kg), Média do Peso de milho de 1000 grãos (g), Média do Número de Grãos por espiga e Média do Número de Fileiras por espiga para a cultura do milho

Dose de N em cobertura (kg ha^{-1})	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)	Peso de milho das parcelas (kg)	Média do peso de 1000 grãos (g)	Média do número de grãos por espiga	Média do número de fileiras por espiga
0	11,35	11,76	387,85	30,47	16,05
36	10,94	11,24	365,97	28,95	15,46
84	11,76	11,97	356,52	30,58	15,25
132	12,02	12,29	341,22	29,84	15,20
180	12,05	11,96	384,70	29,18	15,45
228	12,28	10,40	351,65	30,27	15,35
CV(%)	11,94 %	12,14 %	6,44 %	7,21 %	4,06 %
p-valor	0,77 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,84 ^{ns}	0,47 ^{ns}

Ao nível α de significância de 5%; * significativo ao nível α de significância de 5%; ^{ns} não significativo ao nível α de significância de 5%.

Na análise de variância do número de plantas, número de espigas, média da altura da planta (cm) e média da altura de espigas (cm) para a cultura do milho submetida a diferentes doses de N em cobertura, verificou-se que não houve

diferença significativa ($\alpha=0,05$) (Tabela 5). Assim como os estudos de Sadeghi (2018) que não mostraram efeito da adubação nitrogenada sobre as características da altura da planta, altura da espiga e rendimento de grãos. Em concordância com Valderrama *et al.* (2014) onde o incremento das doses de N em todas as safras não afetaram as avaliações de altura de plantas (m), altura de inserção de espiga (m), número de grãos por fileira, número de grãos por espiga, massa de 100 grãos.

Tabela 5 - Resumo da análise de variância do Número de Plantas, Número de Espigas, Média da Altura da Planta e Média da Altura de Espigas para a cultura do milho

Dose de N em cobertura (kg ha ⁻¹)	Número de Plantas	Número de Espigas	Média da Altura da Planta (cm)	Média da Altura de Espigas (cm)
0	7,87	8,25	186,58	111,20
36	7,94	8,69	181,71	108,33
84	8,37	9,00	182,05	108,24
132	8,56	9,44	183,97	109,04
180	8,50	9,50	182,65	107,43
228	8,44	9,37	182,31	109,35
CV(%)	10,27 %	9,09 %	4,35 %	7,94 %
p-valor	0,78 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,95 ^{ns}	0,99 ^{ns}

p-valor; Ao nível α de significância de 5%; * significativo ao nível α de significância de 5%; ^{ns} não significativo ao nível α de significância de 5%.

Na análise de variância do índice SPAD do teor relativo para clorofila A, clorofila B e clorofila total para a cultura do milho submetida a diferentes doses de N em cobertura, verificou-se que nenhuma variável apresentou diferença significativa estatisticamente ($\alpha=0,05$) (Tabela 6). Este fato pode ser oriundo do estágio fenológico em que foi realizado a análise de clorofila, estágio (VT), assim como no experimento de Biesdorf *et al.* (2016) onde a leitura do teor de clorofila na folha não foi alterada pela ausência ou forma de aplicação de ureia (aplicação de a lanço, aplicação localizada na linha de plantio ou incorporada ao solo) nos estádios avaliados VT, R2, R3 e R6 e pode estar associado à alta contribuição de N dos resíduos orgânicos presentes na área relativamente às sucessivas plantios. Assim como nos estudos de Sichoeki (2010) em que doses de 0, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de ureia não apresentaram diferença nos índices de clorofila aos 45 dias após a emergência.

Tabela 6 - Resumo da análise de variância do teor relativo de Clorofila A, Clorofila B e Clorofila Total para a cultura do milho

Dose de N em cobertura (kg ha ⁻¹)	Clorofila A (Índice SPAD)	Clorofila B (Índice SPAD)	Clorofila Total (Índice SPAD)
0	49,25	18,45	67,70
36	49,40	18,92	68,32
84	49,62	20,00	69,62
132	49,17	21,22	70,40
180	50,20	20,52	70,72
228	51,20	20,65	71,85
CV(%)	3,6 %	11,22 %	5,29 %
p-valor	0,60 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,63 ^{ns}

Ao nível α de significância de 5%; * significativo ao nível α de significância de 5%; ^{ns} não significativo ao nível α de significância de 5%.

Na análise de variância para a análise de macronutrientes e micronutrientes presentes nas folhas, as variáveis N, P, K, B, Cu, Fe e Mn apresentaram diferença significativa estatisticamente entre diferentes doses de N em cobertura ($\alpha=0,05$). A mesma análise revela que as variáveis Mg e Zn não apresentaram diferença significativa estatisticamente entre diferentes doses de N em cobertura ($\alpha=0,05$). Ao analisar o teste LSD entre as diferentes doses de N em cobertura, a dose 0 (kg ha⁻¹ de N) apresentou menor acúmulo de macronutrientes e micronutrientes em todas as variáveis analisadas N, P, K, B, Cu, Fe e Mn (Tabela 7).

Visando o acúmulo de nitrogênio, a dose 0 (kg ha⁻¹ de N) apresentou menor acúmulo de N, diferindo das demais doses de cobertura de N ($\alpha=0,05$). A dose 36 (kg ha⁻¹ de N) obteve um acúmulo superior comparado a dose de 0 (kg ha⁻¹ de N), diferindo das demais doses de N em cobertura ($\alpha=0,05$). Conforme Martinez, Carvalho e Souza (1999) os valores de referência dos teores foliares de nitrogênio considerados adequados para a cultura do milho são de 27,5-32,5 (g kg⁻¹), portanto as diferentes doses de N em cobertura não atendem os teores foliares de nitrogênio atingidos, conforme as médias que variam de 18,50 a 26,75 (g kg⁻¹).

Nota-se no acúmulo de fósforo, que a dose 0 (kg ha⁻¹ de N) apresentou menor acúmulo e não diferindo estatisticamente ($\alpha=0,05$) da dose de 36 (kg ha⁻¹ de N). Assim como no trabalho de Casagrande (2002) observou que nas diferentes doses de N em cobertura onde se omitiu o N o teor de P foi menor. Conforme Martinez, Carvalho e Souza (1999) os valores de referência dos teores foliares de fósforo considerados adequados para a cultura do milho são de 2,5-3,5 (g kg⁻¹),

portanto não atendem os teores foliares de fósforo atingidos, conforme as médias que variam de 1,50 a 1,85 (g kg⁻¹).

Sobre o acúmulo de potássio, a dose 0 (kg ha⁻¹ de N) apresentou menor acúmulo, diferindo das demais diferentes doses de N em cobertura ($\alpha=0,05$). Que corrobora com os estudos do teor de K na folhas, foi avaliado por Soratto *et al.* (2011) e conforme os fatores estudados por três fontes de N (ureia, Amiréia® 180S e Entec® 26) e quatro doses (0, 45, 90 e 180 kg ha⁻¹ de N) em cobertura, foi observado uma interação e o desdobramento da interação demonstrou que, independente da fonte utilizada, a aplicação de N em cobertura proporcionou incremento no teor de K na folha do milho. Conforme Martinez, Carvalho e Souza (1999) os valores de referência dos teores foliares de potássio considerados adequados para a cultura do milho são de 17,5-22,5 (g kg⁻¹), portanto não atendem os teores foliares de potássio atingidos, conforme as médias que variam de 12,00 a 15,25 (g kg⁻¹).

Ao analisar o acúmulo de boro, a dose 0 (kg ha⁻¹ de N) apresentou menor acúmulo, não diferindo estatisticamente ($\alpha=0,05$) da dose de 180 (kg ha⁻¹ de N). Sobre o acúmulo de cobre a dose 0 (kg ha⁻¹ de N) apresentou menor acúmulo, não diferindo estatisticamente ($\alpha=0,05$) da dose 36 (kg ha⁻¹ de N), as demais doses de N em cobertura não diferem entre si ($\alpha=0,05$). Conforme Nascimento *et al.* (2012) a diagnose foliar revelou que para o cobre na planta foi obtido ajuste linear crescente associados para as doses de N aplicadas à cultura do milho.

Verifica-se que no acúmulo de ferro, a dose 0 (kg ha⁻¹ de N) apresentou menor acúmulo, diferindo estatisticamente ($\alpha=0,05$) apenas da dose 36 (kg ha⁻¹ de N), que obteve maior acúmulo. Ao analisar o acúmulo de manganês, a dose 0 (kg ha⁻¹ de N) apresentou menor acúmulo, diferindo estatisticamente ($\alpha=0,05$) das doses de 180 (kg ha⁻¹ de N) e 228 (kg ha⁻¹ de N)(Tabela 7).

Os micronutrientes, boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn) apresentam acúmulos dos teores foliares que atendem os valores de referência dos teores foliares, em conformidade com Martinez, Carvalho e Souza (1999), sendo respectivamente boro (4-20 mg kg⁻¹), cobre (6-20 mg kg⁻¹), ferro (20-250 mg kg⁻¹) e manganês (20-150 mg kg⁻¹) respectivamente.

Tabela 7 - Resumo da análise de variância de para as variáveis: Nitrogênio (N), Fósforo(P), Potássio(K), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn) e Teste LSD para as folhas do milho

Dose de N em cobertura (kg ha ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)
0	18,50 c	1,50 c	12,00 b	1,70	1,00
36	21,75 b	1,63 bc	14,25 a	1,77	1,15
84	25,50 a	1,70 ab	14,00 a	1,82	1,37
132	26,75 a	1,85 a	14,50 a	1,92	1,30
180	25,00 a	1,73 ab	15,25 a	1,97	1,30
228	26,50 a	1,73 ab	14,50 a	2,00	1,35
Referência	27,5-32,5	2,5-3,5	17,5-22,5	2,5-4,0	1,0-2,0
CV(%)	8,81 %	6,44 %	9,09 %	14,79 %	19,36 %
p-valor	0,0002*	0,0068*	0,0398*	0,5541 ^{ns}	0,2657 ^{ns}

Dose de N em cobertura (kg ha ⁻¹)	B (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
0	10,50 d	7,00 b	80,50 b	38,00 b	22,50
36	12,75 c	7,25 b	118,50 a	49,00 ab	19,25
84	16,25 a	11,25 a	96,50 b	56,50 ab	23,00
132	13,00 bc	10,50 a	89,25 b	49,25 ab	23,50
180	10,75 d	10,25 a	88,00 b	69,25 a	26,50
228	14,75 ab	10,75 a	97,75 ab	69,25 a	26,250
Referência	4-20	6-20	20-250	20-150	20-70
CV(%)	9,25 %	18,9 %	14,71 %	26,38 %	15,68 %
p-valor	0,00001*	0,0091*	0,0221*	0,0436*	0,1108 ^{ns}

Referência: Referência dos teores foliares considerados adequados para a cultura do milho conforme Martinez, Carvalho e Souza (1999). Ao nível α de significância de 5%; * significativo ao nível α de significância de 5%; ^{ns} não significativo ao nível α de significância de 5%. Médias seguidas de mesma letra, não diferem entre si ao nível α de significância de 5% pelo teste de comparação de médias LSD.

4.2 Análise de Componentes Principais para as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT

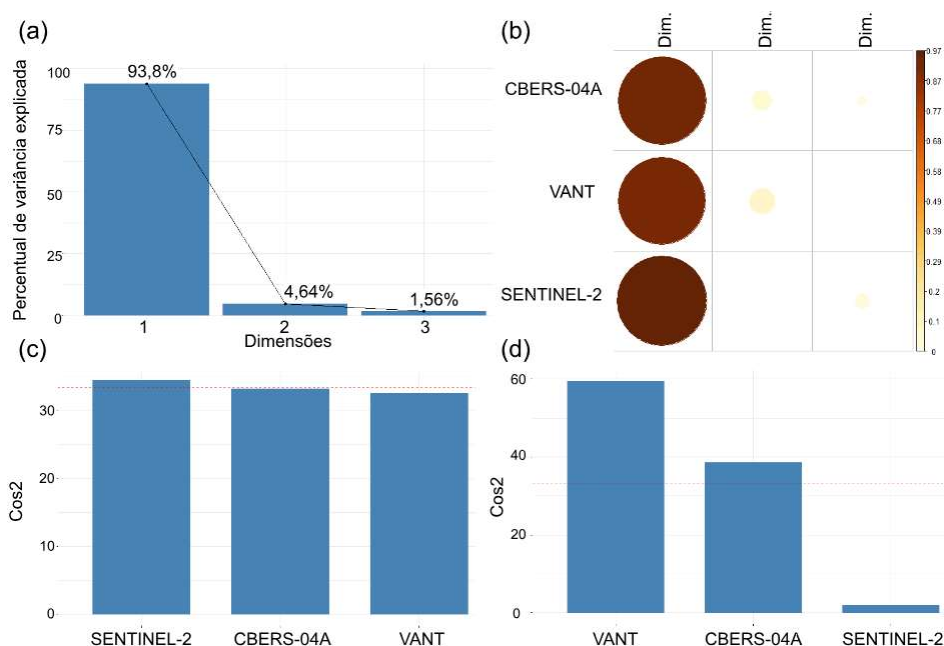
Na Análise de Componentes Principais (PCA) para as variáveis independentes SENTINEL, CBERS-04A e VANT foi observado que apenas duas componentes explicaram 98.4% da variância total do conjunto de dados, portanto os dois primeiros componentes são considerados significativos por explicar a maior parte da variância total do conjunto de dados, desta maneira a interpretação das informações obtidas se torna de mais fácil compreensão para explicar o conjunto de dados e a sua relação com as variáveis. A Primeira Componente Principal (PC1) explica 93.8% da variância total do conjunto de dados, sendo assim esta

componente representa a maior proporção de informação retida nos dados iniciais. A Segunda Componente Principal (PC2) explica 4,64% da variância total do conjunto de dados, deste modo esta componente representa uma reduzida proporção das informações retidas, conforme (Figura 3 - a).

Os resultados obtidos pela correlação entre as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT nas dimensões da PCA, permitem visualizar como as variáveis que estão correlacionadas com as componentes principais, sendo a PC1 representada por Dim.1 possui alta correlação com as variáveis e corrobora como valioso componente para explicar a variabilidade dos dados, já as demais dimensões da PCA, Dim.2 e Dim.3 apresentaram reduzida correlação com as variáveis, expondo relevância reduzida (Figura 3 - b).

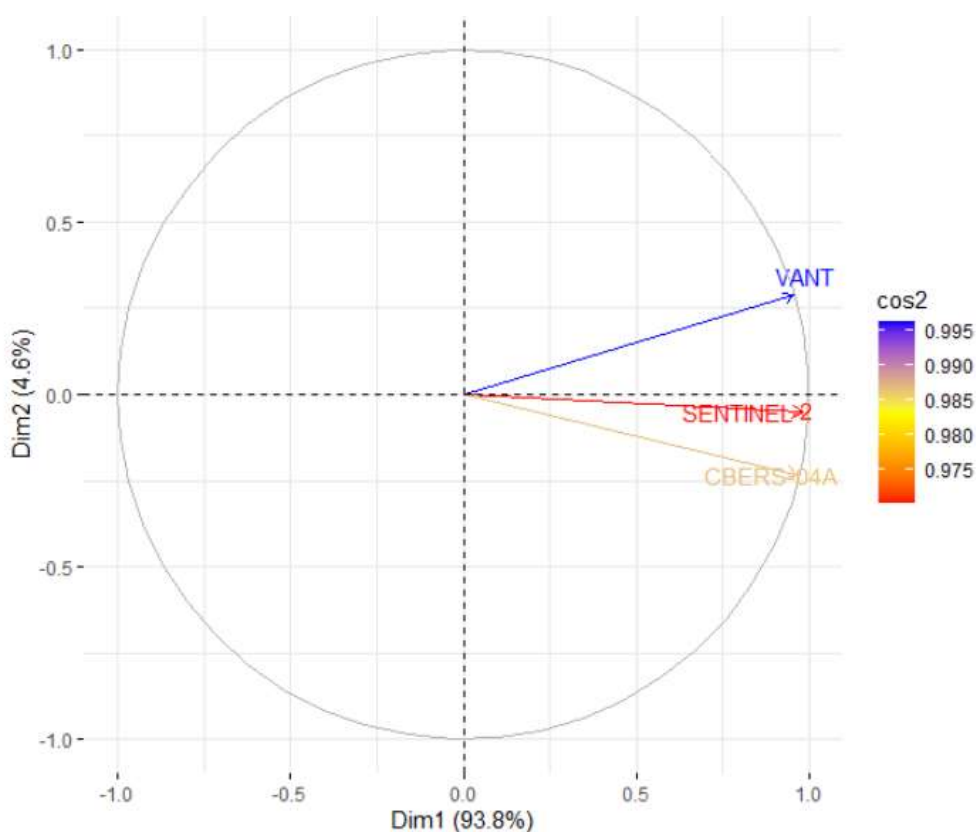
Ao analisar a exploração das variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e o VANT e representadas na PC1 e na PC2, identifica-se que as variáveis apontam maior relevância com o componente PC1 em termos da variação total contida nos dados, já para PC2 a relevância das variáveis é reduzida (Figura 3 - c e Figura 3 - d).

Figura 3 - (a) Gráfico scree plot. (b) Correlação entre as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT com as dimensões da PCA. (c) Gráfico de barras das variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT explicadas na componente PC1. (d) Gráfico de barras das variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT explicadas na componente PC2



Diante da presente análise a exploração conjunta das componentes PC1 e PC2 permitem a visualização das variáveis representadas como vetores, ou seja, segmentos de reta orientados, que indicam direção, sentido e módulo dos vetores, estão posicionadas próximas ao eixo horizontal a direita indicando sentido, módulo e alta correlação positiva com a PC1 com grande parte da explicação das variáveis, principalmente o SENTINEL-2. O CBERS-04A e VANT apresentam uma alta correlação com a PC1, indicando que atuou com grande parte da explicação das variáveis conforme o módulo dos vetores, contudo como a PC2 contribui ligeiramente para a explicação das variáveis, apresenta um deslocamento reduzido do vetor, indicando um deslocamento para direções opostas, portanto uma diferenciação entre as variáveis (Figura 4).

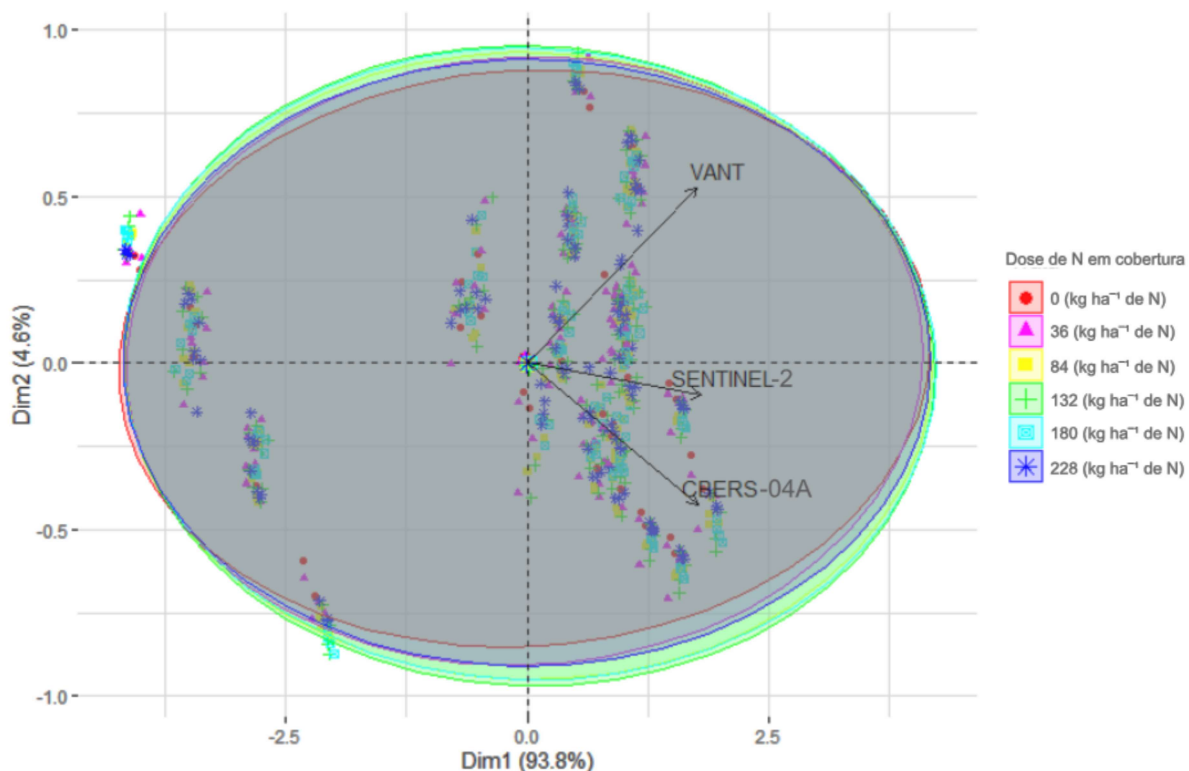
Figura 4 - Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT



A devida análise revela que o conjunto de dados apresenta uma concentração de todos os dados das diferentes doses de N em cobertura submetidos a cultura do milho, esta associação ocorre de forma homogênea aos

centro do biplot, as dimensões das elipses são semelhantes, indicando a dispersão das doses de N em cobertura de forma similar (Figura 5). Considerando uma maior contratação de dados próximos ao vetor das variáveis VANT, SENTINEL-2 e CBERS-04A. Também observa-se que alguns pontos discrepantes no quadrante superior esquerdo, pouco afastados das elipses, estes dados abrangem todas as diferentes doses de N em cobertura (Figura 5).

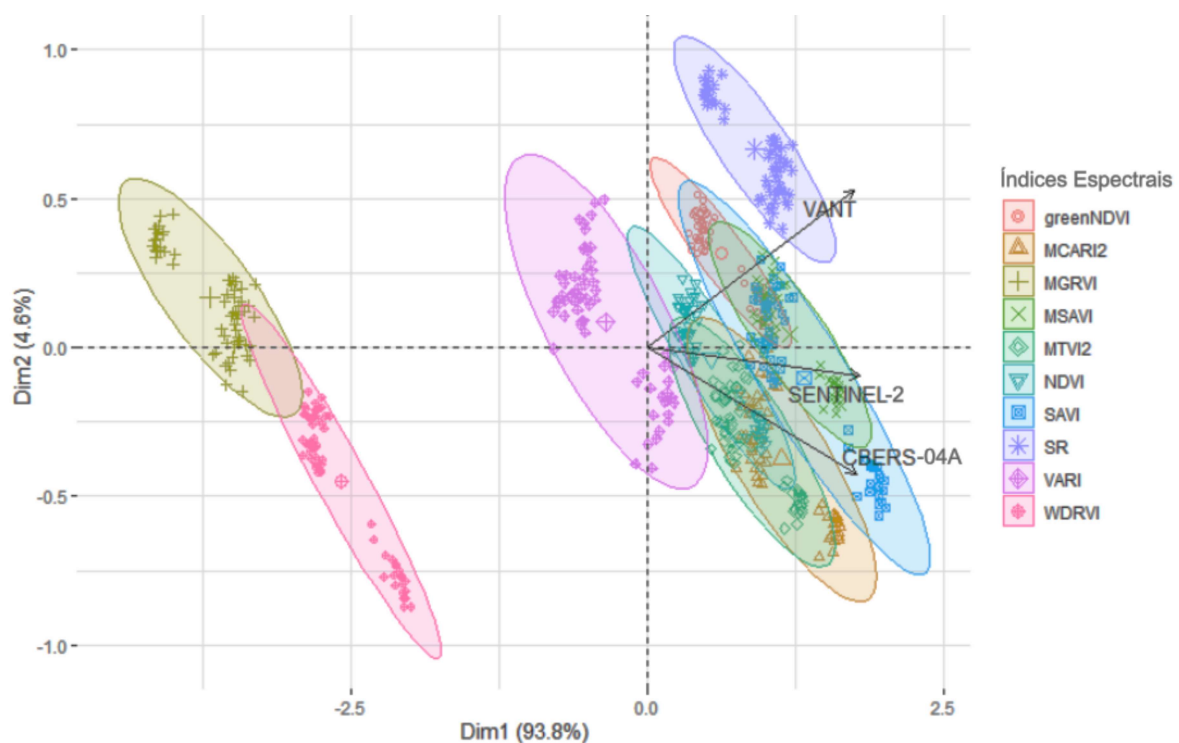
Figura 5 - Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT em relação ao conjunto de dados das doses de N em cobertura submetidos à cultura do milho



Ao analisar o comportamento das variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT em relação ao conjunto de dados dos índices espectrais, estes contribuem na concentração dos dados, conforme o índice observado, sendo que os dados referente aos índices MGRVI e WDRVI apresentam um deslocamento no quadrante esquerdo do eixo, portanto estes índices possuem uma dispersão dos dados dessemelhante aos demais índices. Os dados dos índices SR e greenNDVI estão

próximos ao vetor do VANT, apresentando uma correlação entre estes índices com esta variável. Assim como os dados presentes nos índices MSAVI, SAVI, MCARI2, NDVI e MTVI2 estão próximos aos vetores das variáveis CBERS04-A e SENTINEL, apresentaram uma correlação destes índices com estas variáveis. Os dados do índice VARI estão localizados ao centro do biplot e apresentando dados mais dispersos, e os dados contribuem para todos os vetores (Figura 6).

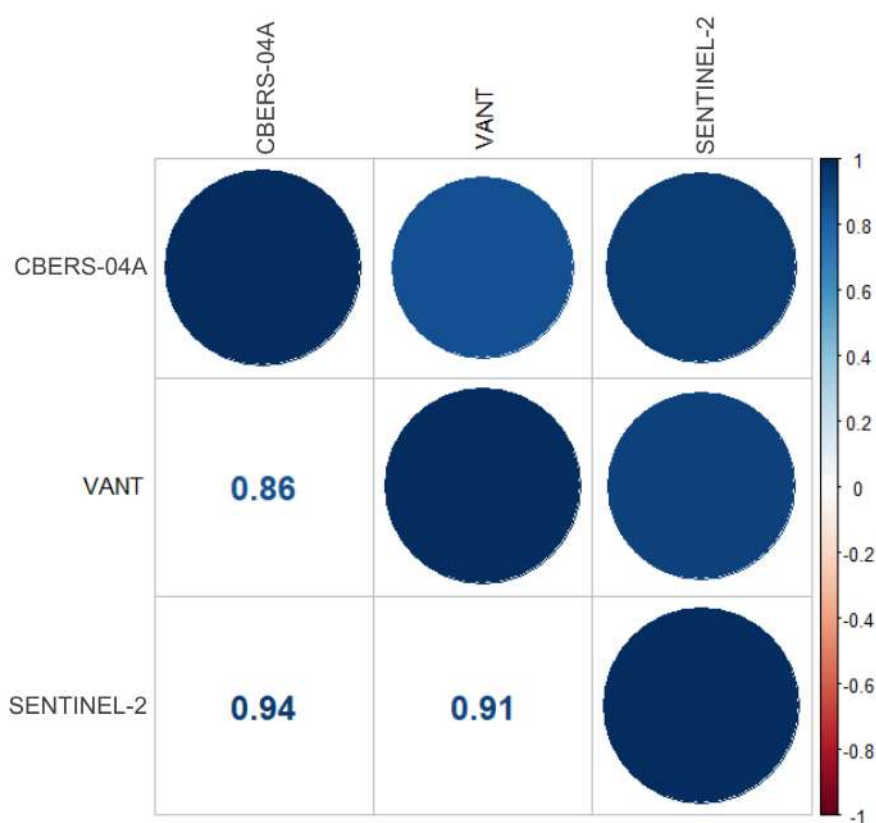
Figura 6 - Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT em relação ao conjunto de dados dos índices espectrais



Conforme a análise de correlação as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT possuem uma correlação positiva forte, sendo que o coeficiente de correlação mais elevado é entre o satélite SENTINEL-2 e o satélite CBERS-04A de ($r = 0,94$), seguidamente do SENTINEL-2 e VANT de ($r = 0,91$) e a correlação do CBERS-04A e VANT de ($r = 0,86$), evidenciando que de fato há similaridade entre as fontes de sensoriamento remoto, mesmo consideram a resolução espacial, radiométrica e temporal diferentes em cada fonte de sensoriamento remoto multiespectral (Figura 7). Estes resultados corroboram com os estudos de Santos *et al.* (2021) onde a

análise de correlação mostrou que há similaridade entre as imagens avaliadas, mesmo considerando as diferentes escalas espaciais, com coeficientes de correlação superiores ($r = 0,73$) para VANT e SENTINEL-2, em comparação com aquele obtido para VANT e Landsat 8 ($r = 0,65$).

Figura 7 - Gráfico de correlação entre as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT



4.3 Análise de Componentes Principais para as variáveis dos parâmetros dos Índices Espectrais

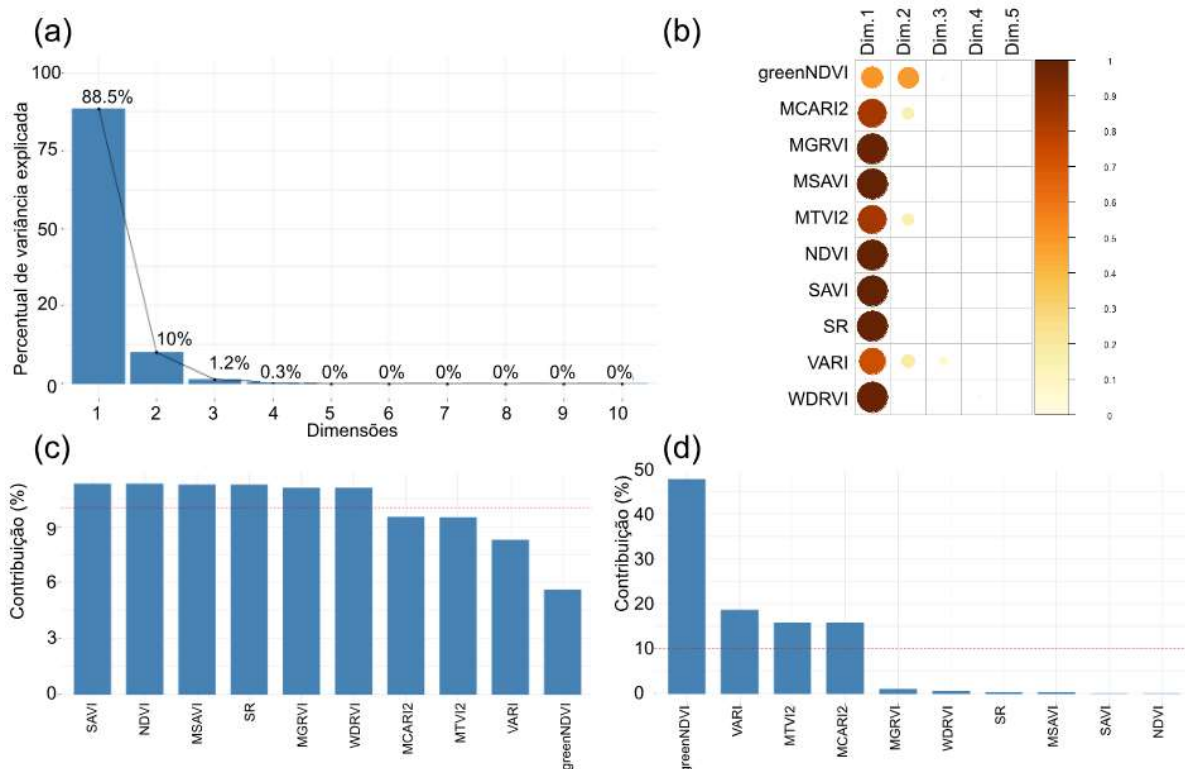
Diante da análise da PCA para as variáveis independentes dos 10 índices espectrais avaliados, sendo eles greenNDVI, MCARI2, MGRVI, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI, SR, VARI e WDRVI, foi observado que apenas duas componentes explicaram 98.6% da variância total do conjunto de dados, portanto os dois primeiros componentes são considerados significativos por explicar a maior parte da variância total do conjunto de dados, sendo respectivamente que a PC1 explica 88,5% da

variância total do conjunto de dados, sendo assim esta componente representa a maior proporção de informação retida nos dados iniciais. A PC2 explica 10% da variância total do conjunto de dados, deste modo esta componente representa uma reduzida proporção das informações retidas, conforme (Figura 8 - a).

Os resultados obtidos pela correlação entre as variáveis nas dimensões da PCA, as correlações com variáveis, são excelentes na PC1 representada por Dim.1 e corroboram como valioso componente para explicar a variabilidade dos dados, e uma correlação moderada com o índice greenNDVI. A PC2 representada por Dim.2 também apresenta correlação moderada com o índice greenNDVI, participando moderadamente da explicação da variância total deste índice, já as demais dimensões da PCA, Dim.3, Dim.4 e Dim.5 apresentaram reduzida correlação com as variáveis, expondo relevância reduzida (Figura 8 - b).

Ao analisar a exploração das variáveis representadas na PC1 e na PC2, identifica-se que as variáveis apontam maior relevância com o componente PC1 em termos da variação total contida nos dados, já para PC2 contribui significativamente com a explicação da variância total dos índices greenNDVI, MCARI2, MTVI2 e VARI (Figura 8 - c e Figura 8 - d).

Figura 8 - (a) Gráfico scree plot. (b) Correlação entre as variáveis dos parâmetros dos índices espectrais com as dimensões da PCA. (c) Gráfico de barras das variáveis dos parâmetros dos índices espectrais explicados na componente PC1. (d) Gráfico de barras das variáveis dos parâmetros dos índices espectrais explicados na componente PC2



Diante da presente análise, a exploração conjunta das componentes PC1 e PC2 permite a visualização das variáveis MCARI2, MSAVI, MTVI2, NDVI e SAVI possuem vetores aproximados indicando uma associação entre si, e a PC1 contribui com grande parte da explicação das variáveis. Assim como, ao analisar a correlação estabelecida pelo método de Pearson, reforça que as mesmas variáveis evidenciam 10 correlações fortes decorrentes a estes índices espectrais, os coeficientes de correlação variam entre ($r = 1$) a ($r = 0,91$) (Figura 9).

A PC1 também sendo responsável por grande parte da explicação das variáveis MGRVI e SR, os vetores estão próximos indicando uma associação entre si, assim como o coeficiente de correlação indica que estes índices apresentaram uma correlação forte entre si ($r = 1$), estes índices também apresentam correlações fortes negativas com os índices MCAR2, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI e WDRVI, os

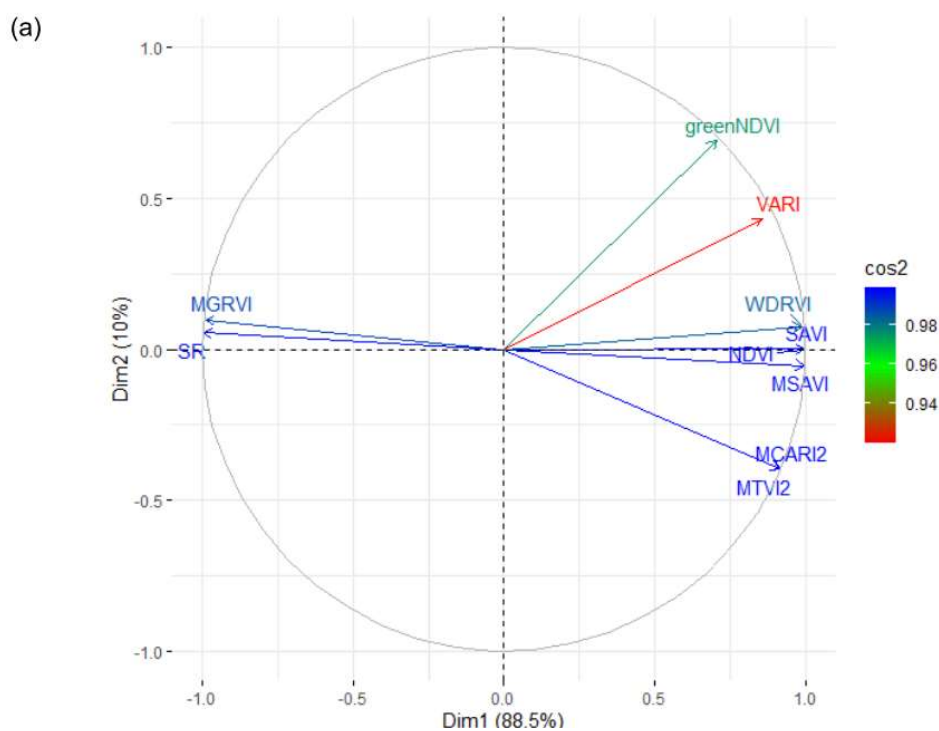
vetores das variáveis encontram-se opostas aos vetores dos índices em questão MGRVI e SR, reforçando tal correlação negativa, o índice VARI também apresenta uma correlação forte, assim como o greenNDVI apresentou correlação negativa moderada (Figura 9).

Já para o índice greenNDVI as componentes PC1 e PC2 são responsáveis por explicar a variância dos dados, por este motivo o vetor se encontra entre as componentes, a análise de correlação revela que esta variável possui correlação positiva forte com os índices NDVI, SAVI, VARI e WDRVI (Figura 9).

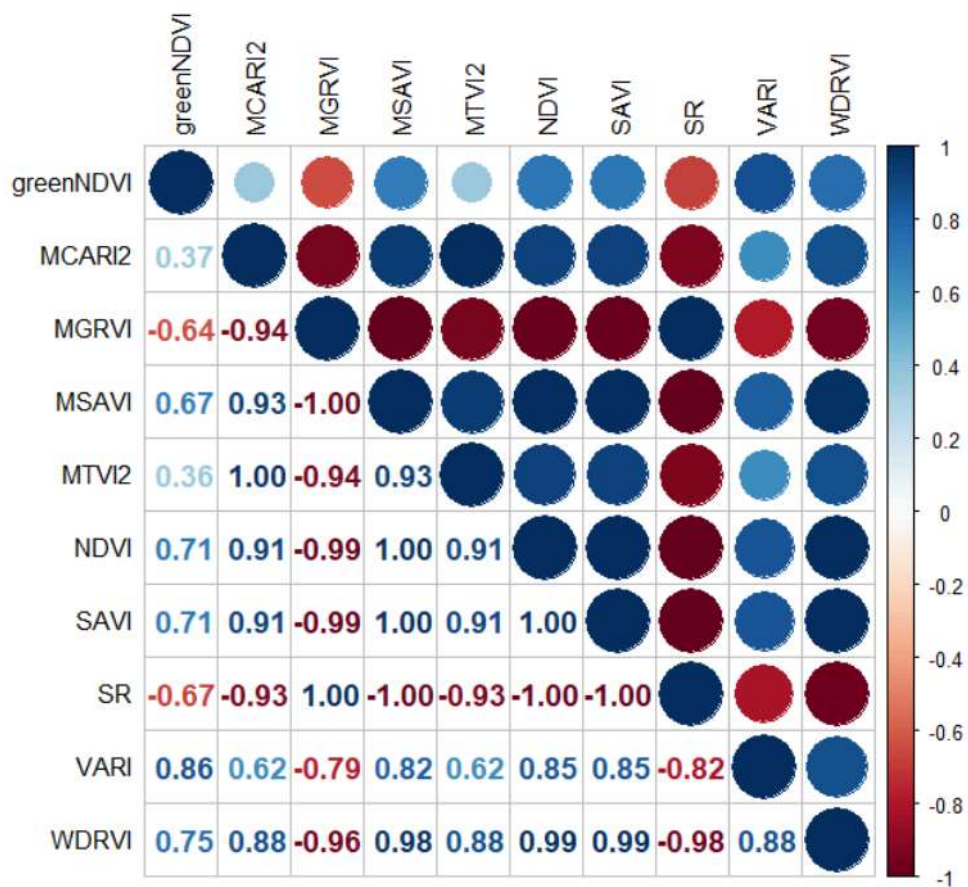
Para o índice VARI a PC2 também é responsável por parte da explicação desta variável e apresenta um deslocamento do vetor, a análise de correlação revela que esta variável possui correlação positiva forte com os índices greenNDVI, NDVI, MSAVI, SAVI e WDRVI (Figura 9).

Os vetores das variáveis MCARI2 e MTVI2 estão posicionadas próximos, portanto possuem associação entre si e estas variáveis possuem um coeficiente de correlação forte ($r = 1$). A análise de correlação apresenta correlações fortes positivas com os índices MSAVI, NDVI, SAVI e WDRVI, que pode ser observada também pela proximidade dos vetores das variáveis, também apresenta correlações fortes negativas com os índices MGRVI e SR, assim reforçando a posição oposta dos vetores (Figura 9).

Figura 9 - (a) Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para os índices espectrais. (b) Gráfico de correlação entre índices espectrais

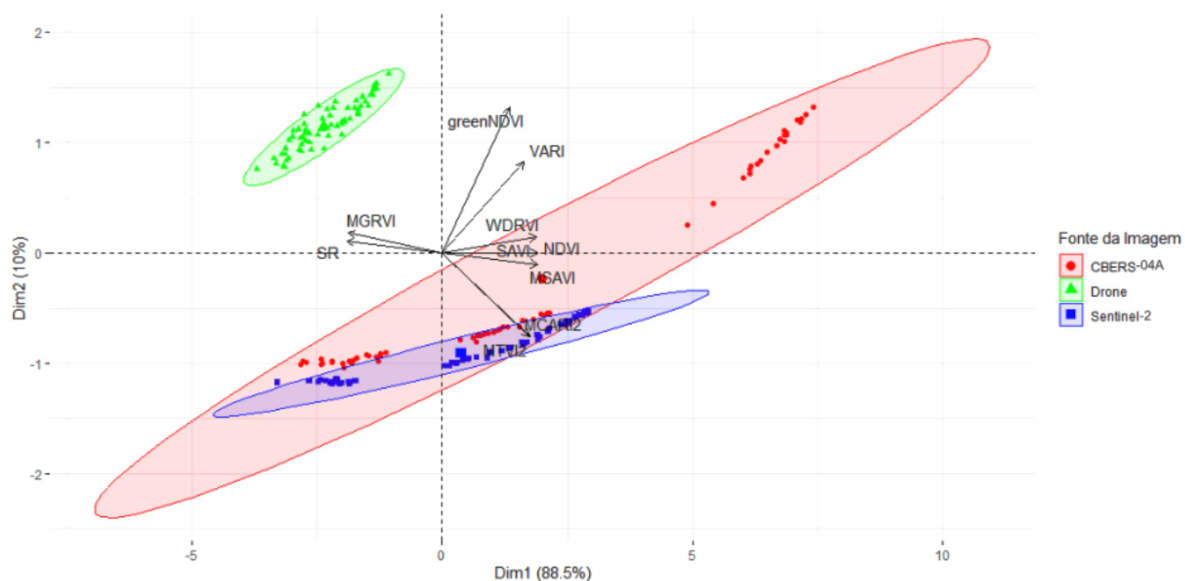


(b)



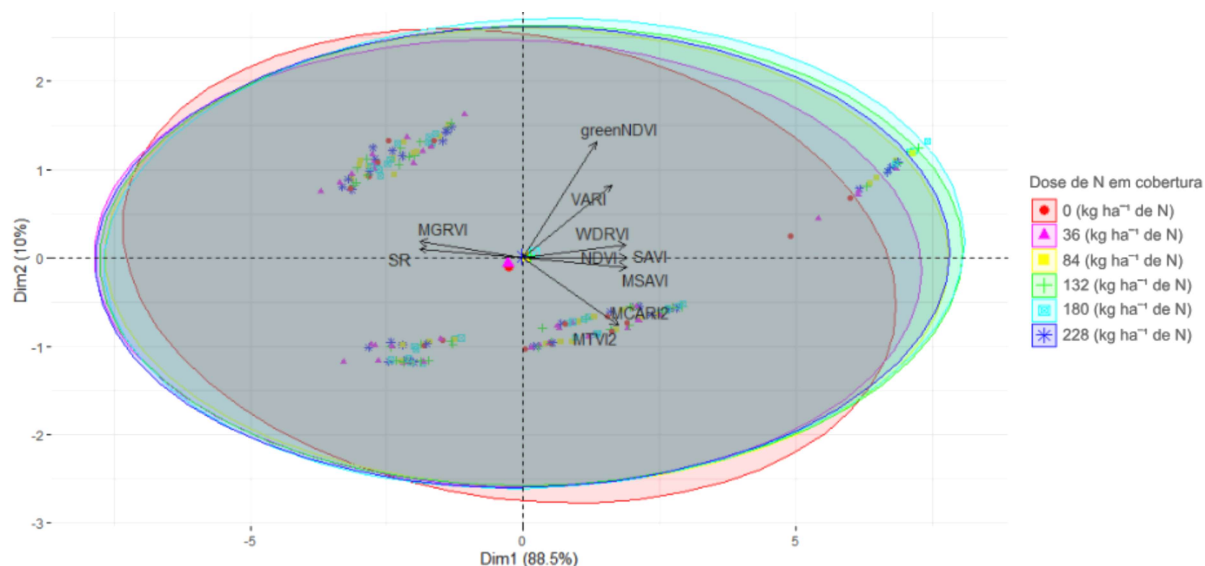
Diante da presente análise, a dispersão dos dados das fontes de sensoriamento remoto multiespectral corrobora na avaliação da relação com as variáveis e o comportamento dos dados, conforme a sua respectiva fonte de sensoriamento remoto. O VANT apresenta concentração dos dados, com elipse reduzida, indicando o como os dados desta fonte são possuem uma dispersão reduzida comparada às demais fontes e aquisição de imagens. O CBERS-04A apresentou uma elevada dispersão dos dados, esta fonte de sensoriamento remoto multiespectral apresenta uma elevada correlação com os índices espectrais MCARI2, MTVI2, MSAVI, NDVI, SAVI e WGRVI. O SENTINEL-2 apresentou pouca dispersão dos dados, portanto uma área da elipse reduzida, esta fonte de sensoriamento remoto multiespectral apresenta uma elevada correlação com os índices espectrais MCARI2, MTVI2, MSAVI, NDVI, SAVI e WGRVI (Figura 10).

Figura 10 - Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 com as variáveis dos parâmetros dos índices espectrais em relação ao conjunto de dados das fontes de aquisição de dados SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT



Diante da presente análise a dispersão dos dados das diferentes doses de N em cobertura submetidos a cultura do milho ocorre de maneira homogênea, contudo o deslocamento das elipses indicam uma tendência da a dispersão dos dados conforme as doses de N, ao analisar as doses 0 e 36 (kg ha^{-1} de N) observa-se um deslocamento mais acentuado das elipses das doses 84, 132, 180 e 228 (kg ha^{-1} de N) (Figura 11).

Figura 11 - Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para os índices espectrais em relação ao conjunto de dados das doses de N em cobertura submetidos à cultura do milho

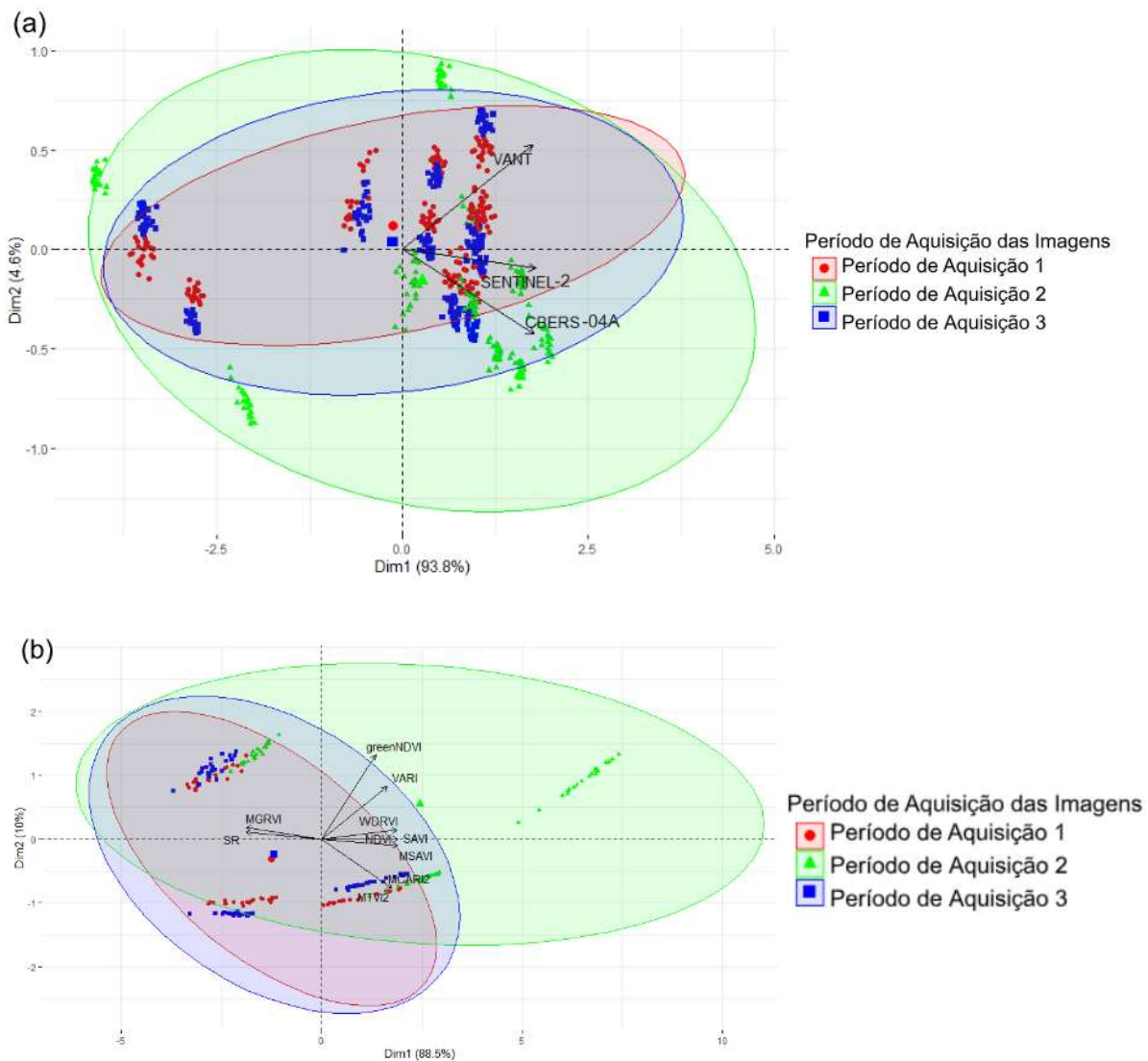


Diante da presente análise o período de aquisição de imagens multiespectrais exerce efeito na dispersão dos dados conforme a data, corroborando para uma elipse com área reduzida no período de aquisição 1, tanto para os vetores das fontes de sensoriamento remoto multiespectral quanto para os vetores dos índices espectrais (Figura 12).

Conforme o período de aquisição 2, os dados apresentaram uma dispersão dos dados mais acentuada, contribuindo para que as elipses deste período possuam dimensões maiores dos demais períodos de aquisição avaliados, notadamente para as variáveis dos parâmetros dos índices espectrais o deslocamento de dados é acentuado no quadrante superior direito, assim como uma relevante dispersão dos dados (Figura 12).

Ao analisar o período de aquisição 3, os dados apresentaram concentração dos dados, corroborando para uma elipse com área reduzida, contudo com dados mais dispersos comparando a dispersão dos dados do período (Figura 12).

Figura 12 - (a) Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para as variáveis SENTINEL-2, CBERS-04A e VANT em relação ao período de aquisição de imagens. (b) Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para as variáveis dos parâmetros dos índices espectrais em relação ao período de aquisição de imagens multiespectrais

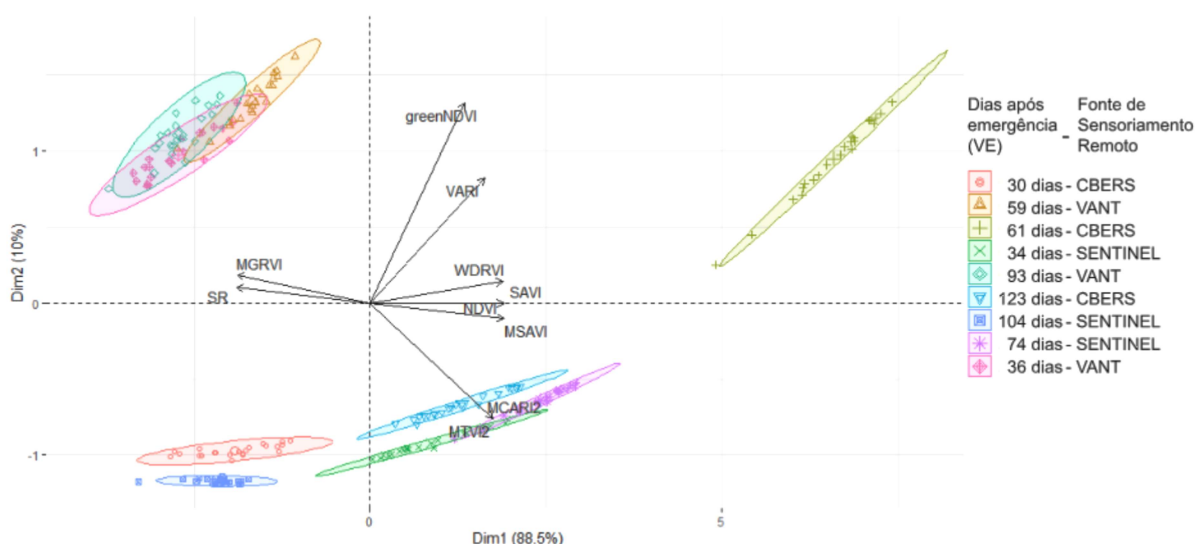


Analisando o impacto das período de aquisição de imagens multiespectrais individualmente e a respectiva fonte da aquisição das imagens o VANT apresenta a concentração de dados de todos os períodos avaliados, sendo aos 36, 74 e 104 dias após emergência, estes dados apresentam uma homogeneidade na dispersão dos dados, com elipses próximas com dimensões semelhantes, distantes dos demais dados obtidos pelas outras fontes imageadoras, estes resultados corroboram para avaliar que independentemente do período de aquisição das imagens o VANT

apresenta uma tendência a apresentar uma concentração dos dados (Figura 13). Ao analisar o CBERS-04A observa-se a concentração de dados em função ao período que ocorreu a aquisição de imagens, sendo aos 30, 61 e 123 dias após emergência apresentam pouca dispersão dos dados, aos 61 dias após emergência apresentou um alongamento da elipse, indicando que neste período em específico possui uma maior dispersão dos dados e também a posição dos dados comparada com os demais indica uma correlação com as variáveis greenNDVI, MSAVI, NDVI, SAVI, VARI e WDRVI (Figura 13).

Já o SENTINEL-2 apresenta a concentração de dados conforme o período da aquisição de imagens 34 e 74 dias após emergência, apresentam pouca dispersão dos dados com elipses com dimensões reduzidas e aproximadas, a posição dos dados indica uma correlação com as variáveis MCARI2 e MTVI2. Os dados referentes aos 93 dias após emergência, apresentam uma acentuada concentração dos dados, indicando que neste período em específico possui pouca dispersão dos dados (Figura 13).

Figura 13 - Gráfico biplot dos componentes PC1 e PC2 para os índices espectrais em relação ao período de aquisição de imagens e a fonte de aquisição de imagem



4.4 Análise de Variância dos Índices Espectrais com 2 fatores (Doses de N em cobertura e Fontes Imageadoras) e Teste de Comparação de médias LSD

A ANOVA foi subdividida em 3 períodos, assim podemos avaliar os efeitos das fases fenológicas do milho conforme os índices espectrais avaliados com os respectivos fatores da análise, sendo eles as diferentes fonte de sensoriamento remoto multiespectral e as doses de N em cobertura submetidos a cultura do milho. De acordo com Ye *et al.* (2018) os estádios de crescimento da cultura afetam diretamente a detecção remota, conforme o estado foliar inferior de N do dossel, pois a reflectância do dossel é impactada pela biomassa antes do estágio V12 e pelo N da planta após esse estágio (Ye *et al.*, 2018). Colovic *et al.* (2022) aponta como vários índices espectrais não mostram alta sensibilidade aos parâmetros da cultura do milho, e ressalta a importância de ter em mente que a ligação entre o sinal espectral a nível do dossel e a propriedade alvo pode ser influenciada por fatores da estrutura do dossel, incluindo o tamanho da planta, idade e ângulo foliar, além disso, deve-se considerar que, em condições de campo, déficits de água e/ou nutrientes podem ser acompanhados por alterações em quaisquer outras propriedades foliares e do dossel que afetem as características de reflectância.

Para o período de aquisição das imagens 1, o estágio fenológico da cultura do milho neste período foi no V7, onde a aquisição das imagens do CBERS-04A, SENTINEL-2 e VANT ocorreram nas datas 04/02/2023, 08/02/2023 e 10/02/2023, aos 30, 34 e 36 dias após emergência respectivamente. No período de aquisição das imagens 2, o estágio fenológico cultura do milho neste período foi no VT, onde a aquisição das imagens do VANT, CBERS-04A e SENTINEL-2 e ocorreram nas datas 05/03/2023, 07/03/2023, 20/03/2023, aos 59, 61, 74 dias após emergência respectivamente. Já para o período de aquisição das imagens 3 foi possível obter distintos estádios fenológicos da cultura do milho, sendo que o VANT sobrevoou no estágio R3 na data 08/04/2023, 93 dias após a emergência, no estágio R4 o SENTINEL-2 adquiriu as imagens na data 19/04/2023 aos 104 dias após a emergência e no estágio R5 o CBERS-04A adquiriu as imagens na data 08/05/2023 com 123 dias após emergência este foi o último sensoriamento remoto que ocorreu ao final do implemento da cultura em campo, sendo que a colheita ocorreu dia 12/05/2023 aos 127 dias após emergência.

Os índices espectrais foram submetidos ao teste ANOVA com dois fatores, sendo eles o primeiro fator foi as doses de N em cobertura submetidos a cultura (D) e o segundo fator foi as fontes de sensoriamento remoto multiespectral (F), também foi avaliado a interação entre os 2 fatores, sendo (I) a interação entre (F) e (D), o p-valor geral do teste oscilou entre 0,998 a 0,000 e a média do teste geral foi de 0,260

Conforme a análise do período de aquisição 1 o teste evidenciou a diferença significativa estatisticamente ao nível de 5% de significância para (F) para todos os índices espectrais, sendo assim, o teste LSD evidencia que as fontes de sensoriamento remoto multiespectral são diferentes entre si e diferenciam a atribuição da diferença entre médias conforme o índice espectral avaliado, este resultado corrobora com a premissa principal que as fontes de sensoriamento remoto podem influenciar nos parâmetros obtidos pelos índices espectrais (Tabela 8). O presente estudo evidenciou que para os índices greenNDVI e VARI o teste não identificou a diferença significativa estatisticamente ($\alpha=0,05$) para (D) portanto, para estes índices espectrais em questão, as diferentes doses de N em cobertura não foram identificadas no estágio V7. O devido estudo também evidencia que para os índices MCARI2, MGRVI, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI, SR e WDRVI o teste identificou a diferença significativa estatisticamente ($\alpha=0,05$) para (D), portanto para estes índices em questão a fonte de sensoriamento remoto multiespectral não influenciou na predição da diferença significativa para as doses de N em cobertura submetidas, sendo assim todas as fontes de sensoriamento remoto podem ser consideradas perfeitamente capazes de avaliar as diferentes doses de N a cultura do milho no estágio V7, para estes índices em questão.

Ao analisar o índice greenNDVI o teste determinou a diferença das fontes de sensoriamento remoto multiespectral de maneira distinta dos demais índices, com média elevada para VANT (Tabela 8). Este resultado corrobora com a associação do vetor VANT aos dados do índice greenNDVI (Figura 6). Assim como nos estudos de Sumner *et al.* (2021), o greenNDVI apresenta tipicamente uma resposta mais fraca ao fornecimento de N de fertilizantes quando comparado aos demais índices avaliados.

Perante a análise, para o índice VARI o teste diferencia as fontes de sensoriamento remoto multiespectral de maneira distinta dos demais índices, com

média elevada para SENTINEL-2 (Tabela 8). Este resultado corrobora com a associação do vetor SENTINEL-2 aos dados do índice VARI (Figura 6).

Diante da presente análise os índices MGRVI e SR apresentam similaridade distinção das fontes de sensoriamento remoto multiespectral e entre as médias das doses de N em cobertura, sendo que as doses 0, 36, 84 e 228 (kg ha^{-1} de N) não diferem entre si estatisticamente ($\alpha=0,05$), assim como as doses 0, 36, 84 e 132 (kg ha^{-1} de N), e as doses 84, 132 e 180 (kg ha^{-1} de N) igualmente não diferem entre si estatisticamente (Tabela 8). Estes resultados corroboram com a correlação forte entre estes índices pela PCA e análise de correlação (Figura 9), assim como a associação dos vetores a fonte de aquisição VANT (Figura 10).

Diante da presente análise os índices MCARI2, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI e WDRVI apresentam similaridade distinção das fontes de sensoriamento remoto multiespectral, contudo não foi observada a mesma similaridade em todos os índices espectrais em questão, apenas alguns índices têm esta característica da distinção entre as médias das doses de N em cobertura (Tabela 8). Estes resultados validam que independentemente da correlação forte entre estes índices pela PCA e pela análise de correlação (Figura 9) estes índices não possuem a mesma distinção entre as diferenças entre as médias obtidas das doses de N em cobertura.

A análise indica que os índices MCARI2 e MTVI2 obtém as mesmas diferenciações entre os doses de N em cobertura, sendo que as doses 84, 132 e 180 (kg ha^{-1} de N) não diferem entre si estatisticamente ($\alpha=0,05$), assim como as doses 0, 84 e 132 (kg ha^{-1} de N), e as doses 0, 36, 84 e 228 (kg ha^{-1} de N) igualmente não diferem entre si estatisticamente ($\alpha=0,05$) (Tabela 8). Souza, Vinciguera e Schimalski (2019) observaram que entre os índices estudados, o MCARI2 demonstrou ser um dos melhores índices para predição de área foliar na cultura do milho, sendo altamente sensível à captura das informações e não estando sujeito a alterações comumente presenciadas na utilização do NDVI.

A presente análise aponta que os índices MSAVI, NDVI e SAVI obtém as mesmas diferenciações entre as doses de N em cobertura, sendo que as doses 84, 132 e 180 (kg ha^{-1} de N) não diferem entre si estatisticamente ($\alpha=0,05$), assim como as doses 0, 36, 84 e 132 (kg ha^{-1} de N), e doses 0, 36, 84 e 228 (kg ha^{-1} de N) igualmente não diferem entre si estatisticamente (Tabela 8).

Ao analisar o índice WDRVI as doses 84, 132 e 180 (kg ha⁻¹ de N) não diferem entre si estatisticamente ($\alpha=0,05$), assim como as doses 0, 36, 84, 132 e 228 (kg ha⁻¹ de N) não diferem entre si estatisticamente (Tabela 8).

Tabela 8 - Resumo da ANOVA dos índices espectrais com 2 fatores (Doses de N em cobertura e Fontes Imageadoras) e teste LSD para o período de aquisição de imagens 1

Período de aquisição das imagens 1				
(F)	greenNDVI	VARI		
CBERS-04A	0,31 c	0,01 c		
VANT	0,40 a	0,11 b		
SENTINEL-2	0,35 b	0,17 a		
CV (%)	4,86	42,2		
p-valor (F)	0,00*	0,00*		
p-valor (D)	0,08 ^{ns}	0,09 ^{ns}		
p-valor (I)	0,94 ^{ns}	0,96 ^{ns}		
(F)	MCARI2	MGRVI	MSAVI	MTVI2
CBERS-04A	0,49 b	-0,57 b	0,48 b	0,43 b
VANT	0,28 c	-0,51 a	0,43 c	0,25 c
SENTINEL-2	0,67 a	-0,71 c	0,58 a	0,60 a
(D)				
0	0,47 bc	-0,59 ab	0,49 bc	0,42 bc
36	0,46 c	-0,58 ab	0,49 bc	0,41 c
84	0,49 abc	-0,60 abc	0,50 abc	0,43 abc
132	0,49 ab	-0,60 bc	0,51 ab	0,43 ab
180	0,50 a	-0,61 c	0,51 a	0,44 a
228	0,46 c	-0,58 a	0,48 c	0,41 c
CV (%)	6,01	-4,66	4,47	6,01
p-valor (F)	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
p-valor (D)	0,01*	0,02*	0,02*	0,01*
p-valor (I)	0,89 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,91 ^{ns}	0,89 ^{ns}
(F)	NDVI	SAVI	SR	WDRVI
CBERS-04A	0,31 b	0,47 b	0,53 b	-0,48 b
VANT	0,27 c	0,41 c	0,57 a	-0,48 c
SENTINEL-2	0,41 a	0,62 a	0,41 c	-0,35 a
(D)				
0	0,33 bc	0,49 bc	0,51 ab	-0,43 b
36	0,32 bc	0,49 bc	0,52 ab	-0,43 b
84	0,34 abc	0,51 abc	0,50 abc	-0,42 ab
132	0,34 ab	0,51 ab	0,50 bc	-0,42 ab
180	0,45 a	0,52 a	0,49 c	-0,41 a
228	0,32 c	0,48 c	0,52 a	-0,44 b
CV (%)	6,09	6,08	4,4	-4,72
p-valor (F)	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
p-valor (D)	0,03*	0,03*	0,02*	0,04*
p-valor (I)	0,89 ^{ns}	0,89 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,86 ^{ns}

(F) = Fontes de sensoriamento remoto multiespectral. (D) = Doses de N em cobertura (kg ha⁻¹). (I) = Interação entre as Fontes de sensoriamento remoto multiespectral e as Doses de N em cobertura (kg ha⁻¹). Ao nível α de significância de 5%; * significativo ao nível α de significância de 5%; ^{ns} não significativo ao nível α de significância de 5%. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha ao nível α de significância de 5% pelo teste de comparação de médias LSD.

A análise do período de aquisição das imagens 2 evidenciou que (F) e (D) são estatisticamente significativas ($\alpha=0,05$) para os índices MCARI2, MGRVI, MTVI2 e VARI, o teste identificou a diferença significativa estatisticamente ($\alpha=0,05$) para (D), portanto para estes índices em questão a fonte de sensoriamento remoto multiespectral não influenciou na predição da diferença significativa para as doses de N em cobertura submetidas, sendo assim todas as fontes de sensoriamento remoto podem ser consideradas perfeitamente capazes de avaliar as diferentes doses de N a cultura do milho no estágio VT, para estes índices em questão (Tabela 9).

Diante da presente análise os índices MCARI2 e MTVI2 obtidos por todas as fontes de sensoriamento remoto novamente apresentam similaridade na distinção entre as médias e perante a exposta análise as doses 84, 132, 180 e 228 (kg ha⁻¹ de N) não diferem entre si estatisticamente ($\alpha=0,05$), assim como as doses 36 e 84 (kg ha⁻¹ de N), e as doses 0 e 36 (kg ha⁻¹ de N) igualmente não diferem entre si estatisticamente (Tabela 9). Estes resultados ressaltam que as diferenças entre doses de N em cobertura observadas neste estudo podem variar conforme o estágio fenológico da cultura avaliada. Conforme os resultados obtidos por Bagheri *et al.* (2013) onde o MTVI2 apresentou uma ótima correlação ($r=0,87$) é denominado bom preditor do teor de nitrogênio na copa do milho, seguidamente o MCARI2 também apresentou uma ótima correlação ($r=0,789$) e foi o segundo melhor índice para previsão do teor de nitrogênio na cultura, ambos com o radiômetro Aster.

A presente análise aponta que, para o índice MGRVI obtidos por todas as fontes de sensoriamento remoto, as doses 0 e 36 (kg ha⁻¹ de N) não diferem entre si estatisticamente ($\alpha=0,05$), assim como as doses 84, 132, 180 e 228 (kg ha⁻¹ de N) igualmente não diferem entre si (Tabela 9). Conforme os estudos de Du (2022) onde o MGRVI apresentou correlações significativas com o índice de área foliar do milho nos estádios de crescimento individuais.

Perante a análise o índice VARI as doses 84, 132, 180 e 228 (kg ha⁻¹ de N) apresentaram médias que não diferem entre si estatisticamente ($\alpha=0,05$), assim como as doses 36, 84 e 132 (kg ha⁻¹ de N) não diferem entre si, assim como as doses 0 e 36 (kg ha⁻¹ de N) igualmente não diferem entre si (Tabela 9). Observou-se nos estudos de Andrade Junior (2021) que o índice VARI apresentou correlação significativa com o teor foliar de N, o que os endossa como encorajador na

identificação do estado nutricional do milho em relação ao N que se mostraram os mais promissores na detecção do estado nutricional do milho em relação ao N.

A análise aponta que a interação entre os fatores (I) foi significativa para os índices greenNDVI, MSAVI, NDVI, SAVI, SR e WDRVI, o teste LSD evidencia que em todos os índices em questão a fonte de aquisição de imagem influenciou na atribuição da diferença entre as médias das doses de N em cobertura, e nestes índices em questão, as fontes de sensoriamento remoto multiespectral SENTINEL-2 e CBERS-04A foram responsáveis pela eficiência em detectar a diferença entre as médias das doses de N em cobertura (Tabela 9). Também foi observado que a diferença entre as médias das doses de N em cobertura foram diferentes para as fontes de sensoriamento remoto multiespectral SENTINEL-2 e CBERS-04A, portanto apesar de apresentarem correlação entre si, as fontes de sensoriamento remoto influenciaram para estes índices em questão, capazes de avaliar as diferentes doses de N a cultura do milho no estágio VT de maneira distinta.

Diante da presente análise ao avaliar individualmente as fontes de sensoriamento remoto que identificaram a diferença entre as doses de N em cobertura para os índices espectrais greenNDVI, MSAVI, NDVI, SAVI, SR e WDRVI obtidos pelo satélite SENTINEL-2, a ausência de adubação nitrogenada de cobertura, ou seja, as médias da dose 0 (kg ha^{-1} de N) apresentaram médias inferiores que as demais médias, com exceção de SR que apresentou uma média elevada das demais, contudo para todos os índices em questão a dose 0 (kg ha^{-1} de N) não diferiu da dose 36 (kg ha^{-1} de N) ($\alpha=0,05$), assim como as doses 84, 132, 180 e 228 (kg ha^{-1} de N) e as doses 36 e 84 (kg ha^{-1} de N) não diferem estatisticamente entre si ($\alpha=0,05$). Assim como nos estudos de Maresma *et al.* (2016) onde o tratamento controle que não possui fertilizantes nitrogenados apresentou os menores valores para os índices NDVI, WDRVI e GRVI e foi claramente identificado como totalmente diferente dos demais tratamentos com N, assim como o tratamento com 100 kg ha^{-1} de N que é diferente das demais dosagens de N submetidas a cultura do milho.

A presente análise ao avaliar a fonte de sensoriamento remoto CBERS-04A significativa para os índices espectrais greenNDVI, MSAVI, NDVI, SAVI, SR e WDRVI, a ausência de adubação nitrogenada de cobertura, ou seja, as médias das doses 0 (kg ha^{-1} de N) apresentaram médias inferiores que as demais médias, com

exceção de SR que apresentou uma média elevada das demais, contudo para todos os índices em questão, a dose 0 (kg ha⁻¹ de N) é estatisticamente diferente das demais doses de N submetidas a cultura ($\alpha=0,05$). Contudo, ao avaliar as demais diferenças estatisticamente significativas entre as doses de N de cobertura 36, 84, 132, 180 e 228 (kg ha⁻¹ de N) a diferença entre essas doses varia conforme o índice avaliado. Conforme os estudos de Alvino *et al.* (2020) a utilização de um conjunto desses índices é aconselhável, uma vez que alguns índices respondem melhor a determinadas peculiaridades do que outros.

Tabela 9 - Resumo da ANOVA dos índices espectrais com 2 fatores (Doses de N em cobertura e Fontes Imageadoras) e Teste LSD para o período de aquisição das imagens 2

Período de aquisição das imagens 2						
(F)	MCARI2	MGRVI	MTVI2	VARI		
CBERS-04A	0,88 a	-0,92 c	0,77 a	0,46 a		
VANT	0,32 c	-0,56 a	0,29 c	0,18 c		
SENTINEL-2	0,74 b	-0,78 b	0,65 b	0,21 b		
(D)						
0	0,63 c	-0,74 a	0,56 c	0,25 c		
36	0,64 bc	-0,74 a	0,56 bc	0,26 bc		
84	0,65 ab	-0,76 b	0,57 ab	0,29 ab		
132	0,65 a	-0,76 b	0,58 a	0,29 ab		
180	0,66 a	-0,76 b	0,58 a	0,30 a		
228	0,66 a	-0,76 b	0,58 a	0,30 a		
CV (%)	2,31	-1,94	2,33	11,7		
p-valor (F)	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*		
p-valor (D)	0,01*	0,00*	0,00*	0,03*		
p-valor (I)	0,28 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,24 ^{ns}		
greenNDVI			MSAVI			
(D)	CBERS-04A	VANT	SENTINEL-2	CBERS-04A	VANT	SENTINEL-2
0	0,53 aD	0,45 bA	0,38 cC	0,76 aC	0,47 cA	0,62 bC
36	0,56 aC	0,44 bA	0,39 cBC	0,78 aB	0,47 cA	0,63 bBC
84	0,58 aAB	0,44 bA	0,41 cAB	0,80 aAB	0,47 cA	0,65 bAB
132	0,59 aAB	0,44 bA	0,43 bA	0,81 aA	0,47 cA	0,67 bA
180	0,61 aA	0,44 bA	0,43 bA	0,81 aA	0,47 cA	0,67 bA
228	0,58 aBC	0,45 bA	0,42 cA	0,80 aAB	0,48 cA	0,66 bA
CV (%)	2,95			2,1		
p-valor (F)	0,00*			0,00*		
p-valor (D)	0,00*			0,00*		
p-valor (I)	0,00			0,05*		

(D)	NDVI			SAVI		
	CBERS-04A	VANT	SENTINEL-2	CBERS-04A	VANT	SENTINEL-2
0	0,61 aC	0,31 cA	0,45 bC	0,92 aC	0,47 cA	0,68 bC
36	0,64 aB	0,31 cA	0,46 bBC	0,96 aB	0,46 cA	0,70 bBC
84	0,67 aA	0,31 cA	0,48 bAB	0,10 aA	0,46 cA	0,73 bAB
132	0,68 aA	0,31 cA	0,50 bA	1,01 aA	0,46 cA	0,75 bA
180	0,68 aA	0,31 cA	0,50 bA	1,03 aA	0,46 cA	0,75 bA
228	0,66 aAB	0,32 cA	0,49 bA	0,99 aAB	0,48 cA	0,74 bA
CV (%)	3,05			3,05		
p-valor (F)	0,00*			0,00*		
p-valor (D)	0,00*			0,00*		
p-valor (I)	0,02*			0,02*		

(D)	SR			WDRVI		
	CBERS-04A	VANT	SENTINEL-2	CBERS-04A	VANT	SENTINEL-2
0	0,24 cA	0,53 aA	0,38 bA	-0,09 aD	-0,45 cA	-0,31 bC
36	0,22 cB	0,53 aA	0,37 bAB	-0,04 aC	-0,45 cA	-0,29 bBC
84	0,20 cBC	0,53 aA	0,35 bBC	0,00 aB	-0,45 cA	-0,27 bAB
132	0,19 cC	0,53 aA	0,34 bC	0,02 aAB	-0,45 cA	-0,25 bA
180	0,19 cC	0,53 aA	0,33 bC	0,04 aA	-0,45 cA	-0,25 bA
228	0,20 cBC	0,52 aA	0,34 bC	-0,01 aB	-0,44 cA	-0,26 bA
CV (%)	3,73			-8,82		
p-valor (F)	0,00*			0,00*		
p-valor (D)	0,00*			0,00*		
p-valor (I)	0,05*			0,00*		

(F) = Fontes de sensoriamento remoto multiespectral. (D) = Doses de N em cobertura (kg ha⁻¹). (I) = Interação entre as Fontes de sensoriamento remoto multiespectral e as Doses de N em cobertura (kg ha⁻¹). Ao nível α de significância de 5%; * significativo ao nível α de significância de 5%; ns não significativo ao nível α de significância de 5%. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha ao nível α de significância de 5% pelo teste de comparação de médias LSD

A análise do período da coleta 3 evidenciou a diferença significativa estatisticamente ($\alpha=0,05$) para (F) em todos os índices espectrais, contudo o teste estatístico não evidenciou a diferença significativa estatisticamente ($\alpha=0,05$) para (D) e (I) (Tabela 10). Este fato pode ser oriundo das fases fenológicas em que estes períodos de aquisição de imagens ocorreram, onde nos estádios R3, R4 e R5 a detecção do suprimento de N da cultura torna-se difícil, devido ao dossel do milho fechado, ao consumo do suprimento de N da cultura e à presença da biomassa. Estes resultados corroboram com os resultados obtidos por Sumner *et al.* (2021) em que à medida que o dossel do milho se desenvolve, a utilidade desses índices para detectar estritamente diferenças no suprimento de N parece diminuir, à medida que a estação de crescimento avança e o dossel do milho se fecha, os índices sensíveis à biomassa foram principalmente superados por índices que incorporam o comprimento de onda da borda vermelha. Estes resultados reforçam as respostas obtidas por Sumner *et al.* (2021) que observaram que a magnitude dos valores de

índices espectrais e as respostas ópticas pela cultura do milho às doses de N diferiram por estádios de crescimento, ano e plataformas de sensoriamento.

Os índices greenNDVI e VARI apresentam similaridade distinção das fontes de sensoriamento remoto multiespectral, assim como os índices MCARI2, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI e WDRVI também apresentam similaridade distinção das fontes de sensoriamento remoto multiespectral, e também foi observado tal similaridade para os índices MGRVI e SR na distinção das fontes de sensoriamento remoto multiespectral. Estes resultados corroboram com a correlação forte entre estes índices, que apresentaram similaridade entre si indicados na PCA, na análise de correlação (Figura 9), assim como a associação dos vetores das respectivas fontes de sensoriamento remoto multiespectral (Figura 10).

Tabela 10 -Resumo da ANOVA dos índices espectrais com 2 fatores (Doses de N em cobertura e Fontes Imageadoras) e Teste LSD para o período de aquisição das imagens 3

(F)	Período da aquisição das imagens 3				
	greenNDVI	MCARI2	MGRVI	MSAVI	MTVI2
CBERS-04A	0,40 a	0,67 a	-0,74 c	0,61 a	0,59 a
VANT	0,40 a	0,27 c	-0,51 a	0,43 c	0,24 c
SENTINEL-2	0,26 b	0,51 b	-0,54 b	0,45 b	0,45 b
CV (%)	4,05	4,99	-3,81	3,71	5,0
p-valor (F)	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
p-valor (D)	0,29 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,58 ^{ns}
p-valor (I)	0,82 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,82 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,81 ^{ns}
(F)	NDVI	SAVI	SR	VARI	WDRVI
CBERS-04A	0,44 a	0,66 a	0,39 c	0,13 a	-0,32 a
VANT	0,27 c	0,41 c	0,57 a	0,13 a	-0,48 c
SENTINEL-2	0,29 b	0,44 b	0,54 b	0,08 b	-0,46 b
CV (%)	5,16	5,16	3,65	26,4	-4,21
p-valor (F)	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
p-valor (D)	0,43 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,84 ^{ns}	0,47 ^{ns}
p-valor (I)	0,78 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,74 ^{ns}

(F) = Fontes de sensoriamento remoto multiespectral. (D) = Doses de N em cobertura (kg ha⁻¹). (I) = Interação entre as Fontes de sensoriamento remoto multiespectral e as Doses de N em cobertura (kg ha⁻¹). Ao nível α de significância de 5%; * significativo ao nível α de significância de 5%; ^{ns} não significativo ao nível α de significância de 5%. Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si em linha ao nível α de significância de 5% pelo teste de comparação de médias LSD.

4.5 Análise dos Mapas

Ao avaliar o comportamento das imagens nos mapas do índice espectral MTVI2 as áreas com tonalidade avermelhada apresentam os menores valores de índice, intermediários amarelos, enquanto as áreas com tonalidade verde representam os maiores valores de índice. No período de aquisição 1 das imagens a

diferença entre tonalidades das imagens é evidente, tanto avaliadas individualmente quanto conjuntamente, a maior presença de áreas avermelhadas, alaranjadas e amareladas, está relacionado a valores menores do índice MTVI2 que, possivelmente, esteja associado ao estágio fenológico V7, a influência do solo exposto e o dossel reduzido podem influenciar neste estágio (Figura 14). Em conformidade com Santos *et al.* (2012) a cor vermelho-claro ou laranja-avermelhado corresponde ao período de crescimento, quando já existe atividade fotossintética, mas o dossel ainda não cobre totalmente o solo.

No período de aquisição 2 das imagens a tonalidade verde-escura é predominante, devido ao estágio fenológico VT no momento da aquisição das imagens, o dossel do milho está mais desenvolvido e a influência do solo exposto é reduzida devido ao aumento da dimensão das plantas e o aumento de plantas invasoras (Figura 14). Segundo os estudos de Wolschick *et al.* (2003) as plantas de milho atingem a altura máxima aos 65 dias após a emergência e o índice de área foliar máximo aos 60 dias após a emergência, as plantas que receberam adubação nitrogenada apresentaram senescência foliar acelerada a partir dos 90 dias após a emergência.

No período de aquisição 3 as imagens exibem a tonalidade verde-claro e amarelo, o estágio fenológico varia entre R3 e R5, o dossel do milho está totalmente desenvolvido, a influência do solo exposto é reduzida contudo, o suprimento de água também é reduzido neste período, devido à diminuição do regime de chuvas na área no mês de maio (Figura 14). Em conformidade com os estudos realizados por Strieder *et al.* (2008) em estádios fenológicos avançados o IAF é maior, a qualidade e a competição entre plantas por luz alteram características do dossel, a senescência foliar também é mais intensa no período de enchimento de grãos.

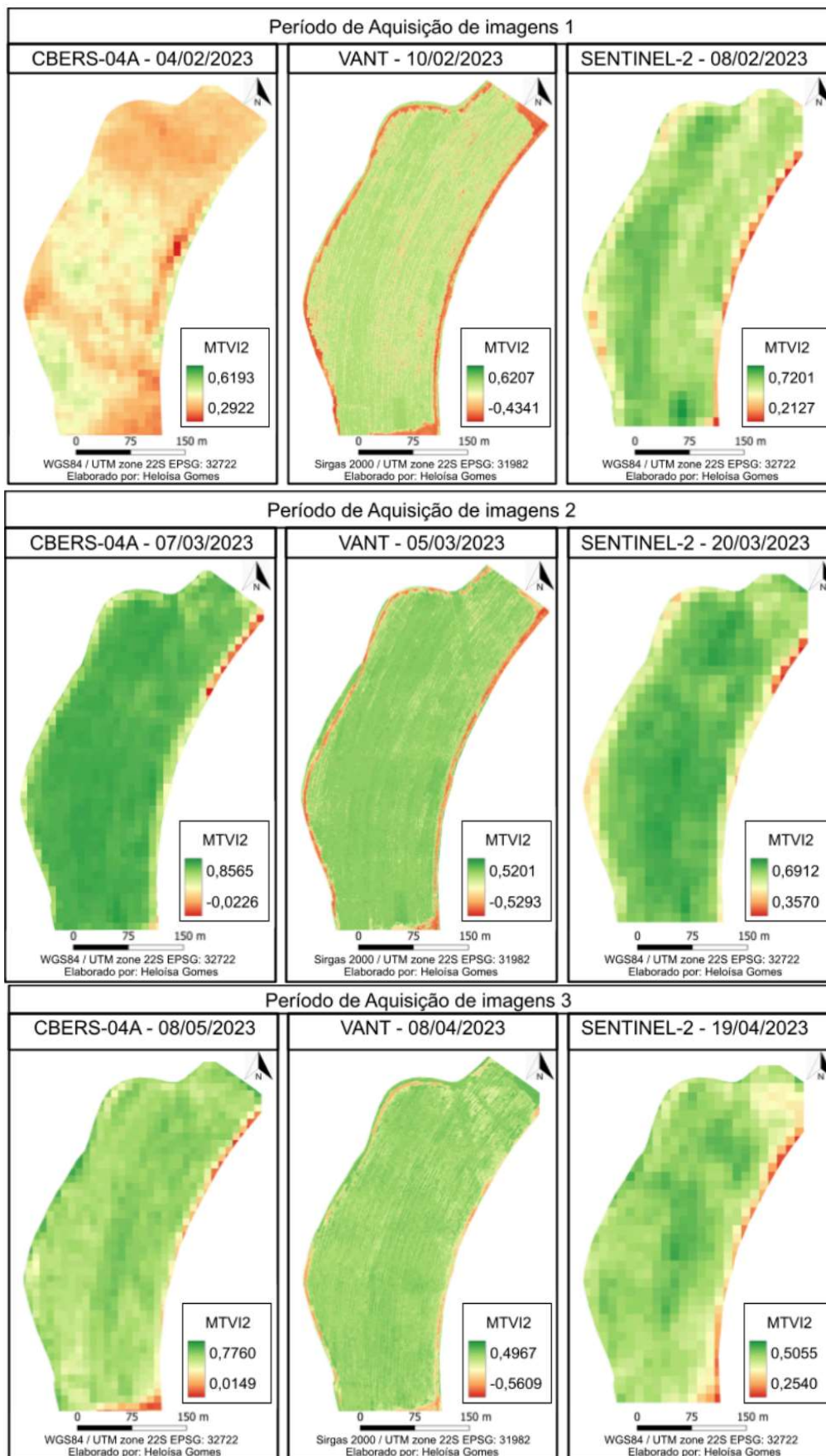
Ao avaliar a diferença da resolução espacial entre as fontes de sensoriamento remoto, o VANT se destaca, com resolução espacial de 0,047 m, seguidamente o CBERS-04A com 8 m e o SENTINEL-2 possui 10m de resolução espacial, visivelmente quanto menor a dimensão do píxel, mais visível é a presença de solo exposto, falhas na semeadura e o monitoramento das plantas é minucioso (Figura 14). De acordo com Borotkanych (2023) a resolução espacial das imagens é um dos aspectos essenciais do sensoriamento remoto, pois o nível de detalhe de uma imagem depende da resolução espacial do satélite utilizado ou drones com resolução espacial excepcionalmente alta. O uso de alta resolução espacial contribui

para obter detalhes para detecção de doenças ou pragas, identificação de processos do solo, mapeamento de campo e detecção e mitigação de anomalias locais. Já a resolução espacial média pode auxiliar tarefas que não exigem extrema precisão, mas precisam de ampla cobertura de sensoriamento remoto como o monitoramento da saúde e do crescimento das culturas, monitoramento do teor de umidade e nutrientes, monitoramento da densidade vegetativa e detecção de pragas e doenças.

A resolução temporal das fontes de sensoriamento remoto também devem ser levadas em consideração, o uso de VANTs permite monitoramento imediato e pode ser recorrido no estágio fenológico adequado para predição de deficiência de nitrogênio na cultura, já os satélites possuem um tempo de revisita ao mesmo local, o SENTINEL-2 possui uma resolução temporal de 10 dias, já o CBERS-04A de 31 dias e quando a presença de nuvens na data da aquisição das imagens impossibilita a visualização da vegetação posterga-se a avaliação para o mês seguinte o que dificulta os estudos com este satélite CBERS-04A. Em conformidade com Leivas *et al.* (2022) o número de imagens sem a presença de nuvens é muito baixo, o SENTINEL-2A, possui a vantagem, possuir menor resolução temporal, permitindo o acompanhamento das culturas ao longo do ciclo com mais frequência, mesmo em período chuvoso, pois ao mapear a fenologia da cultura quase em tempo real é um desafio e as observações de sensoriamento remoto nem sempre são sensíveis aos estágios de crescimento da cultura e para obter uma precisão na detecção da fenologia da cultura depende da frequência e disponibilidade de observações sem nuvens durante a estação de crescimento.

Os demais mapas dos índices espectrais greenNDVI, MCARI2, MGRVI, MSAVI, MTVI2, NDVI, SAVI, SR, VARI e WDRVI estão disponíveis no apêndice.

Figura 14 - Mapas do índice espectral MTVI2



5 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho mostraram que as variáveis biométricas e os índices SPAD não apresentaram diferença significativa entre as doses de N em cobertura. Em contrapartida, análise de macronutrientes e micronutrientes das folhas N, P, K, B, Cu, Fe e Mn foram estatisticamente significativas para as doses de N em cobertura e a dose 0 (kg ha^{-1} de N) apresentou menor acúmulo de macronutrientes e micronutrientes em todas as variáveis.

Constatou-se que ao comparar imagens multiespectrais das plataformas de sensoriamento remoto do satélite SENTINEL-2, satélite CBERS-04A e VANT constatou-se que quaisquer fontes de sensoriamento remoto multiespectral conseguem detectar com precisão distintas doses de nitrogênio em cobertura, contudo, a determinação do índice espectral e do estágio fenológico no momento da aquisição de tais imagens são de extrema importância para a efetividade do sensoriamento remoto aplicado a deficiência nutricional de nitrogênio na cultura do milho, foi possível prever a avaliação nutricional nos estádios fenológicos V7 e VT.

Notou-se que o índice espectral pode sofrer a influência da fonte de sensoriamento remoto multiespectral utilizado, a avaliação das doses de nitrogênio em cobertura não foi satisfatória para as imagens captadas pelo VANT aplicadas aos índices espectrais greenNDVI, MSAVI, NDVI, SAVI, SR e WDRVI, no estágio fenológico VT, em contrapartida, no estágio fenológico V7 a predição não foi influenciada pela fonte de aquisição de imagens multiespectrais.

Por fim, o estudo aqui desenvolvido viabiliza à oportunidade para novos estudos para esclarecer as particularidades das fontes de sensoriamento remoto multiespectral e averiguar como as imagens capturadas podem contribuir como o monitoramento de deficiência nutricional nas culturas, especialmente para trazer reflexão de como a escolha das tecnologias de monitoramento de culturas podem aperfeiçoar a viabilidade do manejo diversificado que a agricultura de precisão proporciona.

Recomenda-se a utilização do satélite SENTINEL-2 devido a excelente resolução temporal e aquisição gratuita de imagens. Sugere-se a utilização do índice espectral MTVI2 ou MCARI2 para avaliar doses de N em cobertura na cultura do milho, para reduzir os efeitos da contaminação do solo. Aconselha-se avaliar doses de N em cobertura na cultura do milho no estágio fenológico VT.

REFERÊNCIAS

AGROANALYSIS. O agronegócio é o seguinte - Preocupação com os fertilizantes. Editorial, 2022.

ALBERT, A. M. **Índices de Vegetação Obtidos com Câmera Multiespectral Relacionados com Adubação Nitrogenada e Produtividade no Milho.** n. 35. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, GO, 2020.

ALVINO, F. C. G.; ALEMAN, C. C.; FILGUEIRAS, R.; ALTHOFF, D; CUNHA, F. F. Vegetation Indices for Irrigated Corn Monitoring. **Engenharia Agrícola**, v.40, n.3, p.322-333, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n3p322-333/2020>. Acesso em: 22 nov. 2023.

ANDA, Associação Nacional para Difusão de Adubos. 2023. Disponível em: https://anda.org.br/pesquisa_setorial/. Acesso em: 22 nov. 2023.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; MELO, F. B.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J. Evaluation of the nutritional status of corn by vegetation indices via aerial images. **Ciência Rural**, v.51, n.8, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200692>. Acesso em: 22 nov. 2023.

ANDRADE, R. G.; HOTT, M. C.; MAGALHÃES JUNIOR, W. C. P. de; D'OLIVEIRA, P. S.; SILVA E OLIVEIRA, J. **Uso de veículo aéreo não tripulado (vant) no monitoramento dos estádios de desenvolvimento da cultura do milho.** Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/209340/1/Cap-21-Ebook-EngSanitAmb-Ricardo.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.

BAGHERI, N.; AHMADI, H.; ALAVIPANAH, S. K.; OMID, M. Sensoriamento remoto multiespectral no manejo sítio-específico da adubação nitrogenada. **Pesquisa agropecuária brasileira**. v. 48, n.10, p.1394-1401, 2013. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/14616/12429>. Acesso em: 22 nov. 2023.

BARBOSA, B. D.; FERRAZ, G.; SANTOS, L.; MARIN, D.; MACIEL, D.; FERRAZ, P.; ROSSI, G. RGB vegetation indices applied to grass monitoring: a qualitative analysis. **Agronomy Research**. v. 17, p. 349-357, 2019.

BENDIG, J.; YU, K.; AASEN, H.; BOLTEN, A.; BENNERTZ, S.; BROSCHEIT, J.; GNYP M.L.; BARETH, B. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 39, p.79-87, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243415000446>. Acesso em: 30 nov. 2023.

BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, Embrapa, cap.1, p. 21-33, 2014.

BEZZON, L.; BONIFACIO, M. **Crise energética na China acende um alerta sobre ruptura no mercado global de fertilizantes**. StoneX. Disponível em: <https://www.mercadosagricolas.com.br/fertilizantes/crise-energetica-na-china-acende-um-alerta-sobre-ruptura-no-mercado-global-de-fertilizantes/>. Acesso em: 22 nov. 2023.

BIESDORF, E. M.; BIESDORF, E. M.; TEIXEIRA, M. F. F.; DIETRICH, O. H.; PIMENTEL, L. D.; ARAÚJO, C. de. Métodos de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em solo de cerrado. **Revista de Agricultura Neotropical**, n. 3, p. 44–50, 2016. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/view/805>. Acesso em: 22 nov. 2023.

BLOSFELD, L. H. **Correlação linear entre os índices de vegetação NDVI E NDRE com a produtividade do milho segunda safra**. Trabalho de Curso apresentado à Universidade Federal de Mato Grosso, 2018.

Boletim 100. Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. Instituto Agrônomo (IAC). São Paulo, 2022.

BORGES, F. P. F. **Análise de ilhas de calor urbanas por geoprocessamento no Distrito Federal**. n. 100. Monografia de Projeto Final - Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2017.

BORGES, G. M.; PACHÊCO, A. P.; SANTOS, F. K. S. Sensoriamento Remoto: Avanços e Perspectivas. **Revista de Geografia (UFPE)**. v. 32, n. 2, 2015.

BOROTKANYCH, N. Resolução Espacial De Imagens De Satélites: Tipos E Usos. Sensoriamento Remoto. **EOS Data Analytics**, 2023. Disponível em: <https://eos.com/pt/blog/resolucao-espacial/>. Acesso em: 31 jan. 2024.

BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p.156-172, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425700001978>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CABEZAS, W. A. R. L.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: II. avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 489-496, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831997000300019>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CASAGRANDE, J. R. R.; FORNASIERI FILHO, D. Adubação nitrogenada na cultura do milho safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n.1, p. 33-40, 2002.

CASSIM, B.M.A.R.; MACHADO, A.P.M.; FORTUNE, D.; MOREIRA, F.R.; ZAMPAR, É.J.D.O.; BATISTA, M.A.. Effects of Foliar Application of Urea and Urea-Formaldehyde/Triazone on Soybean and Corn Crops. **Agronomy**, n.10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10101549>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CHEN, J. M. Evaluation of Vegetation Indices and a Modified Simple Ratio for Boreal Applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 22. n. 3, p. 229-242, 1996.

CILIA, C.; PANIGADA, C.; ROSSINI, M.; MERONI, M.; Busetto, L.; AMADUCCI, S.; BOSCHETTI, M.; PICCHI, V.; COLOMBO, R. Nitrogen Status Assessment for Variable Rate Fertilization in Maize through Hyperspectral Imagery. **Remote Sensing**. v.6, p. 6549-6565, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs6076549>. Acesso em: 22 nov. 2023.

COELHO, A. M. Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho. **Circular Técnica 96**, Minas Gerais, Embrapa, n.96, Dezembro, 2007. ISSN 1518-4269 versão online. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPMS/20488/1/Circ_96.pdf. Acesso em: 3 abr. 2024.

COLOVIC, M.; YU, K.; TODOROVIC, M.; CANTORE, V.; HAMZE, M.; ALBRIZIO, R.; STELLACCI, A.M. Hyperspectral Vegetation Indices to Assess Water and Nitrogen Status of Sweet Maize Crop. **Agronomy**. v.12, n.9, p.2181. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12092181>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Análise Mensal do milho de junho/julho de 2019. Brasília: Análise Mensal, julho de 2019.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Tabela de dados - Produção e balanço de oferta e demanda de grãos - 4º levantamento - safra 2022/23, 2023.

COSTA, J. P. S. **Predição da produtividade de cana-de-açúcar a partir de parâmetros biométricos e imagens orbitais do sensor MSI/sentinel-2**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2021. Disponível em: https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/1295/1/tcc_Joao%20Pedro%20de%20Souza%20Costa%202020.2.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

CRAVO, M. S.; VIEGAS, I. J. M.; BRASIL, E. C. **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. – 2. ed.** Brasília, DF: Embrapa, 2020. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1125022> . Acesso em: 22 nov. 2023.

CRUZ, J. C.; CAMPANHA, M. M.; COELHO, A. M.; KARAM, D.; PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, I.; GARCIA, J. C.; PIMENTEL, M. A. G.; GONTIJO NETO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. E. P. de; COSTA, R. V. da; ALVARENGA, R. C.; QUEIROZ, V. A. V. Boas Práticas Agrícolas. **Documentos 119**, Embrapa Milho e Sorgo, n.119, Novembro, 2011. ISSN 1518-4277 versão online. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/908225/boas-praticas-agricolas-milho>. Acesso em: 31 jan. 2024.

DASTAGIRI, MB.; PV, N. S. Satellite Farming in Global Agriculture: New Tech Revolution for Food Security and Planet Safety for Future Generation. **ACTA SCIENTIFIC AGRICULTURE**. v.4. n.4. 2020.

Diálogo Setorial União Europeia-Brasil. Relatório Estudo Sobre a Indústria Brasileira e Europeia de Veículos Aéreos Não Tripulados, Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, 2016. Disponível em: https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/images/publicacaoa_DRONES-20161130-20012017-web.pdf. Acesso em: 02 dez. 2023.

DIAS, M. A. R. **Desempenho agrônômico do milho com diferentes fontes e doses de nitrogênio**. n.88. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

DU, L.; YANG, H.; SONG, X.; WEI, N.; YU, C.; WANG, W.; ZHAO, Y. Estimating leaf area index of maize using UAV-based digital imagery and machine learning methods. **Scientific Reports**. v.12, n.15937, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20299-0>. Acesso em: 02 dez. 2023.

EICHOLZ, E. D.; BREDEMEIER, C.; BERMUDEZ, F.; MACHADO, J. R. A.; GARRAFA, M.; BISPO, N. B.; AIRES, R. F. **Informações técnicas para o cultivo do milho e sorgo na região subtropical do Brasil: safras 2019/20 e 2020/21**. MISOSUL. Associação Brasileira de Milho e Sorgo, Sete Lagoas, 2020.

EMBRAPA. Pecuária Brasil em 50 alimentos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Ministério da Agricultura. DF. p. 253-256, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1153294/brasil-em-50-alimentos>. Acesso em: 22 nov. 2023.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2024.

EOSDA - Earth Observing System. Monitoramento satélite. Disponível em: <https://eos.com/pt/>. Acesso em: 22 nov. 2023.

ERBETTA, E.; ECHARTE, L.; ELIZAGARAY, C. R.; DEPETRIS, G. J.; GABBANELLI, N.; ECHARTE, M. E. Stover biogas potential of corn crops grown under contrasting water availability and nitrogen supply, **Biomass and Bioenergy**, v.145, 2021. ISSN 0961-9534 versão online. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195342030475X>. Acesso em: 22 nov. 2023.

FAQUIN, V. **Nutrição Mineral de Plantas**. n.187. Especialização - Curso de Pós-Graduação "Lato Sensu" a Distância Solos e Meio Ambiente, Universidade Federal de Lavras UFLA, Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão - FAEPE, 2005.

FEIZOLAHPOUR, F.; BESHARAT, S.; FEIZIZADEH, B.; REZAVERDINEJAD, V.; HESSARI, B. An integrative data-driven approach for monitoring corn biomass under irrigation water and nitrogen levels based on UAV-based imagery. **Environmental Monitoring and Assessment**. v.195, n.1081, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11697-6>. Acesso em: 20 jan. 2024.

FERNANDES, P. **Estimativa da Produtividade de Milho (ZEA MAYS L.) Através de Imagens Multiespectrais Obtidas Por Veículo Aéreo Não Tripulado**. n. 78. Dissertação (mestrado). Programa de Pós graduação em Agricultura de Precisão, Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, RS, 2016.

FERNANDES, S. C. **Índices de vegetação para diagnóstico nutricional de nitrogênio na cultura do milho a partir de imagens geradas por drone**. Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Pato Branco, 2023

FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. Safra Mundial de Milho 2020/2021. São Paulo: 7º Levantamento do USDA, novembro, 2021.

FILHO, A. B.; PATERNIANI, E.; CORDEIRO, C. M. T.; GARCIA, J. C, MAGALHÃES, J. R.; NASS, L. L.; SANTOS, M. X.; ANDRADE, R. V.; PARENTONI, S.; ABADIE, T. Uma história brasileira do milho o valor dos recursos genéticos. **Paralelo 15**. 2000.

FILHO, I. A. P.; CRUZ, J. C.; GARCIA, J. C. Sistemas Diferenciais de Cultivo. **EMBRAPA**, Milho, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/sistemas-diferenciais-de-cultivo#:~:text=O%20plantio%20de%20ver%C3%A3o%2C%20ou%20primeira%20safra%2C%20%C3%A9,Nordeste%2C%20esse%20per%C3%ADodo%20ocorre%20no%20in%C3%ADcio%20do%20ano%29>. Acesso em: 02 dez. 2023.

FITZ, P. R. **Classificação de imagens de satélite e índices espectrais de vegetação: uma análise comparativa**. SC, Geosul, v. 35, n. 76, 2020.

FRANCO, J. R.; DAL PAI, E.; CALÇA, M. V. C.; RANIERO, M. R.; DAL PAI, A.; SARNIGHAUSEN, V. C. R.; ROMÁN, R. M. S. Atualização da normal climatológica e classificação climática de köppen para o município de Botucatu-SP. **IRRIGA**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 77–92, 2023. DOI: 10.15809/irriga.2023v28n1p77-92. Disponível em: <https://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4615>. Acesso em: 3 abr. 2024.

FURLANETTO, R. H.; NANNI, M. R.; CRUSIOL, L. G. T.; SILVA, G. F. C.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de. **Potencial de utilização de sensores multiespectral e hiperespectral no estudo de diferentes alvos agrícolas**. Jornada Acadêmica da Embrapa Soja, v.12, p. 146-154, 2017.

GITELSON, A. A. Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. **Journal of Plant Physiology**, v. 161, n. 2, p.165-173, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161704705726>. Acesso em: 30 nov. 2023.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS, **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p.289-298, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7). Acesso em: 30 nov. 2023.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, p.76-87, 2002.

GONG, P.; PU, R.; BIGING, G. S.; LARRIEU, M. R. Estimation of Forest Leaf Area Index Using Vegetation Indices Derived From Hyperion Hyperspectral Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6. 2003.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY, E.; ZARCO-TEJADA, P. J.; STRACHAN, I.B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture, **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3, p.337-352, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425704000264>. Acesso em: 30 nov. 2023.

HENRIQUES, H. J. R.; CORTEZ, J. W.; SCHWAMBACK, D. A. **Potencial dos índices de vegetação como estimadores da produtividade na cultura do milho**. XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, 23 a 25 de novembro de 2020. Disponível em: <https://conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2020/anais-2020/geomatica-instrumentacao-e-agricultura-de-precisao-giap/2696-potencial-dos-indices-de-vegetacao-como-estimadores-da-produtividade-na-cultura-do-milho/file>. Acesso em 31 jan. 2024

HONG, S.; MINZAN, L.; YANE, Z.; YONG, Z.; HAIHUA, W. Detection of Corn Chlorophyll Content Using Canopy Spectral Reflectance. **American Scientific Publishers**, v.8, n.1, p.134-139, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1166/sl.2010.1215>. Acesso em: 04 dez. 2023.

HUANG, S.; TANG, L.; HUPY, J. P.; WANG, Y.; SHAO, G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. **Journal of Forestry Research**. v. 32, p.1-6, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>. Acesso em: 30 nov. 2023.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p.295-309, 1988. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003442578890106X>. Acesso em: 30 nov. 2023.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LIU, H.; Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 3, p. 224-234, 1994. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425794900183>. Acesso em: 30 nov. 2023.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) - Tabela 1312 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias, 2018. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 21 nov. 2021.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) - Tabela 1312 - Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias, 2020. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 21 nov. 2021.

IBGE - SIDRA (Sistema IBGE de Recuperação Automática). Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Tabela 6588 - Série histórica da estimativa anual da área plantada, área colhida, produção e rendimento médio dos produtos das lavouras (Vide Notas). Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588>. Acesso em: 22 nov. 2023.

IFA. Associação Internacional de Fertilizantes Informações de Mercado, 2021. Disponível em: <https://globalfert.com.br/>. Acesso em: 21 dez. 2023.

INPE. Câmeras Imageadoras CBERS 04A. 2019. Disponível em: <http://www.cbers.inpe.br/sobre/cameras/cbers04a.php>. Acesso em: 22 nov. 2023.

INPE. CBERS 04A. 2019. Disponível em: <http://www.cbers.inpe.br/sobre/cbers04a.php>. Acesso em: 22 nov. 2023.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. CBERS 04A, 2020. Disponível em: <http://www.cbers.inpe.br/sobre/cbers04a.php>. Acesso em: 22 dez. 2023.

INPE. Sistema de Coleta de Dados. 2019. Disponível em: http://www.cbers.inpe.br/sobre/coleta_dados.php. Acesso em: 22 nov. 2023.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 11, n. 3–4, p. 185-200, 1991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167587705800042>. Acesso em: 30 nov. 2023.

JARMAN, M.; DIMMOCK, J. Satellites for agriculture. **AHDB, Agriculture and Horticulture**, 2018.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3833-3845, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>. Acesso em: 30 nov. 2023.

JORDAN, C. F. **Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. Ecology**, v.50, n.4, p.663–666, 1969. Disponível em: doi:10.2307/1936256. Acesso em 22 jan. 2024.

JORGE, L. A. de C.; TRINDADE JUNIOR, O. Metodologia para Utilização de Aeromodelos em Monitoramento Aéreo. **Circular Técnica 15**, 2002. ISSN 1517-4778 versão online.

KOPPEN. Alvares, Clayton Alcarde .; Stape, Jose Luiz .; Sentelhas, Paulo Cesar .; de Moraes Goncalves, Jose Leonardo.; Sparovek, Gerd. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p.711–728, 2014. Disponível em: <https://bv.fapesp.br/pt/publicacao/92900/koppens-climate-classification-map-for-brazil> . Acesso em: 22 nov. 2023.

KOPPEN. Classificação climática de Köppen para os municípios brasileiros. 2023. <https://koppenbrasil.github.io/>

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

KUMAR, V.; SHARMA, A.; BHARDWAJ, R.; THUKRAL, A. K. Comparison of different reflectance indices for vegetation analysis using Landsat-TM data. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 12, p. 70-77, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938518300302>. Acesso em: 30 nov. 2023.

LANG, Q.; ZHIYONG, Z.; LONGSHENG, C.; HONG, S.; MINZAN, L.; LI, L.; JUNYONG, M. Detection of Chlorophyll Content in Maize Canopy from UAV Imagery. **IFAC-PapersOnLine**, v.52, n.30, p.330-335, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319324802>. Acesso em: 02 dez. 2023.

LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. de. C.; TAKEMURA, C. M.; GARÇON, E. A. M. **Ciências Agrárias: o Avanço da Ciência no Brasil - Volume 4:** Análise da dinâmica temporal de índices de vegetação NDVI, EVI, SAVI e IRECI através de imagens Sentinel-2a e MODIS. Editora Científica Digital, cap. 21, v. 4, p. 332-343, 2022. Editora Científica Digital. Vol. 4 - Ano 2022. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/articles/code/220709585>. Acesso em: 31 jan. 2024.

LEONARDI, S. S.; ORTIZ, J. O.; FONSECA, L. M. G. Comparação de técnicas de fusão de imagens para diferentes sensores orbitais. **INPE**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, p. 4111-4113, 2005. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.22.49/doc/thisInformationItemHomePage.html>. Acesso em: 3 abr. 2024.

LESLIE, C. R.; SERBINA, L. O.; MILLER, H. M. Landsat and Agriculture—Case Studies on the Uses and Benefits of Landsat Imagery in Agricultural Monitoring and Production. **U.S. Geological Survey**, Reston, Virginia, 2017.

LIMA FILHO, O. F. de. Guia de Diagnose Visual de Deficiências Nutricionais em Sorgo-Sacarino. **Circular Técnica 31**, 2014. ISSN 1679-0464 versão online.

LOUHAICHI, M.; BORMAN, M.; JOHNSON, D. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. **Geocarto International**. 2001.

LUNA NETO, E. V. de; SILVA, A. V. da; BARBOSA DA SILVA, J. H.; SILVA, C. M. da; COSTA, T. R. S.; MIELEZRSKI, F. **Índices espectrais de vegetação no monitoramento do milho (*Zea mays* L.) submetidos à bioestimulantes**. Nativa, n.11, p.323-330, 2023. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/13779>. Acesso em: 31 jan. 2024.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. **Circular Técnica 22**, Embrapa, Sete Lagoas, MG, Dezembro, 2002

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M. Fisiologia da Produção de Milho. **Circular Técnica 76**, Minas Gerais, EMBRAPA, n. 76, ISSN 1679-1150, Dezembro, 2006.

MAPIR. Survey3W Camera - Red+Green+NIR (RGN, NDVI). 2023. Disponível em: <https://www.mapir.camera/en-gb/products/survey3w-camera-red-green-nir-rgn-ndvi>. Acesso em: 30 nov. 2023.

MARESMA, Á.; ARIZA, M.; MARTÍNEZ, E.; LLOVERAS, J.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. Analysis of Vegetation Indices to Determine Nitrogen Application and Yield Prediction in Maize (*Zea mays* L.) from a Standard UAV Service. **Remote Sensing**, n.10, p. 368, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs8120973>. Acesso em: 04 dez. 2023.

MARESMA, Á.; ARIZA, M.; MARTÍNEZ, E.; LLOVERAS, J.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. Analysis of Vegetation Indices to Determine Nitrogen Application and Yield Prediction in Maize (*Zea mays* L.) from a Standard UAV Service. **Remote Sensing**, v.8, n.12, p. 973, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs8120973>. Acesso em: 21 dez. 2023.

MARESMA, A.; CHAMBERLAIN, L.; TAGARAKIS, A.; KHAREL, T.; GODWIN, G.; CZYMMEK, K. J. SHIELDS, E.; KETTERINGS, Q. M. Accuracy of NDVI-derived corn yield predictions is impacted by time of sensing. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.169, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919319647>. Acesso em: 02 dez. 2023.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p. 143-168, 1999.

Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Adubos ou fertilizantes químicos (exceto fertilizantes brutos). Comex Stat. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis>. Acesso em: 21 dez. 2023.

MOTOHKA, T.; NASAHARA K.N.; OGUMA, H.; TSUCHIDA, S. Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology. **Remote Sensing**. 2010.

MOURA, M. C. F. D. **Correlação entre produtividade em cana-de-açúcar e índices de vegetação espectrais: estudo de caso na região de Oratórios**, MG. 2013. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/771/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2023.

NASTARI, P. M.A. Crise na Ucrânia e a dependência da importação de fertilizantes. **AGROANALYSIS**. Mercado & Negócios. 2022.

NASCIMENTO, F. M.; BICUDO, S. J.; FERNANDES, D. M.; RODRIGUES, J. G. L.; FERNANDES, J. C. Diagnose foliar em plantas de milho em sistema de semeadura direta em função de doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 5, n. 1, p. 67-86, 2012. ISSN 1984-7548 versão online. Disponível em: [doi:https://doi.org/10.5777/paet.v5i1.1642](https://doi.org/10.5777/paet.v5i1.1642). Acesso em: 22 nov. 2023.

NEVIS, H.S. **Comportamento Espectral do NDVI na Cultura do Milho e sua Correlação com Adubação de Base**. n. 24 . Trabalho de conclusão de curso - Curso de Agronomia, Centro Universitário de Anápolis, 2018.

NILAHYANE, A.; ISLAM, M.A.; MESBAH, A.O.; GARCIA y GARCIA, A. Effect of Irrigation and Nitrogen Fertilization Strategies on Silage Corn Grown in Semi-Arid Conditions. **Agronomy**, n.10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy8100208>. Acesso em: 22 nov. 2023.

OSAKI, M. Alto Preço de Fertilizante Desafia Produtor. **CEPEA**. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniao-cepea/alto-preco-de-fertilizante-desafia-produtor.aspx>. Acesso em: 21 dez. 2023.

OSBORNE, S. L.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D .; SCHLEMMER, M. R. Detection of Phosphorus and Nitrogen Deficiencies in Corn Using Spectral Radiance Measurements. **Agronomy Journal**. Remote Sensing. v. 94, n. 6, 2002.

PEREIRA FILHO, I. A. **Cultivo do milho**. Dados Sistema de Produção Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de Produção, ISSN 1679-012, Versão Eletrônica 9ª edição, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/486917/cultivo-do-milho>. Acesso em: 3 abr. 2024.

Phantom 4 Pro. PHANTOM 4 PRO Especificações DJI. 2023. Disponível em: <https://www.dji.com/br/phantom-4-pro/info>. Acesso em: 22 jan. 2024

PINHEIRO, M.G. **Respostas de cultivares crioulas de milho a inoculação com bactérias diazotróficas e adubação orgânica**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2013.

POLIDORO, J. C. Guerra na Ucrânia: por que o Brasil depende tanto dos fertilizantes da Rússia? Thais Carrança. **BBC News Brasil**, mar, 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-60596334>. Acesso em: 24/01/2023.

PURCINO, A. Á. C.; ALVES, V. M. C.; PARENTONI, S. N.; SANTOS, M. X. dos. Como as plantas utilizam fertilizantes nitrogenados. **Revista Cultivar**, 2015. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/como-as-plantas-utilizam-os-fertilizantes-nitrogenados>. Acesso em: 31 jan. 2024.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 48, n. 2, p. 119-126, 1994. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425794901341>. Acesso em: 30 nov. 2023.

QUARTAROLI, C.F.; VICENTE, L.E.; ARAÚJO, L.S. **Sensoriamento Remoto**. 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/988056>. Acesso em: 22 jan. 2022.

QUEIMADURAS, B. W.; STEVEN VERDE, V.; HASHEM, A. A.; MASSEY, J. H.; SHEW, A. M.; ADVIENTO-BORBE, M. A. A.; MILAD, M. Determining nitrogen deficiencies for maize using various remote sensing indices. **Precision Agriculture**,

v. 23, p. 791–811, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09861-4>. Acesso em: 04 dez. 2023.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. 2.ed, NPCT - Nutrição de Plantas e Tecnologia. ISBN:978-65-81433-00-0. 2019.

REETZ, H. Heres how to estimate yields for corn and soybeans before harvest. **Better Crops With Plant Food**, Atlanta, v. 71, p. 18-19, 1987.

RICHARDSONS, A.J.; WIEGAND, A. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric engineering and remote sensing**. v. 43, n. 12, p. 1541-1552, 1977.

ROMUALDO, L.M. **Utilização da visão artificial para diagnose nutricional de nitrogênio, fósforo, potássio e manganês em milho**. nº150. Dissertação (Doutorado). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. Universidade de São Paulo. Departamento de Zootecnia, Pirassununga, 2013.

RONDEAUX, G. STEVEN, M. BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 95-107, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425795001867>. Acesso em: 30 nov. 2023.

ROUJEAN, J. L.; BREON, F. M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 3, p. 375-384, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425794001143>. Acesso em: 30 nov. 2023.

SADEGHI, S.M.; NOORHOSSEINI, S.A.; DAMALAS, C.A. Environmental sustainability of corn (*Zea mays L.*) production on the basis of nitrogen fertilizer application: The case of Lahijan, Iran, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 95, p. 48-55, 2018. ISSN 1364-0321 versão online. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118305082>. Acesso em: 22 nov. 2023.

SAMPAIO, H. S.; BOURSCHEIDT, V.; SARRACINI, L. H.; JORGE, L. A. de C.; BETTIOL, G. M.; BERNARDI, A. C. de C. Comparação entre índices de vegetação obtidos por imagens aéreas com veículos aéreos não tripulados (VANT) e satélite. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**. SP, v. 14, n. 2, 2020.

SANTANA, D. C.; COTRIM, M. F.; FLORES, M. S.; BAIO, F. H. R.; SHIRATSUCHI, L. S.; JUNIOR, C. A. S.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E. UAV-based multispectral sensor to measure variations in corn as a function of nitrogen topdressing. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v.23, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938521000707>). Acesso em: 02 dez. 2023.

SANTOS, C. V. B. dos; MOURA, M. S. B. de; GALVÍNCIO, J. D.; CARVALHO, H. F. de S.; MIRANDA, R. de Q.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Comparação de imagens multiespectrais utilizando Satélites e VANT para a análise de mudanças estruturais em área de Floresta Seca. **Revista Brasileira de Geografia Física, RBGF**, n.06, Outubro, 2021. ISSN 1984-2295 versão online. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1144438>. Acesso em: 31 jan. 2024.

SANTOS, D. G. dos; LOEBMANN, W.; MAÇORANO, R. P.; SIQUEIRA da SILVA, G. B.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. de C. Interpretação de alvos a partir de imagens de satélite de média resolução espacial. **Circular Técnica 21**, SP, 2012. ISSN 1414-4182. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/961448/1/04812.pdf>. Acesso em: 31 jan, 2024.

SCHLEICHER, T. D.; BAUSCH, W. C.; DELGADO, J. A.; AYERS, P. D. Avaliação e refinamento do índice de reflectância do nitrogênio (NRI) para o manejo de fertilizantes sítio-específicos. **Sociedade Americana de Engenheiros Agrônomos e Biológicos - ASAE**, Reunião Anual da ASAE, n. 011151, 2001.

SCHLEMMER, M.; GITELSON, A.; SCHEPERS, J.; FERGUSON, R.; PENG, Y.; SHANAHAN, J.; RUNDQUIST, D. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 25, p. 47-54, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243413000469>. Acesso em: 04 dez. 2023.

SHARIFI, A. Using Sentinel-2 Data to Predict Nitrogen Uptake in Maize Crop. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.13, p. 2656-2662, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9103946>. Acesso em: 04 dez. 2023.

SICHOCKI, D.; WEHREN, D.; VOLF, M.; FLAVIO, J.; WRUCK, F.; FAGUNDES, J.; SILVA, W.; SEGATE, T.; SOUSA, L. Índice SPAD e produtividade de Milho sob efeito de uréia protegida e comum em diferentes dosagens. **XXIX Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas.XIII Reunião Brasileira sobre Micorrizas.XI Simpósio Brasileiro de Microbiologia do Solo. VIII Reunião Brasileira de Biologia do Solo**. Guarapari – ES, Brasil, 13 a 17 de setembro de 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320584529>. Acesso em: 22 nov. 2023.

SILVA JÚNIOR, M. C. da.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M. de.; SENA JÚNIOR, D. G.; ABRAHÃO, S. A. **Utilização de imagens multiespectrais para detectar diferentes níveis nutricionais na forrageira Brachiaria decumbens**. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. p. 401-406, 2007.

SILVA, J. P.; SANTOS, Y. R. P.; BELLO, M. I. M. C. Aplicação da ANOVA e dos testes de Fisher e Tukey em dados de recalque de edifícios de múltiplos pavimentos. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, v. 59, n. 3, p. 829-845, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/5388>. Acesso em: 09 jan. 2024.

SKONIESKI, F.R.; VIÉGAS, J.; MARTIN, T.N.; MINGOTTI, C.C.A.; NAETZOLD, S.; TONIN, T.J.; DOTTO, L.R.; MEINERZ, G.R. Effect of Nitrogen Topdressing Fertilization and Inoculation of Seeds with *Azospirillum brasilense* on Corn Yield and Agronomic Characteristics. **Agronomy**, n.12, v.9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy9120812>. 2019. Acesso em: 22 nov. 2023.

SORATTO, R. P.; SILVA, Â. H. da; CARDOSO, S. de M.; MENDONÇA, C. G. de. Doses e fontes alternativas de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo arenoso. **Ciência e Agrotecnologia**,

n.35, p. 62–70, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000100007>. Acesso em: 22 nov. 2023.

SOUSA, M. G. F. de.; VINCIGUERA, V.; SCHIMALSKI, M. B. **Extração de parâmetros biofísicos e químicos de plantas empregando o sensoriamento remoto**. 29º Seminário de Iniciação Científica - UDESC. 2019. ISSN 1983-8301 versão online.

STRIEDER, M. L.; SILVA, P. R. F. da; RAMBO, L.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; ENDRIGO, P. C.; JANDREY, D. B. **Características de dossel e rendimento de milho em diferentes espaçamentos e sistemas de manejo**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, n.43, v.3, p. 309–317, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X200800030000>. acesso em: 31 jan. 2024.

SUMNER, Z.; VARCO, J. J.; DHILLON, J. S.; FOX, A. A. A.; CZARNECKI, J.; HENRY, W. B. Ground versus aerial canopy reflectance of corn: red-edge and non-red edge vegetation indices. **Agronomy Journal**, v.113, p.2773–2788. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20657>. Acesso em: 22 nov. 2023.

The European Space Agency. Descrição do satélite. 2023. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/satellite-description>. Acesso em: 22 nov. 2023.

The European Space Agency. GUIA DE MISSÃO DO SENTINEL-2. 2023. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Acesso em: 22 nov. 2023.

The European Space Agency. Guia de usuário sentinel-2 MSI, 2021. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>. Acesso em: 22 nov. 2023.

The European Space Agency. Segmento Terrestre. 2023. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/ground-segment>. Acesso em: 22 nov. 2023.

The European Space Agency. Visão geral do MultiSpectral Instrument (MSI). 2023. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>. Acesso em: 22 nov. 2023.

TIBOLA, C. S.; MEDEIROS, E. P.; SIMEONE, M. L. F.; OLIVEIRA, M.A. Espectroscopia no Infravermelho próximo para avaliar indicadores de qualidade tecnológica e contaminantes em grãos. **Embrapa**, Brasília, DF, 2018. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/193539/1/ID44539-2018LVespectroscopia.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.

COMPTON, J. T. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**. v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425779900130>. Acesso em: 30 nov. 2023.

USDA. De 04 de outubro de 2023. Acesso em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/topCountriesByCommodity#chart28>. Acesso em: 10 fev. 2024.

USGS - U.S. Geological Survey. Missões Landsat. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions>. Acesso em: 22 dez. 2023.

VALDERRAMA, M.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BENETT, C. G. S.; ANDREOTTI, M. Adubação nitrogenada na cultura do milho com uréia revestida por diferentes fontes de polímeros. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 35, n. 2, p. 659-669, 2014. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4457/445744140008.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.

VALENCIA, L. V. Â. **Comportamento espectral das culturas de milho, arroz e soja, usando imagens dos satélites Sentinel-2, CBERS-04A e Landsat-8**. n.118. Dissertação (Mestrado), Curso de mestrado em Ciências e aplicações Geoespaciais, Universidade Presbiteriana Mackenzie, SP, 2020.

VASCONCELLOS, C. A.; FILHO, I. A. P.; CRUZ, J. C. Adubação para o Milho Verde. **Circular Técnica 16**, Minas Gerais, EMBRAPA, n.16, 2002. ISSN 1679-1150 versão online.

VINCINI, M.; FRAZZI, E. E.; D'ALESSIO, P. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. **Precision Agriculture**. v. 9, p. 303–319, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9075-z>. Acesso em: 30 nov. 2023.

WOLSCHICK, D.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T; JADOSKI, S. O. Adubação nitrogenada na cultura do milho no sistema plantio direto em ano com precipitação pluvial normal e com "El Niño". **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.27, p. 461-468, 2003. Disponível em: <https://locus.ufv.br//handle/123456789/14493>. Acesso em: 31 jan. 2024

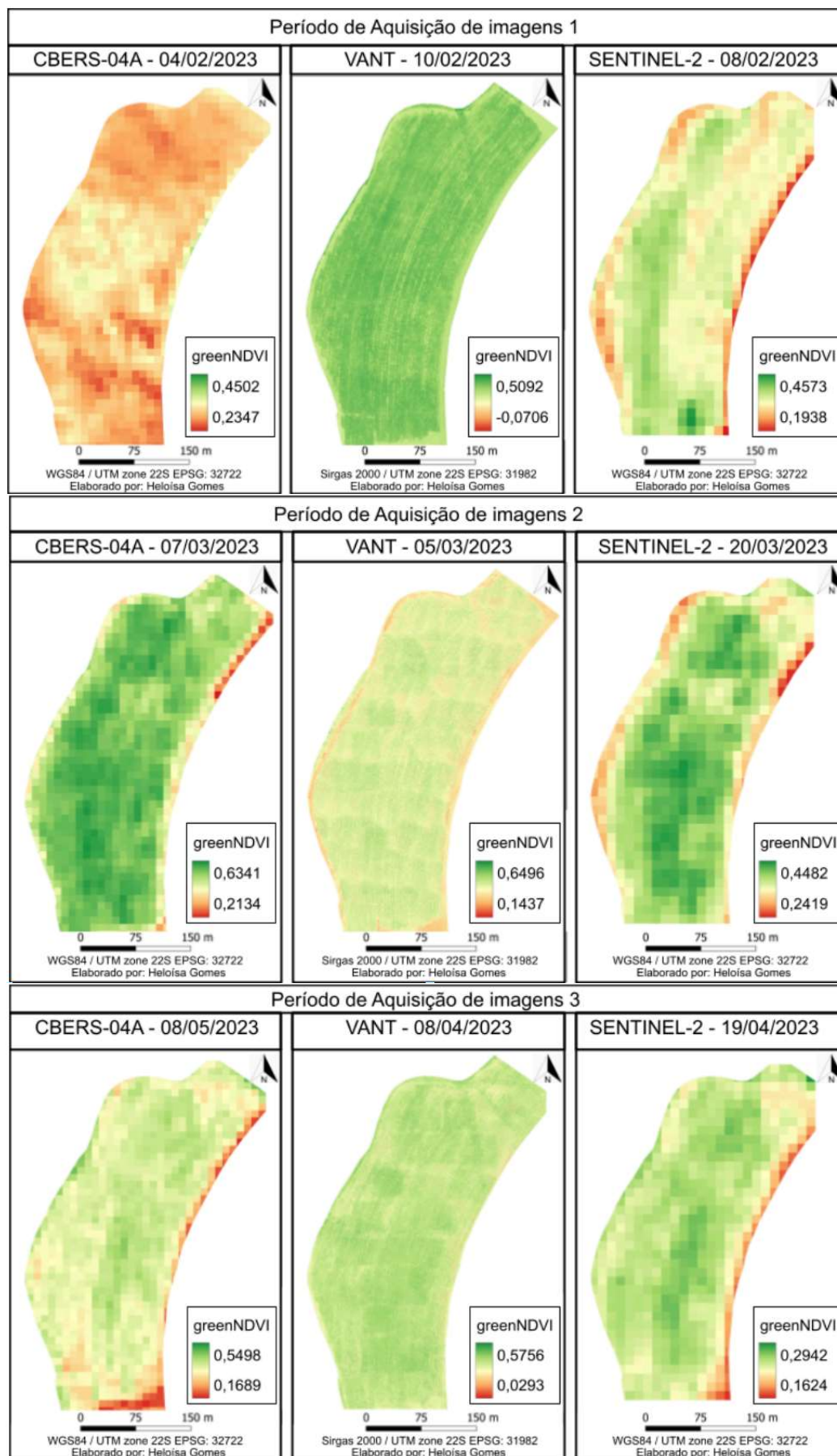
XUE, L.; CAO, W.; LUO, W.; DAI, T.; ZHU, Y. Monitoring Leaf Nitrogen Status in Rice with Canopy Spectral Reflectance. **Agronomy Journal**. v. 96, p. 135-142, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1350>. Acesso em: 30 nov. 2023.

YE, H.; HUANG, W.; HUANG, S.; WU, B.; DONG, Y.; CUI, B. Remote Estimation of Nitrogen Vertical Distribution by Consideration of Maize Geometry Characteristics. **Remote Sensing**. v.10, n.12, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10121995>. Acesso em: 30 nov. 2023.

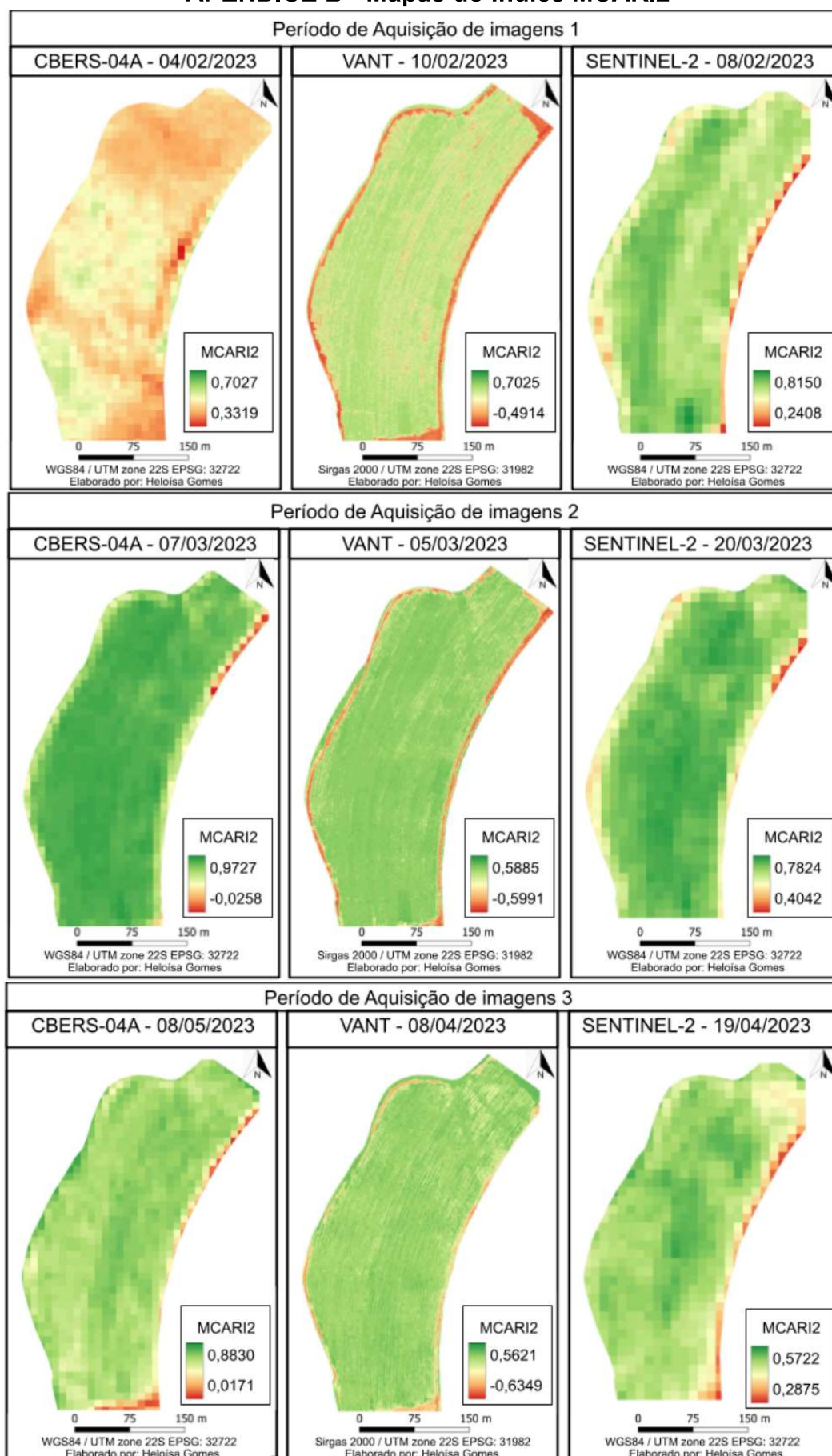
ZHANG, M.; ZHOU, J.; SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R. Estimation of maize yield and effects of variable-rate nitrogen application using UAV-based RGB imagery. **Biosystems Engineering**, v.189, p. 24-35, 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S153751101930875X>. Acesso em: 02 dez. 2023.

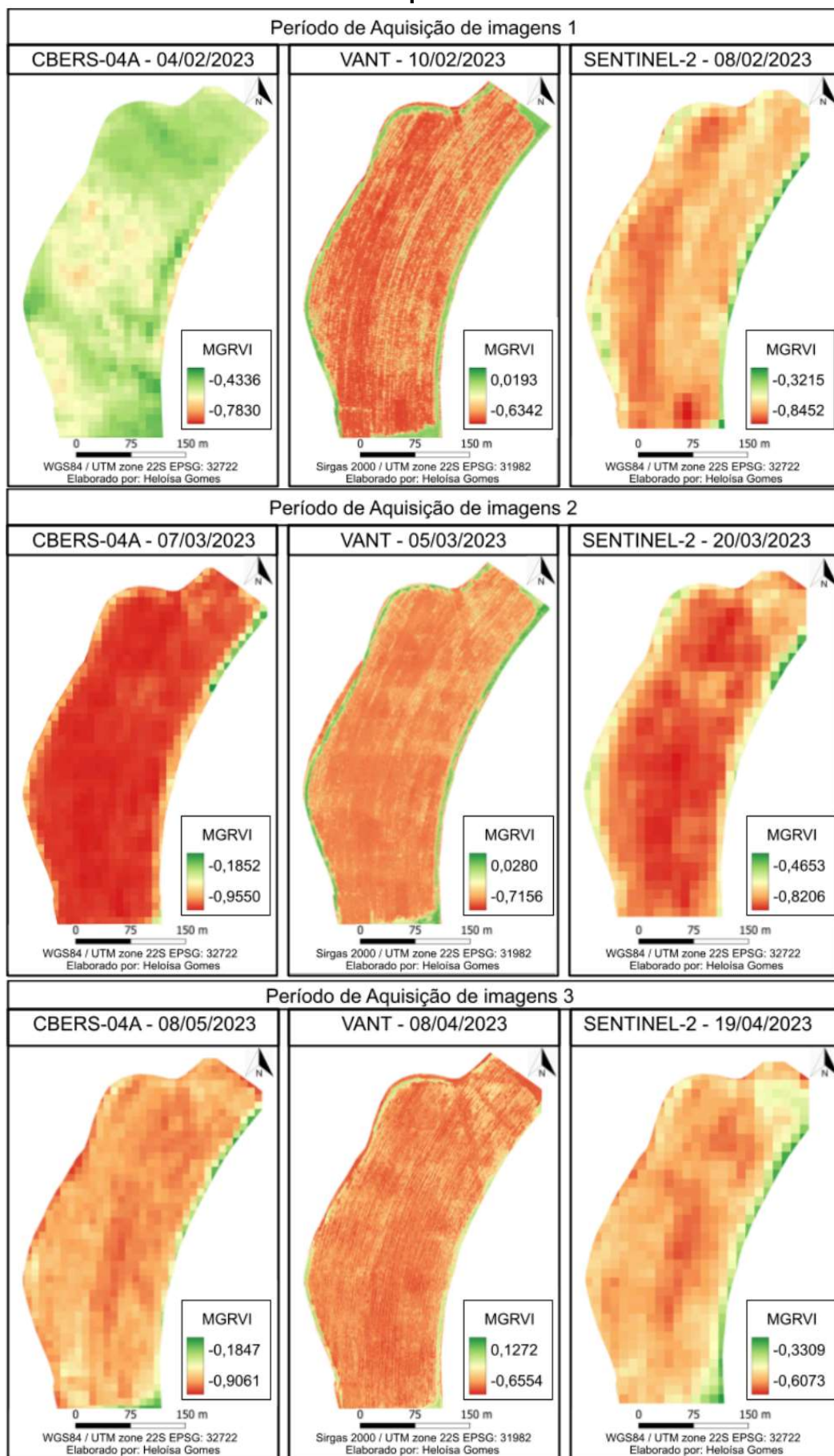
APÊNDICE A - Mapas do índice greenNDVI



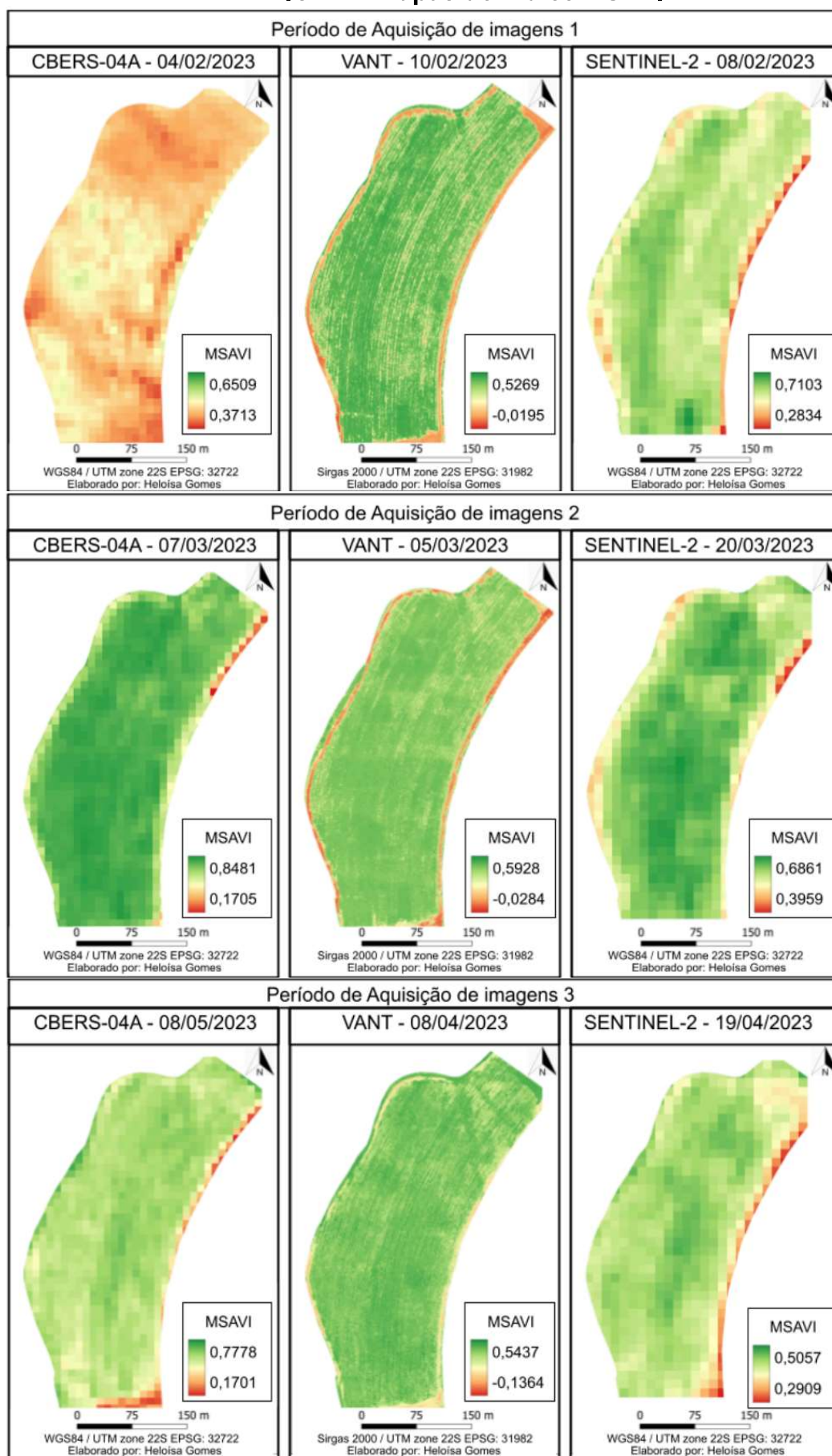
APÊNDICE B - Mapas do índice MCARI2



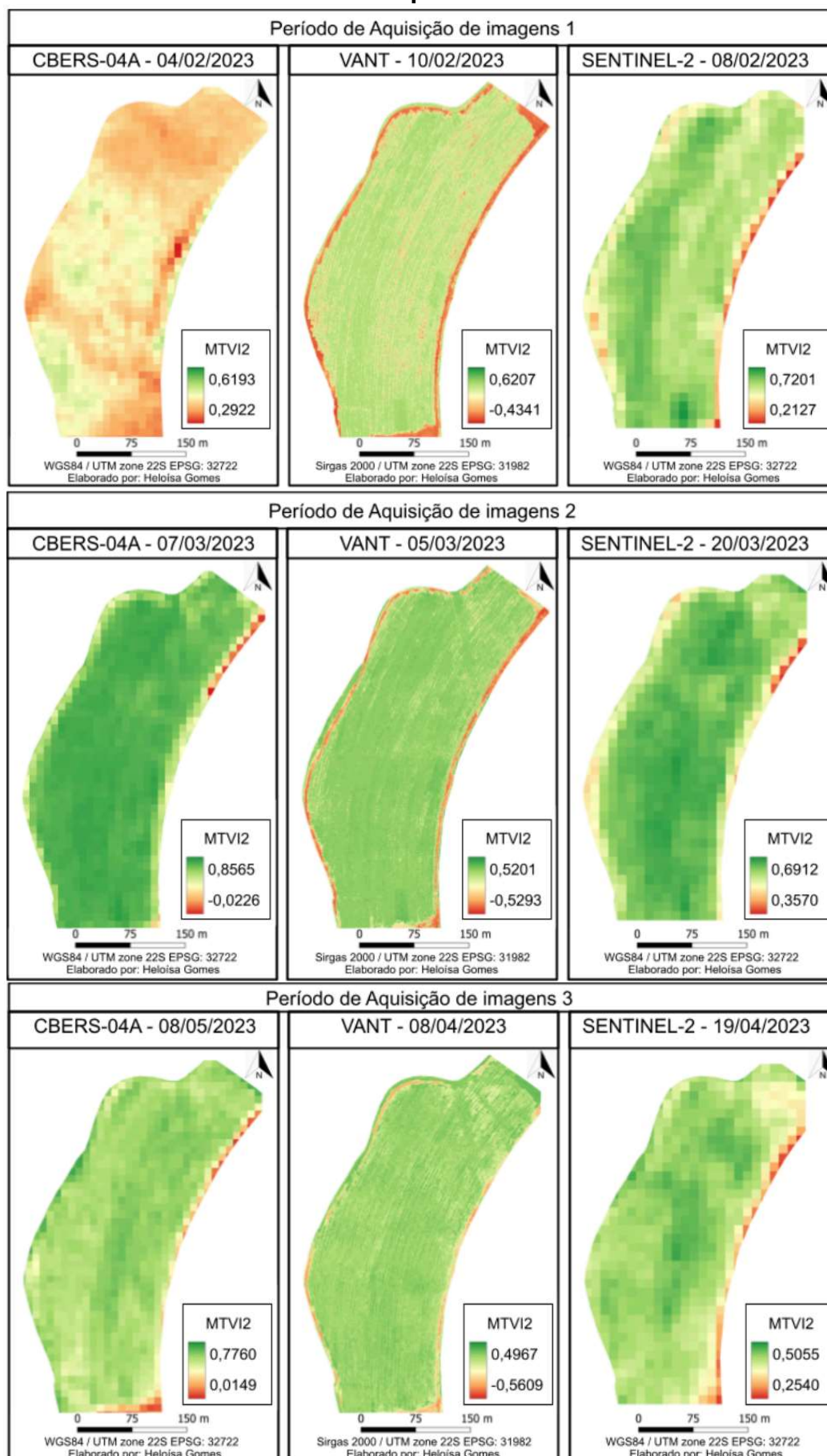
APÊNDICE C - Mapas do índice MGRVI



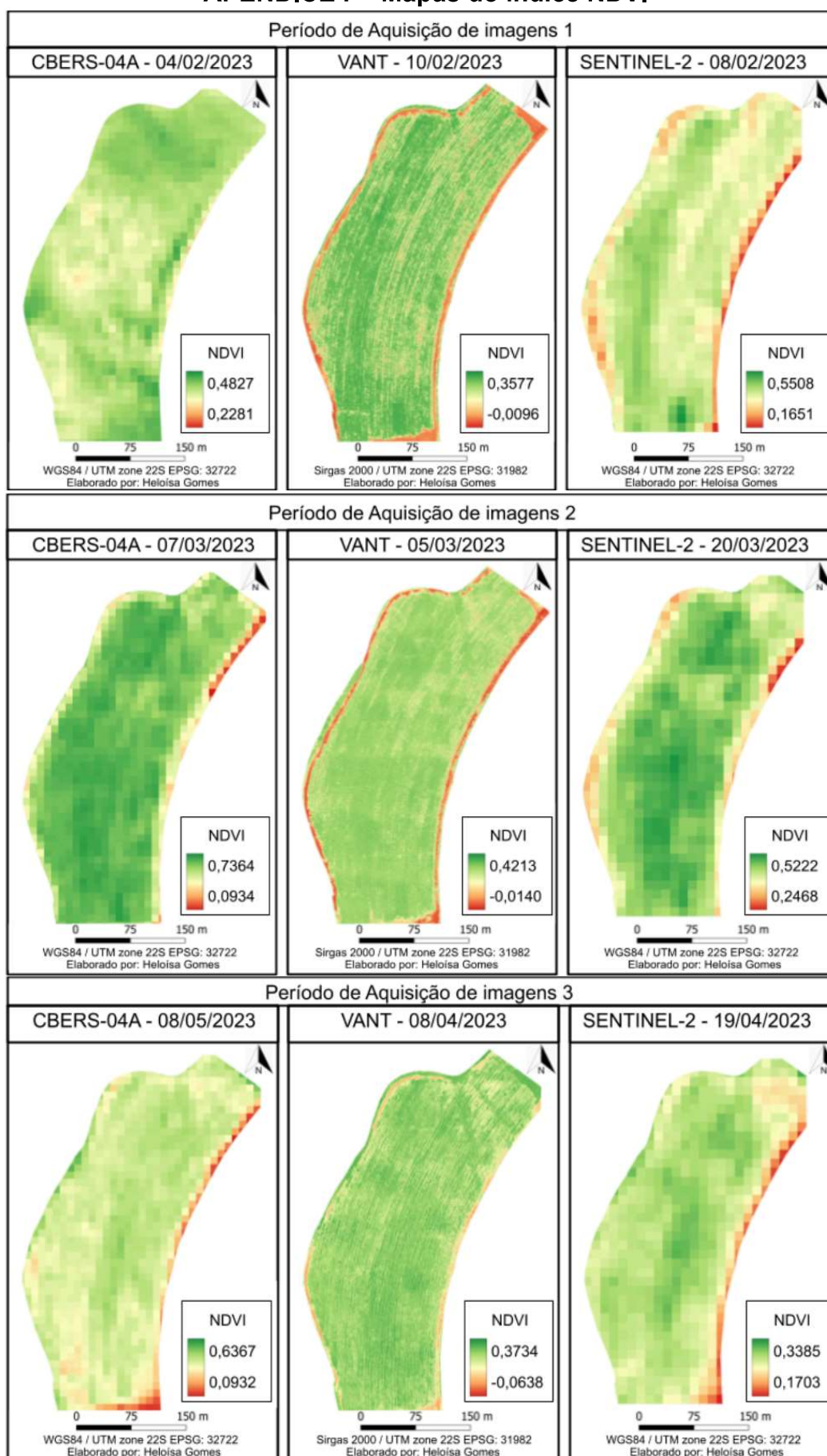
APÊNDICE D - Mapas do índice MSAVI



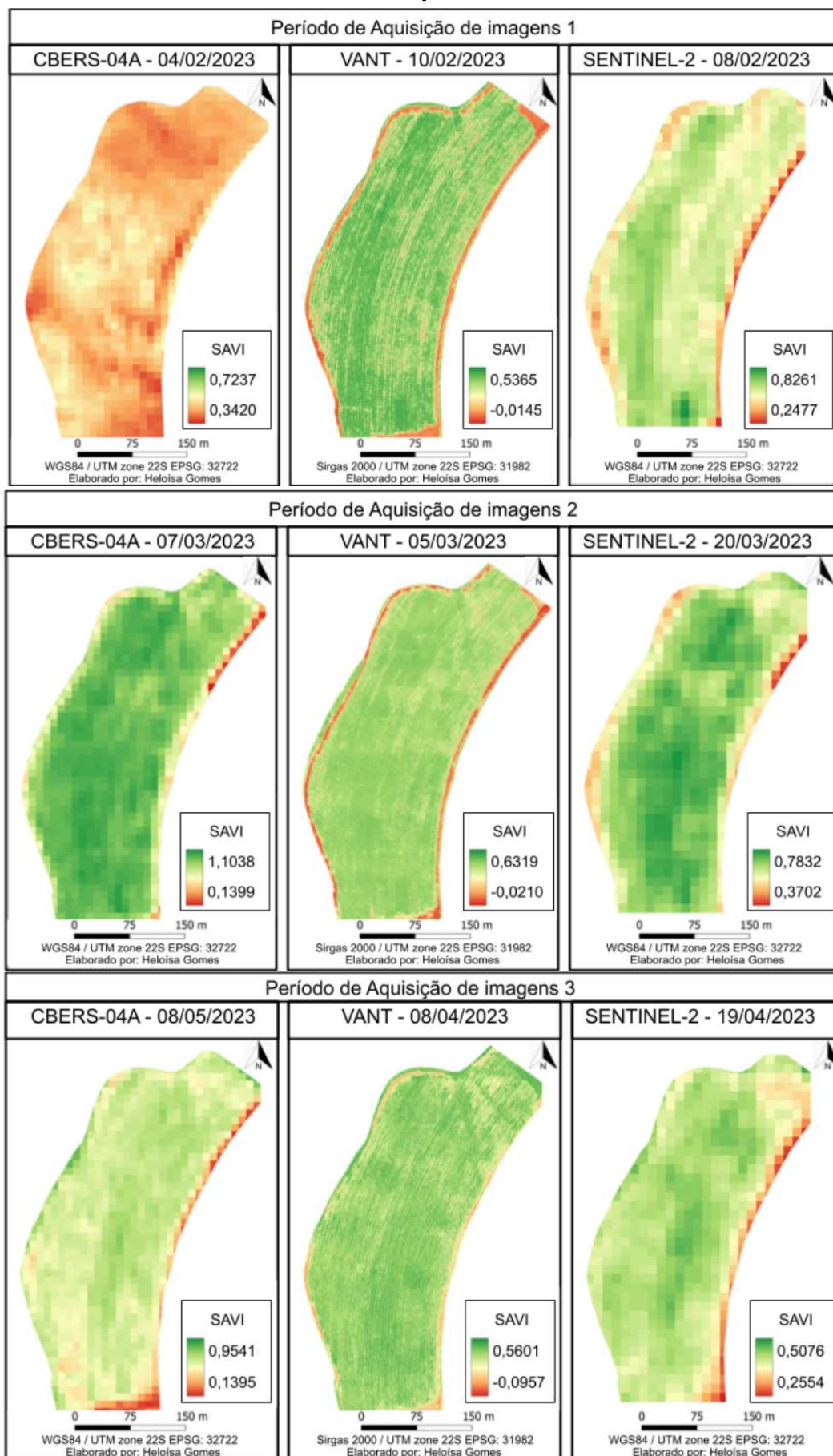
APÊNDICE E - Mapas do índice MTVI2



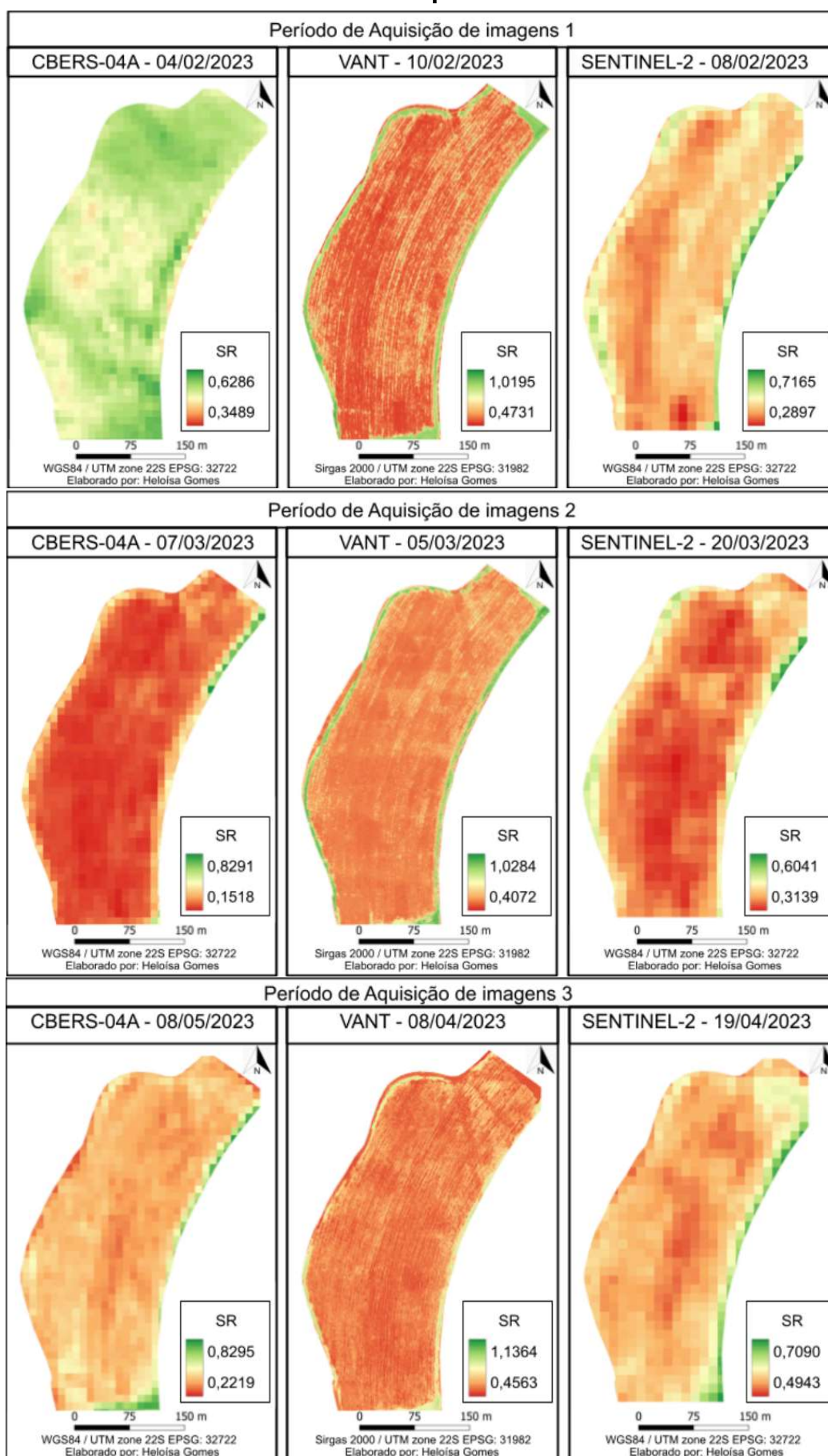
APÊNDICE F - Mapas do índice NDVI



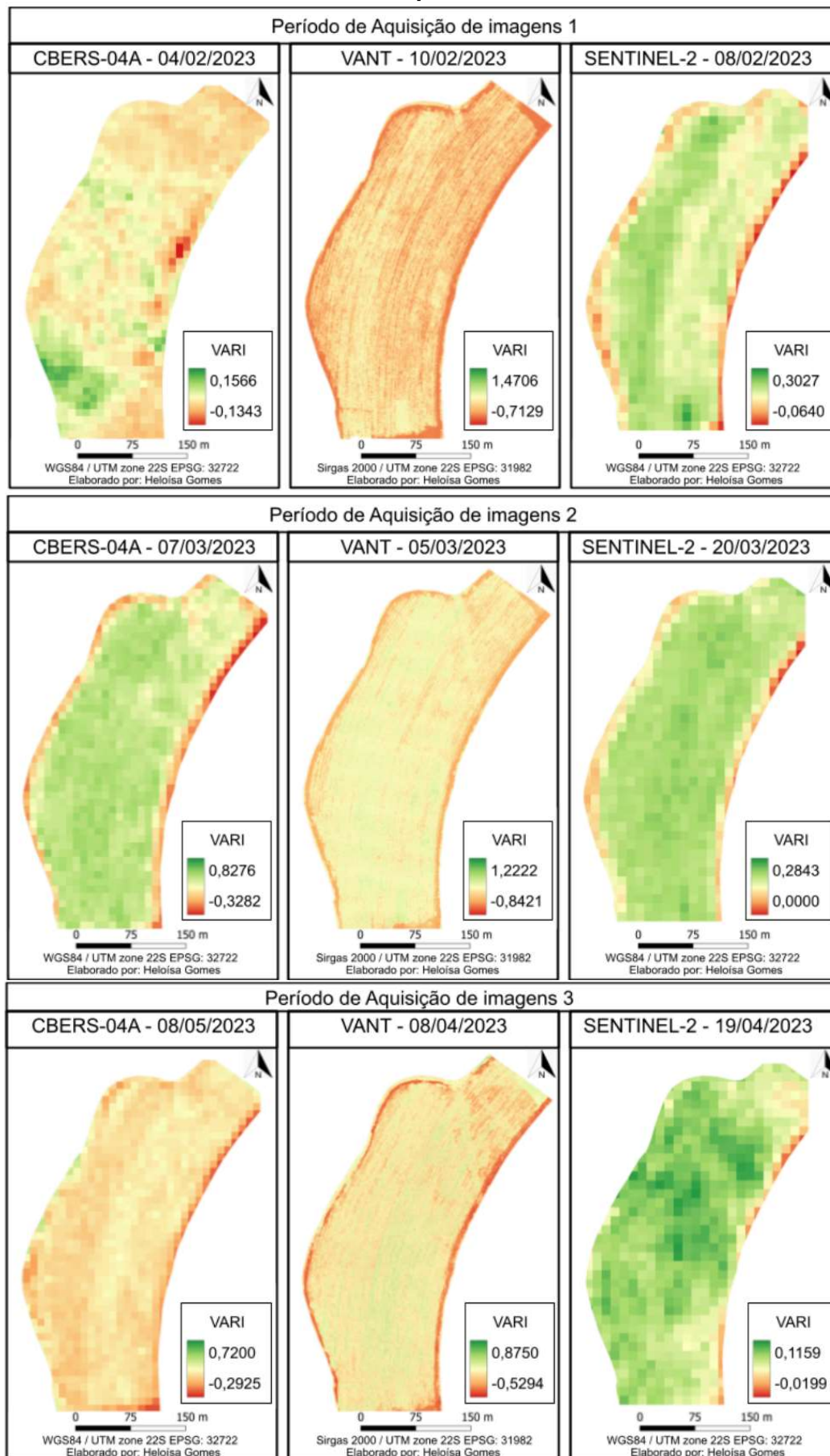
APÊNDICE G - Mapas do índice SAVI



APÊNDICE H - Mapas do índice SR



APÊNDICE I - Mapas do índice VARI



APÊNDICE J - Mapas do índice WDRVI

