



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

FELIPE HERMÍNIO MEIRELES NOGUEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO ESPECTRAL PORTÁTIL
APLICADO À DETERMINAÇÃO DE NITROGÊNIO FOLIAR NA CULTURA DO
MILHO

FORTALEZA

2022

FELIPE HERMÍNIO MEIRELES NOGUEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO ESPECTRAL PORTÁTIL APLICADO À
DETERMINAÇÃO DE NITROGÊNIO FOLIAR NA CULTURA DO MILHO

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia apresentada ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Adunias dos Santos Teixeira,
Ph.D.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N712d Nogueira, Felipe Hermínio Meireles.
Desenvolvimento de um instrumento espectral portátil aplicado à determinação de nitrogênio foliar na cultura do milho / Felipe Hermínio Meireles Nogueira. – 2022.
87 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira.

1. Sensor espectral. 2. Análise foliar. 3. Agricultura de precisão. 4. Zea mays. I. Título.

CDD 630

FELIPE HERMÍNIO MEIRELES NOGUEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO ESPECTRAL PORTÁTIL APLICADO À
DETERMINAÇÃO DE NITROGÊNIO FOLIAR NA CULTURA DO MILHO

Monografia apresentada ao Curso de
Agronomia apresentada ao Departamento de
Engenharia Agrícola da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Agronomia.

Aprovada em: 25/01/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D.(Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Marcio Regys Rabelo de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Odílio Coimbra da Rocha Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Francisco Benvindo Nogueira
(*in memoriam*) e Germana Magela Costa
Meireles.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de depositar todo esforço e dedicação necessário para avançar mais uma etapa da vida.

Ao CNPq pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À Universidade Federal do Ceará por conceder o ambiente necessário para condução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Marcio Regys Rabelo de Oliveira e Odílio Coimbra da Rocha Neto pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao Tiago, por contribuir nas atividades de campo mais intensas.

Ao Sandoval e Antônio, por operarem os implementos agrícolas.

À Profª. Mirian por permitir a utilização do Lab. de Manejo do Solo para a realização das análises químicas.

À Deyse Maia por contribuir com a condução das análises químicas.

Ao Prof. Clemilson por conceder o material e instrumentos necessários para impressão 3D do equipamento.

Ao Arnaldo por ter disponibilizado a estufa de ventilação forçada, almofariz e o integrador foliar.

Aos bolsistas de graduação Lucas, Mateus Lima, Guilherme, Brenna Sombra e pós-graduação Fábio, Bruno, Nicolás e Sharon.

À minha família e amigos pelo apoio e incentivo.

Meus sinceros agradecimentos a todos!

“Só obtém algo interessante da vida, da escola, do trabalho, quem lê muito. E só lê muito quem lê por prazer!”

(PIAZZI, 2014, p. 12).

RESUMO

Na agricultura, o estudo do fluxo de radiação eletromagnética nas plantas têm contribuído para o conhecimento mais aprofundado sobre suas condições, possibilitando a observação desde a concentração de clorofila, status nutricional ou estresse hídrico. Nesta perspectiva, o trabalho teve como objetivo desenvolver um equipamento espectral portátil para estimar a proporção de nitrogênio em plantas de milho. A aquisição dos dados pelo equipamento ocorreu por meio do sensor espectral AS7265x conectado a um Arduino UNO e portado de outros componentes eletrônicos para transmissão dos dados e comunicação com o operador. A estrutura do equipamento foi elaborada por impressão 3D, do contendo um compartimento dedicado ao sensor. Em seguida foi elaborado um aplicativo para comunicação, via Bluetooth, do equipamento desenvolvido com um *smartphone*. Para a calibração do equipamento desenvolvido, intitulado MSPAT (Multispectral Soil Plant Analysis Tool), conduziu-se o experimento em solo agrícola e em vasos utilizando a cultura do milho híbrido AG-1051 com diferentes doses de fertilizante nitrogenado (0, 30, 60, 120, 180 e 240 kg.ha⁻¹). As atividades ocorreram na área experimental do Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA) localizado na Universidade Federal do Ceará (UFC). Foram mensurados parâmetros morfológicos: altura das plantas, número de folhas, espessura do colmo e IAF. A operação com os equipamentos ópticos SPAD-502 em campo e FieldSpec Pro FR 3 em laboratório de espectrorradiometria foram realizadas para comparação com os índices gerados com o MSPAT. A análise química em laboratório para determinação da concentração de nitrogênio no tecido foliar do milho foi realizada no Laboratório de Manejo do Solo do Departamento de Solos da UFC. As análises de variância e teste de médias foram realizadas por meio do software SISVAR 4.2, enquanto que a elaboração dos modelos foram conduzidas no software MATLAB 7.9. Os índices gerados com o MSPAT para correlação com a concentração de nitrogênio foram às 18 bandas do sensor individualmente e todas as possibilidades de razão entre as bandas. As bandas individuais que apresentaram coeficientes de determinação mais relevantes foram sobre a região do verde e vermelho devido às características biofísicas dos pigmentos das plantas. Já pela razão de bandas os índices que apresentaram resultados mais satisfatórios correspondem a utilização da banda 535 nm com as bandas do infravermelho (900 e 940 nm), caracterizando o efeito da clorofila e condição da estrutura do tecido foliar. Com o conjunto de dados do espectrorradiômetro os índices que apresentaram maior relevância foram as razões 410 e 535 nm ($R^2 = 0,93$), 410 e 560 nm ($R^2 = 0,927$), 410 e 585 nm ($R^2 = 0,929$), estando associado a sensibilidade desses comprimentos de onda à

concentração de clorofila a e b. Avaliando os valores estimados de proporção de nitrogênio entre o MSPAT e o espectrorradiômetro observou-se um R^2 de 0,657, enquanto comparado os valores do espectrorradiômetro com o SPAD foi de 0,685. Contudo, é possível observar que o MSPAT apresentou um desempenho satisfatório, semelhante ao SPAD-502, demonstrando o seu potencial para estimar a concentração de nitrogênio em folhas de milho.

Palavras-chave: sensor espectral; análise foliar; agricultura de precisão; *Zea mays*

ABSTRACT

In agriculture, the study of electromagnetic radiation flux in plants has contributed to a more in-depth knowledge about their conditions, allowing the observation from the chlorophyll content, nutritional status or water stress. In this perspective, the work aimed to develop a portable spectral equipment to estimate the nitrogen content in corn plants. Data acquisition by the equipment occurred through the AS7265x spectral sensor connected to an Arduino UNO and ported to other electronic components for data transmission and communication with the operator. The structure of the equipment was elaborated by 3D printing, containing a compartment dedicated to the sensor. Then, an application was developed for communication, via Bluetooth, of the equipment developed with a smartphone. For the calibration of the developed equipment, called MSPAT, the experiment was carried out in agricultural soil and in pots using the hybrid corn culture AG-1051 with different doses of nitrogen fertilizer (0, 30, 60, 120, 180 and 240 kg. ha⁻¹). The activities took place in the experimental area of the Agricultural Electronics and Mechanics Laboratory (LEMA) located at the Federal University of Ceará (UFC). Morphological parameters were measured: plant height, number of leaves, stem thickness and LAI. Operation with SPAD-502 optical equipment in the field and FieldSpec Pro FR 3 in a spectroradiometric laboratory were performed for comparison with the indices generated with MSPAT. Chemical analysis in the laboratory to determine the concentration of nitrogen in the corn leaf tissue was performed at the Soil Management Laboratory of the UFC Soil Department. The analysis of variance and test of means were carried out using the SISVAR 4.2 software, while the elaboration of the models was carried out in the MATLAB 7.9 software. The indices generated with MSPAT for correlation with nitrogen content were the 18 bands of the sensor individually and all possibilities of ratio between the bands. The individual bands that presented the most relevant coefficients of determination were over the green and red region due to the biophysical characteristics of the peppers of the plants. As for the band ratio, the indices that presented the most satisfactory results correspond to the use of the 535 nm band with the infrared bands (900 and 940 nm) characterizing the effect of chlorophyll and the condition of the leaf tissue structure. With the spectroradiometer dataset, the indices that were most relevant were the ratios 410 and 535 nm ($R^2 = 0.93$), 410 and 560 nm ($R^2 = 0.927$), 410 and 585 nm ($R^2 = 0.929$), being associated the sensitivity of these wavelengths to the concentration of chlorophyll a and b. Evaluating the estimated values of nitrogen content between the MSPAT and the spectroradiometer, an R^2 of 0.657 was observed, while comparing the values of the spectroradiometer with the SPAD it

was 0.685. However, it is possible to observe that MSPAT presented a satisfactory performance, similar to SPAD-502, demonstrating its potential to estimate the concentration of nitrogen in corn leaves.

Keywords: superspectral sensor; leaf analysis; precision agriculture

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Características de um equipamento óptico.....	26
Figura 2 - A) Modelo esquemático dos componentes; B) Diagrama elétrico do sistema.....	31
Figura 3 - Plataforma utilizada para modelagem 3D do MSPAT.....	32
Figura 4 - Vista superior das peças: A) tampa; B) pinça; C) suporte dos componentes eletrônicos.....	33
Figura 5 - Corte lateral com as dimensões da câmara do sensor.....	34
Figura 6 - Produto gerado com a impressão 3D a partir do modelo projetado.....	34
Figura 7 - A) Processo de fixação da fita aluminizada sobre a superfície externa do equipamento; B) Equipamento revestido pela fita aluminizada.....	35
Figura 8 - Fluxograma de utilização do aplicativo MSPAT Bluetooth.....	36
Figura 9 - Fluxograma dos sinais sonoros utilizados pelo MSPAT.....	37
Figura 10 - Sensor espectral AS7265x.....	37
Figura 11 - Características ópticas do sensor AS7265x.....	39
Figura 12- Mapa de Localização da área de estudo.....	40
Figura 13 - Croqui da área experimental de milho em solo agrícola.....	42
Figura 14 - Delineamento experimental para o milho cultivado em vaso.....	43
Figura 15 - Sistema elétrico para acionamento da eletrobomba.....	44
Figura 16 - Reservatório de água para irrigação.....	45
Figura 17 - Mensuração da pressão com auxílio de um manômetro.....	45
Figura 18 - Leitura do volume de água nos coletores para teste de uniformidade A) em solo agrícola; B) em vaso.....	47
Figura 19 - Plantio do milho em A) solo agrícola; B) vaso.....	48
Figura 20 - Padronização do local para avaliação na folha.....	50
Figura 21 - Avaliação com os sensores ópticos A) SPAD-502; B) MSPAT.....	50
Figura 22- Cobertura do espectro eletromagnético com as bandas do MSPAT e espectralradiômetro.....	51
Figura 23 - Leitura com espectralradiômetro utilizando A) Geometria de aquisição dos dados hiperespectrais em <i>dark-room</i> . B) Detalhe da placa branca de referência.....	52
Figura 24- Comparação entre os dados do espectralradiômetro e o MSPAT.....	52
Figura 25 - Processamento das amostras no almofariz.....	53
Figura 26 - Local de armazenamento das amostras maceradas.....	53

Figura 27 - Etapas da metodologia para determinação do nitrogênio: A) Pesagem das amostras; B) digestão das amostras; C) destilação; D) titulação; E) comparação dos produtos utilizados gerados na titulação.....	54
Figura 28 - Parâmetros agronômicos avaliados: A) altura da planta em solo agrícola; B) espessura do colmo em solo agrícola; C) número de folhas em solo agrícola; D) altura da planta em vaso; E) espessura do colmo em vaso; F) número de folhas em vaso.....	56
Figura 29 - Mensuração do IAF.....	57
Figura 30 - Etapa das avaliações morfológicas na espiga: A) transporte para o laboratório; B) comprimento da espiga; C) diâmetro da espiga; D) peso da espiga.....	57
Figura 31- Imagem aérea do milho cultivado em solo agrícola.....	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Comportamento espectral do LED HIR333/H0.....	25
Gráfico 2 - Característica espectral dos fotodiodos utilizados no SPAD-502.....	27
Gráfico 3 - Comportamento espectral dos LED's emissores A) infravermelho; B) luz visível; C) ultravioleta.....	38
Gráfico 4 - Responsividade das bandas do sensor AS7265x.....	39
Gráfico 5 - Comportamento da temperatura e precipitação durante o cultivo do milho em solo agrícola.....	41
Gráfico 6 - Característica da bomba QB-60 e da tubulação utilizada no sistema de irrigação.....	44
Gráfico 7- Desenvolvimento da altura de plantas de milho cultivadas em solo agrícola.....	61
Gráfico 8- Desenvolvimento de número folhas de milho por plantas cultivadas em solo agrícola	61
Gráfico 9- Desenvolvimento da espessura do colmo de milho cultivado em solo agrícola.....	62
Gráfico 10- Distribuição normal dos dados de concentração de nitrogênio foliar.....	67
Gráfico 11- Valores de reflectância médio por tratamento utilizando A) espectrorradiômetro FieldSpec correspondente as bandas do sensor AS7265x B) MSPAT.....	68
Gráfico 12- Coeficientes de determinação da razão entre as bandas do sensor AS7265x utilizando os dados do espectrorradiômetro.....	71
Gráfico 13- Coeficientes de determinação da razão entre as bandas do MSPAT.....	72
Gráfico 14- Interpretação do coeficiente de Pearson (r) sobre a razão de bandas do MSPAT.....	73
Gráfico 15- Interpretação do coeficiente de Pearson (r) sobre a razão de bandas do sensor AS7265x com os dados do espectrorradiômetro.....	74
Gráfico 16- Valores de N foliar medido e estimado a partir dos modelos gerados com o MSPAT nas banda A) 680 e 645 nm; B) 940 e 535 nm; C) 900 e 535 nm; D) 680 e 585 nm.....	76
Gráfico 17- Valores de N foliar medido e estimado com os modelos gerados a partir dos dados do espectrorradiômetro FieldSpec com as bandas A) 535 e 410 nm; B) 585 e 410 nm; C) 610 e 410 nm; D) 560 e 410 nm.....	77
Gráfico 18- Valores de N foliar medido e estimado a partir do modelo gerado com o SPAD.....	78
Gráfico 19- Valores estimados entre o MSPAT e SPAD; SPAD e FieldSpec; MSPAT e FieldSpec.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resolução espacial dos satélites disponíveis para imageamento.....	23
Tabela 2 - Tabela dos componentes eletrônicos para montagem do MSPAT.....	30
Tabela 3- Doses de nitrogênio correspondentes aos tratamentos utilizados.....	42
Tabela 4 - Avaliação do sistema de irrigação.....	46
Tabela 5 - Quantidades e data de aplicação dos fertilizantes utilizados.....	49
Tabela 6 - Simulações geradas para estudo dos melhores modelos na estimativa de nitrogênio	58
Tabela 7- Interpretação do coeficiente de Pearson.....	59
Tabela 8- Análise de Variância para as variáveis número de folhas (NF), altura de plantas (ALT), espessura do colmo (ESP), índice de área foliar (IAF), concentração de nitrogênio (N), peso da espiga com palhada (PP), peso da espiga despalhada (PD), comprimento da espiga (CO), diâmetro da espiga (DI).....	63
Tabela 9- Resultado do teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis número de folhas (NF), altura de plantas (ALT), peso da espiga despalhada (PD) e comprimento da espiga (CO).....	64
Tabela 10 - Análise de Variância para as variáveis número de folhas (NF), altura de plantas (ALT), espessura do colmo (ESP), índice de área foliar (IAF), concentração de nitrogênio (N)	65
Tabela 11- Resultado do teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis número de folhas (NF), altura de plantas (ALT), IAF e concentração de nitrogênio (N).....	66
Tabela 12- Coeficiente de determinação (R^2) da correlação das bandas individualizadas do sensor AS7265x com concentração de nitrogênio.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
ALT	Altura de plantas
ANOVA	Análise de Variância
BLOC	Blocos
BRIX	Sólidos solúveis da solução
CO	Comprimento da espiga
CV	Coefficiente de Variação
DAP	Dias Após Plantio
DBC	Delineamento em Blocos Casualizado
DCEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DI	Diâmetro da espiga
DIC	Delineamento Inteiramente Casualizado
ESP	Espessura do Colmo
FOV	<i>Field of View</i>
FV	Fonte de Variação
GL	Graus de Liberdade
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
IAF	Índice de Área Foliar
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IRIS	<i>Infra Red Intelligent Spectroradiometer</i>
ISN	Índice de Suficiência do Nitrogênio
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LEMA	Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola
LP	Leitura parcela testada
LPR	Leitura parcela de referência
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
N	Concentração de Nitrogênio
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NF	Número de Folhas
NIR	Near Infrared
PD	Peso da espiga Despilhada
PP	Peso da espiga com Palhada
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SPAD	<i>Soil Plant Analysis Division</i>
SR	Sensoriamento Remoto
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>
TRAT	Tratamentos
UV	Ultravioleta
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
USD	United States Dollar

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Ângulo de sensibilidade do sensor
θ	Ângulo entre o LED emissor de luz e o sensor espectral
λ	Comprimento de onda
ρ	Fator de Reflectância
σ	Desvio padrão
β	Bandas do sensor AS7265x

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	Objetivo Geral.....	20
2.2	Objetivos específicos.....	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3.1	Agricultura de precisão na cultura do milho.....	21
3.2	Tecnologias por Sensoriamento remoto na agricultura.....	22
3.2.1	<i>Sensoriamento remoto por satélites.....</i>	<i>22</i>
3.2.2	<i>Sensoriamento remoto por veículos aéreos.....</i>	<i>24</i>
3.2.3	<i>Sensoriamento remoto proximal.....</i>	<i>25</i>
3.3	Espectrorradiometria aplicada à agricultura.....	28
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	30
4.1	Elaboração do equipamento óptico espectral MSPAT.....	30
4.2	Desenvolvimento do aplicativo <i>MSPAT Bluetooth</i>	35
4.3	Avaliação do desempenho de equipamentos ópticos na cultura do milho.....	39
4.3.1	<i>Descrição da área de estudo.....</i>	<i>40</i>
4.3.2	<i>Delineamento experimental.....</i>	<i>41</i>
4.3.3	<i>Sistema de irrigação.....</i>	<i>43</i>
4.3.4	<i>Preparo do solo.....</i>	<i>47</i>
4.3.5	<i>Plantio da cultura do milho.....</i>	<i>47</i>
4.3.6	<i>Plano de adubação.....</i>	<i>48</i>
4.3.7	<i>Aquisição dos dados com equipamentos ópticos por espectrorradiometria.....</i>	<i>49</i>
4.3.8	<i>Análise laboratorial para determinação de nitrogênio.....</i>	<i>52</i>
4.3.9	<i>Parâmetros morfológicos.....</i>	<i>55</i>
4.3.10	<i>Modelagem e Análises estatísticas.....</i>	<i>57</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
5.1	Análises de variância dos parâmetros agronômicos.....	60
5.1.1	<i>Teste F dos dados de milho cultivado em solo agrícola.....</i>	<i>62</i>
5.1.2	<i>Teste de Tukey dos dados de milho cultivado em solo agrícola.....</i>	<i>63</i>
5.1.3	<i>Teste F dos dados de milho cultivado em vaso.....</i>	<i>64</i>
5.1.4	<i>Teste de Tukey dos dados de milho cultivado em vaso.....</i>	<i>65</i>

5.2	Modelos de estimativa do nitrogênio em folhas de milho.....	66
5.2.1	<i>Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov.....</i>	66
5.2.2	<i>Comportamento espectral das amostras de tecido foliar do milho.....</i>	67
5.2.3	<i>Correlação dos índices utilizando bandas individuais.....</i>	69
5.2.4	<i>Correlação dos índices com a normalização das bandas.....</i>	70
5.2.5	<i>Validação dos índices com a normalização das bandas.....</i>	72
5.2.6	<i>Modelos que apresentaram melhor desempenho com o MSPAT.....</i>	74
5.2.7	<i>Modelos que apresentaram melhor desempenho com o espectrorradiômetro....</i>	76
5.2.8	<i>Modelo gerado com o SPAD-502.....</i>	77
5.2.9	<i>Comparação dos valores estimados entre os equipamentos avaliados.....</i>	78
6	CONCLUSÃO.....	80

1 INTRODUÇÃO

A fotossíntese é um do processo realizado pelas plantas que possui elevada contribuição sobre a cadeia alimentar dos ecossistemas naturais (DIAS FILHO, 2006). Devido a importância desse fenômeno, muitos estudos são realizados para o conhecimento mais aprofundado deste evento (FALKOWSKI & RAVEN 2013; BAKER, 2006; RYU et al., 2019). Ademais, existe uma forte relação da atividade fotossintética com a saúde da planta, ao estresse hídrico, deficiência nutricional, ocorrência de patógenos e dentre outras adversidades de natureza biótica ou abiótica (CHAERLE & VAN DER STRAETEN, 2000).

As observações sobre o estado da planta por técnicas de óptica tem contribuído significativamente para o desenvolvimento de novas tecnologias (VALERO UBIERNA, 2020). Dentre as práticas mais comumente realizadas existem avaliações por imagens multiespectrais (SANTOS et al., 2015) e hiperespectrais (GALVÃO et al., 2009), utilizando-se da espectroscopia de reflectância (FERNANDES et al., 2004) ou transmitância (MARTINAZZI et al., 2004). Atualmente estes recursos são fortemente utilizados na agricultura, por meio de sensores embarcados em satélites (PALACIOS-VÉLEZ et al., 2011), câmeras acopladas a veículos aéreos (ARROYO et al., 2017), espectrorradiômetros em laboratório e equipamentos ópticos utilizados em campo (ESTRELLA MEDINA et al., 2017). Com a obtenção de informações por estes meios, torna-se possível entender as características biofísicas da planta através de sua resposta espectral, do é caracterizada pela forte absorção na região do espectro eletromagnético do vermelho, com menor intensidade no azul, enquanto a maior reflectância ocorre na região do verde e infravermelho (VIGNOLINI et al., 2013). Por isso, a partir do conhecimento sobre o comportamento espectral da vegetação, aliado a métodos matemáticos e estatísticos, torna-se possível a concepção de modelos matemáticos para aplicações na agricultura, servindo para a quantificação de parâmetros físicos, da estrutura do tecido vegetal, e bioquímicos, sobre a concentração de nutrientes na planta. Dentre os possíveis usos do Sensoriamento Remoto (SR) na agricultura, a estimativa da concentração de nitrogênio na planta tem favorecido a utilização de fertilizantes nitrogenados com maior eficiência em diferentes culturas (HABIBULLAH et al., 2020). Porém, a aplicação de métodos ópticos robustos para a utilização na agricultura ainda dependem de equipamentos de custo elevado, inviabilizando a operação. Por este motivo se torna relevante o desenvolvimento de tecnologias mais acessíveis, possibilitando a popularização de ferramentas importantes no desenvolvimento da agricultura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve como objetivo geral desenvolver um equipamento óptico e portátil sensível à concentração de nitrogênio em folhas de milho (*Zea mays* L.).

2.2 Objetivos específicos

- Projetar e desenvolver a estrutura do equipamento por impressão 3D para a instalação dos componentes eletrônicos e suporte do sensor óptico AS7265x em uma câmara para aquisição dos dados espectrais.
- Calibração do equipamento desenvolvido mediante avaliação em plantas de milho cultivadas sob diferentes concentrações de nitrogênio.
- Seleção dos modelos obtido por validação cruzada que apresentaram melhor desempenho para estimar o nitrogênio em folhas milho.
- Avaliar a performance do equipamento elaborado em comparação ao clorofilômetro SPAD-502 e ao espectrorradiômetro FieldSpec Pro FR 3.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Agricultura de precisão na cultura do milho

O milho (*Zea mays L.*) é uma cultura de elevado valor socioeconômico devido sua presença em diversos produtos da alimentação humana e na pecuária, além de se tratar de uma *commodity*. Por conta da exploração em grande escala dessa cultura, a utilização de tecnologias mais avançadas permite ao agricultor conhecer com maior precisão o comportamento das variáveis que envolvem o sistema de produção. Dentre essas tecnologias a utilização de Sistema de Informações Geográficas (SIG) (PALACIOS OREJUELA et al., 2020) e Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) (ALVES, 2021) tem contribuído para a elaboração do conjunto de dados que possibilita a elaboração de mapas sobre a distribuição de características do solo para aplicação de fertilizantes, observação do IAF (Índice de Área Foliar) (FAUSTO et al 2018) e NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) (GUHA et al., 2018), assim como mapas de produtividade e rendimento da cultura (ANZILIERO, 2021). A partir da utilização do NDVI, Matias et al. (2015) apresentam uma regressão linear altamente significativa entre a produtividade obtida e estimada de diferentes culturas, caracterizando o elevado potencial da tecnologia aplicada. Na aplicação do NDVI para a cultura do milho o autor gerou mapas de produtividade por meio de imagens do satélite Landsat 8, de forma que o índice foi calculado mediante a normalização das reflectâncias (ρ) apresentadas na banda 4 (*Red*), na região do vermelho (660 nm) e 5 (NIR) do infravermelho próximo (870 nm), conforme a equação:

$$NDVI = \frac{(\rho NIR - \rho Red)}{(\rho NIR + \rho Red)}$$

De Carvalho Gasparotto et al. (2015) expõem sobre o comportamento espectral do milho, por sensoriamento hiperespectral, submetido a diferentes doses de nitrogênio com 5 tratamentos (0, 50, 100, 200 e 300 kg.ha⁻¹ de N) e 10 repetições, com avaliações 15, 30, 45, 60 e 80 dias após emergência. Após a análise dos dados o autor observou que o comportamento espectral apresentou variação entres os tratamentos principalmente no espectro visível e entre 60 e 80 dias após emergência.

No trabalho proposto por Ferraz et al. (2022) utiliza-se um VANT para determinar a altura de plantas de milho a partir das análises das imagens obtidas, de forma que as mensurações realizadas em campo e com o veículo aéreo não apresentaram diferença significativa. Já Leite et al. (2021) aplicaram geoestatística na avaliação do arranjo de plantas de milho de forma que o trabalho possibilitou o mapeamento de áreas que apresentaram erros no processo de semeadura. Dos Passos et al. (2019) propõem o monitoramento da cultura do milho por meio de VANT's para avaliar diversos problemas no desenvolvimento da cultura, validando a efetividade da tecnologia.

3.2 Tecnologias por Sensoriamento remoto na agricultura

Devido ao crescimento populacional dos grandes centros urbanos, as práticas agrícolas têm demandado maior fluxo operacional dos sistemas de produção, fazendo com que a automatização destes sistemas apresentem elevado nível tecnológico. Neste sentido, a agricultura de precisão tem se aliado aos avanços científicos para contribuir com a tomada de decisão dos agricultores, estando especialmente atrelado às técnicas de irrigação, manejo do solo, utilização de máquinas e implementos agrícolas, proporcionando benefícios econômicos, ambientais e sociais (AUERNHAMMER, 2001).

A utilização de tecnologias que envolvem SIG, GNSS, conjuntamente com a computação, tem contribuído para a utilização do SR como uma ferramenta fundamental para o processamento de informações sobre as culturas, modelagem das propriedades físicas e químicas do solo, conhecimento do relevo, aquisição e predição de informações climáticas (VENKATARATNAM et al., 2001). Conforme apresentado por Jensen (2009), esta tecnologia possui diversas vantagens quando aplicado na agricultura devido algumas características: métodos não destrutivos para a coleta de informações; pode abranger o estudo sistemático sobre grandes áreas; torna viável a observação de ambientes com acessibilidade limitada; além de fornecer informações biofísicas sobre diversos alvos nos agroecossistemas.

3.2.1 Sensoriamento remoto por satélites

Com a evolução do SR orbital, suas aplicações na agricultura têm se tornado cada vez mais relevantes, chegando ao nível de atuação sobre o gerenciamento do desenvolvimento das culturas, conforme apresentado por Casady e Palm (2002). Na Tabela 1 é possível observar os principais satélites disponíveis para imageamento da terra, dos quais são utilizados para diversas aplicações no estudo do uso e cobertura da terra. Atualmente existem diversos bancos de dados que disponibilizam gratuitamente as imagens dos orbitais em plataformas na *internet* (HOUSKA, 2012; MILCINSKI et al., 2017; DE SOUZA & CÂMARA, 2009), sendo utilizado mais comumente para gestão e mapeamento da agricultura os orbitais da coleção Landsat (1973-Presente) e Sentinel (2015-Presente), por possuírem grande acervo histórico de dados e características de resolução espacial e espectral relevantes.

Tabela 1 - Resolução espacial dos satélites disponíveis para imageamento

Satélite	Resolução espacial	Satélite	Resolução espacial
World View 2	30 cm	Kompsat-3A	40 cm
World View 3	30 cm	Geoeye	50 cm
Kompsat3-A	40 cm	Pleiades	50 cm
Geoeye	50 cm	Quick Bird	60 cm
Pleiades	50 cm	Kompsat 3	70 cm
Kompsat 3	70 cm	GAOFEN 2	80 cm
Kompsat 2	1 m	IKONOS	80 cm
Tripletat	1 m	Kompsat 2	1 m
RAPID EYE	5 m	SPOT 6-7	1,50 m
TH-1	10 m	PLANET	3 m
World View 3-4	30 cm	RAPID EYE	5 m
World View 1-2	50 cm	Sentinel-2*	10 m
CBERS-2*	20 m	GAOFEN 1	16 m
CBERS-4*	5 m	Landsat 1 - 9*	30 m

* Acesso livre

Fonte: EngeSat, adaptado pelo Autor (2022).

Conforme apresentado por Atzberger (2013), os dados obtidos por satélites são de grande importância principalmente para as agências governamentais que monitoram a cobertura vegetal de áreas ambientais e atividade agrícola, tornando possível avaliar a evolução das classes de ocupação e uso da terra. Porém, existem alguns fatores que dificultam a sua aplicação, como por exemplo a ocorrência de nuvens, com maior ocorrência em períodos chuvosos, e tempo de revisita do satélite. O Landsat-8 possui um período de revisita de 16 dias enquanto que o Sentinel-2 é de 10 dias.

Ovando et al. (2021) apresentam o desempenho de diferentes índices de vegetação por meio do orbital Sentinel-2 para estimativa do rendimento da soja, obtendo resultados mais relevantes quando utilizando as bandas da região do espectro no NIR e SWIR. De Almeida et al. (2019) descrevem sobre a avaliação dos níveis de degradação de pastagens utilizando imagens Sentinel-2. Com a utilização de imagens dos orbitais Landsat 8, CBERS-4 e Sentinel-2, Valencia et al. (2020) avaliaram o comportamento espectral das culturas do milho, arroz e soja, tornando possível visualizar diferenças sobre o comportamento espectral das culturas em relação a idade da vegetação, época de cultivo e regime de chuvas.

3.2.2 Sensoriamento remoto por veículos aéreos

Em alternativa às questões levantadas no final do tópico anterior, na agricultura tem-se contornado esses contratempos pela utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's), devido à capacidade de realizar imageamento de área com alta resolução espacial e em momentos mais pertinentes para o manejador da cultura agrícola. Os VANT's do tipo multirrotores e asa fixa são os mais comumente utilizados (BATEIRA et al., 2018), sendo necessário avaliar as características de cada VANT para aplicação em determinadas situações. Os modelos de asa fixa, por possuírem apenas um rotor, apresentam menor consumo de energia, proporcionando maior autonomia de voo e maior área de cobertura. Porém, sua decolagem ocorre horizontalmente, diferente dos multirrotores que são verticalmente, tornando necessário uma pessoa para realizar o lançamento manualmente ou por meio de um equipamento lançador por catapulta. Sobre o VANT asa fixa também é importante levar em consideração que o pouso deve ocorrer preferencialmente em uma área aberta com superfície de vegetação rala, onde em condições diferentes o veículo passa a ser suscetível a danos na sua estrutura, sendo necessário realizar reparos ou substituir peças.

As aplicações dos VANT's possibilitaram a observação de diversas características importantes sobre as plantas, como por exemplo, no manejo da irrigação, a detecção de estresse a seca, proposto por Ding (2019); na ocorrência de patógenos e aplicação de produtos fitossanitários, de acordo com de Lamichhane et al. (2016); no mapeamento da ocorrência de plantas invasoras (LÓPEZ-GRANADO et al., 2011) ou na estimativa de biomassa, de acordo com Calou et al. (2019). Porém, é importante levar em consideração que ainda existe um elevado custo para aquisição de VANT's profissionais portados de câmeras multiespectrais,

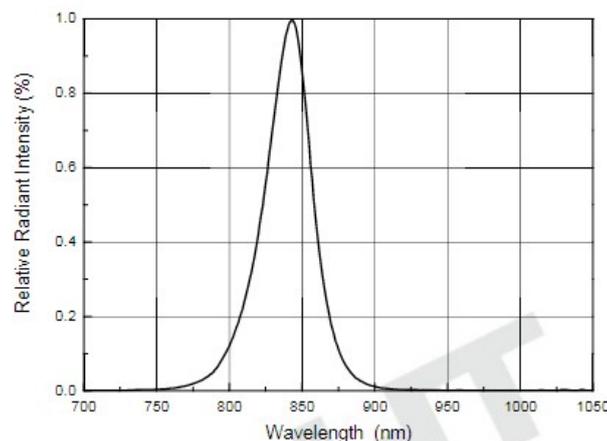
além de exigir qualificação da mão de obra para realização das missões de voo. Outra opção também utilizada é o aluguel de veículos aéreos tripulados a bordo de sensores hiperespectrais, porém seria necessário entender o contexto da aplicação do levantamento aerofotogramétrico para avaliar a viabilidade de aquisição do serviço.

3.2.3 Sensoriamento remoto proximal

Diferente do método utilizado no SR por veículos aéreos e satélites, o sensoriamento remoto proximal normalmente é praticado por equipamentos portáteis disposto de sensores ativos, do qual dependem de uma fonte de energia para que o pulso eletromagnético atinja o alvo e chegue até o sensor. A partir do fluxo de energia eletromagnética dos alvos a mesma pode ser refletida, absorvida ou transmitida, de modo que os equipamentos ópticos se baseiam comumente na mensuração da reflectância ou transmitância (LADEIA et al., 2019).

A fonte de luz utilizada nos equipamentos ópticos geralmente são LEDs (*Light Emitting Diode*) que possuem características classificadas de acordo com o comprimento de onda eletromagnética que operam, de forma que o seu comportamento espectral seja caracterizado pelo seu comprimento de onda central. No Gráfico 1 é apresentado a distribuição espectral do LED HIR333/H0 que corresponde a banda 840 nm (EVERLIGTH, 2022).

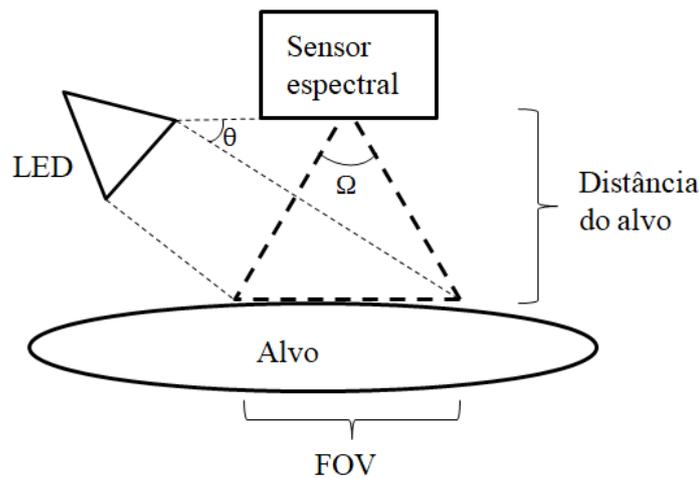
Gráfico 1- Comportamento espectral do LED HIR333/H0



Fonte: Microelectronics, (2002).

Em relação aos sensores proximais por reflectância, é estabelecido uma geometria de disposição dos componentes ópticos conforme os elementos apresentados na Figura 1. Dentre os parâmetros é determinado no equipamento a distância do alvo, a disposição da fonte de luz e o sensor espectral. Na conformação desses componentes existem algumas características relevantes para serem conhecidas, como o ângulo entre o fotodiodo emissor e o sensor espectral (θ) e o ângulo de sensibilidade do sensor (Ω). A partir da distância do alvo será possível definir a extensão da área sensoriada, também denominada como *field of view* (FOV) (ARAÚJO, 2018). Segundo Holland et al. (2012) outro aspecto importante para ser considerado sobre os sensores ópticos é a potência do LED emissor que determinará a energia irradiada em função da distância sobre o alvo.

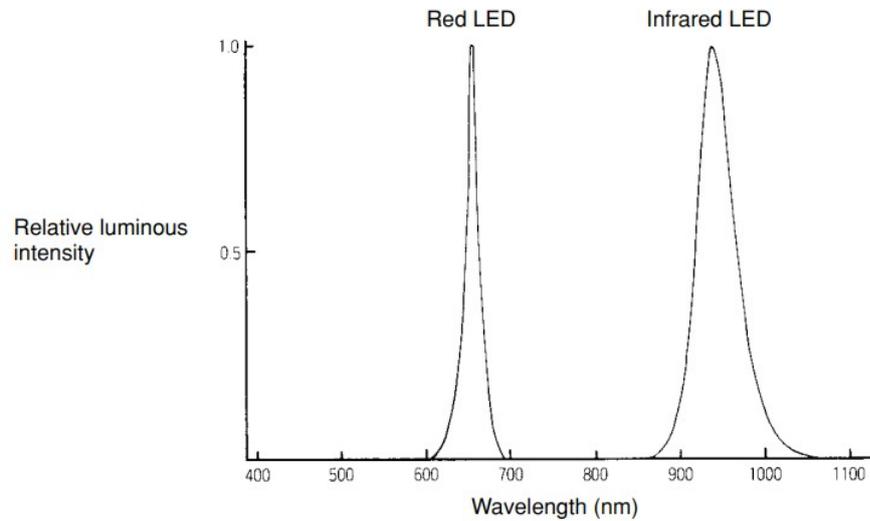
Figura 1 - Características de um equipamento óptico



Fonte: Autor (2022).

O SPAD-502 é um exemplo de equipamento óptico por transmitância lançado na década de 1980 capaz de medir a concentração de clorofila por meio da avaliação nos comprimentos de onda de radiação vermelha (650 nm) e infravermelho (940 nm) (MINOLTA, 1989), conforme apresentado pelo Gráfico 2. Através da avaliação com o equipamento é mensurado o índice SPAD (*Soil Plant Analysis Division*), o qual é frequentemente utilizado em diversas aplicações na agricultura.

Gráfico 2 - Característica espectral dos fotodiodos utilizados no SPAD-502



Fonte: MINOLTA (1989).

Dentre as publicações que avaliaram a aplicação do SPAD-502 na agricultura é possível mencionar a utilização para determinar o tempo de aplicação de adubo nitrogenado no arroz, proposto por Pushpanathan et al. (2004). O autor conclui que o equipamento contribuiu com a eficiência de aplicação dos fertilizantes. Já Rhezali e Lahlali (2017) avaliaram a cultura do milho para determinar o *status* de nitrogênio na planta por meio do SPAD, havendo uma correlação relevante entre o índice e concentração de nitrogênio. O diagnóstico sobre a condição nutricional das plantas é um conhecimento extremamente importante no manejo agrícola de uma cultura, por isso Afonso et al. (2018) realizaram leituras com o SPAD nas culturas do pessegueiro (*Prunus persica*), ameixa (*Prunus domestica* L.) e cerejeira (*Prunus cerasus* L.), onde teve como resultado uma forte correlação da concentração de nitrogênio com as leituras do SPAD. Além das correlações diretas com a condição nutricional do tecido vegetal, Samborski et al. (2009) utilizaram o SPAD para avaliar a proporção de suficiência do nutriente por meio da equação:

$$ISN(\%) = \frac{LP}{LPR}$$

De acordo com a equação ISN representa o Índice de Suficiência do Nitrogênio (%), LP é a leitura sobre a parcela testada e LPR é a leitura na parcela de referência, em condições ideais de adubação. A partir do valor de suficiência de nitrogênio, alguns autores

definiram quais seriam as condições de suficiência para indicar qual momento para adubação. No milho, Peterson et al. (1993) e Blackmer e Schepers (1994) admitiram o ISN inferior a 0,95 como indicativo de uma deficiência que pode levar à redução da produção de grãos. Já Ahmad et al. (1999) sugeriram 0,90 como o limiar do ISN para aplicação de milho N. Para a cultura do algodão Boggs et al. (2003) descobriram que os lotes de controle sem N eram os únicos com um $ISN < 0,90$ de forma que a adubação que obteve maior rendimento foi de 40 kg N ha^{-1} .

Outro equipamento óptico bastante utilizado na agricultura é o GreenSeeker[®], do qual foi desenvolvido na Universidade de Oklahoma (EUA), na década de 1990. Este aparelho opera nos comprimentos de onda do vermelho (650 nm) e infravermelho próximo (770 nm). Sua leitura de reflectância calcula o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), do qual é apresentado o valor no *display* do equipamento (NTECH INDUSTRIES, 2008). Moges et al. (2005) utilizaram o equipamento para prever biomassa, captação de nitrogênio e rendimento final de grãos de trigo, obtendo valores relevantes para aplicação. Ali et al. (2015) apresentam uma utilização para o equipamento na adubação nitrogenada no arroz com base no valor de NDVI, demonstrando que a metodologia foi eficaz. O equipamento também foi utilizado por Fabbri et al. (2020) como uma ferramenta para ajuste da adubação na cultura da cevada, do qual demonstrou o elevado potencial para a tomada de decisão sobre quanto adubar com fertilizantes nitrogenados. Já Păcurar et al. (2019) apresentam a utilização do GreenSeeker para a servir como ferramenta para um sistema de aplicação automático de fertilizantes de taxa variável, contribuindo para uma aplicação mais eficiente em função dos valores de NDVI mensurados.

3.3 Espectrorradiometria aplicada à agricultura

As análises por espectrorradiômetros são comumente utilizadas para calibração de outros sensores ópticos devido a robustez na aquisição de informações hiperespectrais com intervalo de amostragem de até 1nm. Os dados obtidos por um espectrorradiômetros também são utilizados para elaboração de bancos de dados de assinaturas espectrais sobre objetos específicos. A exemplo do trabalho proposto por Jarmer et al. (2008), utilizando-se o espectrômetro FieldSpec-II para estimar propriedades químicas de um solo agrícola, foi possível gerar mapas sobre a concentração de carbono orgânico e nitrogênio. Silva et al.

(2012) apresentaram a caracterização espectral da cultura do eucalipto, observando que houve diferença estatística sobre as bandas de 400 a 700 nm com base na concentração de clorofila. Já Clevers e Kooistra (2011) utilizaram o espectrômetro FieldSpec 3 para estimar a concentração de clorofila e nitrogênio em pastagens e na cultura da batata através da geração de índices de vegetação, obtendo-se êxito para a estimativa de ambos os parâmetros. De acordo com Moreira et al. (2013), a avaliação com espectrorradiômetro possibilitou a compreensão do comportamento espectral de solos afetados por sais, estimando a condutividade elétrica com base no comportamento espectral da amostra de solo. Genú e Demattê (2012) realizaram comparações do comportamento espectral em diferentes classes de solos com os orbitais Landsat 5, TERRA e com o espectrorradiômetro IRIS (*Infra Red Intelligent Spectroradiometer*). Os autores observaram que além do IRIS os sensores orbitais também foram capazes de diferenciar as classes de solos avaliadas. Paz et al. (2009) expuseram uma problemática sobre a diferenciação entre espécies de plantas forrageiras, do qual foi proposto a avaliação do comportamento espectral das diferentes espécies de gramíneas em laboratório de espectrorradiometria. Por meio dos resultados foi possível observar a possibilidade de diferenciação do comportamento espectral dos capins Colômbio (*Panicum maximum*) e Elefante (*Pennisetum purpureum Schum*).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Elaboração do equipamento óptico espectral MSPAT

Na elaboração do equipamento foram utilizados os componentes eletrônicos listados na Tabela 2. Após reunir o aparato eletrônico necessário, foi iniciado a definição dos parâmetros lógicos de aquisição dos dados pelo sensor, para operação sobre o Arduino UNO R3. A programação foi realizada no *software* Arduino IDE por meio da linguagem C++. A partir do levantamento do custo em USD (United States Dollar), devido alguns componentes serem importados, obteve-se um valor total de \$ 90,16, que na cotação atual corresponde a R\$ 480,82. É importante perceber que o custo dos componentes eletrônicos não corresponde ao custo total do equipamento, pois não foram considerados os valores para impressão 3D, mão de obra e estrutura necessária para calibração.

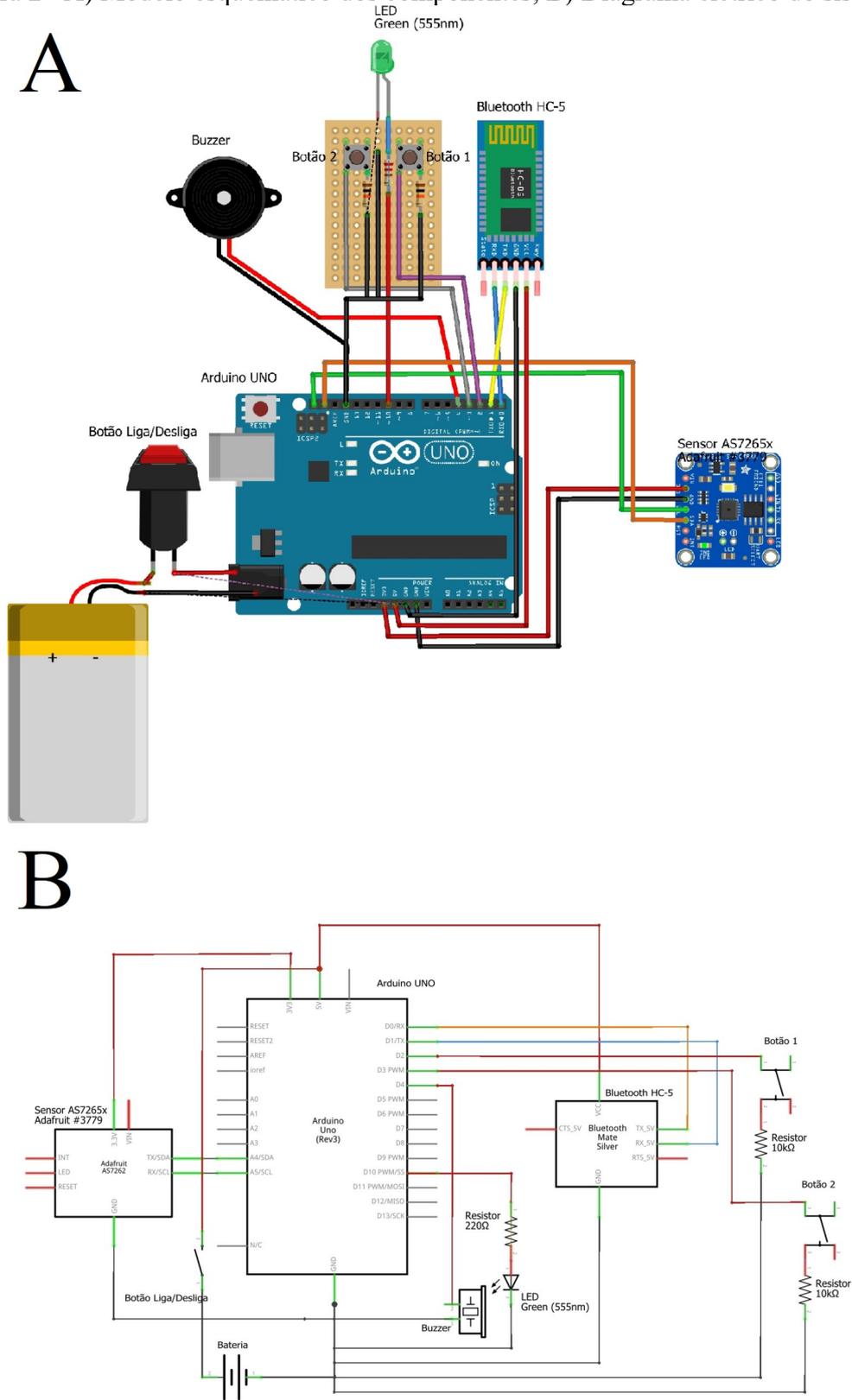
Tabela 2 - Tabela dos componentes eletrônicos para montagem do MSPAT

Componentes	Qtd.	Preço (USD)
Chave Táctil Push-Button	2	0,94
Módulo Bluetooth HC-05	1	1,54
Arduino Uno R3	1	7,55
Led Verde 5mm	1	0,39
Buzzer Ativo	1	1,08
Botão Interruptor Liga Desliga	1	0,74
Resistor 220 Ohms	1	0,14
Resistor 10k Ohms	2	0,02
Sensor óptico AS7265x	1	64,95
Bateria 3000 mAh 12V	1	12,81
Total		\$ 90,16

Fonte: Autor (2022).

Após a preparação do *script* a ser carregado no Arduino UNO, é apresentado na Figura 2 a definição do modelo esquemático e elétrico das ligações entre os componentes.

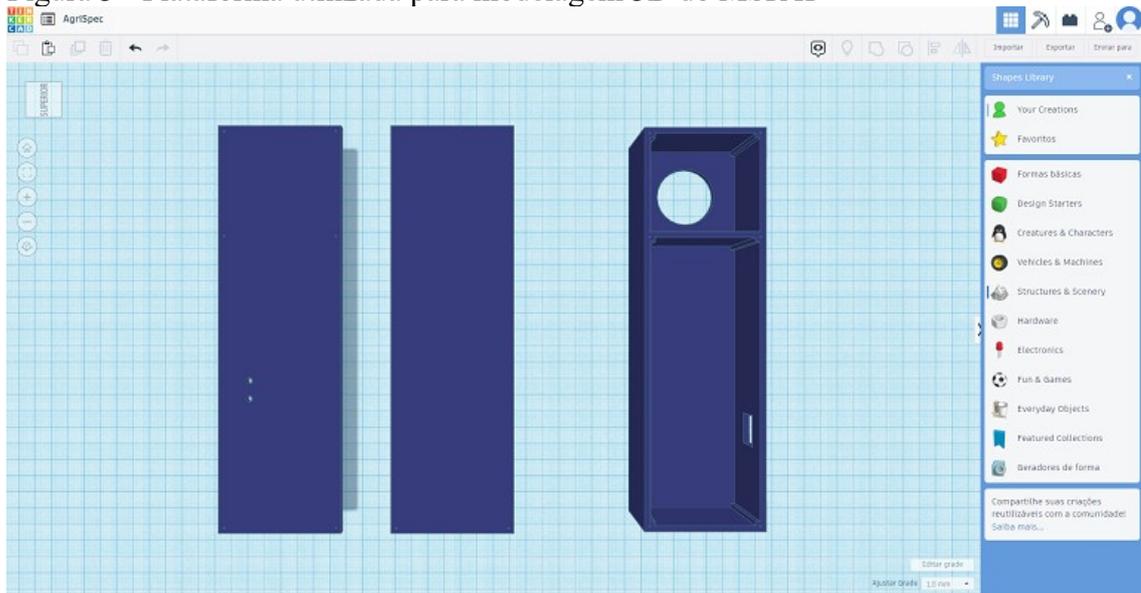
Figura 2 - A) Modelo esquemático dos componentes; B) Diagrama elétrico do sistema



Fonte: Autor (2022).

Em seguida, o modelo 3D do equipamento foi elaborado por meio da plataforma Tinkercad®, do qual é disponibilizada *online* e gratuitamente no seu *site* (www.tinkercad.com). Na Figura 3 é possível visualizar a interface da plataforma utilizada no desenvolvimento do modelo 3D do equipamento proposto.

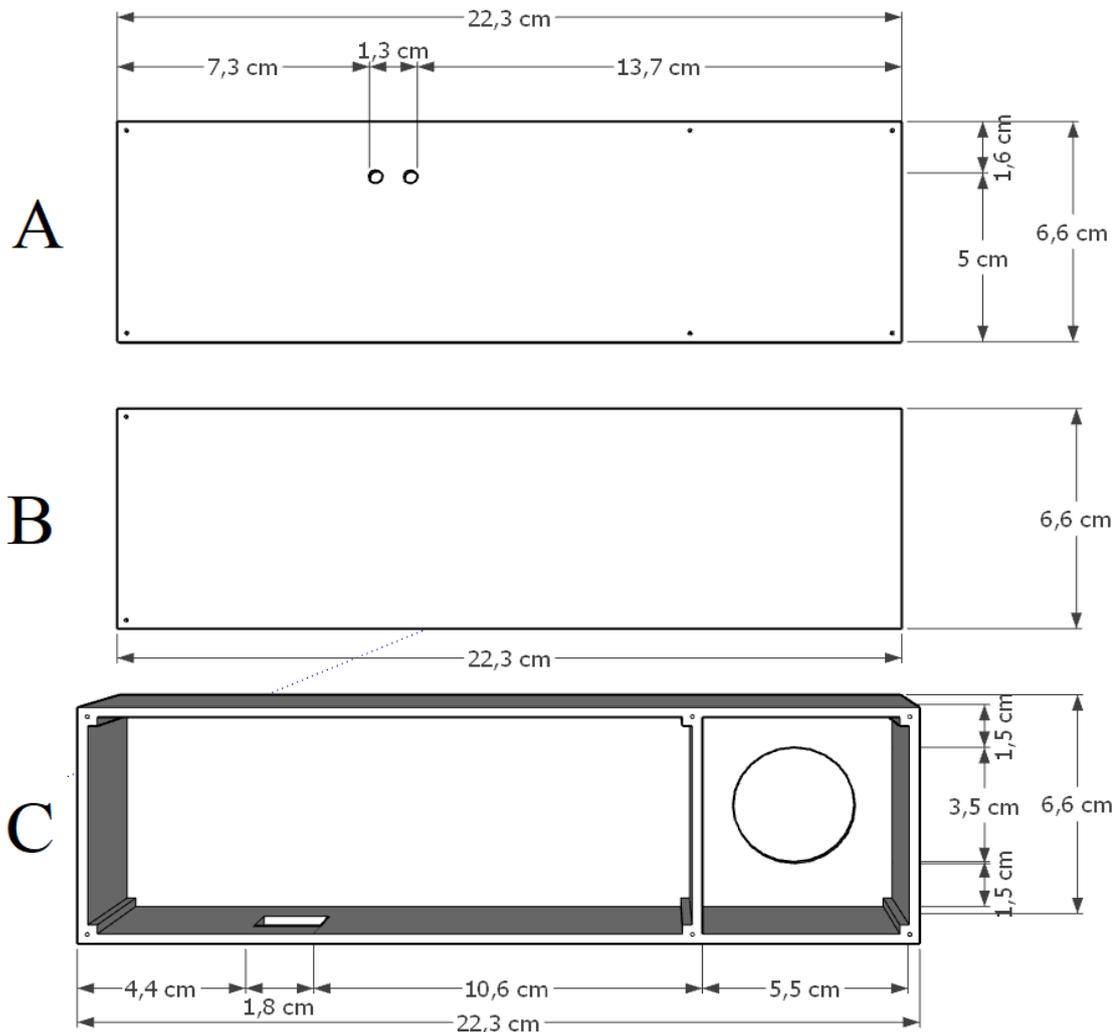
Figura 3 - Plataforma utilizada para modelagem 3D do MSPAT



Fonte: Autor (2022).

As peças do modelo tridimensional foram definidas a fim de obter-se três partes. Conforme a Figura 4, é possível visualizar as dimensões de cada parte do equipamento. A peça da Figura 4C foi utilizada para suporte dos componentes eletrônicos, como a bateria, Arduino UNO, Módulo *Bluetooth* e o *Buzzer*, obtendo também a câmara do equipamento que possui o orifício de abertura de disposição da folha. A parte apresentada na Figura 4B foi utilizada para servir como pinça para auxiliar a fixação da folha na câmara do equipamento e para impedir a entrada de luz no momento da aquisição dos dados. Já o componente da Figura 4A foi empregado para fechar o lado superior do equipamento, por meio de seis perfurações ao longo de sua extremidade para passagem dos parafusos. Esta mesma peça também serve de suporte para fixação dos dois botões e do sensor espectral.

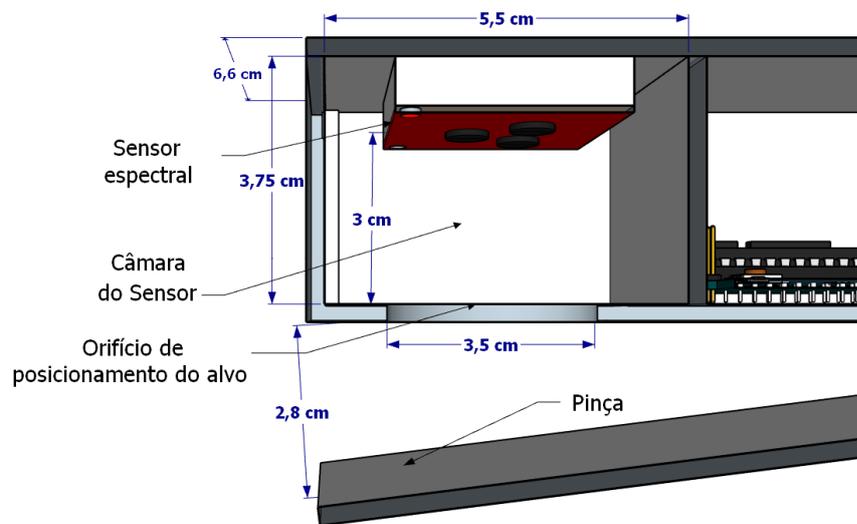
Figura 4 - Vista superior das peças: A) tampa; B) pinça; C) suporte dos componentes eletrônicos



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 5 é possível verificar as dimensões da câmara do equipamento do qual é instalado o sensor espectral e o posicionamento do sensor em relação ao alvo. Para aquisição dos dados pelo sensor, a folha avaliada deve ser inserida no espaço entre a pinça e o orifício de posicionamento do alvo. Pressionando-se a pinça a câmara estará fechada e o ambiente ficará disponível para a aquisição dos dados. Na câmara ocorre a mensuração da reflectância quando o operador pressiona o botão programado para acionar o sensor espectral.

Figura 5 - Corte lateral com as dimensões da câmara do sensor



Fonte: Autor (2022).

Após a definição do modelo 3D na plataforma Tinkercad® o projeto foi salvo no formato STL (*Standard Tessellation Language*) e processado pela impressora 3D do Laboratório de Sistemas e Mídias Digitais da UFC. A impressão teve como resultado as peças apresentadas na Figura 6.

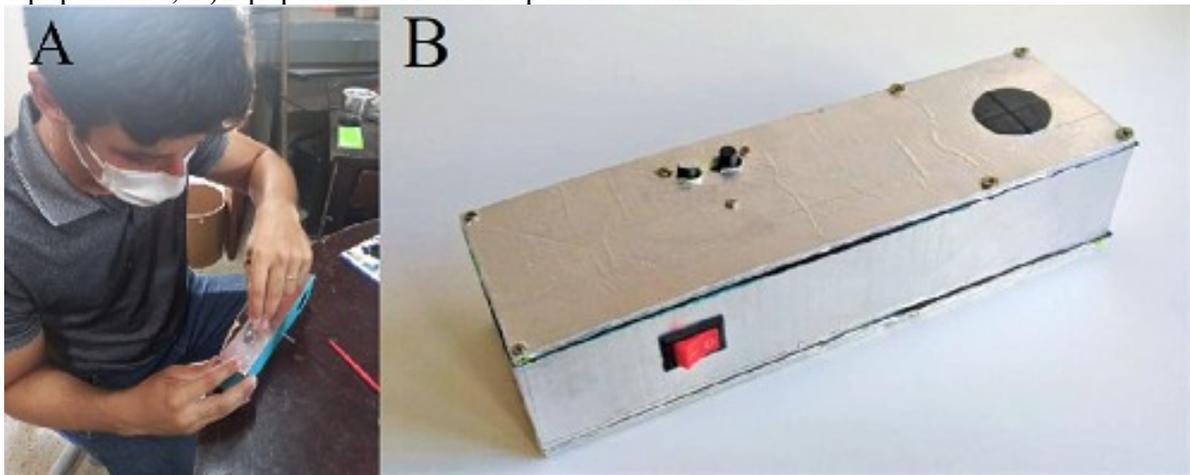
Figura 6 - Produto gerado com a impressão 3D a partir do modelo projetado



Fonte: Autor (2022).

Com as peças impressas foi realizada a montagem e alocação dos componentes eletrônicos no interior do equipamento. Na constituição da superfície na parte interna da câmara foi aplicada a tinta preta acrílica *Black 3.0* fabricado pela empresa *Culture Hustle* (www.culturehustle.com). A utilização da tinta tem como objetivo tornar o ambiente da câmara mais escuro possível, amenizando a influência das superfícies internas ao equipamento sobre a resposta do sensor espectral. Na parte externa do equipamento optou-se por revestir totalmente com fita aluminizada, buscando mitigar a influência do ambiente externo sobre o equipamento. Após finalizada a preparação do equipamento obteve-se o produto intitulado MSPAT, conforme apresentado pela Figura 7.

Figura 7 - A) Processo de fixação da fita aluminizada sobre a superfície externa do equipamento; B) Equipamento revestido pela fita aluminizada



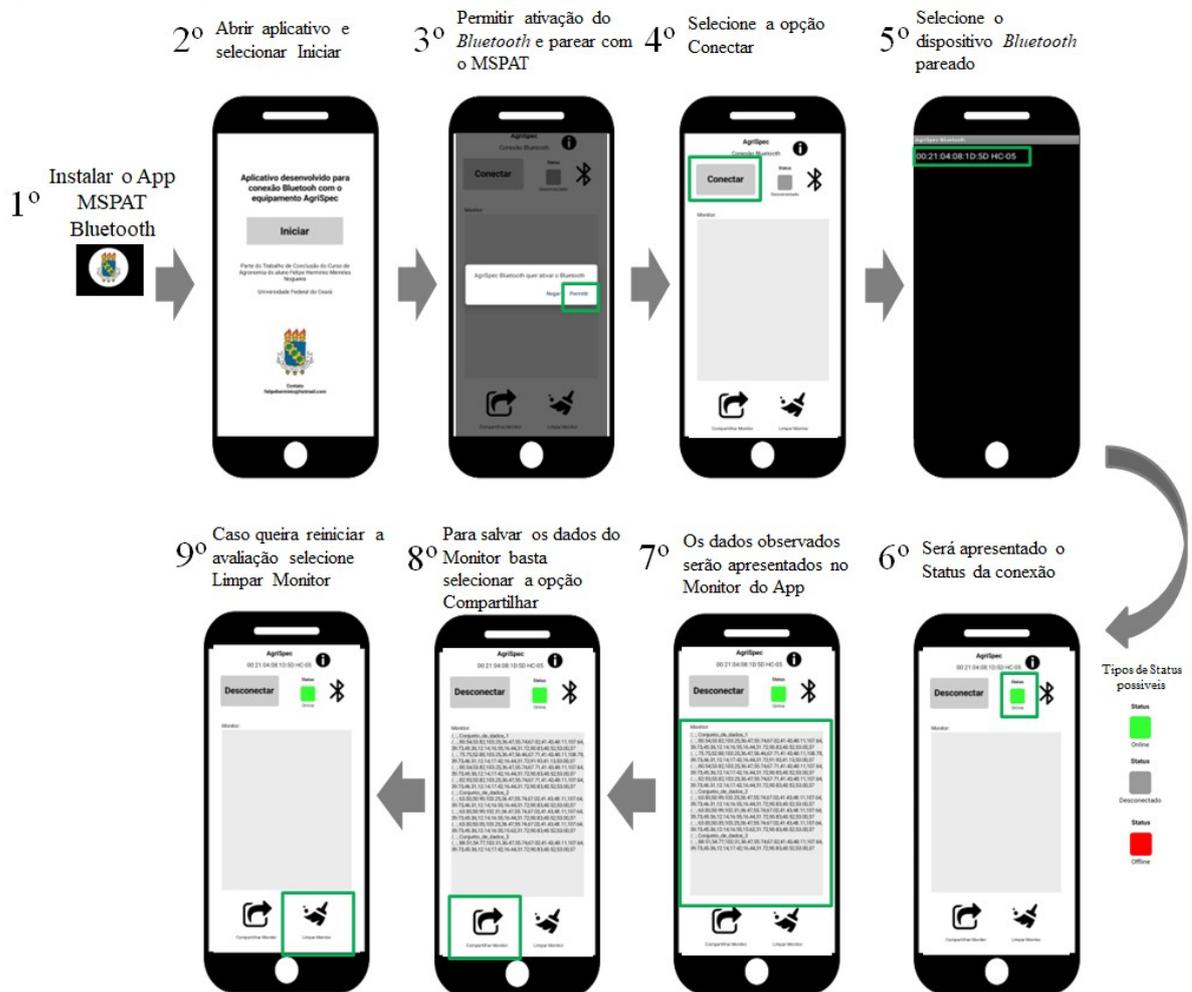
Fonte: Autor (2022).

4.2 Desenvolvimento do aplicativo *MSPAT Bluetooth*

A operação necessária para obtenção dos dados com o MSPAT (Multispectral Soil Plant Analysis Tool) ocorre via conexão *Bluetooth* por meio de um *smartphone*, conforme apresentado pela Figura 8. De acordo com o fluxograma, primeiramente se faz necessário instalar o aplicativo “MSPAT Bluetooth”, desenvolvido através da plataforma MIT App Inventor (www.appinventor.mit.edu). Após abrir o aplicativo será necessário permitir a opção de ativar o *Bluetooth* para que o dispositivo seja pareado com o equipamento MSPAT. Após

concluir o pareamento, deve-se selecionar a opção “Conectar” para apresentar a lista de dispositivos *Bluetooth* disponíveis. Selecionando a opção HC-05, que corresponde ao *Bluetooth* do MSPAT, será apresentado o status da conexão como *Online*. Dessa forma, com a operação do equipamento os dados do sensor serão transmitidos para o *smartphone* via *Bluetooth*. Concluída a análise com o MSPAT, para salvar os dados é necessário selecionar o ícone de “Compartilhar monitor”, do qual fornecerá as opções para salvar pelo gerenciador de arquivos no dispositivo ou transferir via internet (e-mail ou redes sociais). Para reiniciar a avaliação basta selecionar o botão “Limpar monitor”.

Figura 8 - Fluxograma de utilização do aplicativo MSPAT Bluetooth

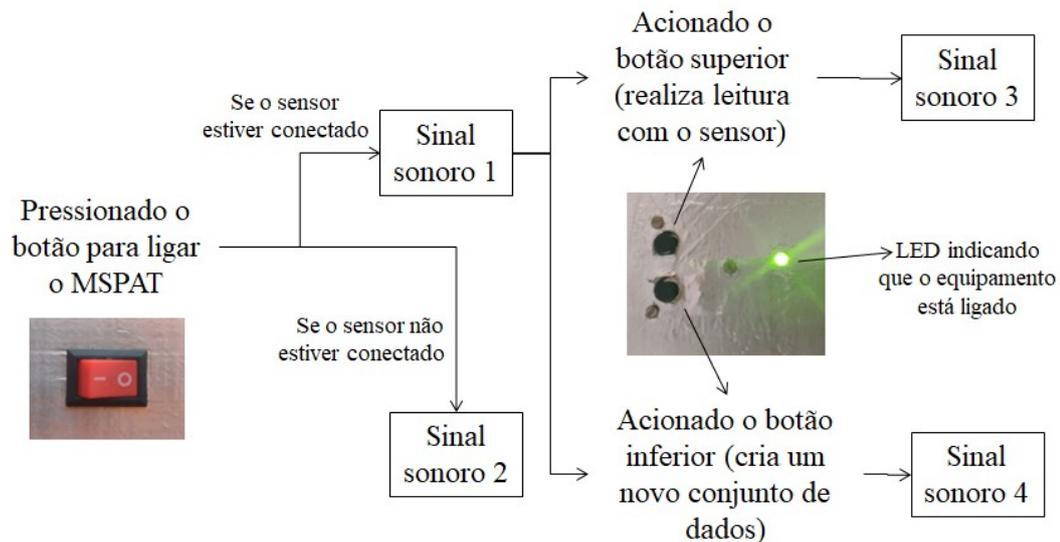


Fonte: Autor (2022).

No manuseio do MSPAT são aplicados alguns recursos de comunicação sonora com o operador, pela programação do *Buzzer* integrado ao sistema. Na Figura 9 é apresentado o fluxograma com os possíveis sinais sonoros apresentados na utilização do equipamento, são

eles: *i*) Sinal sonoro 1 (3 bips de 2000 Hz com intervalo de 200 milissegundos), o programa foi iniciado e o sensor está conectado; *ii*) Sinal sonoro 2 (11 bips numa escala de 2500 a 1500 Hz com intervalo de 50 milissegundos três vezes), indica que o sensor não está conectado; *iii*) Sinal sonoro 3 (2 bips de 2300 Hz com intervalo de 150 milissegundos), significa que foi criado um novo conjunto de dados; e *iv*) Sinal sonoro 4 (1 bip de 2100 Hz), som para indicar que a leitura com o sensor foi realizada com sucesso.

Figura 9 - Fluxograma dos sinais sonoros utilizados pelo MSPAT



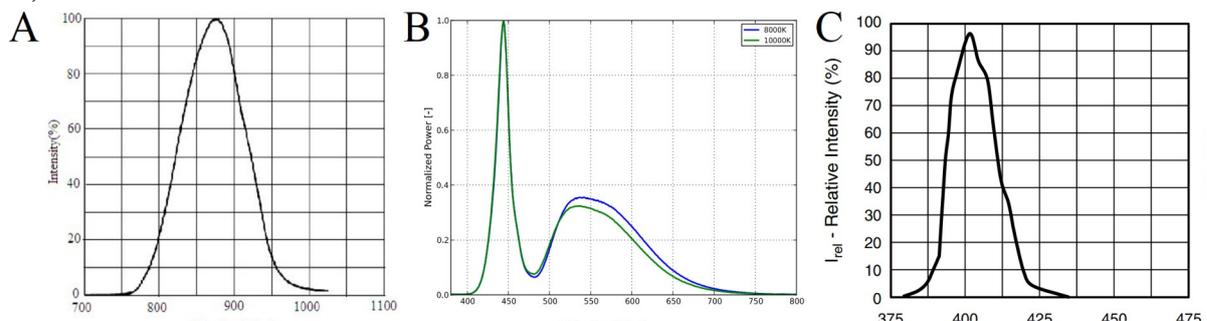
O sensor AS7265x é um componente eletrônico que possui avaliações positivas sobre a sua utilização na agricultura (MOINARD et al, 2021). A aplicação deste sensor se torna pertinente devido suas características ópticas e praticidade para aplicação. Em sua estrutura são utilizados três sensores que formaram a tríade dos sensores AS72651, AS72652 e AS72653, conforme apresentado pela Figura 10.

Figura 10 - Sensor espectral AS7265x



Este sensor é capaz de avaliar a reflectância em 18 bandas diferentes do espectro eletromagnético, desde o ultravioleta, região do visível e infravermelho próximo, enquadrando-se na categoria de sensor superespectral (10 e 20 bandas) (OLIVEIRA et al., 2020). A energia refletida captada pelo sensor é originada de três LED's já embarcados no componente eletrônico, sendo o UV SMD LED PLCC-2 o emissor no ultravioleta, LUXEON 3014 para emissão de luz branca no espectro visível e o SIR19-21C/TR8 no infravermelho. No Gráfico 3 é possível observar o comportamento dos comprimentos de onda emitidos pelos LED's.

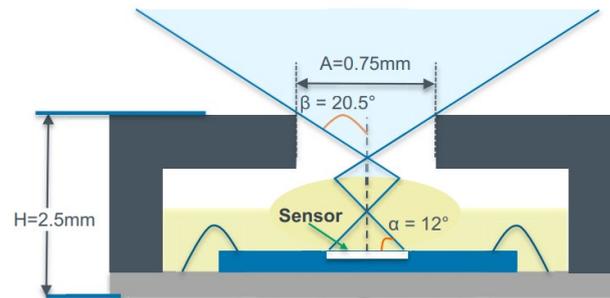
Gráfico 3 - Comportamento espectral dos LED's emissores A) infravermelho; B) luz visível; C) ultravioleta



Fonte: MICROELECTRONICS (2002), SHINOMIYA (1994) e RESISTORS (2012).

No manuseio do sensor AS7265x buscou-se conhecer suas características ópticas para a definição FOV no MSPAT. Na Figura 11 é apresentado que o ângulo de abertura do sensor é de 20,5°. Deste modo, a distância adotada do sensor até o alvo foi de 3 cm, como apresentado na Figura 5. O diâmetro da área de sensibilidade calculado foi de 2,24 cm, porém considerando a distância entre cada sensor da tríade e a remoção do efeito da borda do equipamento definiu-se o diâmetro do orifício com 3,5 cm.

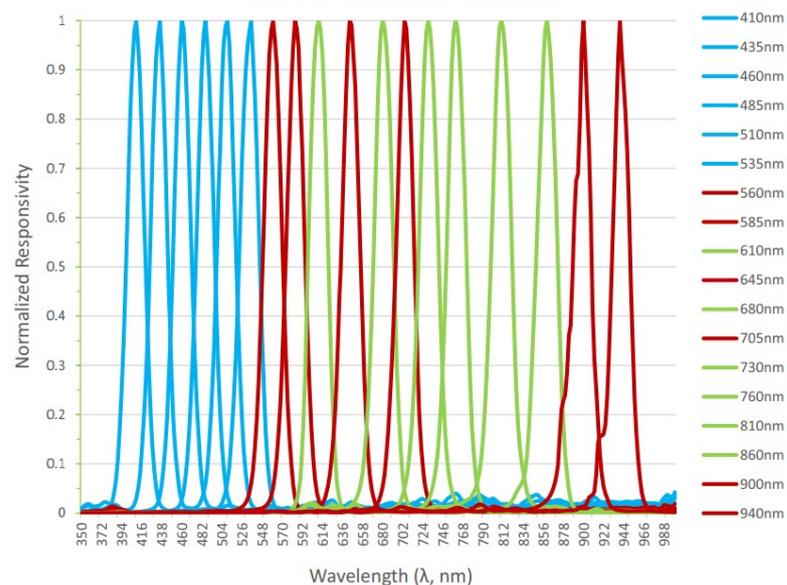
Figura 11 - Características ópticas do sensor AS7265x



Fonte: Valtersson (2018).

A partir de cada leitura do sensor é mensurada a reflectância em 18 bandas que correspondem aos comprimentos de onda 410, 435, 460, 485, 510, 535, 560, 585, 610, 645, 680, 705, 730, 760, 810, 860, 900 e 940 nm. No Gráfico 4 é possível observar a responsividade de cada banda sobre o espectro eletromagnético.

Gráfico 4 - Responsividade das bandas do sensor AS7265x
AS72651 + AS72652 + AS72653



Fonte: Valtersson (2018).

4.3 Avaliação do desempenho de equipamentos ópticos na cultura do milho

Após a elaboração do equipamento deu-se início ao estudo em campo sobre a avaliação do potencial do sensor na cultura do milho. Foi conduzido o experimento com a

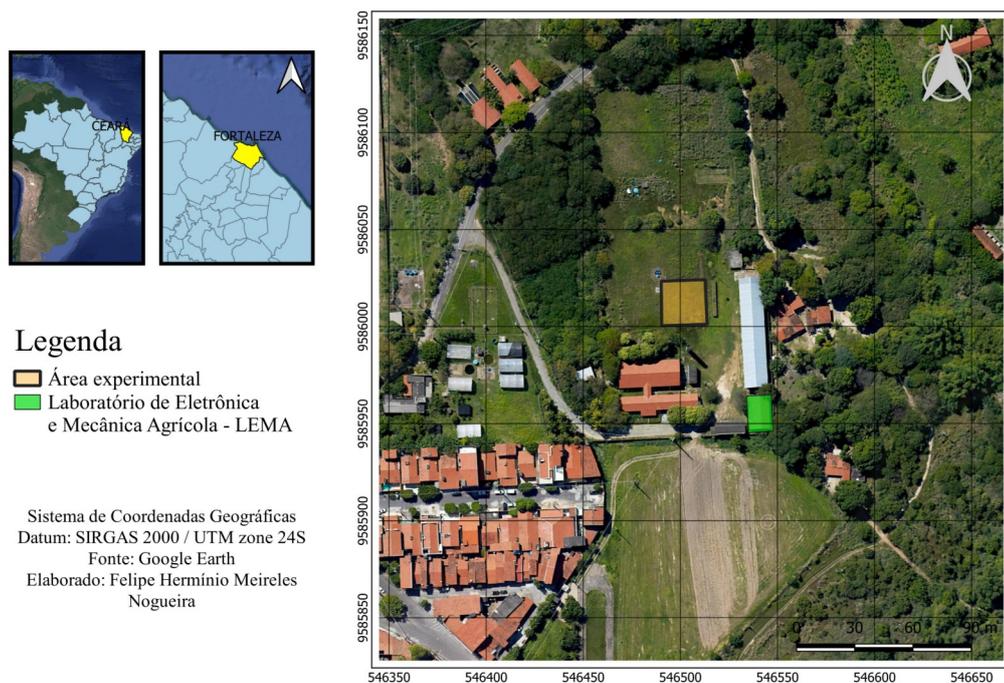
implantação da cultura em campo com duas abordagens, sendo estas, a primeira em vaso e a segunda em solo agrícola, utilizando-se diferentes doses de nitrogênio (0, 30, 60, 120, 180 e 240 kg.ha⁻¹). Ao longo do experimento foram realizadas avaliações por sensores ópticos, morfológicos e determinação do nitrogênio na folha.

4.3.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado na área experimental do Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA) localizado na Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza-CE. Geograficamente situa-se a -3.745294 de latitude, -38.581159 de longitude e altitude de 19 m. De acordo com a classificação de Köppen, a área experimental está localizada em clima Aw. A classificação do solo na área de estudo é um Argissolo vermelho-amarelo de textura franco-argilo-arenosa. A cultivar de milho utilizada foi a AG-1051, do qual é recomendada para produção de silagem e milho verde.

Figura 12- Mapa de Localização da área de estudo

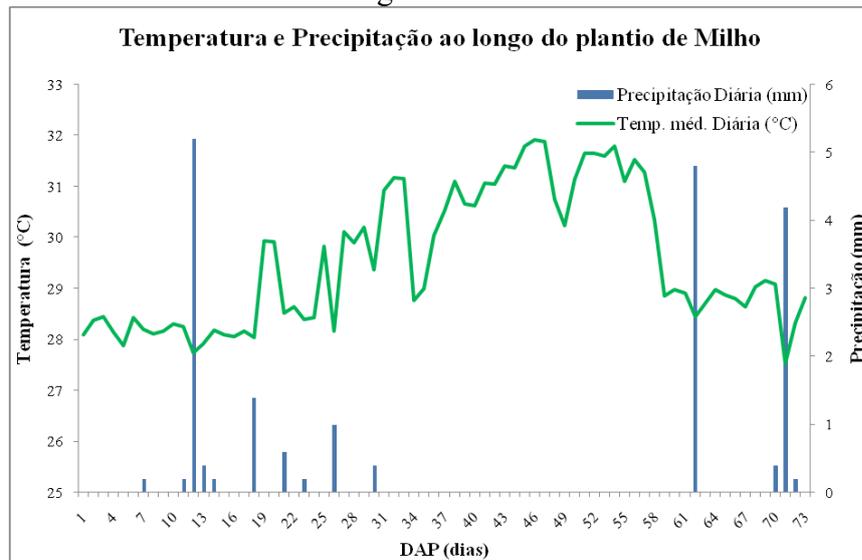
Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Google Earth (2022).

Com base nos dados disponibilizados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) na plataforma BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) tornou-se possível apresentar o comportamento de algumas variáveis meteorológicas da estação automática de Fortaleza-CE durante o experimento, conforme apresentado pelo Gráfico 5. A precipitação total acumulada ao longo do ciclo foi de 19,4 mm.

Gráfico 5 - Comportamento da temperatura e precipitação durante o cultivo do milho em solo agrícola



Fonte: INMET (2022).

4.3.2 Delineamento experimental

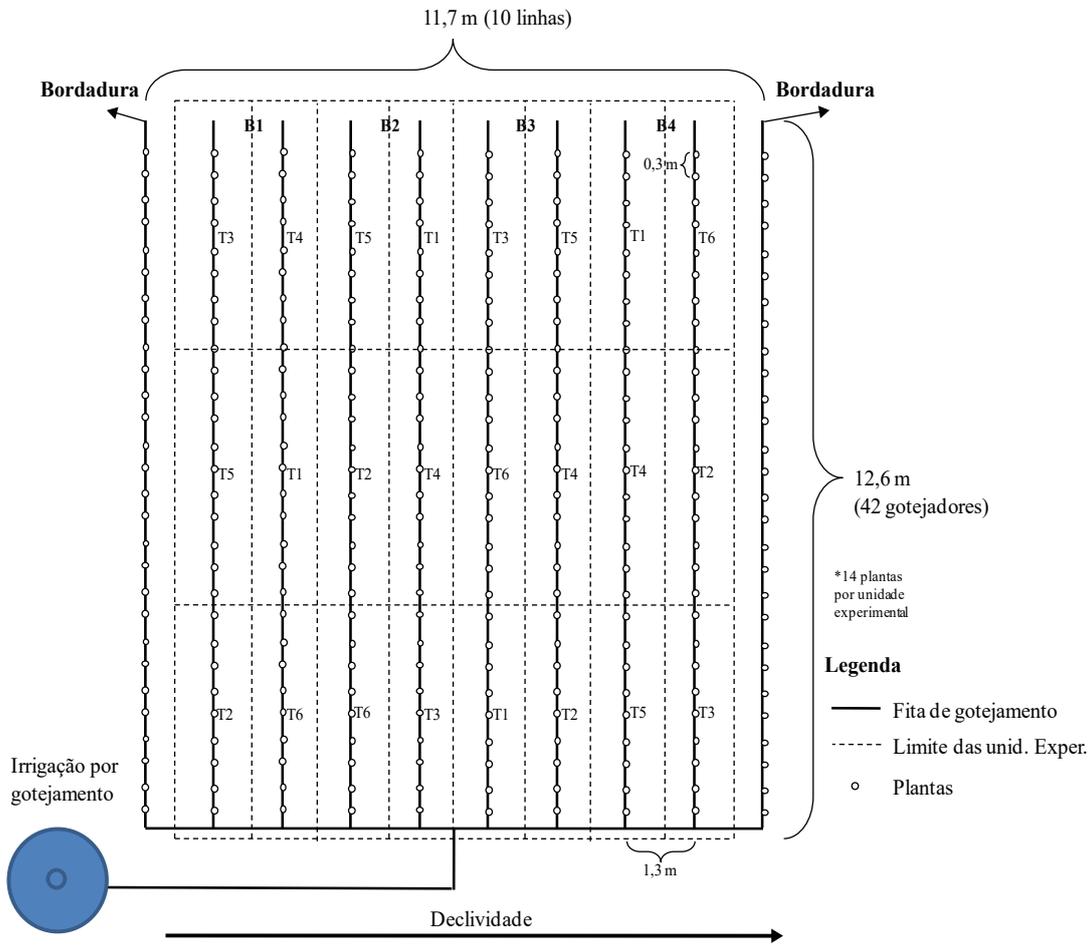
O delineamento adotado para o plantio de milho em solo agrícola foi de blocos casualizados (DBC), parcelado a cada duas fitas de gotejamento e com quatro repetições, no sentido a declividade, como apresentado pela Figura 13. Os tratamentos foram estabelecidos a partir das doses de nitrogênio apresentadas por Coelho (2007) para o plantio de milho em agricultura irrigada de alta tecnologia, de forma que a dose adequada normalmente situa-se de 120 a 160 kg.ha⁻¹. Por isso utilizou-se os tratamentos T1 (0 kg.ha⁻¹ de N), T2 (30 kg.ha⁻¹ de N), T3 (60 kg.ha⁻¹ de N), T4 (120 kg.ha⁻¹ de N), T5 (180 kg.ha⁻¹ de N) e T6 (240 kg.ha⁻¹ de N), conforme apresentado pela Tabela 3.

Tabela 3- Doses de nitrogênio correspondentes aos tratamentos utilizados

Tratamento	Dose de N (kg.ha ⁻¹)
T1	0
T2	30
T3	60
T4	120
T5	180
T6	240

Fonte: Autor (2022).

Figura 13 - Croqui da área experimental de milho em solo agrícola

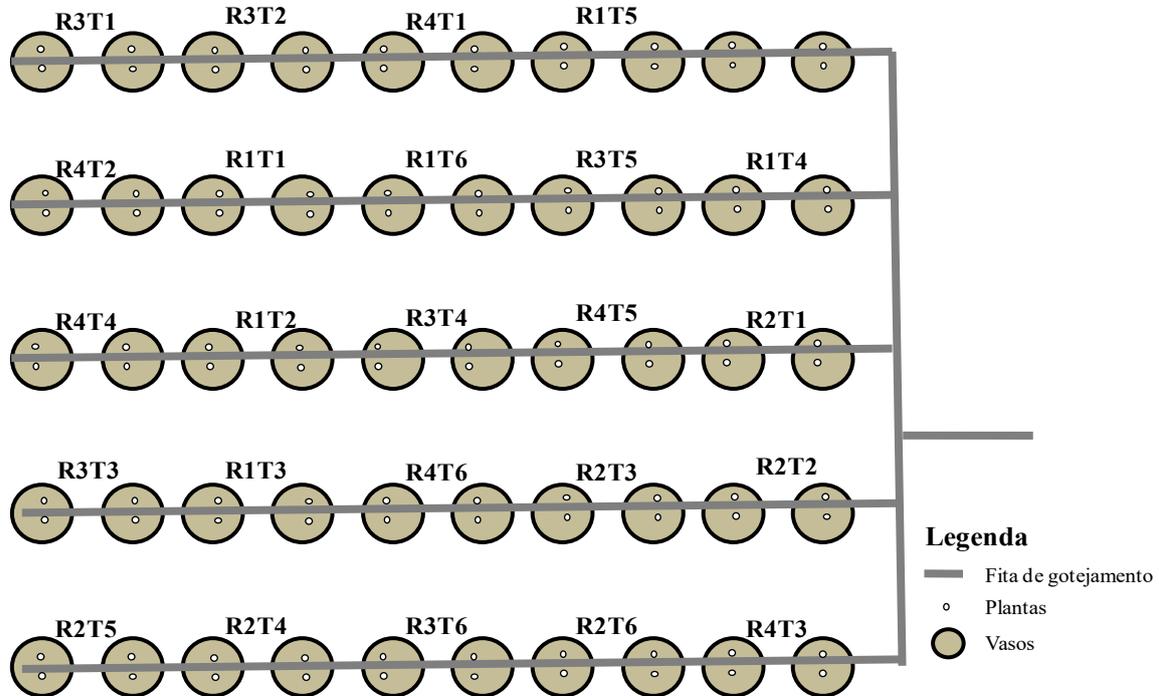


Fonte: Autor (2022).

Na Figura 14 é apresentado o delineamento adotado para o plantio de milho em vaso, do qual foi do tipo inteiramente casualizado (DIC) com quatro repetições. As doses de

nitrogênio aplicada correspondem aos mesmos valores adotados no experimento em solo agrícola.

Figura 14 - Delineamento experimental para o milho cultivado em vaso

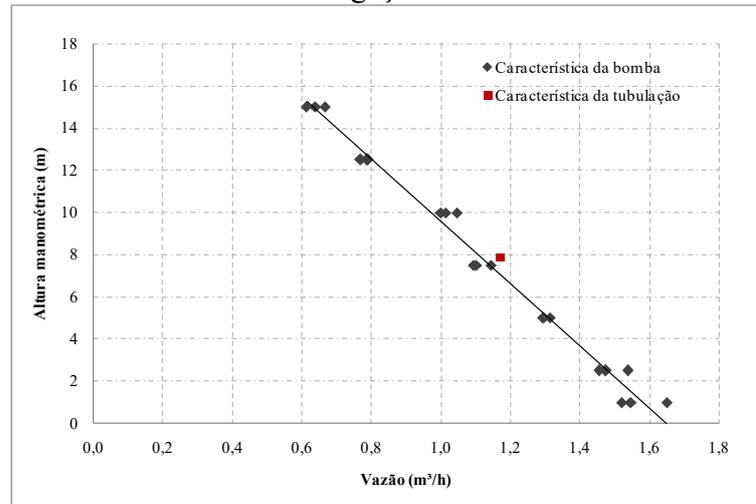


Fonte: Autor (2022).

4.3.3 Sistema de irrigação

O método de irrigação adotado foi localizado, por meio de um sistema de gotejamento, utilizando-se sensores capacitivos para monitorar a umidade do solo. Para bombeamento da água foi utilizada a eletrobomba QB-60, que possui uma potência de 0,5 CV. No Gráfico 6 estão apresentadas as características da bomba e tubulação observadas durante o seu funcionamento.

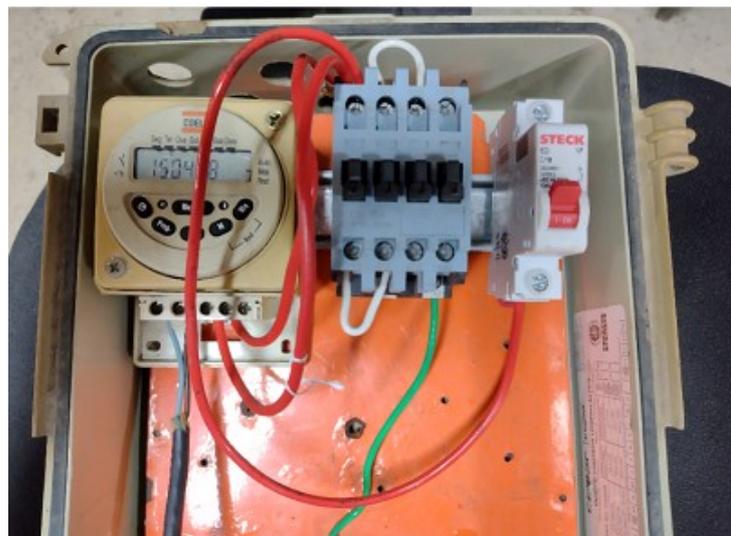
Gráfico 6 - Característica da bomba QB-60 e da tubulação utilizada no sistema de irrigação



Fonte: Autor (2022).

O sistema de irrigação foi programado por meio da utilização do temporizador digital da marca Coel[®], modelo RTST20, com alimentação na rede elétrica de 220V. Entre a eletrobomba e o temporizador foi utilizado um contator para controlar a carga de acionamento da bomba. Outro elemento importante no sistema elétrico da irrigação foi a utilização do disjuntor, evitando a operação da bomba em momentos de sobrecarga da rede elétrica, fazendo com o que sistema seja desativado (Figura 15).

Figura 15 - Sistema elétrico para acionamento da eletrobomba



Fonte: Autor (2022).

Na irrigação utilizou-se a água de um poço artesiano para preencher uma caixa d'água de 5000 L que forneceu água por gravidade, utilizando-se uma bóia de nível mecânico, para uma caixa menor de 1000 L. Na Figura 16 é possível observar no sistema hidráulico a tubulação de retorno da água para a caixa de 1000 L com um registro no retorno para controle

Figura 16 - Reservatório de água para irrigação



da pressão nas fitas gotejadoras.

Fonte: Autor (2022).

No início das fitas gotejadoras foi adaptado uma tomada de pressão para mensurar e ajustar, por meio de um manômetro de precisão, a pressão adotada de 8 m.c.a., conforme apresentado pela Figura 17.

Figura 17 - Mensuração da pressão com auxílio de um manômetro



Fonte: Autor (2022).

Após a instalação do sistema de irrigação foi realizado o teste de uniformidade e mensuração da vazão. Foram avaliadas 5 fitas gotejadoras no sistema de irrigação em solo agrícola e em vaso. A mensuração do volume de água com um recipiente ocorreu ao longo de 8 gotejadores durante um minuto, conforme a Tabela 4. Considerando o número de gotejadores e o volume de água médio, o sistema de irrigação em solo agrícola apresentou uma vazão de 516,6 L/h, enquanto no sistema em vaso registrou-se uma vazão de 45 L/h. Na Figura 18 são apresentados os recipientes utilizados para leitura do volume de água obtido nos gotejadores em vaso e em solo agrícola.

Tabela 4 - Avaliação do sistema de irrigação

	Volume dos recipientes no sistema de irrigação em solo agrícola (mL)					Volume dos recipientes no sistema de irrigação em vaso (mL)				
	Linha 1	Linha 3	Linha 5	Linha 7	Linha 9	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5
	21	20	20	21	21	15	14	15	13	14
	20	19	22	20	19	14	14	14	16	14
	22	23	22	22	21	15	15	14	15	15
	20	19	23	20	18	15	15	17	14	15
	21	21	20	20	21	13	17	17	13	16
	20	23	20	21	20	14	15	15	15	16
	21	19	23	20	19	14	15	16	16	17
	21	22	21	22	21	16	14	14	16	17
Média	21	20,5	21,5	20,5	20,5	14,5	15,0	15,0	15,0	15,5
Desv.Pad.	0,71	1,75	1,30	0,89	1,20	0,93	0,99	1,28	1,28	1,20
Coef. Var.	3,37%	8,55%	6,06%	4,32%	5,83%	6,38%	6,61%	8,54%	8,54%	7,71%

Fonte: Autor (2022).

Figura 18 - Leitura do volume de água nos coletores para teste de uniformidade A) em solo agrícola; B) em vaso



Fonte: Autor (2022).

4.3.4 Preparo do solo

Na preparação do solo para o plantio ocorreu a utilização de alguns implementos agrícolas, dentre eles a grade, enxada rotativa e encanteiradora, para a formação de canteiros com 1,2 m de solo enleirado. Esta medida foi adotada para impossibilitar o efeito da adubação nas parcelas laterais.

A preparação do solo em vaso ocorreu com a utilização arisco para abastecer 50 vasos de 8 litros. Após depositado o arisco no vaso, o solo foi inundado e drenado por gravidade cinco vezes ao longo do mesmo dia. Isto ocorreu com o objetivo de retirar possíveis elementos químicos que poderiam interferir nos efeitos das adubações.

4.3.5 Plantio da cultura do milho

O plantio do milho em solo agrícola ocorreu no dia 27/09/2021 (Figura 19A), com colheita no dia 08/12/2021, aos 72 dias após o plantio. Já o milho em vaso foi plantado no dia 27/10/2021, conforme a Figura 19B, e permaneceu no vaso até o dia 14/12/2021, com 48 dias após o plantio.

Figura 19 - Plantio do milho em A) solo agrícola; B) vaso



Fonte: Autor (2022).

4.3.6 Plano de adubação

Os cálculos de adubação no experimento em solo agrícola foram realizados com base em unidade de área, enquanto para os vasos calculou-se com base no volume. Após mensuração com trena, o volume de solo no vaso do tronco de cilindro foi de 8,4 dm³. A adubação do experimento em campo foi realizada a partir dos resultados apresentados em análise química do solo e a necessidade da cultura. Já para o vaso as recomendações foram realizadas considerando todos os nutrientes com baixa fertilidade. Nesse sentido definiu-se o plano de adubação apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Quantidades e data de aplicação dos fertilizantes utilizados

Data	Quantidade dos adubos aplicados
<i>Experimento conduzido em solo agrícola</i>	
27/09/21	7 g/planta de KCl e 60 g/planta de Super Simples
15/10/21	T2 com 10,59 g e T3, T4, T5, T6 com 21,17 g de Ureia e 7 g/planta de KCl
19/10/21	21g de Ubifol
05/11/21	T4, T5 e T6 com 21,17 g de Ureia
22/11/21	T5 com 21,17 g de Ureia e T6 com 42,34 g de Ureia
<i>Experimento conduzido em vaso</i>	
27/10/21	4,2 g /vaso de Super Simples e 0,7 g/vaso de KCl
08/11/21	T2, T3, T4, T5, T6 com 0,56g/vaso de Ureia e 0,7 g de KCl/vaso
10/11/21	0,05 g/vaso de Ubifol
11/11/21	T3, T4, T5, T6 com 0,56g/vaso de Ureia e 0,64 g/ vaso de Super Simples
13/11/21	T4, T5, T6 com 0,56g/vaso de Ureia e 0,64 g/ vaso de Super Simples
16/11/21	0,4 g/vaso de Sulfato de magnésio
17/11/21	T4, T5, T6 com 0,56g/vaso de Ureia e 0,64 g/ vaso de Super Simples
19/11/21	T5, T6 com 0,56g/vaso de Ureia e 0,6 g/vaso de Sulfato de magnésio
22/11/21	T5, T6 com 0,56g/vaso de Ureia e 0,4 g/vaso de Sulfato de magnésio
25/11/21	T6 com 0,56g/vaso de Ureia e 0,05 g/vaso de Ubifol
29/11/21	T6 com Ureia 0,56g/vaso

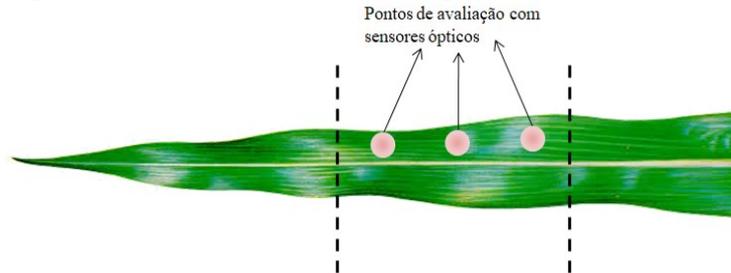
Fonte: Autor (2022).

4.3.7 Aquisição dos dados com equipamentos ópticos por espectrorradiometria

As avaliações dos sensores nas folhas de milho ocorreram tanto no experimento em solo agrícola quanto em vaso. Nas avaliações fez-se uso de três equipamentos ópticos aqui abordados, são eles: SPAD-502, MSPAT e o FieldSpec Pro FR 3. Nesta lógica, para que os dados obtidos pelos equipamentos possam ser comparados, as avaliações ocorreram em locais padronizados na folha. Definiu-se então em três pontos do terço médio da folha, posicionado na lateral da face adaxial da lâmina, de forma a evitar a nervura central, como mostra a Figura 20. Além do local da folha, também foi estabelecida a folha a ser avaliada, sendo sempre a

última folha recém-formada da planta. Para evitar efeito da remoção da folha nas avaliações seguintes, a planta que teve sua folha removida foi sinalizada com fita para que não fosse avaliada novamente.

Figura 20 - Padronização do local para avaliação na folha



Fonte: Autor (2022).

De acordo com o fluxo de trabalho em campo, as atividades ocorreram de forma que primeiramente foi realizado a leitura com o SPAD-502 seguido da avaliação com MSPAT, como apresentado pela Figura 21. A avaliação com os dois sensores portáteis ocorreram em uma folha por unidade experimental, quando ela ainda permanecia na planta. Em seguida, foi realizado um corte na base da folha avaliada, colocando-a em sacos de papel identificados e armazenando-as em caixa de isopor para o transporte imediato até o laboratório de espectrorradiometria (*dark-room*).

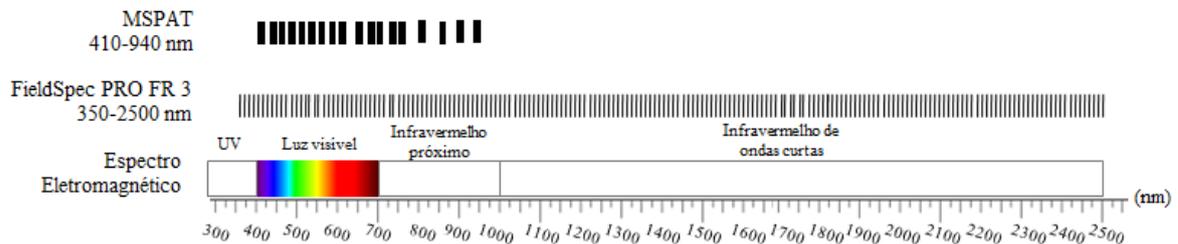
Figura 21 - Avaliação com os sensores ópticos A) SPAD-502; B) MSPAT



Fonte: Autor (2022).

No Laboratório de Geoprocessamento, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da UFC, cada amostra de folha foi submetida a leituras com o espectrorradiômetro FieldSpec PRO FR 3 (*Analytical Spectral Devices Inc.*). As mensurações espectrais foram realizadas em *dark-room*, de maneira contínua e em ambiente climatizado, utilizando a sonda de contato *Hi-Brite Contact Probe*. De acordo com Ribeiro et al. (2021), este sensor não-imageador combina três espectrômetros com resoluções espectrais de 3 nm (visível e infravermelho próximo) e 10 nm (infravermelho distante) reamostrados para 1 nm e realiza cálculos de reflectância em tempo real em um cone com um ângulo de 25° de *field-of-view* (FOV). Na Figura 22 é possível observar uma comparação sobre a cobertura do espectro eletromagnético do MSPAT, com largura de cada banda com 20 nm, em relação ao espectrorradiômetro.

Figura 22- Cobertura do espectro eletromagnético com as bandas do MSPAT e espectrorradiômetro



Fonte: Autor (2022).

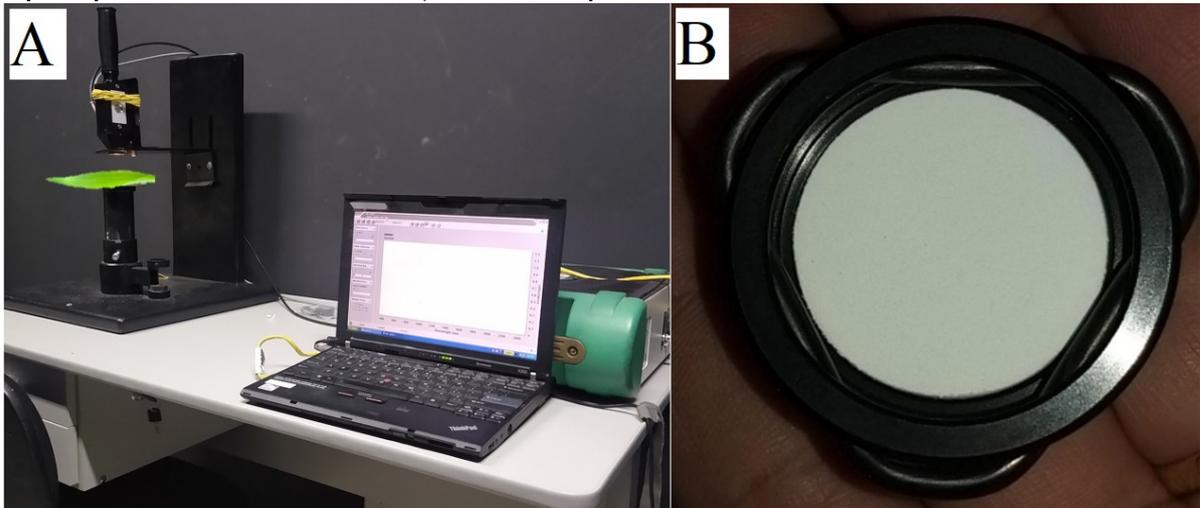
A calibração (*white reference*) do sensor para os fatores de reflectância (ρ) foi realizada a cada 20 minutos, por meio de leitura padrão em placa *Spectralon* (Figura 23B) com características bastante similares a uma superfície lambertiana, em que 100% da energia incidida é refletida em todas as direções (OLIVEIRA et al., 2020). Da mesma forma o MSPAT também foi submetido a calibração utilizando a placa branca com a leitura no início de cada avaliação.

Buscando realizar as leituras de forma análoga à realizada no campo, também foram coletados dados em três pontos da superfície das amostras, sendo cada dado representativo da média aritmética de 10 leituras. Isto permitiu a caracterização de cada amostra pela média total (30 leituras/amostra foliar). Na Figura 23A, pode-se observar a

geometria de aquisição dos dados no ambiente de trabalho. Os valores em números digitais foram convertidos em reflectância, por meio do software ViewSpecPro 6.2.

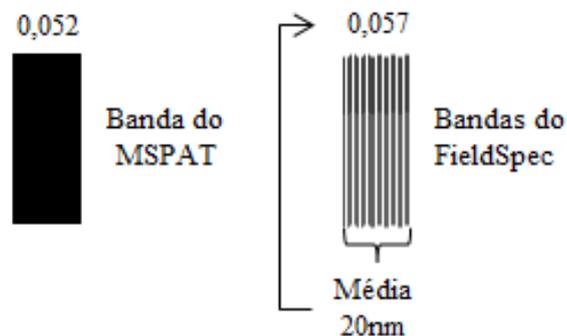
No tratamento dos dados do espectrorradiômetro, para comparação com o MSPAT, foi gerado a média das bandas que englobam cada banda do sensor AS7265x, conforme apresentado pela Figura 24

Figura 23 - Leitura com espectrorradiômetro utilizando A) Geometria de aquisição dos dados hiperespectrais em *dark-room*. B) Detalhe da placa branca de referência



Fonte: Autor (2022).

Figura 24- Comparação entre os dados do espectrorradiômetro e o MSPAT

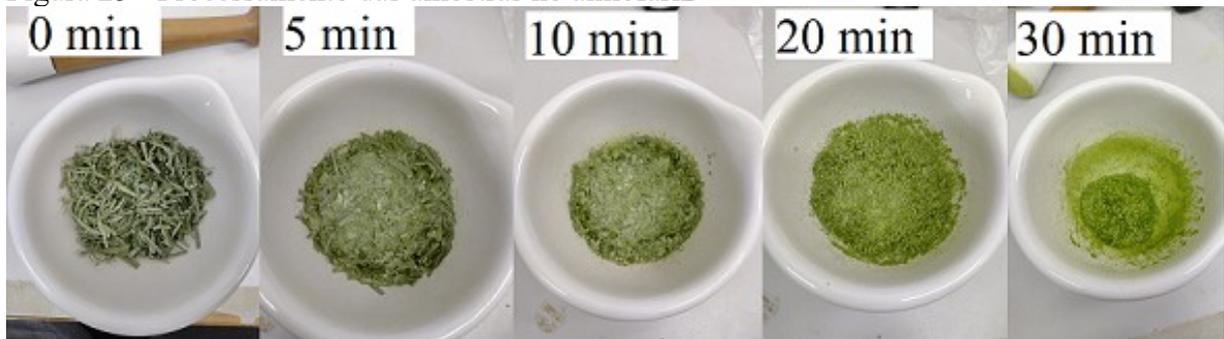


Fonte: Autor (2022).

4.3.8 Análise laboratorial para determinação de nitrogênio

Após a avaliação do tecido foliar com espectrorradiômetro o material foi rapidamente levado para estufa de pré-secagem a 60 °C por 48 horas ou até atingir peso constante. O material retirado da estufa foi macerado com o auxílio de um almofariz, conforme a Figura 25. Antes de iniciar a macerar cada amostra foi cortado com tesoura para facilitar a desfragmentação do material. Cada amostra de folha apresentou um tempo médio para conclusão do processo no almofariz de 30 minutos.

Figura 25 - Processamento das amostras no almofariz



Fonte: Autor (2022).

O armazenamento das amostras maceradas ocorreram por meio da utilização de sacos plásticos identificados, como apresentado pela Figura 26. Todos os sacos foram devidamente fechados e armazenados em ambiente escuro e seco, para evitar ao máximo sua deterioração.

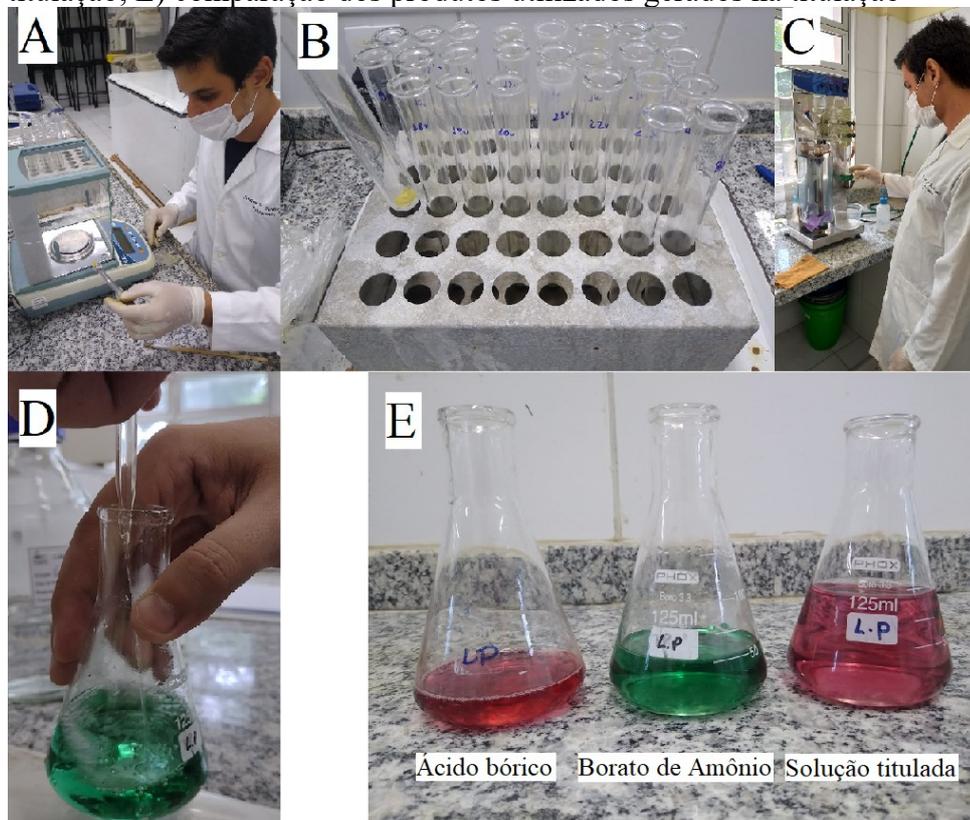
Figura 26 - Local de armazenamento das amostras maceradas



Fonte: Autor (2022).

Após maceração, o material foi levado para o Laboratório de Pedologia do Departamento de Ciência do Solo da UFC, para pesagem de 0,1 g por amostra de material macerado (Figura 27A). O material pesado foi utilizado para determinação do nitrogênio a partir da metodologia proposta por Kjeldahl e adaptado por De Andrade et al. (2001). A metodologia tem por princípio a conversão do N orgânico em NH_4^+ por digestão com H_2SO_4 (Figura 27B) e substâncias catalisadoras. Posteriormente, o NH_4^+ foi destilado por arraste de vapor após adicionar NaOH (Figura 27C) no produto da digestão. Logo em seguida, foi preparado uma solução de ácido bórico para ser utilizada como solução indicadora. No equipamento destilador a amônia é arrastada por vapor para o ácido bórico, formando o borato de amônio (cor verde-esmeralda, Figura 27D) para, por fim, ser titulado com a solução de H_2SO_4 padronizado até voltar a cor do ácido bórico (vermelho âmbar, conforme apresentado na Figura 27E).

Figura 27 - Etapas da metodologia para determinação do nitrogênio: A) Pesagem das amostras; B) digestão das amostras; C) destilação; D) titulação; E) comparação dos produtos utilizados gerados na titulação



Fonte: Autor (2022).

A tabulação dos valores de peso da amostra, volume de ácido utilizado na titulação e proporção do ácido sulfúrico padronizado possibilitou, por meio da equação proposta pela metodologia, calcular a concentração de nitrogênio por amostra em g de N/kg de folha.

4.3.9 Parâmetros morfológicos

As variáveis morfológicas foram avaliadas nas plantas cultivadas em vaso e em solo agrícola para acompanhar o desempenho agrônômico do milho em relação a adubação nitrogenada. Assim, foram conduzidas avaliações sobre: *i*) altura da planta, *ii*) número de folhas por planta, *iii*) espessura do colmo e *iv*) Índice de Área Foliar (IAF).

A mensuração da altura ocorreu por meio da utilização de uma régua graduada, do qual padronizou-se a mensuração até a última folha completa (Figura 26A e 26D). Na espessura do colmo utilizou-se um paquímetro para mensuração na base da planta (Figura 26B e 26E), evitando raízes adventícias e folhas mortas. O número de folhas por planta foi contabilizado a partir da observação da quantidade de folhas sadias completas na planta, de acordo com a Figura 26C e 26F.

Figura 28 - Parâmetros agronômicos avaliados: A) altura da planta em solo agrícola; B) espessura do colmo em solo agrícola; C) número de folhas em solo agrícola; D) altura da planta em vaso; E) espessura do colmo em vaso; F) número de folhas em vaso



Fonte: Autor (2022).

Após a remoção de todas as folhas de uma planta por unidade experimental, o material foi armazenado em saco de papel para transporte até o laboratório que possibilitou a utilização do equipamento integrador de folhas LI – 3100 (Li-Cor. Inc. Lincoln, Nebraska, USA) para determinação do IAF, como apresentado pela Figura 29.

Figura 29 - Mensuração do IAF



Fonte: Autor (2022).

A colheita do milho cultivado em solo agrícola foi realizada dia 08/12/2021, onde as espigas foram conduzidas para o LEMA (Figura 30A) realizando-se mensuração do peso da espiga com palha, peso da espiga despalhada (Figura 30D), comprimento (Figura 30B) e diâmetro da espiga (Figura 30C) com o auxílio de um paquímetro.

Figura 30 - Etapa das avaliações morfológicas na espiga: A) transporte para o laboratório; B) comprimento da espiga; C) diâmetro da espiga; D) peso da espiga



Fonte: Autor (2022).

4.3.10 Modelagem e Análises estatísticas

Para desenvolver os modelos estimativos da concentração de N nos vasos, a normalidade dos dados foliares foi verificada por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$). O gráfico de normalidade foi gerado no software SPSS® v.13, licenciado pela UFC.

As variáveis morfológicas da planta e da espiga (altura da planta, número de folhas por planta, espessura do colmo, IAF, peso da espiga com palhada, peso da espiga despilhada, comprimento e diâmetro da espiga) foram submetidas a análise de variância (ANOVA) e teste de comparação de médias (teste de Tukey à 5% de probabilidade) dos diferentes tratamentos de doses de nitrogênio aplicado em solo agrícola e em vaso com o software SISVAR 4.2 (FERREIRA et al., 2008).

Os dados dos sensores ópticos foram analisados e processados pelo programa MATLAB versão 7.9. No software foi automatizado o processo para apresentação dos coeficientes de determinação (R^2), coeficientes de Pearson (r) e os parâmetros do modelo linear correspondente a cada índice gerado com o MSPAT, FieldSpec e SPAD, na estimativa da proporção de nitrogênio.

Ao longo das análises geraram-se 343 índices que foram comparados estatisticamente com concentração de nitrogênio no interior das folhas. Neste sentido correlacionou-se: I) individualmente com as 18 bandas do sensor AS7265x, utilizado no MSPAT; II) individualmente as 18 bandas do sensor AS7265x correspondentes aos dados do espectrorradiômetro, como apresentado pela Figura 24; todas as possibilidades de razão entre as bandas do sensor AS7265x (considerando que a ordem importa e desconsiderando os índices com bandas iguais) com os dados do III) MSPAT e IV) espectrorradiômetro; V) os valores mensurados com o SPAD. Na Tabela 6 são definidas as simulações apresentadas com diferentes sensores ópticos e modelos para correlação com nitrogênio em folhas de milho.

Tabela 6 - Simulações geradas para estudo dos melhores modelos na estimativa de nitrogênio

Simulação	Equipamento óptico	Método	Modelo	Índices
I	MSPAT	Bandas	$y = a \times \beta_1 + b$	18
II	FieldSpec Pro FR 3	individuais		18
III	MSPAT	Normalização	$y = a \times \frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1 + \beta_2} + b$	153
IV	FieldSpec Pro FR 3	β_1 e β_2		153
V	SPAD-502	Mensurado	$y = a \times SPAD + b$	1

Fonte: Autor (2022).

A definição dos melhores índices para aplicação na estimativa da concentração de nitrogênio na cultura do milho ocorreu por meio da técnica de validação cruzada pelo método “k-fold”, onde o conjunto de dados para correlação foi aleatorizado e dividido em quatro grupos. Em seguida foi estabelecido que três subconjuntos de dados seriam aplicados para calibração e um para validação, rotacionando a validação entre os quatro conjuntos de dados e permitindo aleatoriedade dos mesmos. Neste sentido, os resultados dos modelos são apresentados de forma que todo o conjunto de dados sobre a proporção de nitrogênio foi submetido a calibração e validação. As métricas geradas para categorizar os modelos se deram pelo cálculo do coeficiente de determinação (R^2) para a calibração e o coeficiente de Pearson (r) durante a validação, sendo este último interpretado conforme a Tabela 7.

Tabela 7- Interpretação do coeficiente de Pearson

r	Condição	Interpretação
0,9	Para mais ou negativo para menos	Muito forte
0,7 a 0,9	Positivo ou negativo	Forte
0,5 a 0,7	Positivo ou negativo	Moderada
0,3 a 0,5	Positivo ou negativo	Fraca
0 a 0,3	Positivo ou negativo	Desprezível

Fonte: Mukaka (2012).

Os resultados de coeficiente de determinação (R^2) indicam que quando existir valores mais próximos a 1, maior é a proximidade de uma relação linear perfeita. Com isso, a definição de parâmetros para a interpretação é importante para uma avaliação mais clara e objetiva, de acordo com o contexto envolvido. Por isso, optou-se por atribuir aos valores de coeficiente de determinação as categorias utilizadas por Sanchez et al. (2011), do qual definem: $0,7 < R^2 < 1$ para um modelo com ajuste forte; $0,4 < R^2 < 0,7$ para um modelo com ajuste médio; $0,2 < R^2 < 0,4$ para um modelo com ajuste fraco e $R^2 < 0,2$ para nenhum ajuste. Para avaliar o desempenho dos modelos de regressão foi utilizado o parâmetro RMSE (sigla em inglês *Root Mean Squared Error*) que foi obtido a partir da raiz dos quadrados médios das diferenças entre os valores calculados e os observados, de forma que enquanto maior for o valor do RMSE, consequentemente maior será considerado o erro associado ao modelo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análises de variância dos parâmetros agronômicos

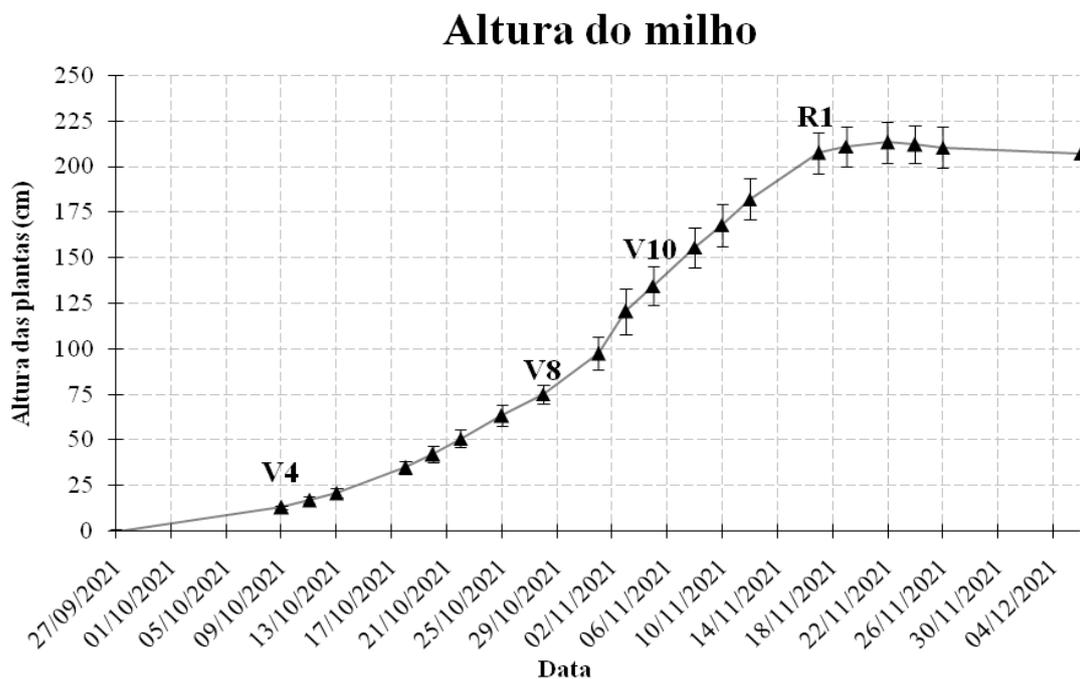
No decorrer do desenvolvimento do milho cultivado em solo agrícola (Figura 31) as avaliações morfológicas realizadas para acompanhar o desempenho agronômico dos tratamentos resultaram nos dados apresentados pelos Gráficos 7, 8 e 9, com a média de todas as unidades experimentais associados a barra de erro dos desvios padrão. A deficiência na disponibilidade de nitrogênio para a planta acarreta diversos problemas sobre o seu desenvolvimento, pois está diretamente associada à composição de aminoácidos e proteínas que atuam no crescimento vegetativo (KARLEN et al., 1988). Contudo, existem diversos aspectos que influenciam na disponibilidade do nutriente, desde sua disponibilidade química na forma de NO_3^- ou NH_4^+ , como biologicamente sobre a presença de bactérias diazotróficas (BALDANI et al., 1997).

Figura 31- Imagem aérea do milho cultivado em solo agrícola



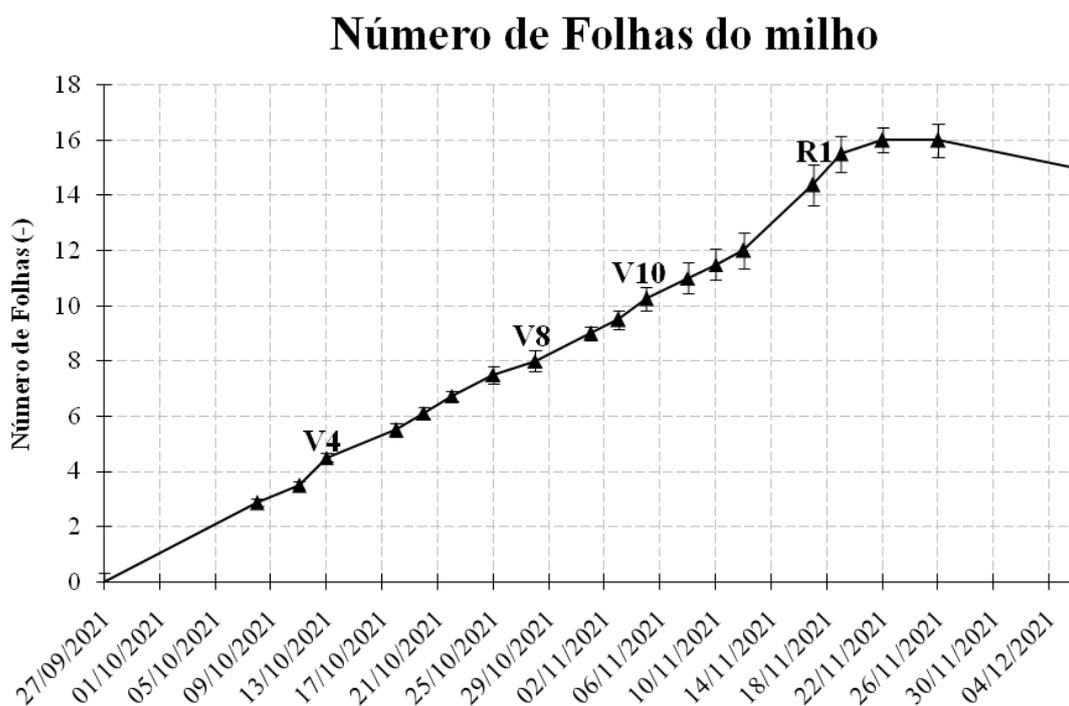
Fonte: Autor (2022).

Gráfico 7- Desenvolvimento da altura de plantas de milho cultivadas em solo agrícola



Fonte: Autor (2022).

Gráfico 8- Desenvolvimento de número folhas de milho por plantas cultivadas em solo agrícola



Fonte: Autor (2022).

Gráfico 9- Desenvolvimento da espessura do colmo de milho cultivado em solo agrícola



Fonte: Autor (2022).

5.1.1 Teste F dos dados de milho cultivado em solo agrícola

O teste estatístico aplicado sobre as variáveis apresentadas na Tabela 8 indicou que no experimento realizado em solo agrícola houve diferença significativa para as variáveis peso da espiga despalhada, comprimento da espiga, número de folhas e altura de plantas, com fonte de variação sobre os blocos. Os tratamentos aplicados com doses diferentes do fertilizante nitrogenado não demonstraram ter diferença significativa. Meneghin et al. (2008) apresentam diferentes concentrações de nitrogênio no solo em função da dose aplicada, profundidade e diferentes extratores para mensuração do nitrogênio. Neste trabalho é apresentado que na camada de 0-20, a partir da maior dose de nitrogênio aplicadas (350 kg.ha⁻¹ de N), resultou a concentração de nitrogênio no solo de 188 mg/kg. Este dado pode justificar o fato das doses de nitrogênio aplicadas no experimento em solo agrícola não terem apresentado diferença significativa, pois o resultado da análise química do solo, amostrado antes do plantio do experimento em solo agrícola, apresentou uma proporção de nitrogênio de

350 mg/kg. Este nível de nitrogênio encontrado em solo agrícola pode estar associado ao fato da área ter permanecido em pousio por mais de dois anos, favorecendo o crescimento e incorporação da matéria orgânica de plantas espontâneas na área. A partir dos Gráficos 7, 8 e 9 observa-se que sobre o comportamento do desvio padrão ao longo do desenvolvimento das plantas não apresentou-se valores significativos, como confirmado pela análise da Tabela 8.

Tabela 8- Análise de Variância para as variáveis número de folhas (NF), altura de plantas (ALT), espessura do colmo (ESP), índice de área foliar (IAF), concentração de nitrogênio (N), peso da espiga com palhada (PP), peso da espiga despilhada (PD), comprimento da espiga (CO), diâmetro da espiga (DI)

FV	GL	Teste F								
		NF	ALT	ESP	IAF	N	PP	PD	CO	DI
TRAT	5	0,182 ^{n.s}	0,196 ^{n.s}	1,686 ^{n.s}	0,683 ^{n.s}	2,709 ^{n.s}	1,634 ^{n.s}	0,885 ^{n.s}	1,827 ^{n.s}	0,409 ^{n.s}
BLOC	3	3,455*	13,04*	1,974 ^{n.s}	0,194 ^{n.s}	1,246 ^{n.s}	1,506 ^{n.s}	4,62*	5,288*	0,904 ^{n.s}
Resíduo	15									
Total	23									
CV (%)		3,61	3,35	6,99	23,29	4,59	5,29	6,8	3,47	3,81

FV - Fonte de Variação; GL - Graus de liberdade; TRAT - Tratamentos; * significativo pelo teste f a 5%, n.s - não significativo a 5%

Fonte: Autor (2022).

5.1.2 Teste de Tukey dos dados de milho cultivado em solo agrícola

A partir do resultado da análise de variância, foi feito o teste de Tukey a 5% de significância (Tabela 8) para indicar quais médias dos tratamentos diferem estatisticamente. Analisando a Tabela 8 pode-se perceber que para as variáveis altura (ALT) e número de folhas (NF) os Blocos 2,3 e 4 diferiram do Bloco 1, que obteve valores inferiores aos seguintes. Sobre as variáveis peso da espiga despilhada (PD) e comprimento da espiga (CO) o Bloco 3 apresentou valores superiores, diferindo estatisticamente do Bloco 1. A definição dos blocos para o experimento foram estabelecidas em função da declividade do terreno, porém é importante levar em consideração que houve a ocorrência de lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*) a partir dos 18 DAP, atacando severamente as novas folhas principalmente das plantas dos Blocos 1 e 2. O controle foi realizado periodicamente com Lannate®, porém não chegou a extinguir o inseto da cultura. Logo, pode-se observar que a partir das variáveis

morfológicas da espiga, as características que diferenciam estatisticamente são as que apresentam maior efeito sobre o ataque da lagarta.

Tabela 9- Resultado do teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis número de folhas (NF), altura de plantas (ALT), peso da espiga despalhada (PD) e comprimento da espiga (CO)

BLOC	NF (und.)	ALT (cm)	PD (g)	CO (g)
1	15,33 a	196,42 a	249,25 a	21,52 a
2	16,08 b	209,75 b	269,08 ab	21,98 ab
3	16,25 b	219,17 b	288,42 b	23,18 b
4	16,25 b	217,67 b	272,92 ab	22,60 ab

BLOC - Blocos

Fonte: Autor (2022).

5.1.3 Teste F dos dados de milho cultivado em vaso

No experimento conduzido em vaso, a análise de variância apresentada na Tabela 10 mostra que houve diferença sobre as variáveis número de folhas (NF), altura das plantas (ALT), IAF e concentração de nitrogênio (N), de forma que apenas a variável espessura do colmo não diferiu significativamente. A partir dos resultados apresentados se torna evidente que o nitrogênio foi o principal fator limitante para o desenvolvimento da planta, ainda assim, não houve diferenciação estatística da espessura do colmo. O comportamento da espessura do colmo em relação a adubação nitrogenada já foi observado por Moraes et al. (2017) e De Andrade Meira et al. (2009) e constataram que esta variável não apresenta diferenças significativas, existindo maior efeito sobre os aspectos morfológicos relacionados ao desenvolvimento das folhas.

Tabela 10 - Análise de Variância para as variáveis número de folhas (NF), altura de plantas (ALT), espessura do colmo (ESP), índice de área foliar (IAF), concentração de nitrogênio (N)

FV	GL	Teste F				
		NF	ALT	ESP	IAF	N
TRAT	5	15,412*	4,374*	1,618 ^{n.s}	16,521*	33,776*
Resíduo	15					
Total	23					
CV(%)		9,90	14,20	6,79	17,83	11,63

FV - Fonte de Variação; GL - Graus de liberdade; TRAT - Tratamentos; * significativo pelo teste f a 5%, n.s não significativo a 5%

Fonte: Autor (2022).

Devido à ausência de diferença estatística entre os tratamentos aplicados na cultura do milho cultivado em solo agrícola (Tabela 8), as simulações apresentadas na Tabela 6 foram aplicadas para calibração do MSPAT utilizando os dados gerados na cultura do milho cultivado em vaso, pois houve diferença entre as doses de nitrogênio aplicadas (Tabela 10). A diferenciação estatística dos tratamentos sobre as características da planta é um fator relevante para que os modelos gerados possuam aplicação em distintas condições da planta.

5.1.4 Teste de Tukey dos dados de milho cultivado em vaso

Os parâmetros significativos sobre a análise de variância foram utilizados para realizar o teste de Tukey a 5% de significância (Tabela 11), indicando a diferença entre as médias das variáveis número de folhas (NF), altura das plantas (ALT), IAF e concentração de N. A variável número de folhas (NF), mostra que os T5 e T6 não diferiram estatisticamente, possuindo os valores mais elevados. Todas as variáveis apresentaram diferença do T1 com os demais, em exceção a concentração de nitrogênio, que não difere do T2 e T3. Nas médias de altura o T6 apresentou os maiores valores, diferenciando-se dos outros tratamentos. Semelhante à altura (ALT), o IAF também apresentou valores superiores no T6, diferindo dos demais tratamentos. Em concentração de nitrogênio na folha (N), os tratamentos T1, T2 e T3 apresentaram os menores valores, diferindo do T4. Em concentração de nitrogênio (N) o T4 diferenciou-se do T5, que obteve os maiores valores em relação aos outros tratamentos. O T6, que recebeu maior dose de N, não apresentou o melhor resultado sobre a concentração de N,

porém se manteve entre o nível do T4 e T5, demonstrando que a dose de 240 kg.ha⁻¹ apresentou ser prejudicial às plantas. A utilização da Uréia em doses elevadas no solo causa toxidez nas plantas em razão que, após entrar em contato com o solo, ocorre a hidrólise do fertilizante, elevando o pH ao redor dos grânulos e convertendo todo o seu conteúdo em NH₄⁺ (OUYANG et al., 1998).

As avaliações morfológicas em campo ocorreram após finalizar o plano de adubação com o T6 (Tabela 5). Por isso, por mais que torne evidente o efeito das doses crescentes do fertilizante nitrogenado sobre as características morfológicas, principalmente os tratamentos T2 (30 kg.ha⁻¹), T3 (60 kg.ha⁻¹) e T4 (120 kg.ha⁻¹) demonstram características semelhantes de déficit nutricional.

Tabela 11- Resultado do teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis número de folhas (NF), altura de plantas (ALT), IAF e concentração de nitrogênio (N)

TRAT	NF (und.)	ALT (cm)	IAF (cm ²)	N (g/kg)
1	3,98 a	45,00 a	474,00 a	8,80 a
2	4,40 ab	54,50 ab	875,25 ab	9,44 a
3	4,85 ab	59,75 ab	1005,75 bc	10,68 a
4	5,40 bc	61,50 ab	1008,25 bc	15,20 b
5	6,45 c	50,75 ab	1359,00 cd	19,46 c
6	6,35 c	68,75 b	1558,25 d	18,10 bc

TRAT - Tratamento

Fonte: Autor (2022).

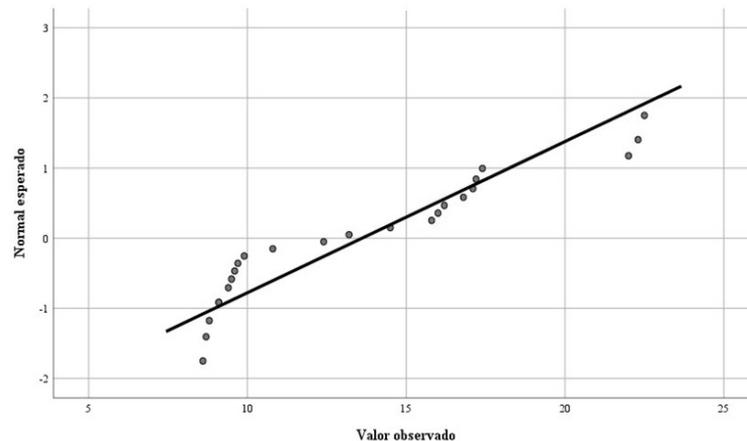
5.2 Modelos de estimativa do nitrogênio em folhas de milho

5.2.1 Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov

As concentrações foliares de N variaram de 8,6 a 22,5 g/.kg-1, apresentando uma média de 13,61 g/.kg-1 de N e um desvio padrão de 4,638 g.kg⁻¹.O teste de Kolmogorov-Smirnov aplicado ao conjunto (N^o=24) apontou distribuição normal dos dados de

concentração foliar (p-value = 0,205) (Gráfico 10) e, portanto, os modelos preditivos puderam ser aplicados.

Gráfico 10- Distribuição normal dos dados de concentração de nitrogênio foliar



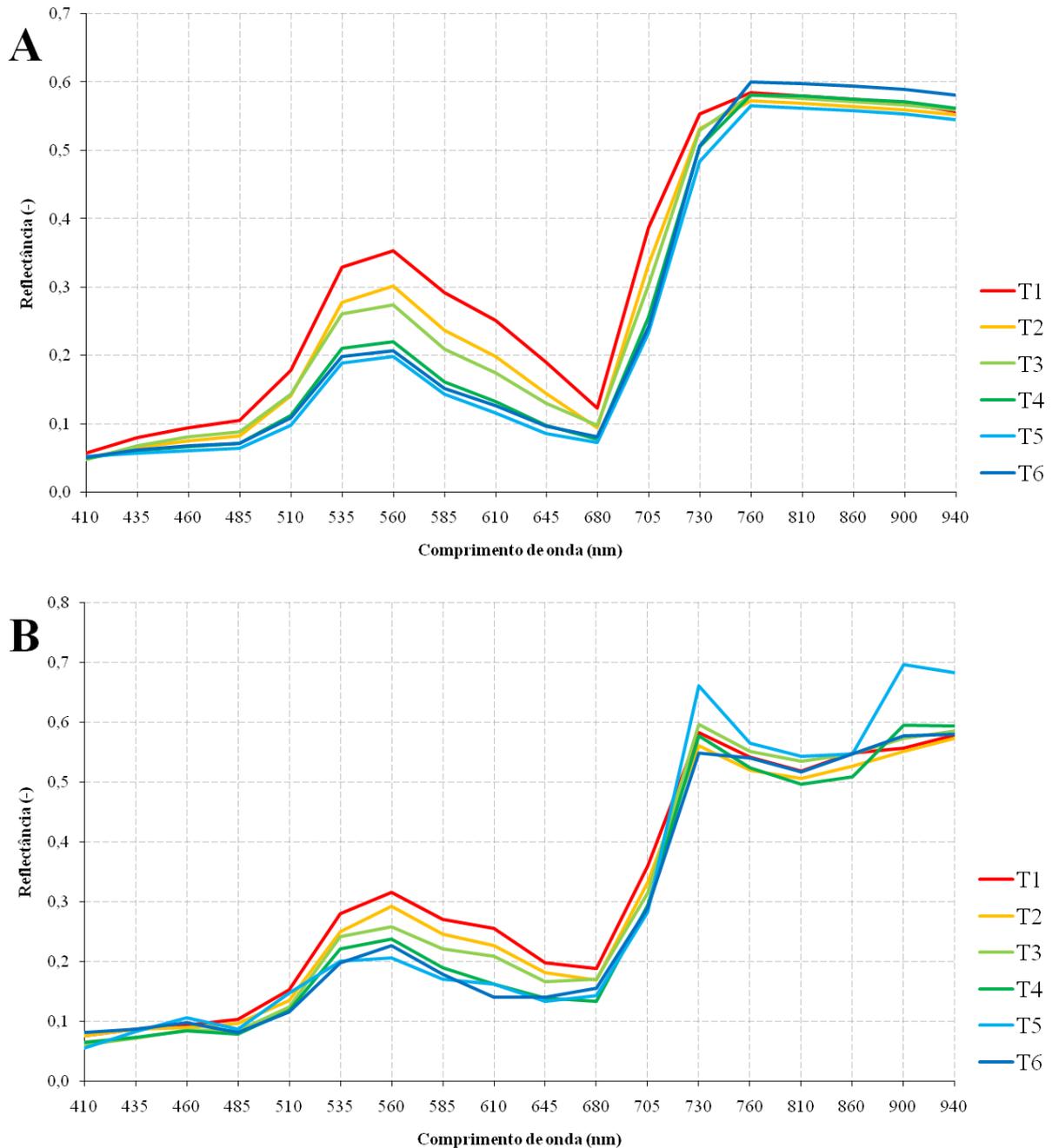
Fonte: Autor (2022).

5.2.2 Comportamento espectral das amostras de tecido foliar do milho

No Gráfico 11 é possível observar os valores em reflectância com as 18 bandas do sensor espectral AS7265x utilizado no MSPAT assim como os valores correspondentes com os dados do espectrorradiômetro. Após comparação visual entre os gráficos é possível perceber a coerência do comportamento espectral do MSPAT em relação ao espectrorradiômetro, diferenciando-se apenas por uma leve queda sobre os valores nas bandas 760, 810 e 860 nm. Esse efeito sobre a região do infravermelho próximo pode ser explicado pela influência do método de aquisição dos dados ou do ambiente (PONZONI et al., 2015), pois este comportamento ocorreu independente da condição dos alvos. Em ambos os gráficos é perceptível o efeito dos tratamentos sobre a resposta espectral da folha, de forma que as doses de nitrogênio foram inversamente proporcionais a reflectância na região do visível (400 a 700 nm), principalmente entre as bandas do verde (535, 560, 585 nm) e vermelho (610, 645 e 680 nm). O nitrogênio do tecido vegetal é destinado principalmente para a composição do cloroplasto, também havendo contribuição sobre os aminoácidos livres, proteínas, bases nitrogenadas e ácidos nucleicos, tornando a presença deste nutriente essencial para a

ocorrência dos processos fisiológicos da planta (MENGEL & KIRKBY, 1987). Com isso, a elevação da reflectância no visível está associado a redução da concentração dos pigmentos, e consequentemente de nitrogênio no tecido foliar pois devido a relevância da absorbância para a produção de energia nas plantas, sua ausência proporciona maiores valores de reflectância, como afirmado por Terashima et al. (2009) e Martins et al. (2020).

Gráfico 11- Valores de reflectância médio por tratamento utilizando A) espectrorradiômetro FieldSpec correspondente as bandas do sensor AS7265x B) MSPAT



Fonte: Autor (2022).

5.2.3 Correlação dos índices utilizando bandas individuais

Na Tabela 12 são apresentados os coeficientes de determinação gerados por meio da correlação com cada banda do sensor AS7265x, separando o conjunto de dados obtidos pelo MSPAT e com o espectrorradiômetro. Logo, observa-se que, em ambos os sensores, possuem comprimentos de onda de menor impacto para estimar a concentração de nitrogênio pertencem a região do azul e do infravermelho próximo, com valores tendendo a zero. Já as bandas com maior relevância pertencem principalmente aos comprimentos de onda do verde (535, 560 e 585 nm) e vermelho (610, 645 e 680 nm). O comportamento dos resultados sobre a região do visível ocorre devido as características biofísicas proporcionadas pelos pigmentos encontrados nos cloroplastos, que correspondem a uma proporção de 65% de clorofila, 6% de carotenoides e 29% de xantofilas, podendo mudar conforme a espécie, de forma que os pigmentos predominantes absorvem na região do azul (próximo a 445 nm), mas apenas a clorofila absorve na região do vermelho (próximo a 645 nm) e apresenta reflectância mais elevada no verde, próximo a 535 nm (PONZONI et al., 2015).

Tabela 12- Coeficiente de determinação (R^2) da correlação das bandas individualizadas do sensor AS7265x com concentração de nitrogênio

Banda (nm)	R^2		Banda (nm)	R^2	
	MSPAT	Fildspec		MSPAT	Fildspec
410	0,014	0,000	645	0,584	0,552
435	0,065	0,210	680	0,368	0,309
460	0,162	0,284	705	0,447	0,680
485	0,317	0,325	730	0,020	0,379
510	0,468	0,473	760	0,000	0,000
535	0,581	0,659	810	0,000	0,000
560	0,500	0,683	860	0,020	0,000
585	0,579	0,645	900	0,000	0,000
610	0,593	0,619	940	0,000	0,000

Fonte: Autor (2022).

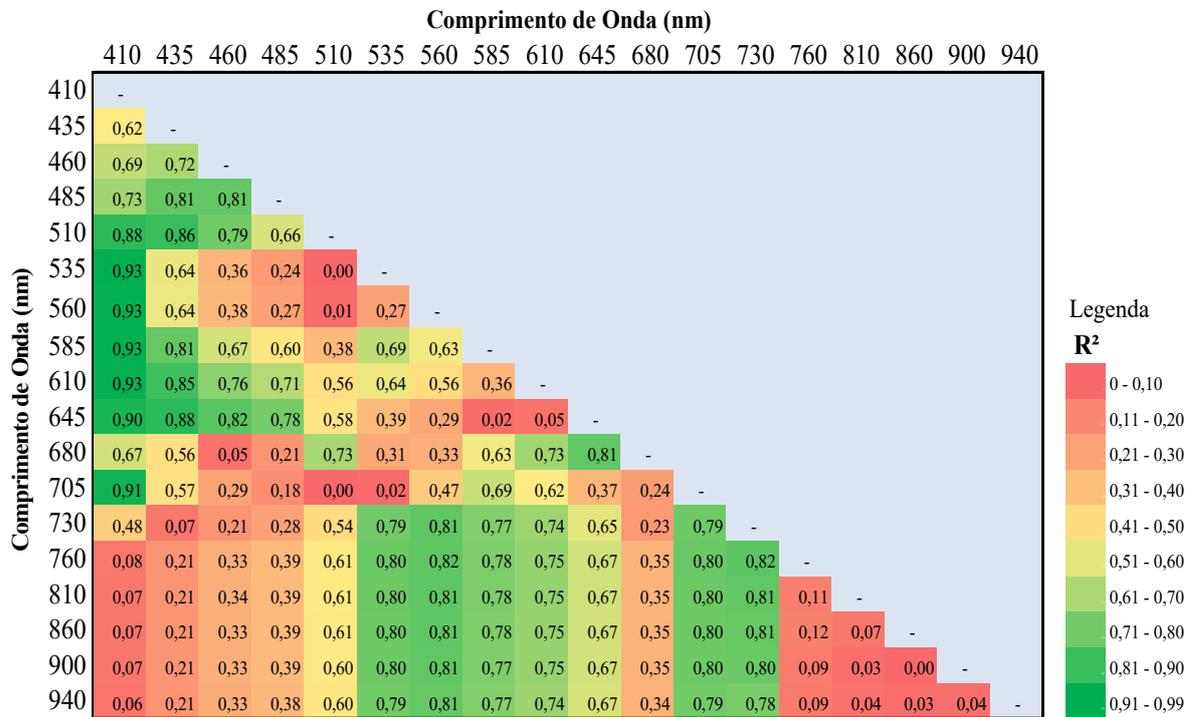
5.2.4 Correlação dos índices com a normalização das bandas

Diante do desafio de propor modelos para estimar o status nutricional de nitrogênio no milho, inúmeras tentativas de combinações foram realizadas para observar os melhores ajustes. Explorar novas bandas espectrais faz parte disto e, portanto, as performances aqui encontradas ressaltam que as faixas do espectro mais interessantes se encontram na região visível, ressaltando-se o verde e vermelho devido a contribuição da clorofila.

Por meio da observação do Gráfico 12 torna-se possível entender que, entre os índices gerados pela razão de bandas, com o espectrorradiômetro, os melhores índices estão situados entre as bandas na região do verde e do vermelho, associadas à banda de 410 nm. Estes resultados são corroborados por Qiao et al. (2022) que, ao estudarem as características espectrais de plantas deficientes de N, demonstraram que as bandas mais sensíveis estavam localizadas em torno de 710 nm (borda vermelha) e de 512 nm (banda verde), sendo o seu índice de nutrição de nitrogênio (NNI) construído a partir destas bandas.

Já os índices gerados entre as bandas do infravermelho foram as que apresentaram um menor desempenho. Mesmo não apresentando relevância individualmente a banda 410 nm contribuiu para a geração de resultados relevantes devido à capacidade de contrastar com as bandas que apresentaram maior relevância individualmente, conforme apresentado na Tabela 12.

Gráfico 12- Coeficientes de determinação da razão entre as bandas do sensor AS7265x utilizando os dados do espectrorradiômetro



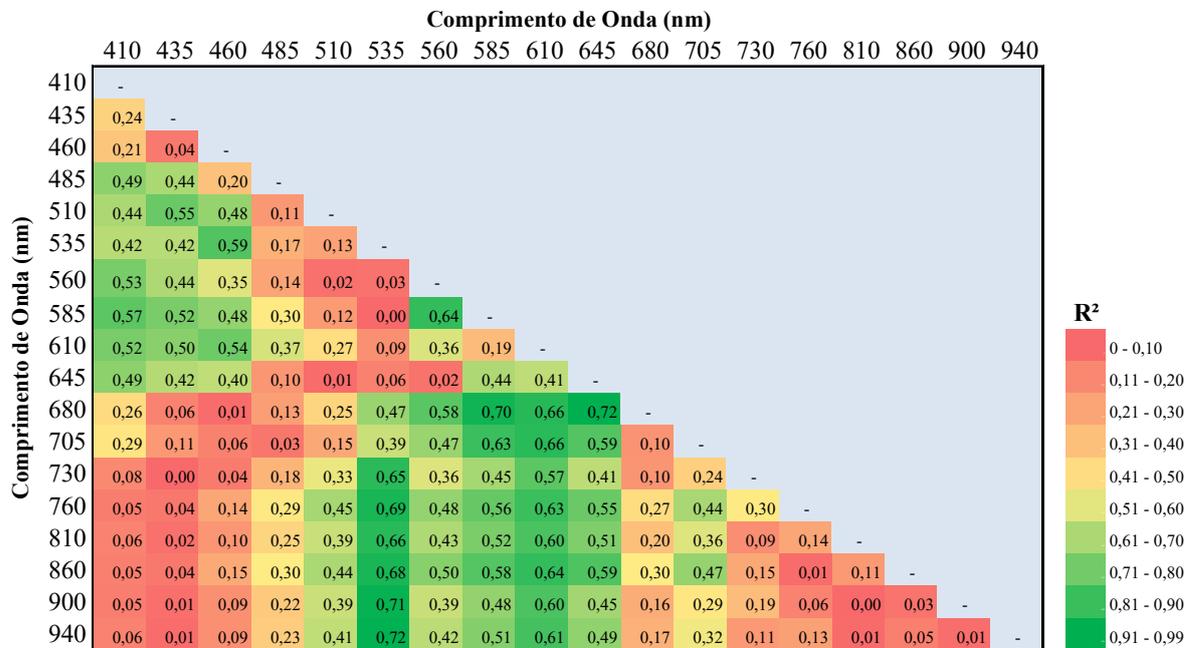
Fonte: Autor (2022).

Sabe-se que a clorofila tem dois picos de absorção de energia eletromagnética na região do visível, um na região azul (400 e 500 nm) e outro na região vermelha (620 e 700 nm) (LICHTENTHALER, 1987). Portanto, essas regiões são comumente usadas para fazer estimativas para quantificar a clorofila. A região azul, representada no sensor AS7265x pela banda de 410 nm, também é influenciada pela absorção de energia ocasionados por outros pigmentos foliares (OLIVEIRA et al., 2017). Este fato pode dificultar significativamente a estimativa do teor de clorofila (fortemente associada à concentração de N) para estes comprimentos de onda (BUSCHMANN et al., 1994). Conseqüentemente, as melhores estimativas da concentração de clorofila são comprimentos de onda no verde (500 e 570 nm), vermelho (CLEVERS & GITELSON, 2013), e a região da borda do vermelho (700 a 750 nm) (USTIN et al., 2009).

Os coeficientes de determinação apresentados no Gráfico 13 demonstra que os melhores índices gerados por meio do MSPAT contêm a banda 535 nm associadas às bandas do infravermelho (bandas 730 a 940 nm) retratando os picos de reflectância da vegetação. A banda 535 nm expressa o quão verde é a vegetação (ROSA, 2009), já o infravermelho

próximo é apresentado na literatura como forte indicador da estrutura celular do tecido das folhas (DOS SANTOS TEIXEIRA, 2018).

Gráfico 13- Coeficientes de determinação da razão entre as bandas do MSPAT



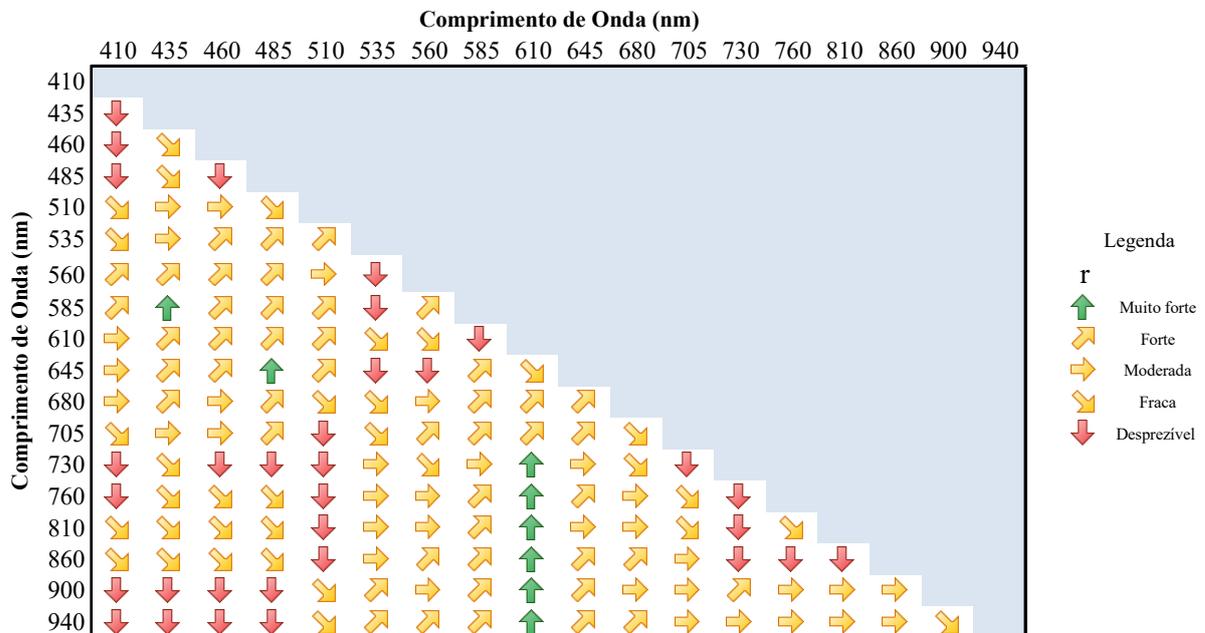
Fonte: Autor (2022).

Observou-se também que houve a presença de índices relevantes quando utilizando as bandas 585, 610 e 645 nm em razão com as bandas da borda do vermelho (705 e 730 nm) e infravermelho próximo. Com base nos valores de R^2 e RMSE apresentados por Oliveira et al. (2020), os índices de vegetação que forneceram predições mais fortes foram aqueles que estimaram a concentração de N em comprimentos na região entre 700 a 750 nm. A região do vermelho também foi relevante no ajuste dos modelos, principalmente o representado pelas bandas 680 nm em associação com 585 e 645 nm. Nos Gráficos 8 e 9 é apresentado novamente que a associação entre bandas do infravermelho próximo proporcionou baixa performance pois ambas as bandas não apresentaram interferência sobre o efeito dos tratamentos.

5.2.5 Validação dos índices com a normalização das bandas

Os resultados da validação são apresentados por meio da interpretação do coeficiente de Pearson (Tabela 7), portanto geraram-se os Gráficos 14 e 15 para possibilitar a visualização da interpretação dos valores sobre todo o conjunto de dados. Observou-se que os modelos que apresentaram razões de bandas com correlação forte ou muito forte estão presentes nas bandas do vermelho, com destaque para 610 nm quando associadas aos comprimentos do infravermelho. Em estudos como os de Clevers e Kooistra (2011), Inoue et al. (2012) e Yao et al. (2013), os índices de vegetação que utilizaram a região do vermelho (próximo a 645nm) geralmente fornecem estimativas mais precisas do que aquelas que operam na região verde (próximo a 535 nm).

Gráfico 14- Interpretação do coeficiente de Pearson (r) sobre a razão de bandas do MSPAT

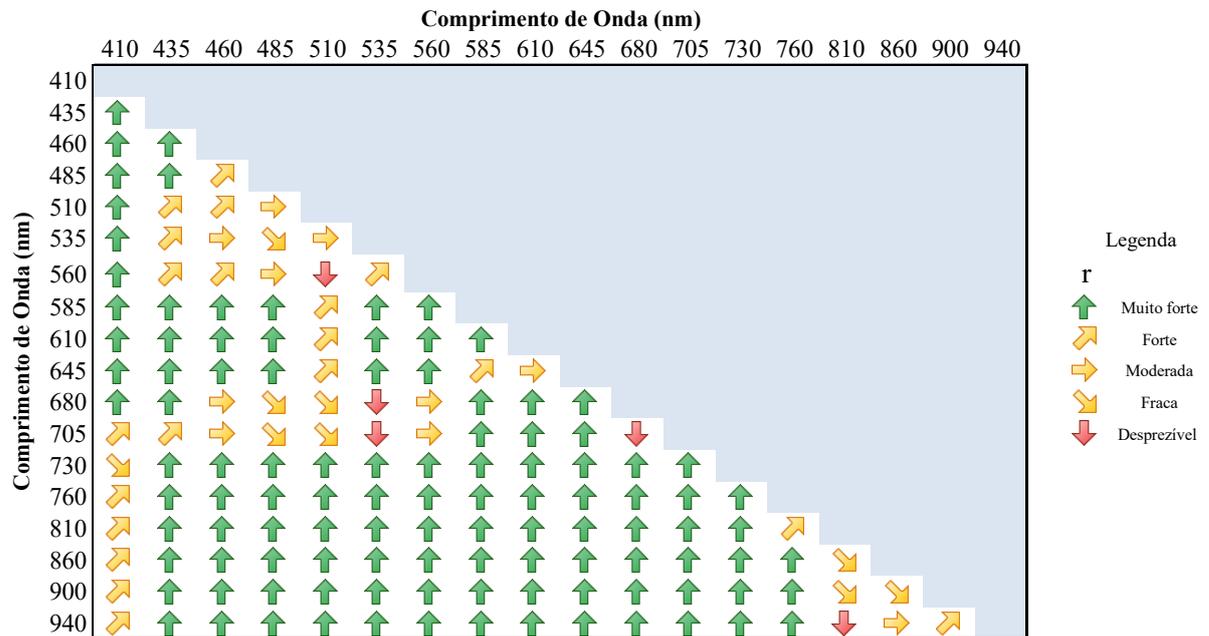


Fonte: Autor (2022).

Há, ainda, correlações fortes sobre o espectro do vermelho (610 e 680 nm) em relação ao azul (435, 460 e 485 nm), pois estas bandas mantêm estreita correlação com os pigmentos fotossintetizantes no interior dos tecidos foliares. A absorção de luz pelos pigmentos foliares domina o espectro de reflectância da folha e leva a valores geralmente reduzidos em toda a faixa do visível (OLIVEIRA et al., 2017). No entanto, as regiões de absorção mais intensa estão localizadas nas faixas correspondentes ao azul e ao vermelho, devido à absorção dos dois principais pigmentos foliares: Clorofila-a e Clorofila-b, que representam 65% do total de pigmentos foliares (MOSS & LOOMIS, 1952).

A partir do Gráfico 15 pôde-se perceber que, com a utilização do conjunto de índices gerados pelo espectrorradiômetro, os coeficientes de Pearson apresentaram, em sua maioria, valores superiores a 0,9, apontando uma correlação muito forte entre as concentrações de N e os resultados dos modelos. Isto demonstrou a qualidade das leituras espectrais que o espectrorradiômetro pode executar sobre um alvo, permitindo uma melhor representatividade dos comprimentos de onda utilizados nos modelos. No Gráfico 13, observa-se uma boa habilidade dos comprimentos de onda do infravermelho próximo de se combinar com a maioria das demais bandas na construção de um índice. Este resultado sugere que índices gerados com o infravermelho próximo pelo espectrorradiômetro possuem alto desempenho. Houve ainda algumas exceções que apresentaram estimativas com correlações inferiores, a exemplo os índices gerados entre as bandas do infravermelho, assim como a banda de 535 nm com as bandas de 680 e 705 nm.

Gráfico 15- Interpretação do coeficiente de Pearson (r) sobre a razão de bandas do sensor AS7265x com os dados do espectrorradiômetro



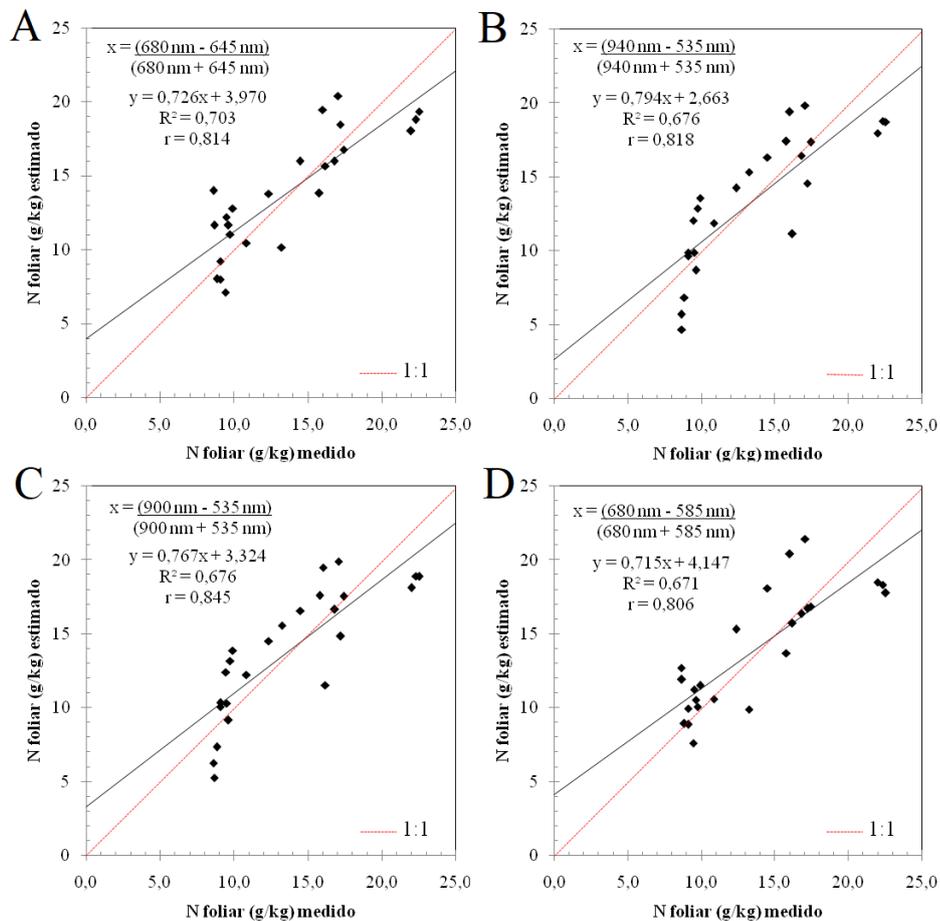
Fonte: Autor (2022).

5.2.6 Modelos que apresentaram melhor desempenho com o MSPAT

A observação dos melhores modelos ocorreu após a categorização a partir das interpretações de cada métrica, conforme apresentado por Sanchez et al. (2011) e na Tabela 7. Utilizou-se então, os modelos que apresentaram o coeficiente de determinação considerado forte ($0,7 < R^2 < 1$) e coeficiente de Pearson Forte ou Muito Forte. Deste modo, para o conjunto de índices gerados pelo AgriSpes, os melhores modelos corresponderam a utilização da razão entre as bandas 680 e 645 nm, 940 e 535 nm, 900 e 535 nm e 680 e 585 nm, tendo suas relações entre valores medidos e estimados apresentados no Gráfico 16.

As bandas representativas da região do verde (535 e 585 nm) foram mais frequentes nos índices com maior relevância, porém a região da borda do vermelho (680 nm) e infravermelho próximo (900 nm e 940 nm) também foram importantes para estes modelos. Tran et al. (2020) apresentam a aplicação do mesmo sensor utilizado no MSPAT (AS7265x) para estimar o valor BRIX em maçãs, observando uma comparação entre os valores reais e estimados com R^2 de 0,861. A partir da conformação do equipamento utilizado por Habibullah et al. (2020) para estimar a concentração de N nas culturas do milho, canola, soja e trigo, utilizando o sensor AS7262 e AS7263, obteve-se um R^2 de 0,739 sobre a conformação dos dados reais e estimados. Neste sentido é possível observar que a partir da relação entre os valores reais e estimados de concentração de N (Gráfico 16) com o MSPAT, pode-se perceber que são condizentes com os resultados encontrados na literatura, de forma que os melhores modelos apresentaram um ajuste com R^2 entre 0,67 e 0,7.

Gráfico 16- Valores de N foliar medido e estimado a partir dos modelos gerados com o MSPAT nas banda A) 680 e 645 nm; B) 940 e 535 nm; C) 900 e 535 nm; D) 680 e 585 nm



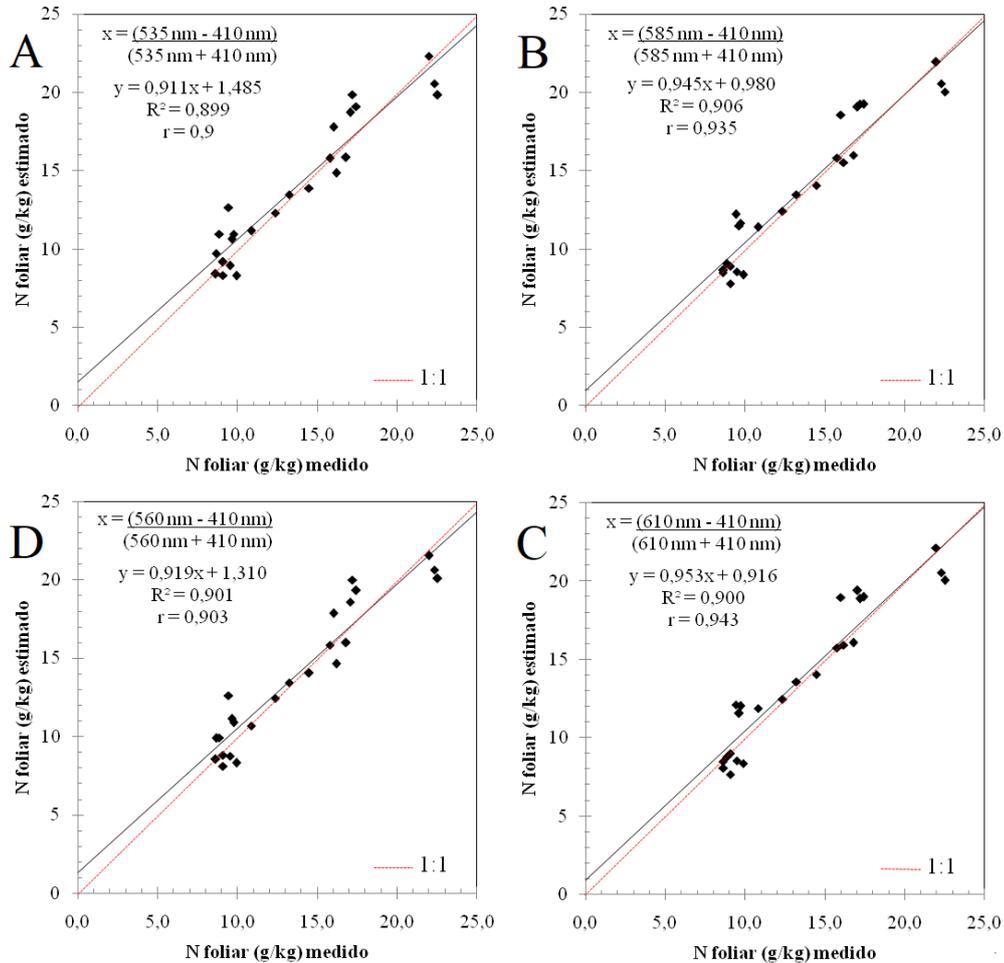
Fonte: Autor (2022).

5.2.7 Modelos que apresentaram melhor desempenho com o espectrorradiômetro

A partir dos resultados gerados com os índices do espectrorradiômetro, foram selecionados os modelos que apresentaram melhor capacidade para estimar a concentração de nitrogênio em folhas de milho. No total foram selecionados 57 modelos, conforme os critérios definidos no início do tópico anterior, estando presente no Gráfico 17 apenas os quatro modelos que apresentaram melhor desempenho sobre as métricas avaliadas. Jarmer et al. (2003) utilizaram o FieldSpec 2 para estimar a concentração de nitrogênio com a avaliação sobre o dossel da cultura do trigo, observou a relação entre os valores reais e estimados com

R^2 de 0,838 e RMSE de 2,94, de forma que os melhores resultados foram obtidos principalmente quando utilizando as bandas na região do verde (535, 560 e 585 nm).

Gráfico 17- Valores de N foliar medido e estimado com os modelos gerados a partir dos dados do espectrorradiômetro Fieldspec com as bandas A) 535 e 410 nm; B) 585 e 410 nm; C) 610 e 410 nm; D) 560 e 410 nm



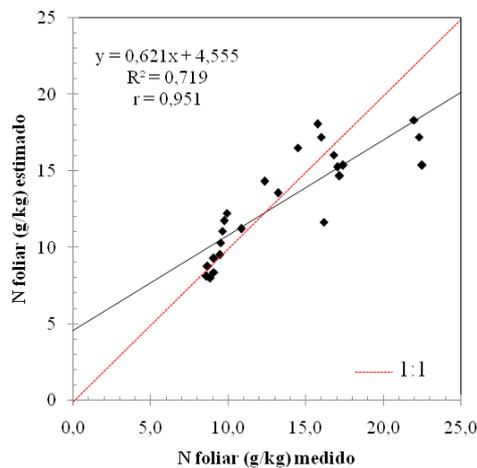
Fonte: Autor (2022).

5.2.8 Modelo gerado com o SPAD-502

Após a validação cruzada pelo método “k-fold”, o índice SPAD apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,68, sendo categorizado como um modelo de ajuste médio (SANCHEZ et al., 2011), porém, a partir do Gráfico 18 o modelo gerado possui resultados semelhantes ao apresentado pelo MSPAT, com um R^2 de 0,719. Hurtado et al. (2011) apresentaram a métrica coeficiente de Pearson (r) do SPAD para estimar a

concentração de N em folhas de milho com diferentes doses de fertilizante nitrogenado e estádios fenológicos. Os autores obtiveram resultados satisfatórios quando avaliaram as folhas durante o florescimento da cultura, no intervalo de adubação de 0 a 180 kg.ha⁻¹, obtendo um valor de $r = 0,8$, enquanto neste trabalho obteve-se um $r = 0,951$ avaliando-se no estágio vegetativo. Os valores de r apresentados podem ser justificados quando analisado o ambiente de estabelecimento da cultura, pois Hurtado et al. (2011) por ter avaliado o SPAD na cultura em solo agrícola, a existência de nitrogênio residual ou obtido biologicamente pode ter favorecido uma melhor distinção entre os tratamentos apenas no estágio de florescimento. Durante o pendoamento do milho, conforme apresentado por Von Pinto et al. (2009), ocorre um elevado acúmulo de nitrogênio na planta principalmente devido ao início da formação da espiga, caracterizando o período de maior demanda do nutriente. Neste trabalho a cultura do milho em vaso foi cultivada em arisco de construção lavado, tornando o nitrogênio aplicado mais responsivo em relação às características da planta, de forma que os tratamentos que receberam as menores doses apresentaram diferenciação dos tratamentos nos estágio vegetativo (Tabela 11).

Gráfico 18- Valores de N foliar medido e estimado a partir do modelo gerado com o SPAD

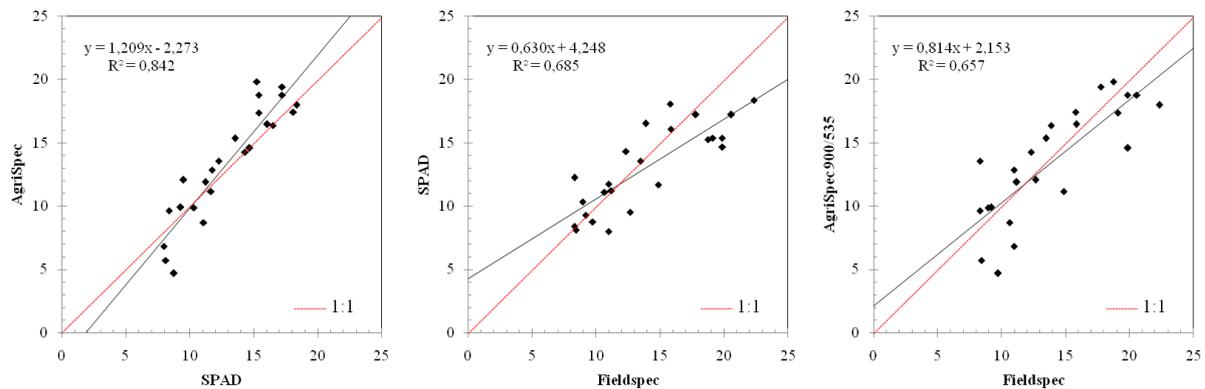


Fonte: Autor (2022).

5.2.9 Comparação dos valores estimados entre os equipamentos avaliados

A partir da comparação entre os valores estimados pelos equipamentos ópticos no Gráfico 19, foi possível observar que em relação ao FieldSpec, o SPAD e MSPAT apresentaram coeficientes de determinação semelhantes ($R^2 = 0,685$ e $R^2 = 0,657$, respectivamente), que demonstra o elevado potencial de ambos os equipamentos para realizar a estimativa da concentração de nitrogênio em tecido foliar do milho.

Gráfico 19- Valores estimados entre o MSPAT e SPAD; SPAD e FieldSpec; MSPAT e FieldSpec.



Fonte: Autor (2022).

O propósito buscado foi apresentar os melhores modelos para estimar a concentração de nitrogênio em tecido foliar de milho para cada equipamento avaliado. Para isto, utilizou-se as métricas de desvio, para ressaltar os modelos em que o RMSE fosse o mínimo possível. O RMSE forneceu a visualização mais completa da distribuição de erros, expressando o desvio com a própria unidade de medida utilizada (g/kg). Estudando a modelagem de parâmetros bioquímicos na vegetação, Dos Santos Teixeira (2018) destacou que quanto maior a amplitude dos dados, maiores são os desvios durante a estimativa. Assim, para esta amplitude dos dados, os três melhores modelos avaliados produziram um RMSE de 1,465 para o espectrorradiômetro (535 e 410 nm), 2,53 para o SPAD, e 2,664 para o MSPAT (900 e 535 nm).

6 CONCLUSÃO

Avaliando os resultados obtidos neste trabalho, os equipamentos utilizados mostraram eficiência em determinar a concentração de nitrogênio nas folhas da cultura do milho. A partir das avaliações com o sensor AS7265x aplicado ao MSPAT, conclui-se que o mesmo foi sensível à proporção de nitrogênio utilizando-se os modelos de maior relevância ($R^2 = 0,721$) apresentados neste trabalho.

Após a validação os modelos que apresentaram os melhores desempenhos sobre as métricas avaliadas para o Fieldspec foram a partir dos índices gerados utilizando-se a banda 410 nm em razão com as bandas na região do verde (535, 560 e 585 nm, com $R^2 = 0,89$; $0,90$ e $0,93$, respectivamente). Por meio do SPAD-502 gerou-se um modelo ($R^2 = 0,68$) com resultados semelhantes ao proporcionado pelos índices do MSPAT.

A partir da avaliação do desempenho dos equipamentos ópticos, concluiu-se que, em relação ao espectrorradiômetro, o SPAD-502 e o MSPAT são potencialmente competitivos para estimar a concentração de nitrogênio em folhas de milho.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, Sandra et al. **Assessing the potential use of two portable chlorophyll meters in diagnosing the nutritional status of plants.** *Journal of Plant Nutrition*, v. 41, n. 2, p. 261-271, 2018.
- AHMAD, Irfan S. et al. **Nitrogen sensing for precision agriculture using chlorophyll maps.** In: ASAE Meeting Presentation. 1999. p. 18-21.
- ALI, Ali M. et al. **A framework for refining nitrogen management in dry direct-seeded rice using GreenSeeker™ optical sensor.** *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 110, p. 114-120, 2015.
- ALVES, Inglith de Souza Lage. **Sistema GNSS-RTK de baixo custo em veículos aéreos não tripulados para aplicações na agricultura.** 2021.
- ANZILIERO, Darlei. **As Técnicas de Monitoramento por VANT: Uma Revisão dos Resultados Obtidos na Agricultura.** Epitaya E-books, v. 1, n. 10, p. 34-47, 2021.
- ARAÚJO, Geovana Oliveira de. **Sensor de diâmetro de fibra óptica de baixo custo.** 2018.
- ARROYO, Jaen Alberto et al. **UAV technology and machine learning techniques applied to the yield improvement in precision agriculture.** In: 2017 IEEE Mexican Humanitarian Technology Conference (MHTC). IEEE, 2017. p. 137-143.
- ATZBERGER, Clement. **Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs.** *Remote sensing*, v. 5, n. 2, p. 949-981, 2013.
- AUERNHAMMER, Hermann. **Precision farming—the environmental challenge.** *Computers and electronics in agriculture*, v. 30, n. 1-3, p. 31-43, 2001.
- BAKER, Neil R. (Ed.). **Photosynthesis and the Environment.** Springer Science & Business Media, 2006.
- BALDANI, JoséI et al. **Recent advances in BNF with non-legume plants.** *Soil Biology and Biochemistry*, v. 29, n. 5-6, p. 911-922, 1997.
- BATEIRA, Carlos et al. **VANTs e Geotecnologias/instabilidade de vertentes e agricultura de precisão no Alto Douro vinhateiro.** 2018.
- BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. **Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn.** *Communications in soil science and plant analysis*, v. 25, n. 9-10, p. 1791-1800, 1994.
- BOGGS, Johnny L. et al. **Relationship between hyperspectral reflectance, soil nitrate-nitrogen, cotton leaf chlorophyll, and cotton yield: a step toward precision agriculture.** *Journal of Sustainable Agriculture*, v. 22, n. 3, p. 5-16, 2003.

BUSCHMANN, Claus et al. **Spectrometer for fast measurements of in vivo reflectance, absorptance, and fluorescence in the visible and near-infrared**. Remote Sensing of Environment, v. 48, n. 1, p. 18-24, 1994.

CALOU, Vinícius B.C. et al. **Estimation of maize biomass using unmanned aerial vehicles**. Engenharia Agrícola, v. 39, p. 744-752, 2019.

CASADY, William W.; PALM, Harlan Lee. **Precision Agriculture: Remote Sensing and Ground Truthing** (2002). 2002.

CHAERLE, Laury; VAN DER STRAETEN, Dominique. **Imaging techniques and the early detection of plant stress**. Trends in plant science, v. 5, n. 11, p. 495-501, 2000.

CLEVERS, Jan GPW; GITELSON, Anatoly A. **Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and-3**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 23, p. 344-351, 2013.

CLEVERS, Jan GPW; KOOISTRA, Lammert. **Using hyperspectral remote sensing data for retrieving canopy chlorophyll and nitrogen content**. IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, v. 5, n. 2, p. 574-583, 2011.

COELHO, Antônio M. **Nutrição e adubação**. Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro científico (ALICE), 2007.

DE ALMEIDA, Mateus Benchimol Ferreira; SIMÕES, Margareth; FERRAZ, Rodrigo Peçanha Demonte. **Avaliação dos níveis de degradação de pastagens por sensoriamento remoto: um subsídio para o plano de agricultura de baixa emissão de carbono**. In: Embrapa Solos-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. Anais... São José dos Campos: Inpe, 2019. p. 3252-3255., 2019.

DE ANDRADE MEIRA, Flávia et al. **Fontes e épocas de aplicação do nitrogênio na cultura do milho irrigado**. Semina: Ciências Agrárias, v. 30, n. 2, p. 275-283, 2009.

DE ANDRADE, João Carlos et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. 2001. p. 285.

DE CARVALHO GASPAROTTO, Aline et al. **Comportamento espectral de milho submetido a diferentes doses de nitrogênio**. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), João Pessoa-PB. Anais, São José dos Campos: INPE, p. 157-162, 2015.

DE SOUZA, Vanessa Cristina Oliveira; CÂMARA, Gilberto. **Avaliação dos principais catálogos de imagens de Sensoriamento Remoto**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. p. 4985-4992, 2009.

DIAS FILHO, Moacyr Bernardino. **A fotossíntese e o aquecimento global**. Embrapa Amazônia Oriental-Documentos (INFOTECA-E), 2006.

DING, Kunlun. **State of Knowledge of Irrigation Techniques and Practicalities within Given Socio-Economic Settings**. Irrigation and Drainage, v. 68, n. 1, p. 31-45, 2019.

DOS PASSOS, Emerson Gabriel Cardoso et al. **Uso de imagens aéreas obtidas por drone no monitoramento do desenvolvimento da cultura do milho**. Anais da Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnológica Interdisciplinar (MICTI)-e-ISSN 2316-7165, v. 1, n. 12, 2019.

DOS SANTOS TEIXEIRA, Adunias et al. **Spectral response of corn submitted to different levels of nitrogen irrigation and fertilization**. In: AGU Fall Meeting 2018. AGU, 2018.

ESTRELLA MEDINA, Shirly Vanessa et al. **Cuantificación del contenido de arcilla en los suelos del estado de Santa Catarina, Brasil a través de los datos espectrales obtenidos mediante fieldspec pro 3**. 2017.

FABBRI, Carolina et al. **A Sustainability Assessment of the Greenseeker N Management Tool: A Lysimetric Experiment on Barley**. Sustainability, v. 12, n. 18, p. 7303, 2020.

FALKOWSKI, Paul G.; RAVEN, John A. **Aquatic photosynthesis**. Princeton University Press, 2013.

FAUSTO, Marcos Alves et al. **Estimativa do índice de área foliar e umidade do solo por imagens Landsat 8 em diferentes coberturas do solo na Baixada Cuiabana MT**. 2018.

FERNANDES, R. B. A. et al. **Quantificação de óxidos de ferro de Latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, p. 245-257, 2004.

FERRAZ, Marcelo Araújo Junqueira et al. **Determinação de altura de plantas de milho através da análise de imagens aéreas obtidas com ARP**. Brazilian Journal of Development, v. 8, n. 1, p. 6900-6917, 2022.

FERREIRA, Daniel Furtado. **SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística**. In: Revista symposium. 2008. p. 36-41.

GALVÃO, Lênio Soares; FORMAGGIO, Antônio Roberto; BREUNIG, Fábio Marcelo. **Relações entre índices de vegetação e produtividade de soja com dados de visada fora do nadir do sensor Hyperion/EO-1**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, v. 14, p. 1095-1102, 2009.

GENÚ, A. M.; DEMATTÊ, J. A. M. **Espectrorradiometria de solos e comparação com sensores orbitais**. Bragantia, v. 71, n. 1, p. 82-89, 2012.

GUHA, Subhanil et al. **Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy**. European Journal of Remote Sensing, v. 51, n. 1, p. 667-678, 2018.

HABIBULLAH, Mohammad et al. **A cost-effective and portable optical sensor system to estimate leaf nitrogen and water contents in crops**. Sensors, v. 20, n. 5, p. 1449, 2020.

HOLLAND, Kyle H.; LAMB, David W.; SCHEPERS, James S. **Radiometry of proximal active optical sensors (AOS) for agricultural sensing**. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, v. 5, n. 6, p. 1793-1802, 2012.

HOUSKA, Treva. **EarthExplorer**. US Geological Survey, 2012.

HURTADO, Sandro Manuel Carmelino et al. **Clorofilômetro no ajuste da adubação nitrogenada em cobertura para o milho de alta produtividade**. *Ciência Rural*, v. 41, p. 1011-1017, 2011.

INOUE, Yoshio et al. **Diagnostic mapping of canopy nitrogen content in rice based on hyperspectral measurements**. *Remote Sensing of Environment*, v. 126, p. 210-221, 2012.

JARMER, T. et al. **Estimation of some chemical properties of an agricultural soil by spectroradiometric measurements**. *Pedosphere*, v. 18, n. 2, p. 163-170, 2008.

JARMER, T. Lilienthal H.; UDELHOVEN, T. **Spectral determination of nitrogen content of wheat canopies**. In: 3 rd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy. 2003.

JENSEN, John R. **Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e**. Pearson Education India, 2009.

KARLEN, D. L.; FLANNERY, RL and; SADLER, E. J. **Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn**. 1988.

LADEIA, Crislaine Alves et al. **Sensor ativo como ferramenta de estimativa de nitrogênio e clorofila em variedades de café**. 2019.

LAMICHHANE, Jay Ram et al. **Toward a reduced reliance on conventional pesticides in European agriculture**. *Plant Disease*, v. 100, n. 1, p. 10-24, 2016.

LEITE, João Lucas et al. **Uso de técnicas geoestatísticas na avaliação do arranjo espacial de plantas em lavoura de milho**. 2021.

LEVKOFF, Lindsay; DOKTER, Peter. **SparkFun Electronics ProtoSnap and repurposed electronics**. In: Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction. 2012. p. 381-382.

LICHTENTHALER, Hartmut K. [34] **Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes**. *Methods in enzymology*, v. 148, p. 350-382, 1987.

LÓPEZ-GRANADOS, Francisca. **Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches**. *Weed Research*, v. 51, n. 1, p. 1-11, 2011.

MARTINAZZI, Elizandra et al. **Espectroscopia de filmes transparentes no UV-VIS-VI**. Salão de Iniciação Científica (16.: 2004: Porto Alegre). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2004., 2004.

MARTINS, Juliano Araujo et al. **Potential use of hyperspectral data to monitor sugarcane nitrogen status**. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 43, 2020.

MATIAS, João Fillipe Generoso; STRECK, Luciano; AGUILAR, Damian Dulau. **Geração de mapas de produtividade de milho (*Zea mays*) com índice de vegetação NDVI de**

imagens Landsat 8. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), João Pessoa-PB. Anais, São José dos Campos: INPE, p. 157-162, 2015.

MENEGHIN, Maria Fernanda Scian et al. **Avaliação da disponibilidade de nitrogênio no solo para o trigo em latossolo vermelho do Distrito Federal.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 1941-1948, 2008.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition.** Bern. International Potash Institute, p. 687-695, 1987.

MICROELECTRONICS, Alcatel; SEMICONDUCTOR, A. M. I.; SOLUTIONS, Inc Apache Design. **Austriamicrosystems AG A VANT Corporation BNR Jntemational Boeing Satellite Systems Broadcom.** 2002.

MILCINSKI, Grega et al. **SENTINEL-2 Services Library-efficient way for exploration and exploitation of EO data.** In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 2017. p. 19502.

MINOLTA, Konica. **Chlorophyll meter SPAD-502 instruction manual.** Minolta Co., Ltd., Radiometric Instruments Operations Osaka, Japan, 1989.

MOGES, S. M. et al. **Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield.** Journal of plant nutrition, v. 27, n. 8, p. 1431-1441, 2005.

MOINARD, S. et al. **Testing the potential of a new low cost multispectral sensor for decision support in agriculture.** In: Precision agriculture'21. Wageningen Academic Publishers, 2021. p. 2025.

MORAES, Gildean Portela et al. **Adubação nitrogenada associada à inoculação com Azospirillum brasilense na cultura do milho.** Agropecuária Técnica, v. 38, n. 3, p. 109-116, 2017.

MOREIRA, Luis Clenio Jário et al. **Características espectrais de solos aluviais submetidos à salinização.** XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Foz do Iguaçu. Anais, INPE, p. 8940-8947, 2013.

MOSS, R. A.; LOOMIS, W. E. **Absorption spectra of leaves. I. The visible spectrum.** Plant physiology, v. 27, n. 2, p. 370, 1952.

MUKAKA, Mavuto M. **A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research.** Malawi medical journal, v. 24, n. 3, p. 69-71, 2012.

NTECH INDUSTRIES. **Greenseeker Manuals** Disponível em: <http://www.ntechindustries.com/greenseeker-manual.html> Acesso em: 3 abr. 2008.

OLIVEIRA, Luiz Felipe Ramalho de et al. **Estimating foliar nitrogen in Eucalyptus using vegetation indexes.** Scientia Agricola, v. 74, p. 142-147, 2017.

- OLIVEIRA, Marcio Regys Rabelo de et al. **Reflectance spectrometry applied to the analysis of nitrogen and potassium deficiency in cotton**. Revista Ciência Agronômica, v. 51, 2020.
- OUYANG, Duosheng; MACKENZIE, Angus F.; FAN, Mingxian. **Phytotoxicity of banded urea amended with triple superphosphate and potassium chloride**. Agronomy Journal, v. 90, n. 6, p. 734-739, 1998.
- OVANDO, Gustavo et al. **Desempeño de diferentes índices de vegetación de Sentinel-2 para estimar el rendimiento de soja en agricultura de precisión**. AgriScientia, v. 38, n. 2, p. 1-12, 2021.
- PĂCURAR, Adrian Daniel et al. **Green Seeker, an Automatic Control System for Variable Rate Fertilizer Application**. A Bibliographic Study. ProEnvironment Promediu, v. 12, n. 38, 2019.
- PALACIOS OREJUELA, Iván; USHĨÑA, Dennis; CARRERA VILLACRÉS, David. **Técnicas SIG para recuperación de suelos cangahuosos, con fines de agricultura comunitaria en el Ilaló**. Ciencia del suelo, v. 38, n. 2, p. 295-309, 2020.
- PALACIOS-VÉLEZ, Enrique; PALACIOS-SÁNCHEZ, Julio Enrique; PALACIOS-SÁNCHEZ, Luis Alberto. **Agricultura de riego asistida con satélites**. Tecnología y ciencias del agua, v. 2, n. 2, p. 69-81, 2011.
- PAZ, Cesar Roberto et al. **Discriminação de diferentes espécies de pastagens com uso da espectrorradiometria**. 2009.
- PETERSON, Todd A. et al. **G93-1171 using a chlorophyll meter to improve N management**. Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension, p. 1353, 1993.
- PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; KUPLICH, Tatiana Mora. **Sensoriamento remoto da vegetação**. Oficina de Textos, p.19, 2015.
- PUSHPANATHAN, K. R.; KUMAR, M. Vijaya; SIDDESWARAN, K. **Chlorophyll meter as a tool to determine the time of application of N in rice (Oryza sativa L.)—A review**. Agricultural Reviews, v. 25, n. 4, p. 309-312, 2004.
- QIAO, Baiyu et al. **Maize Characteristics Estimation and Classification by Spectral Data under Two Soil Phosphorus Levels**. Remote Sensing, v. 14, n. 3, p. 493, 2022.
- RESISTORS, Standard Thick Film Chip. Vishay. 2012.
- RHEZALI, Abdelaziz; LAHLALI, Rachid. **Nitrogen (N) mineral nutrition and imaging sensors for determining N status and requirements of maize**. Journal of Imaging, v. 3, n. 4, p. 51, 2017.
- RIBEIRO, Sharon Gomes et al. **Soil Organic Carbon Content Prediction Using Soil-Reflected Spectra: A Comparison of Two Regression Methods**. Remote Sensing, v. 13, n. 23, p. 4752, 2021.

ROSA, Roberto. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Edufu, p. 264, 2009.

RYU, Youngryel; BERRY, Joseph A.; BALDOCCHI, Dennis D. **What is global photosynthesis? History, uncertainties and opportunities**. Remote sensing of environment, v. 223, p. 95-114, 2019.

SAMBORSKI, Stanislaw Marek; TREMBLAY, Nicolas; FALLON, Edith. **Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations**. Agronomy journal, v. 101, n. 4, p. 800-816, 2009.

SANCHEZ, Alejandro et al. Verification and Validation of the Coastal Modeling System. Report 4. **CMS-Flow: Sediment Transport and Morphology Change**. ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER VICKSBURG MS COASTAL AND HYDRAULICS LAB, 2011.

SANTOS, JANNAYLTON EVERTON OLIVIERA et al. **Imagens do Landsat-8 no mapeamento de superfícies em área irrigada**. Irriga, v. 1, n. 2, p. 30-36, 2015.

SHINOMIYA, Masaki. **Electrodeless Fluorescent Lamp "Everlight"**. Matsushita Technical Report, 1994.

SILVA, Emanuel Araújo et al. **Caracterização espectral na reflectância de Eucalyptus grandis**. Floresta, v. 42, n. 2, p. 285-292, 2012.

TERASHIMA, Ichiro et al. **Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green**. Plant and cell physiology, v. 50, n. 4, p. 684-697, 2009.

TRAN, Nhut-Thanh; FUKUZAWA, Masayuki. **A portable spectrometric system for quantitative prediction of the soluble solids content of apples with a pre-calibrated multispectral sensor chipset**. Sensors, v. 20, n. 20, p. 5883, 2020.

USTIN, Susan L. et al. **Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy**. Remote Sensing of Environment, v. 113, p. S67-S77, 2009.

VALENCIA, Lady Victoria Angulo et al. **Comportamento espectral das culturas de milho, arroz e soja, usando imagens dos satélites Sentinel-2, Cbers-4 e Landsat-8**. 2020.

VALERO UBIERNA, Constantino. **Los sensores ópticos en la agricultura digital**. Plataforma Tierra, 2020.

VALTERSSON, Magnus. **Methods for On-Chip Spectroscopy**. 2018.

VENKATARATNAM, L. et al. **Remote sensing and GIS in agricultural resources management**. In: Proceedings of the First National Conference on Agri-Informatics (NCAI), Dharwad, India, 3-4 June 2001. Indian Society of Agricultural Information Technology (INSAIT), 2002. p. 20-29.

VIGNOLINI, Silvia et al. **Analysing photonic structures in plants**. Journal of The Royal Society Interface, v. 10, n. 87, p. 20130394, 2013.

VON PINHO, RENZO GARCIA et al. **Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho.** Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v. 8, n. 02, 2009.

YAO, Xinfeng et al. **Comparison and intercalibration of vegetation indices from different sensors for monitoring above-ground plant nitrogen uptake in winter wheat.** Sensors, v. 13, n. 3, p. 3109-3130, 2013.