



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

MARCOS ANDRÉ CARDOSO DA SILVA

CONSTRUÇÃO DE CÂMERA MULTIESPECTRAL DE BAIXO CUSTO COM
ANÁLISE EM CULTIVO DE CAFÉ ARÁBICA (*Coffea arabica*)

AREIA
2025

MARCOS ANDRÉ CARDOSO DA SILVA

**CONSTRUÇÃO DE CÂMERA MULTIESPECTRAL DE BAIXO CUSTO COM
ANÁLISE EM CULTIVO DE CAFÉ ARÁBICA (*Coffea arabica*)**

Trabalho de Graduação apresentado a Coordenação do Curso em Agronomia, do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof^a. Dra. Valéria Peixoto Borges.

AREIA

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586c Silva, Marcos André Cardoso da.

Construção de câmera multiespectral de baixo custo com análise em cultivo de café arábica (*Coffea arabica*) / Marcos André Cardoso da Silva. - Areia:UFPB/CCA, 2025.

56 f. : il.

Orientação: Valéria Peixoto Borges.
TCC (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Agronomia. 2. Sensores imageadores. 3. NDVI. 4. Agricultura de precisão. I. Borges, Valéria Peixoto. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631/635(02)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE AGRONOMIA

DEFESA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aprovado em 13/05/2025

“Construção de câmera multiespectral de baixo custo com análise em cultivo de café arábica (*Coffea arabica*)”

Autor: Marcos André Cardoso da Silva

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 VALERIA PEIXOTO BORGES
Data: 02/04/2025 09:26:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Valéria Peixoto Borges
Orientadora – UFPB

Documento assinado digitalmente
 RENAN AVERSARI CAMARA
Data: 31/03/2025 21:05:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Renan Aversari Câmara
Coorientador – UFPB

Documento assinado digitalmente
 ALLEF DE SOUZA SILVA
Data: 17/03/2025 15:33:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Allef de Souza Silva
Examinador – UFPB

Documento assinado digitalmente
 ROBSON DE SOUSA NASCIMENTO
Data: 17/03/2025 17:57:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Robson de Sousa Nascimento
Examinador – UFPB

À Deus, por ter concebido essa conquista em minha vida, agraciando-me com essa vitória. A toda minha família, pela dedicação, motivação, compreensão, paciência, amor e força. Aos meus pais que fizeram o possível para que conseguisse chegar à conclusão do curso. Meus irmãos Ivonaldo, Maria da Conceição e Thiago que também me apoiaram bastante. Em especial ao meu avô, Manoel Cardoso da Silva (*In memoria*) que muito me ajudou em vida, direta e indiretamente durante a fase inicial do curso, no qual, nunca deixou de acreditar em mim. A minha avó Maria Ferreira. Aos amigos adquiridos ao longo do curso. Em especial, Samara que tem muito significado para mim, me auxiliando constantemente, acreditando incontestavelmente no meu potencial. Meu respeito e admiração infinita para com ela. E a mim mesmo, como mérito de tanto esforço, dedicação e determinação, **Dedico.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus** por mais essa conquista e pela força necessária para não desistir de meus objetivos e assim concretizar meu grande sonho em se tornar Engenheiro Agrônomo, agregando também a formação de Licenciatura em Geografia.

Aos meus pais, **Marinalva Cardoso** e **Antonio Francisco** que com tamanha humildade fizeram o possível para que conseguisse concluir mais este curso, ajudando-me nos momentos bons e ruins durante toda a minha vida e mais ainda durante o trajeto do curso de Agronomia. No qual, com seus grandes ensinamentos, possibilitou-me enxergar a profissão de Engenheiro como alguém que cuida da terra que nos oferta nosso alimento.

Aos meus irmãos: **Ivonaldo Cardoso**, **Maria da Conceição** e **Thiago Cardoso** pelo incentivo.

A **Samara Silva** minha namorada, oportunizado pelo presente de maior significância adquirido no decorrer do curso que foi conhecê-la, minha fonte de inspiração, alegria, aventuras, aprendizagens e ensinamentos, contando sempre com seu apoio, motivação, companheirismo e sonhos.

A minha tia **Vera Lúcia** por corroborar com seu apoio, prestatividade e crença no meu potencial.

Aos meus avós, em especial **Manoel Cardoso** (*In memoria*) e **Maria Ferreira** que tanto me apoiaram e contribuíram para que chegasse à realização de meu sonho.

As minhas primeiras professoras **Marinalva Ribeiro** e **Verlândia Duarte** que muito me motivavam a trilhar os caminhos acadêmico, acreditando em meu potencial. Assim, como todos os meus professores que fizeram parte do Curso da UFPB, em especial, Adriana Ferreira, Naysa Flávia, Roseilton Fernandes, Bruno Dias, Núbia Pereira, Lucina Rocha, Tássia Melo, Yirina Valdes, Elizabeth Almeida, Bruno Malaquias, Valéria Peixoto, Silvanda Silva, Maria Lorena, Flávio Pereira, Carlos Augusto, Loise Araujo, Aline Mendes, Guilherme Podestá, Walter Esfrain, Mauricio Javier, Lindomárcia Costa, Rosivaldo Gomes, Cauby Dantas, Mário Vinicius, Jaqueline Saraiva, Djail Santos, Sheila Costa, Paloma (doutoranda) que contribuíram bastante ao longo dos semestres, por meio das disciplinas, conversas, debates, colaborativas que proporcionaram direta e indiretamente o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor **Roseilton Fernandes** pelas oportunidades concebidas e honra de poder trabalhar como membro de sua equipe. A professora Dra. **Adriana Ferreira** pela prestatividade, oportunidades e amizade. A professora Dra. **Naysa Flávia** pelas oportunidades de integrar a sua equipe de trabalho no início da graduação.

Aos funcionários da UFPB que integrada o setor da limpeza, bibliotecários, equipe do Centro de Atendimento Médico, Odontológico e Psicossocial – CAMOPS, Secretaria Integrada de Atendimento à Graduação - SIAG, do Grêmio Estudantil, os que compõe o Restaurante Universitário, em especial ao **Raqueilson** com muita prestatividade, dinamismo, entusiasmo, presteza e atendimento quando nos foi necessário.

A **Mariana** pela sua amizade conquistada através da ação de monitoria, no qual, possibilitou me sentir honrado em trabalhar ao seu lado. A **Bianca Marina** por sua amizade, cooperação durante o curso e apoio motivacional. A **Sara Rafaela** por sua amizade e contribuição durante as oportunidades em trabalhar com ela, pessoa extremamente compromissada e que instiga na realização de tudo com muita perfeição.

A **Maria Luiza** pelas conversas descontraídas, sua amizade e sempre ocorrência do respeito mútuo. A **Rosane Martins** pela oportunidade de trabalho, apresentando sempre seu empenho e dedicação em todas as ações. O ilustre **Antonio Alisson** pelos ensinamentos sobre a utilização do lúdico em apresentação através do Teatro de Babau. Também a **João Pedro** e **Renata**.

Agradeço também a **Pollyana** e **Viviane** pela motivação sempre atribuída a mim. Ainda a **turma 2018.2**. Em especial aos amigos **Roberto Ítalo**, **Antenor Pereira**, **Jadson Bruno** e **Bruno Santana** por terem sido agentes fundamentais na permanência e conclusão do curso. Além de agradecer a **Elizabeth Lins** por ter sido responsável por me apresentá-los e possibilitar minha inicialização no curso.

A **Bruno Santana** por toda sua prestatividade, amizade e ajuda no decorrer do curso. Assim como aos colegas e amigos **Carlos Wanderson**, **Jheison Yan**, **Elnatan Alves**, **Jonas Fortunato**, **José Roberto**.

A **Tiago Leandro** e **Manoel Monteiro** que muito me ajudaram na fase difícil após momento pandêmico, oportunizando-me com estadia. A seu **Rômulo Cesar**, sortudo aquele que advém de sua amizade, grande homem.

A minha orientadora Dra. **Valéria Peixoto Borges** pelas leituras sugeridas ao longo dessa orientação, dedicação, oportunidades, conversas e por aceitar o desafio da orientação.

A banca examinadora, meus agradecimentos (**Renan Aversari**, **Robson de Sousa** e **Allef de Souza**) possibilitando, assim, a conclusão deste para obtenção do título de graduação. Principalmente, **Renan Aversari** que contribuiu significativamente para que fosse possível esse projeto final, sempre fazendo acreditar que daria certo, repassando seus ensinamentos, orientações e amizade. Meus agradecimentos a todos que me ajudaram, sejam direta ou indiretamente, a alcançar essa conquista que é obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Parênteses

*Foi assim que salvei teu contato,
Com parênteses fechados.
Só não imaginava que aquele pequeno espaço,
Vazio entre eles definiria o tempo, que nos foi
determinado.
Eu com essa minha mania de não salvar nomes,
pensei que dessa vez fosse diferente.
Já houve o ponto final, a vírgula, a exclamação,
as o parente parecia surpreendente.
Foi assim que salvei teu contato, parecia um
“ferro” sem explicação, todas as vezes que
chegava uma nova notificação.
Foi assim que salvei teu contato, com
parênteses fechados, acho que esse foi meu
erro, fechar o que nem havia começado.*

Fragmento poético transcrito por S. S. S.
(2024).

*“Ninguém educa ninguém, ninguém educa a si
mesmo, os homens se educam entre si,
mediatizados pelo mundo.”*
(Freire, 1987, p.39)

RESUMO

A Agricultura de Precisão tem sido uma importante ferramenta aliada ao sistema de produção agrícola. Na tentativa de atingir com rapidez acesso à informação de modo eficiente, sensores imageadores têm sido utilizados na agricultura moderna, principalmente para monitoramento de áreas cultivadas, com diagnóstico em tempo real da condição geral da cultura. São equipamentos que apresentam no mercado custos elevados, mas que podem ser substituídos por alternativas acessíveis. Em destaque, temos os instrumentos de aquisição de informações espectrais direcionadas ao estudo da vegetação a partir dos comprimentos de ondas na faixa do visível e infravermelho próximo que possibilitam parametrizar atributos morfofisiológicos dos dosséis vegetais, indicados pelo Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI). Com isso, objetivou-se construir uma câmera multiespectral de baixo custo, implementada em plataforma de código aberto Arduino Uno com testes de funcionamento aplicados em variedades de café arábica (*Coffea arabica* L.) na área experimental da Chã do Jardim, Areia, Paraíba. Os materiais foram adquiridos com recursos próprios, gasto equivalente a R\$ 708,17 reais para construção do equipamento. Foi realizada a montagem, confecção e programação da câmera multiespectral a baixo custo através do *Software* Arduino IDE 2.3.3 aplicando a linguagem de programação C-Arduino. Em campo, realizou-se duas visitas na área para tomada de dados da câmera manual, posteriormente, o processamento das imagens através do programa computacional QGIS *Desktop* 3.16.1. Foram realizados, nestes mesmos momentos, os mapeamentos com câmera comercial multiespectral embarcada DJI Mavic 3 Enterprise, para comparar os resultados. A partir das médias do NDVI das variedades de café Acaiá e Araraçu nos três tratamentos gerada com as câmeras, observou-se uma relação mútua, onde a câmera Manual demonstrou ser eficiente para identificar as variações do NDVI no cultivo. A análise estatística apontou que os resultados dos equipamentos diferem entre si. Muito possivelmente devido variação temporal, desuniformidade dada as condições de luminosidade, ângulo de visada, tempo do voo e tomada de dados, além da diferença entre as alturas dos sensores. Filtros utilizados na câmera manual (M) podem não ter realizado a filtragem das bandas desejadas. A câmera embarcada DJI (D) apresentou menor instabilidade, conferindo menor variação das médias. Portanto, a câmera multiespectral manual (M) pode ser utilizada para identificar NDVI em pequenas áreas agrícolas, vazios e problemas nos cultivos, com eficiência e baixo custo em sua produção.

Palavras-Chave: sensores imageadores; NDVI; agricultura de precisão.

ABSTRACT

Precision Agriculture has become an important tool in the agricultural production system. In an attempt to achieve fast access to information in an efficient way, imaging sensors have been used in modern agriculture, mainly for monitoring cultivated areas, with real-time diagnosis of the general condition of the crop. This equipment is expensive on the market, but can be replaced by affordable alternatives. In particular, we have instruments for acquiring spectral information aimed at studying vegetation from wavelengths in the visible and near-infrared range, which make it possible to parameterize morphophysiological attributes of plant canopies, indicated by the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). With this in mind, aimed to build a low-cost multispectral camera, implemented on the Arduino Uno open source platform, with operational tests applied to arabica coffee varieties (*Coffea arabica* L.) in the experimental area of Chã do Jardim, Areia, Paraíba. The materials were purchased with the company's own resources, with an expenditure of R\$ 708.17 reais to build the equipment. The low-cost multispectral camera was assembled, built and programmed using the Arduino IDE 2.3.3 software and the C-Arduino programming language. In the field, two visits were made to the area to take data from the manual camera, and then the images were processed using the computer program QGIS Desktop 3.16.1. At the same time, mapping was carried out using the commercial multispectral camera DJI Mavic 3 Enterprise, in order to compare the results. From the NDVI averages of the Acaiá and Araraçu coffee varieties in the three treatments generated with the cameras, a mutual relationship was observed, where the Manual camera proved to be efficient in identifying NDVI variations in the crop. The statistical analysis showed that the results of the equipment differed from each other. This is quite possibly due to temporal variation, unevenness due to lighting conditions, angle of view, flight time and data collection, as well as the difference between the heights of the sensors. Filters used in the manual camera (M) may not have filtered out the desired bands. The DJI on-board camera (D) showed less instability, giving less variation in the averages. Therefore, the manual multispectral camera (M) can be used to identify NDVI in small agricultural areas, voids and crop problems, with efficiency and low cost in its production.

Keywords: imaging sensors; NDVI; precision agriculture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Comportamento das ondas de radiação com base no conteúdo vegetal do alvo	18
Figura 2 –	Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica, durante 24 meses, nas condições climáticas tropicais do Brasil	23
Figura 3 –	Mapa de localização da área de estudo em cafezal na Estação Experimental Chã de Jardim, no município de Areia – PB, 2024	24
Figura 4 –	Diagrama do circuito elétrico elaborado pela Interface do <i>software</i> Fritzing©	26
Figura 5 –	Imagem externa (A) e interna (B) da Câmera Manual desenvolvida no LIASER, DSER/CCA/UFPB, Areia – PB, 2024	27
Figura 6 –	Bastão metálico adicionado a câmera multiespectral de baixo custo, LIASER, CCA, UFPB, Areia/PB, 2024	28
Figura 7 –	Microcontroladores: A) Câmeras OV2640 e B) Câmeras OV5640	28
Figura 8 –	Croqui da área experimental com destaque as variedades selecionadas para tomada de dados: Arraçu e Acaiá, Estação Experimental Chã do Jardim, CCA, UFPB, Areia/PB, 2024	30
Figura 9 –	Tomada de dados com uso de ARP DJI Mavic 3 Enterprise Multispectral e a câmera multiespectral de baixo custo no campo varietal café, Estação Experimental Chã de Jardim, CCA, UFPB, Areia/PB, 2024	31
Figura 10 –	Tomada de dados com uso da câmera manual de baixo custo no campo varietal café: A) imageamento e B) aferição da altura da planta, Estação Experimental Chã de Jardim, CCA, UFPB, Areia/PB, 2024	32
Figura 11 –	Imagens geradas pela câmera manual (M) da variedade de café Acaiá no Bloco 1: A) Infravermelho Próximo (NIR) e B) vermelho (Red), LIASER, CCA/UFPB, Areia – PB, 2024	32
Figura 12 –	Ortomosaico do NDVI gerado com a câmera embarcada DJI (D) e imagens do NDVI feitas com a câmera manual (M) da variedade Acaiá	34
Figura 13 –	Ortomosaico do NDVI gerado com a câmera embarcada DJI (D) e imagens do NDVI feitas com a câmera manual (M) da variedade Araraçu	35
Figura 14 –	Média do NDVI da variedade de café Acaiá gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada DJI (D)	40
Figura 15 –	Média do NDVI da variedade de café Araraçu gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada DJI (D)	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Preços dos principais componentes utilizados na construção da câmera multiespectral durante sua confecção, Laboratório de Instrumentação Ambiental e Sensoriamento Remoto, Departamento de Solos e Engenharia Rural, CCA, UFPB, 2024	25
Tabela 2 - Alturas das variedades Acaiá – Araraçu e os resultados das médias NDVI das câmeras manual e embarcada ARP DJI	36
Tabela 3 - Estatística descritiva para variedade Acaiá nos três tratamentos, para o NDVI gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada na ARP DJI (D)	38
Tabela 4 - Análise de variância unidirecional para a variedade Acaiá, realizada após reamostragem (<i>bootstrapping</i>) para o NDVI gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada DJI (D)	39
Tabela 5 - Estatística descritiva para variedade Araraçu nos três tratamentos, para o NDVI gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada na ARP DJI (D)	40
Tabela 6 - Análise de variância unidirecional para a variedade Araraçu, realizada após reamostragem (<i>bootstrapping</i>) para o NDVI gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada DJI (D)	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AP	Agricultura de Precisão
ARP	Aeronaves Remotamente Pilotadas
CCA	Centro de Ciências Agrárias
CV	Coeficiente de Variação
B	Blue
B1	Bloco 1
B2	Bloco 2
B3	Bloco 3
BCa	Bias Correction accelerated
D	Câmera embarcada na ARP DJI
DP	Desvio Padrão
DMTI	Terminal Conector Tubular Ilhós
G	Gren
Gb	Gigabytes
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IV	Infravermelho
M	Câmera Manual
m	Metros
LIASER	Laboratório de Instrumentalização Ambiental de Sensoriamento Remoto
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NDs	Números Digitais
NIR	Reflectância da Radiação no Infravermelho Próximo
PB	Estado da Paraíba
R	Red
RGB	Red Gren Blue
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
W	Watts

LISTA DE SÍMBOLOS

©	Copyright
mAh	Miliampére-hora
nm	Nanomêtro
μm	Micrômetro
%	Porcentagem
C++	Extensão da linguagem C
kΩ	Kilohm
v	Voltagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	SENSORIAMENTO REMOTO NA AGRICULTURA DE PRECISÃO	17
2.2	NDVI NO MONITORAMENTO DOS CULTIVOS AGRÍCOLAS	18
2.3	UTILIZAÇÃO DE MICROCONTROLADORES DE BAIXO CUSTO NA CONSTRUÇÃO DE SENSORES AMBIENTAIS	20
2.4	CONSTRUÇÃO DE SENSORES PARA IMAGEAMENTO COM PLATAFORMAS DE BAIXO CUSTO	21
2.5	CAFÉ (<i>Coffea</i> L.)	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	MATERIAIS PARA CONFECÇÃO DO SENSOR	24
3.2	MONTAGEM	27
3.3	PROGRAMAÇÃO	28
3.4	APLICAÇÃO EM CAMPO	29
3.5	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS	32
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICE I – CÓDIGO PROGRAMAÇÃO CÂMERA MANUAL	52

1 INTRODUÇÃO

O cenário agrícola passa por intenso processo de modernização. A agricultura de precisão utiliza um conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas ao sistema de gerenciamento agrícola, com base na variabilidade espacial, temporal da unidade produtiva, objetivando a lucratividade e minimização dos efeitos ao meio ambiente (Brasil, 2014). Desta forma, é um importante instrumento incorporado ao sistema de produção agrícola.

As tecnologias empregadas na agricultura de precisão possibilitam vigilância eficiente das plantações, detecção precoce de doenças e pragas, administração precisa de fertilizantes e defensivos, centrada na diminuição do impacto ambiental, aumento da produção e eficiência agrícola (Furtado *et al.*, 2023).

Atualmente, o monitoramento aéreo em plantações vem se consolidando, principalmente para tomadas de decisões, graças a rapidez na informação proposta. Entre as tecnologias utilizadas está o mapeamento do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN, em inglês, Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) proposto por Rouse *et al.* (1973) (Souza *et al.*, 2023). No qual, descreve e quantifica o nível de vigor da vegetação considerada (Moscovini *et al.*, 2024).

Na agricultura, sua aplicação consiste em estimar a quantidade, qualidade e acompanhar o desenvolvimento da vegetação por meio da medição da intensidade de radiação refletida em determinadas faixas do espectro eletromagnético (Gama-Moreno *et al.*, 2024).

Para obtenção do NDVI são utilizados sensores imageadores, empregados para monitorar propriedades agrícolas e acompanhar a eficiência da produção (Dong *et al.*, 2017), por meio de câmeras multiespectrais (Crusiol, 2017).

A realização de levantamento com sensores comerciais apresenta custos elevados, principalmente a pequenos produtores, devido haver necessidade de ARP (Aeronave Remotamente Pilotada) ou integração de sistemas de imagens com alto valor em máquinas agrícolas, corroborando para aumento no custo geral do equipamento/aplicação (Cucho-Padin *et al.*, 2020).

Sistemas desenvolvidos com materiais de baixo custo apresentam maior facilidade de aquisição e manuseio (Gomes, 2020). As câmeras multiespectrais para estudo da vegetação, apresentam sensores ou filtros responsáveis por medições em comprimentos de ondas na faixa do visível ao infravermelho (Pozo *et al.*, 2014). Tais medidas da radiação refletida são aplicadas em estudos de parametrização de atributos morfofisiológicos dos dosséis vegetais, feitos com métodos baseados nas propriedades das plantas (Ollinger, 2011).

O desenvolvimento de câmeras multiespectrais viabiliza estudos com diversas variedades de espécies vegetais, inclusive café (*Coffea* L.), apresentando alto potencial para trabalho com estimativa de produtividade, desenvolvimento e vigor vegetativo da planta (Fabri *et al.*, 2023). Seu uso pressupõe eficiência, custo-benefício para monitoramento da cultura agrícola; avaliação de sua efetividade, sensibilidade em identificar a resposta espectral sob tratamentos diferentes e desempenho equiparado ao sensor comercial.

Com isso, a pretensão de trabalhar com essa temática surgiu a partir das experiências durante o Estágio Supervisionado no Laboratório de Instrumentalização Ambiental e Sensoriamento Remoto (LIASER), lotado no Departamento de Solos e Engenharia Rural, Campus II, Areia, Estado da Paraíba. Sob as perspectivas e desafios em produzir uma câmera multiespectral de baixo custo, que possa apresentar eficiência semelhante às disponibilizadas pelo mercado comercial para análise de parâmetros agronômicos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Construir uma câmera multiespectral de baixo custo, a partir da plataforma de código aberto Arduino Uno com testes de funcionamento aplicados em cultivo de café arábica (*Coffea arabica* L.) na área experimental da Chã do Jardim, Areia, Paraíba.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar a viabilidade técnica e financeira de desenvolver o equipamento com integração de sensores e filtros com valor acessível para captura de imagens em diferentes bandas espectrais;
- Analisar o sistema de captura das imagens por meio de ajustes e teste de operacionalidade para coleta eficiente dos dados multiespectrais;
- Avaliar o equipamento a partir de sua aplicação em variedades de café arábica (*C. arabica* L.), em comparação com a câmera comercial da ARP DJI Mavic 3 Enterprise Multiespectral.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SENSORIAMENTO REMOTO NA AGRICULTURA DE PRECISÃO

Agricultura de Precisão (AP) é um sistema de gerenciamento agrícola que considera a variabilidade temporal-espacial da unidade produtiva, com intuito de melhorar a sustentabilidade da produção agrícola, conferindo aumento em retorno econômico e a redução de efeitos ao ambiente (MAPA, 2012). Envolve três elementos principais: coleta de informações, aplicação de tecnologia e gestão (Wakulicz, 2016). Assim, o resultado contemplará assertividade, segurança e celeridade na tomada de decisão quanto ao manejo da cultura, levando em consideração o aspecto e o sensor a ser utilizado.

Essa modalidade de agricultura trabalha com mapeamento a partir da obtenção, processamento e análise de dados que possibilita auxiliar no entendimento das condições ideais para o cultivo das principais culturas agrícolas, como a exemplo, falhas de plantio, estresse hídrico, competição com outras espécies e doenças das plantas, no qual, pode-se identificar e mapear as áreas mediante uso combinado dessas tecnologias (SENAR, 2018).

As áreas de produção agrícolas necessitam de monitoramentos para alcançar ao máximo, potencial de produção da cultura. Isso viabiliza a inserção da tecnologia nesse ambiente. Tem forte uso os satélites, sensores (ópticos, térmicos, elétricos), GPS (*Global Positioning System*), ARPs e estações meteorológicas (Schiessl, 2023).

O sensoriamento remoto consiste em uma ferramenta indispensável que pode ampliar significativamente a eficácia dos métodos tradicionais de monitoramento ao meio ambiente, em razão de sua capacidade em cobrir rapidamente grandes áreas e com coberturas repetidas, fornece informações espaciais e temporais necessárias para o manejo sustentável (Formaggio; Sanches, 2017).

Os sensores mais utilizados têm sido os imageadores devido à facilidade, funcionalidade e rapidez na resposta, assim, essa integração de sistemas eletrônicos embarcados com *softwares* especializados possibilita a supervisão e automação em tempo real de máquinas e implementos agrícolas, apto na monitorização e aquisição de informações por meio de sensores, bem como a execução de cálculos estatísticos preditivos (Prado, 2021).

Com a implantação dessas novas tecnologias na agricultura, principalmente as câmeras multiespectrais, os sistemas de gerenciamento têm apresentado resultados eficientes e efetivos principalmente ao agronegócio, refletido diretamente na lucratividade e vetando desperdícios na produção (Inceres, 2016).

As câmeras multiespectrais são exemplos de alternativas para acompanhamento em áreas agrícolas, onde operam por meio de três canais de detecção de cores, alinhados para otimizar a captura de imagens na faixa espectral visível: vermelho (R: *red*), verde (G: *green*) e azul (B: *blue*), capazes de detectar luz na faixa do Infravermelho Próximo (NIR: *Near Infrared*), faixa geralmente que pode ser bloqueada por meio de um filtro óptico (EMBRAPA, 2022).

Aplicação de sensores multiespectrais pode determinar índices de vegetação que mostram um foco na caracterização espectral de solos, plantas e a estimativa de sua produtividade (Silva *et al.* 2014). Assim, o uso de sensores multiespectrais pode auxiliar no diagnóstico e recomendação de aplicação e fertilização de nutrientes as culturas agrícolas.

2.2 NDVI NO MONITORAMENTO DOS CULTIVOS AGRÍCOLAS

A luz solar ao incidir sobre uma planta, parte dos comprimentos de ondas são refletidos, absorvidos e transmitidos, devido a estrutura interna da folha (Liu, 2007) (Figura 1). Sob condições saudáveis, o fotorreceptor da fotossíntese na folha, a clorofila, absorve intensamente luz na faixa do visível, e devido sua estrutura celular, reflete vigorosamente luz do infravermelho próximo (NIR), o que em qualquer alteração na sua sanidade sejam problemas ocasionados por déficit hídrico, doenças ou infestações por pragas agrícolas, passa inverter o processo, absorvendo mais luz infravermelha e refletindo mais luz vermelha, por consequência, há redução no valor do NDVI (Alves; Silva, 2013).

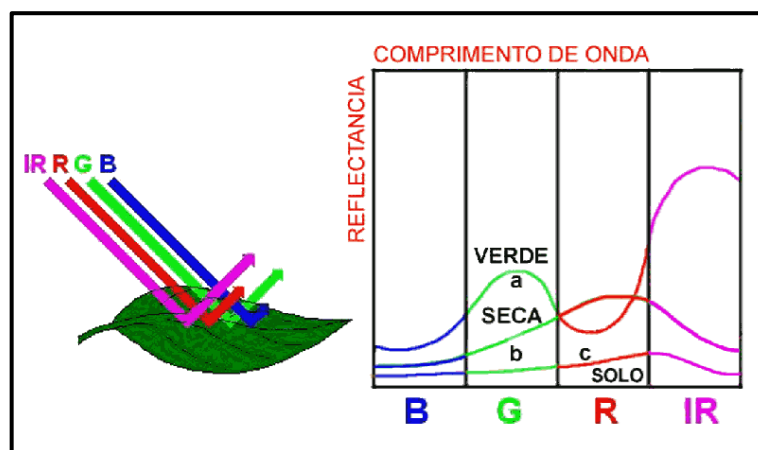


Figura1. Comportamento das ondas de radiação com base no conteúdo vegetal do alvo.
Fonte: <<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>.

Na utilização de um sensor multiespectral para monitoramento agrícola, o cálculo do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), apresenta a qualidade da vegetação imageada e fornece um cenário da situação de preservação e qualidade de áreas verdes da planta por

intermédio da clorofila (Coelho; Rosalen; Faria, 2018). Esses dados em forma de números digitais – NDs convertidos para sinal elétrico da radiação incidente no sensor, resulta como produto, a informação (Mangold *et al.*, 2013).

Pelo NDVI ser um índice baseado na reflectância do dossel, facilita monitorar o vigor da vegetação, a partir da combinação matemática de resposta espectral através das faixas do comprimento de onda vermelho (650 a 700nm - R) e infravermelho próximo (750 a 1300 nm - NIR) (Silva, 2019). Onde, a depender do tipo de cultura, essa radiação solar na faixa do NIR reflete entre 30 e 80% dos raios incidentes (Shiratsuchi *et al.*, 2014). Nesse seguimento, de acordo com Rouse *et al.* (1973), o cálculo é dado pela equação 1:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}), \quad (\text{Eq.1})$$

Em que:

NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

NIR = Refletância da vegetação na banda do infravermelho próximo.

R = Refletância da vegetação na banda do vermelho.

Os resultados do NDVI variam de -1 a 1 (Braz; Andrade; Garcia, 2015) onde os valores próximos de 1 representam áreas com maior vegetação fotossinteticamente ativa, enquanto os valores próximos de -1 representam áreas hídricas ou nuvens. Baseia-se na energia refletida no vermelho e infravermelho próximo, no qual, a região do vermelho tem comprimento de onda sensível ao conteúdo de clorofila na folha (Neves, 2016).

Cooperam na detecção de estresse nutricional da planta por intermédio de diferentes faixas do espectro, como a região do Infravermelho Próximo (NIR) que varia entre 0,7 a 1,3 micrômetro (μm), no qual, essa planta apresentando estresse nutricional será possível perceber a partir da degradação do pigmento fotossintético como a clorofila A, clorofila B, xantofilas, antocianinas e carotenoides, respectivamente (Jorge; Inamasu; 2014).

Para cada situação apresentada pela planta seja estresse hídrico, déficit nutricional, pragas e/ou doenças, a utilização do NDVI por intermédio do processamento analítico das imagens captadas com câmeras multiespectrais, possibilita a construção de diversos índices relacionando a cobertura vegetal, acúmulo de biomassa, até mesmo teores de nitrogênio em diversas espécies cultivadas (Sena Júnior *et al.* 2008; Li *et al.*, 2010). É uma forte tecnologia aliada ao campo, pois, fornece uma maneira poderosa, rápida e econômica de alcançar o monitoramento em tempo real e de forma precisa da colheita, doenças e pragas (Zhang *et al.*, 2019).

2.3 UTILIZAÇÃO DE MICROCONTROLADORES DE BAIXO CUSTO NA CONSTRUÇÃO DE SENSORES AMBIENTAIS

O Arduino (microcontrolador) é uma plataforma de código aberto, desenvolvida em 2005 na Ivrea, Itália, por Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis com intuito de ofertar controle integrado de projetos de design, interação de forma econômica mediante os sistemas de criação de protótipos disponíveis no mercado (Nogueira, 2021).

É de fácil utilização, apto para pessoas com mínimo conhecimento técnico que possibilita utilizar e criar projetos de modo independente a partir das habilidades e experiências adquiridas (Mcroberts, 2015). Apresenta diversas aplicações, como na eletrônica, robótica, indústrias, jogos, segurança, ambiente escolar, entre outros.

Sua plataforma possui *hardware* e *software* livres que denotam, segundo Neri (2014) boa relação custo-benefício; facilidade de programação, gravação do *software* na placa; comunicação via USB embutida na placa, o que facilita a conexão com o servidor; a linguagem utilizada para sua programação é de fácil compreensão. Com esquemas de placas, assim como códigos de aplicações disponibilizados livremente na *internet*, permitem serem alterados, redistribuídos, desenvolvidos e aperfeiçoados (Amaral; Silva, 2017).

As desvantagens do Arduíno consistem em suas placas não executarem mais de um programa por vez; algumas versões sem suporte de comunicação integrado; não suporta linguagem de programação Java e apresenta baixa capacidade de armazenamento de memória (Cravo, 2024).

Existem uma diversidade de Arduíno no mercado com especificidades em *hardware* como o Arduino Pro mini, Arduino Fio, Arduino Nano, Arduino Micro, Arduino Leonardo, Arduino Mega, Arduino Lilypad, Arduino Duo, Arduino Yun, Arduino Esplora, Arduino Robot, Arduino Ethernet, Arduino Pro, Arduino Tre e o mais fácil de manipulação de linguagem de programação simplificado C++, Arduino Uno (Herminia, 2020).

Algumas aplicações no ambiente agrícola são: automação de irrigação para fins de otimização a produção agrícola; como fornecimento de água com precisão sob demanda; monitoramento ambiental como parâmetros umidade do solo, temperatura e umidade do ar; monitoramento da água em termos de qualidade e variação do volume e monitoramento da planta acompanhando seu desenvolvimento, respectivamente no nível do campo agrícola em tempo real (Carvalho, 2023).

A facilidade em aplicação torna o Arduino Uno destaque dentre os mais utilizados, porém apresenta limitações em armazenamento e desempenho (Ramli; Jabbar, 2022). Ressalvas para seu baixo custo, integração com outros equipamentos complementares e eficiência denotada em tempo real.

2.4 CONSTRUÇÃO DE SENSORES PARA IMAGEAMENTO COM PLATAFORMAS DE BAIXO CUSTO

A inserção de novas tecnologias na agricultura tem se intensificado ao longo dos anos, devido seu uso eficiente e importância da implementação de equipamentos autônomos (Santos *et al.*, 2024). Sensores destinados ao imageamento tem sido frequentemente desenvolvido a baixos custos para atendimento principalmente, a pequenos agricultores.

São dispositivos físicos que convertem informação visual em um sinal elétrico, converte luz em uma determinada banda de frequência, com aplicações em sistemas aéreo, monitoramento e auxílio à agricultura (Ferreira, 2008).

Uma opção atrativa por possibilitar análises sejam qualitativas ou quantitativas, podendo direcionar-se em organismos individuais ou integrar-se ao longo do campo de visão para obter uma perspectiva de nível comunitário ou de dossel (Jenkins *et al.*, 2007; Richardson *et al.*, 2009; Sonnentag *et al.*, 2012).

Sua aplicação está em diferentes atividades: monitoramento de culturas da sanidade de uma lavoura; detecção de estresse hídrico; localização e distribuição do ataque de pragas; estimativas de produtividade e previsão de safra; modelagem hidrológica; mapeamento de culturas (Vailant, 2017); através das câmeras multiespectrais que podem ser programadas com placa controladora Arduino.

É possível também trabalhar com sistema de câmera dupla, quando conectado a um Raspberry Pi para obtenção de imagens NDVI (Stamford *et al.*, 2023). As imagens com diferentes comprimentos de onda de um mesmo local podem ser tomadas em tempo real (Kaizu; Imou, 2008).

Existem estratégias que incluem instrumentos projetados para implementar filtros ópticos de passagem de banda dupla personalizados, que permite regiões estreitas nos comprimentos de onda vermelho e NIR passarem para um único sensor de câmera (Dworak, 2013). Isso aponta a evolução no uso da tecnologia em campo, assim como crescimento na produção de sensores imageadores para monitorar culturas agrícolas que venham facilitar as tomadas de decisões.

2.5 CAFÉ (*Coffea* L.)

O café pertence à família *Rubiaceae* do gênero *Coffea*, entre as variedades de importância mundial exploradas comercialmente tem-se o *Coffea arábica* (café arábica); *Coffea canephora* (café robusta), em menor volume tem o *Coffea liberica* (café libérica) e *Coffea dewevrei* (café excelsa) (EMBRAPA, 2004).

Com posto de maior produtor e exportador de café no mundo, está o Brasil. Apresentando em 2024 uma produção entorno de 54,2 milhões de sacas de 60 kg, com uma redução de 1,6% em relação ao ciclo de 2023 influenciada pelos fenômenos climáticos (geadas, restrição hídrica, altas temperaturas), cuja produtividade média nacional de 28,8 sacas colhidas por hectare (CONAB, 2024). *A priori*, o segundo maior produtor está o Vietnã.

Para acompanhar a competitividade existente na economia mundial, existe a necessidade de aumentar a eficiência dos sistemas de produção, seja por meio de tecnologias em geoprocessamento, sistemas de posicionamento global, dentre outras tecnologias para que uma simples propriedade seja um polo produtivo, altamente tecnificado e diversificado (Fabri *et al.*, 2023).

É importante uma cultura saudável. Com surgimento da agricultura de precisão, alternativas estão cada vez mais frequentes ao acompanhamento do desenvolvimento da produção. Sejam os satélites ou sistemas de sensoriamento acoplados a ARP (Aeronave Remotamente Pilotada) para imageamento da área, ambos facilitam acompanhar a cultura por meio da resolução espacial e temporal (Candiago *et al.*, 2015).

O imageamento em áreas de plantio da cultura do café veem sendo realizado com imagens capturadas a partir de sensores multiespectrais ou não, oportunizando a realização de análise de índices de vegetação, medições radiométricas para a determinação de parâmetros biofísicos, características da vegetação, área foliar, biomassa, absorção de radiação fotossinteticamente ativa, produtividade e até mesmo análise da reflectância dos espectros eletromagnéticos (Furlanetto *et al.*, 2017).

São variáveis cujos valores de NDVI sofrem variação conforme as condições da cultura e sua fase fenológica. Ocorre segundo Camargo e Camargo (2001) porque o ciclo fenológico dos cafeeiros da espécie *Coffea arabica* L. apresenta uma sucessão de fases vegetativas e reprodutivas que ocorrem em aproximadamente dois anos, diferentemente da maioria das plantas que emitem as inflorescências na primavera e frutificam no mesmo ano fenológico. Apresenta, portanto, seis fases fenológicas (Figura02).

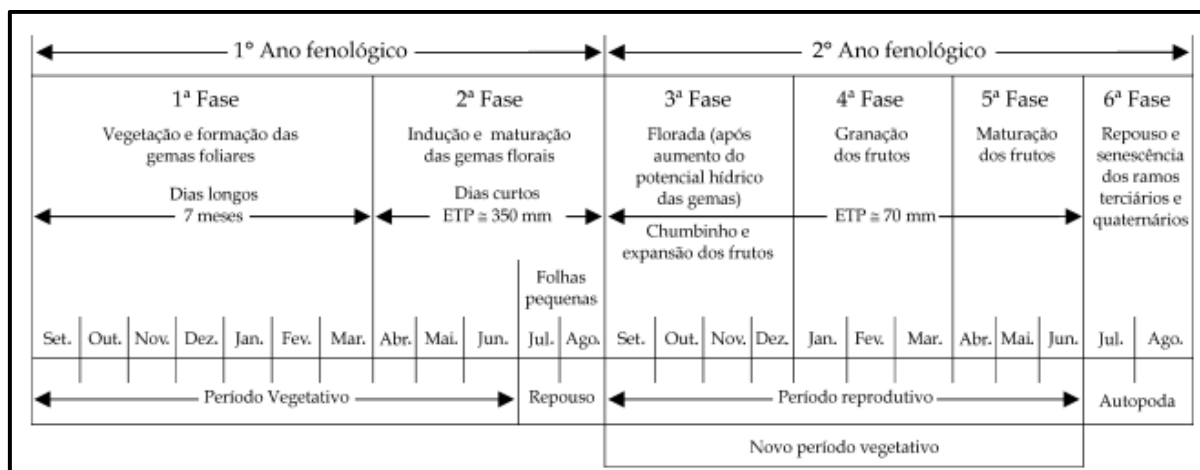


Figura02. Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica, durante 24 meses, nas condições climáticas tropicais do Brasil.

Fonte: Camargo; Camargo, 2001.

Em seu ciclo fenológico, o cafeeiro responde morfofisiologicamente de acordo com as condições do ambiente, quando sob condições de estresse, altera suas propriedades ópticas e os padrões de refletância das folhas e dosséis (Volpato *et al.*, 2019). Subdividindo-se em dois anos fenológicos: período vegetativo com duas fases e período reprodutivo com quatro fases.

Durante esses períodos, à resposta espectral do NDVI apresentam valores maiores e melhores na fase 3 (etapa reprodutiva florada) quando ocorre aumento na biomassa do cafeeiro, enquanto os menores e piores valores são encontrados na sexta fase, quando há redução da biomassa, ocasionada pela autopoda (Carrijo *et al.*, 2021; Paes, 2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O período de desenvolvimento do sensor e testes ocorreram durante a participação de um estágio Supervisionado, em condições de laboratório e campo. Todo processo de confecção da câmera foi realizado no Laboratório de Instrumentação Ambiental e Sensoriamento Remoto, localizado no Departamento de Solos e Engenharia Rural do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal da Paraíba em Areia, estado da Paraíba.

A coleta dos registros de imagens para tomada de dados fora realizada em área experimental de café (*Coffea* L.) (coordenadas 06° 58' 07'' S e 35° 44' 05'' W, altitude de 617 m), na Estação Experimental denominada “Fazenda Chã de Jardim”, pertencente ao Departamento de Fitotecnia e Ciências Ambientais do CCA/UFPB, Campus II, inciso no município de Areia – PB, situada a 4,7 km de distância da instituição (Figura03).

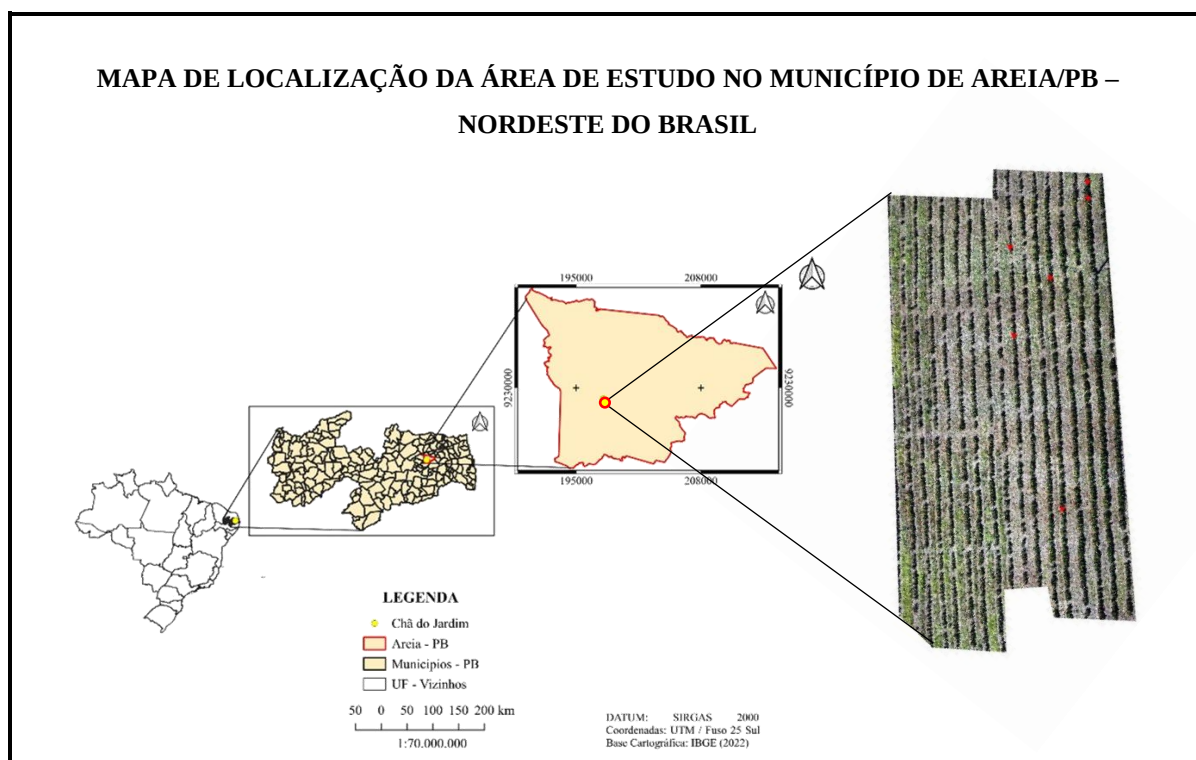


Figura03. Mapa de localização da área de estudo em cafezal na Fazenda Chã de Jardim, no município de Areia – PB, 2024.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2024.

3.1 MATERIAIS PARA CONFECÇÃO DO SENSOR

Para construção inicial da câmera foram utilizados dois módulos de câmera ESP32-CAM modelo OV2640 de dois Megapixels. Assim, com a perspectiva de alcançar uma melhor resolução na qualidade das imagens, ocorreu sua substituição pelo modelo OV5640 DVP de 5 Megapixel. Enquanto a placa microcontroladora utilizada foi a Arduino Uno R3. Foram adquiridos dois filtros fotográficos (Vermelho 49nm e Infravermelho 760nm) para captar radiação no comprimento de onda vermelho e do infravermelho próximo, os quais foram embarcados na carcaça do equipamento.

Além da placa controladora e dos módulos sensores, foram utilizados: uma bateria de lítio 9v com 250mAh para alimentação do sistema; conector de clipe de bateria; dois resistores 10 kΩ para montagem do circuito *PULL-UP* garantindo as extensões esperadas; uma chave Botão Push Buttom R13-507 cinza; uma chave liga/desliga; dois cartões microSDs na armazenagem dos dados com capacidade de 8Gigabytes cada; uma chapa de fenolite; 50 mL de solução de Percloroeto de ferro para remoção das camadas de óxidos, agindo como agente de limpeza, com intuito de facilitar o processo de soldagem; três conectores Kre 2 Vias Azul -

Kf301-2t - 5,08mm; uma barra de pinos macho 1x40 Vias 2,54mm 180° para conexão na chapa de circuito impresso.

Ainda houve a solda de estanho para realizar a soldagem dos itens à chapa de fenolite; impressora a *laser* de tonner para impressão do circuito a ser adicionado à chapa de fenolite; uma microrretífica Dremel para o polimento/acabamento e porta de pinos; dois adaptadores de microSD para transferência dos dados; seis conectores para conectar os cabos de cobre a chapa de fenolite; seis cabos de cobre a serem adicionados a chapa de fenolite para condução da energia ao circuito; seis DMTI Terminal Conector Tubular Ilhós utilizado nas terminações dos cabos de cobre; quatro parafusos M3x20 para fechamento do suporte; impressora 3D para impressão da carcaça; filamento utilizado para abastecer a impressora 3D e possibilitar a impressão da carcaça; 2 metros de tubo redondo de alumínio de $\frac{3}{4}$ de polegada para suporte da câmera e cola Adesivo Instantaneo TekBond 793 para colar a bateria junto a carcaça para evitar danos a outras peças quando estiver em locomoção.

Os preços dos principais componentes utilizados são apresentados na tabela logo abaixo (Tabela1).

Tabela1. Preços dos principais componentes utilizados na construção da câmera multiespectral durante sua confecção, Laboratório de Instrumentação Ambiental e Sensoriamento Remoto, Departamento de Solos e Engenharia Rural, CCA, UFPB, 2024.

Material (quantidade)	Valor Unitário (R\$)*
2x ESP32-CAM (OV5640)	91,78
1x Filtro Infrared Ir 760nm	47,00
1x Filtro Fotográfico Vermelho 49mm	47,00
2x MicroSD (8Gb)	50,00
Impressão da carcaça	10,00
1x Bateria de lítio Elgin (9v) – 250mAh	40,00
1x Conector de clipe de bateria	15,00
2x Resistor 10 k Ω (1/4 Watts)	20,00
1x Chave Botão Push Buttom R13-507 cinza	22,00
1x Chave liga/desliga	18,90
1x Chapa de fenolite 83mm x 40mm	10,00
3x Conectores Kre 2 Vias Azul - Kf301-2t - 5,08mm	55,95
1x Barra de pinos macho 1x40 Vias 2,54mm 180°	22,89
1x Microrretífica Dremel	185,00
6x Cabos de cobre	6,00
6x Conectores	3,00

6x DMTI Terminal Conector Tubular Ilhós	21,00
4x Parafusos M3x20	4,00
1x Tubo redondo de alumínio de ¾ Pol. de 2 m	10,00
1x Cola Adesivo Instantaneo TekBond 793	28,65

Valor Total: 708,17

*Frete incluso ao valor com base na data da compra, pode sofrer variações em novas compras.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2024.

Para impressão da carcaça utilizou-se o filamento ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) na cor cinza. A carcaça foi projetada com auxílio do programa computacional Varicad e impresso em 3D no LIASER (DSER/CCA/UFPB) para embarcar todo circuito.

Os testes iniciais com parâmetros avaliativos de funcionamento do sistema e seus componentes, ocorreram com auxílio de um keyboard, jumpers, bateria de Lítio Elgin 9v recarregável, conector de bateria, quatro resistores de 10 kΩ, microcontrolador Arduino Uno, cabo conector, os dois módulos SCAMP-32 com as câmeras OV5640 DVP e um botão liga/desliga para ativação de todo sistema, direcionando os módulos a realizarem em único disparo das imagens simultaneamente, mediante adição do código de programação pelo Arduino IDE versão 2.3.3.

3.2 MONTAGEM

Durante a montagem da placa, elaborou-se o diagrama do circuito com assistência do *Software Fritzing*® (Figura04). Seu relevo foi impresso em impressora Laser tonner em papel fotográfico, posteriormente, modelada em chapa de fenolite, com dimensões 83mm x 40mm.

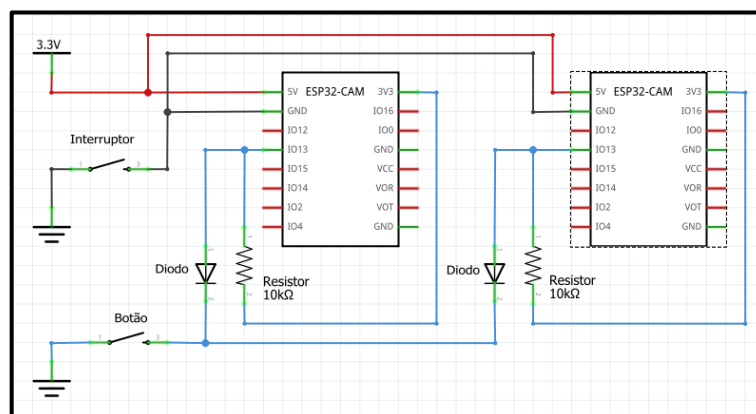


Figura04. Diagrama do circuito elétrico elaborado pela Interface do *software Fritzing*®.

Fonte: Arquivo Pessoal, 2023.

A impressão da placa foi realizada a *laser*, com material fotográfico, para facilitar a fixação, devido aquecimento que é gerado no papel. Após impressão, com auxílio de um ferro aquecido, colocou o papel sobre a chapa de fenolite (para confecção de circuito impresso).

Aquecido a uma temperatura de 220°C e o papel posto sobre a chapa, houve massageamento na parte de trás do papel fotográfico contendo a representação impressa. Aguardou-se 10 minutos, então, a chapa de fenolite foi adicionada a uma solução corrosiva de percloroeto de ferro, utilizada para corroer chapa de fenolite. Logo, após 20 minutos, foi retirada a chapa do material viscoso e encaminhado à pia, onde foi lavado com água corrente, detergente e massageado com lã de aço para retirada da oxidação e depois a aplicação de álcool isopropílico para retirar gorduras e resíduos.

O processo de solda dos componentes aconteceu posterior a envernização do material para retardamento da oxidação. *A posteriori*, foi realizada soldagem dos conectores suporte para até seis cabos de cobre, no qual, nas pontas de cada cabo adicionou-se os DMTI Terminal Conector Tubular Ilhós para facilitar sua adição nos borns, conector de clipe de bateria, resistores, chave Botão Push Buttom R13-507 cinza, chave para ligar e desligar a alimentação do sistema, porta de pinos de cor azul e os dois módulos sensores (ESP32-CAM).

Para armazenamento de dados, os microSDs foram inseridos em cada microcontrolador. Na montagem, utilizou-se a combinação entre módulos com microcontrolador ESP32-CAM.

O resultado da câmera após sua montagem pode ser visualizado a seguir (Figura05).

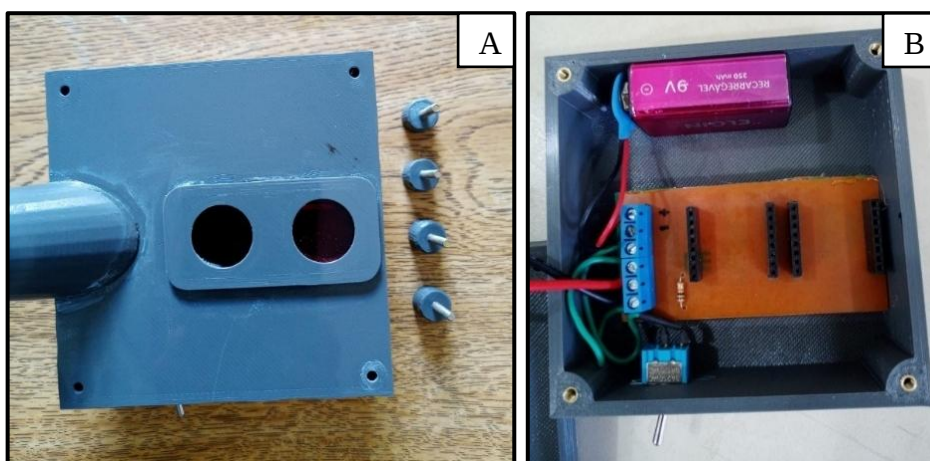


Figura05. Imagem externa (A) e interna (B) da Câmera Manual desenvolvida no LIASER, DSER/CCA/UFPB, Areia – PB, 2024.
Fonte: Acervo do autor, 2024.

As peças foram adicionadas na caixa de proteção e coladas com Cola Adesivo Instantaneo TekBond 793 por precaução. E adicionou-se quatro parafusos rosqueados para

facilitar os ajustes técnicos, sua manutenção e retirada dos cartões micro SD de armazenamento para descarregar as imagens no computador.

Foi adicionado um tubo redondo de alumínio de $\frac{3}{4}$ polegadas, similar ao bastão de selfie, com 2 metros de altura para tomar as imagens acima do dossel da cultura (Figura06).



Figura06. Bastão metálico adicionado a câmera multiespectral de baixo custo, LIASER, CCA, UFPB, Areia/PB, 2024.

Fonte: Acervo do Autor, 2024.

3.3 PROGRAMAÇÃO

Para programação da câmera foi utilizado o *Software* Arduino IDE 2.3.3, aplicando a linguagem de programação C-Arduino (Apêndice I). Os primeiros testes ocorreram com as câmeras OV2640 de resolução 2MP, com uso de sua configuração de fábrica. Foram testados ajustes no código de configuração de fábrica desses microcontroladores até adequação das configurações ideais para alcançar os objetivos pretendidos pela pesquisa. Foram realizados ajustes para melhor desempenho das imagens. Não havendo resultados satisfatórios, ocorreu a substituição das duas câmeras pelas OV5640 DVP de 5MP (Figura07).

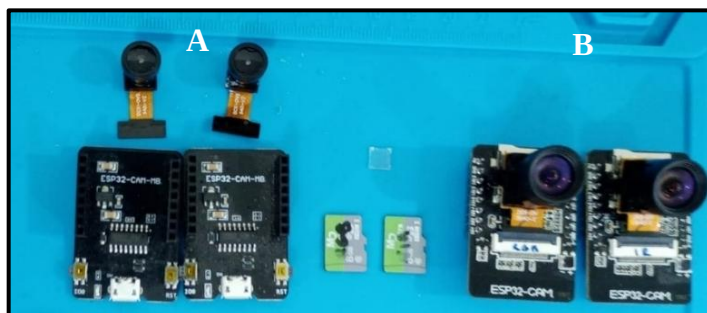


Figura07. Microcontroladores: A) Câmeras OV2640 e B) Câmeras OV5640.

Fonte: Acervo do Autor, 2024.

Os novos testes sobressaíram aos resultados anteriores com uso da câmera OV5640 DVP, selecionada para ser acoplada ao sistema, consequentemente, realizar a tomada de dados em campo.

3.4 APLICAÇÃO EM CAMPO

Na área experimental selecionada para pesquisa constatamos 3 blocos casualizados com 32 variedades de café (*Coffe*) Asa Branca, Guará, Catucaí Amarelo 2015, Graúna, Siriema, Acauã, Bournbon Amarelo, Catucaí Amarelo 24/137, Mundo Novo 379/19, Acauã Novo, IPR 99, MGS Ametista, Oeiras MG 6851, Catiguá Amarelo (26 – EP19 – 7), Catucaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2, IPR 100, Catiguá MG2, MGS Turmalina, MGS Arañas, Catigá MG1, Catucaí Amarelo 2 SL, Catucaí Amarelo 785-15, Catucaí Vermelho 785-15, Topázio MG 1190, MGS Catiguá 3, Arara, IPE 103, IAC 125 RN, Catucaí Amarelo 62, Acaiá e Araraçu, coordenado pelo professor Dr. Guilherme Silva de Podesta, (Departamento de Fitotecnia e Ciências Ambientais/UFPB), no qual, selecionamos as variedade Acaiá e Araraçu para obtenção das imagens (Figura08).

Rodovia				
		B1	B2 + Remineralizador	B3
Número de Variedades	Código			
1	ASA	Asa Branca	MGS Paraíso 2	Oeiras MG 6851
2	GUA	Guará	MGS Catiguá 3	IPR 103
3	CA 2015	Catucaí Amarelo 2015	Topázio MG 1190	Bourbon Amarelo
4	GRA	Graúna	MGS Ametista	MGS Catiguá 3
5	EMA	Siriema	MGS Turmalina	Graúna
6	ACA	Acauã	IPR 99	Topázio MG 1190
7	BA	Bourbon Amarelo	Acaíá	Mundo Novo 379/19
8	CA24/137	Catucaí Amarelo 24/137	Catucaí Amarelo 2015	Catucaí Amarelo 2015
9	MN 379	Mundo Novo 379/19	Catiguá Amarelo (26 - EP19-7)	Arara
10	AN	Acauã Novo	IPR 100	MGS Ametista
11	IPR 99	IPR 99	IAC 125 RN	Guará
12	MGS A	MGS Ametista	Catiguá MG2	Acauã
13	OMG	Oeiras MG 6851	Catucaí Amarelo 785-15	MGS Paraíso 2
14	CA 26	Catiguá Amarelo (26 - EP19-7)	IPR 103	Catucaí Vermelho 785-15
15	CV 144	Catuaí vermelho IAC 144	Catucaí Vermelho 785-15	Catucaí Amarelo 24/137
16	MGS P2	MGS Paraíso 2	Graúna	IAC 125 RN
17	IPR 100	IPR 100	Arara	Catiguá Amarelo (26 - EP19-7)
18	CMG 2	Catiguá MG2	MGS Arañas	Asa Branca
19	MGS T	MGS Turmalina	Acauã	MGS Turmalina
20	MGS AS	MGS Arañas	Guará	Araraçú
21	CM G1	Catiguá MG1	Siriema	Catuaí Amarelo 62
22	CA 2SL	Catucaí Amarelo 2 SL	Catuaí Amarelo 62	Acauã Novo
23	CA 785	Catucaí Amarelo 785-15	Bourbon Amarelo	Catiguá MG1
24	CV 785	Catucaí Vermelho 785-15	Mundo Novo 379/19	Catucaí Amarelo 2 SL
25	TMG 1	Topázio MG 1190	Araraçú	IPR 100
26	MGS C	MGS Catiguá 3	Acauã Novo	Acaíá
27	ARA	Arara	Catucaí Amarelo 24/137	Siriema
28	IPR 103	IPR 103	Catiguá MG1	Catucaí Amarelo 785-15
29	IAC	IAC 125 RN	Oeiras MG 6851	Catuaí vermelho IAC 144
30	CA 62	Catuaí Amarelo 62	Catuaí vermelho IAC 144	IPR 99
31	CAIÁ	Acaíá	Asa Branca	Catiguá MG2
32	AÇU	Araraçú	Catucaí Amarelo 2 SL	MGS Arañas
		B1	B2 + Remineralizador	B3
Prédio IDEP				

CAMPO VARIETAL CAFÉ - CHÃ DE JARDIM

Figura08. Croqui da área experimental com destaque as variedades selecionadas para tomada de dados: Arraçú e Acaíá, Estação Experimental Chã do Jardim, CCA, UFPB, Areia/PB, 2024.

Fonte: Guilherme Silva de Podesta, 2024.

O experimento montado em três blocos casualizados, com espaçamento entre plantas de 0,7 metros e 3,0 metros entre linhas, sendo o Tratamento 1 com utilização de adubação convencional (nitrogênio, potássio, enxofre, magnésio e outros micronutrientes); Tratamento 2 com uso de remineralizador (parceria com professor Dr. Raphael Moreira Beirigo) e Tratamento 3 sem uso de remineralizador e constituinte de três cultivares tradicionais no Brasil (Catuaí Amarelo 24/137, Catuaí Vermelho 144 e Arara).

As primeiras tentativas de obtenção de dados com a câmera ocorreram em 19 de setembro e 03 de outubro de 2024, às 13 horas e 30 minutos. Sem lograr êxito, devido sensor apresentar problemas de salvamento dos arquivos pelo equipamento, foram realizados ajustes e uma nova tentativa no dia 10 de outubro de 2024, às 13 horas e 30 minutos.

O imageamento ocorrido em 10 de outubro de 2024 aconteceu por meio do uso da ARP DJI Mavic 3 Enterprise Multispectral (Figura09) para tomadas dos dados aéreos, cedido em parceria com o Prof. Dr. José Bruno Malaquias e operado pelo Me. Eg. Agrônomo Allef de Souza Silva, ambos da Pós-Graduação pela Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias, Areia, Paraíba. A altitude do voo foi de 20 metros com uma resolução espacial de 0,85 cm/pixel. Na identificação das plantas selecionadas utilizou-se fitas de cetim vermelhas que foram amarradas em uma de suas laterais próxima ao ápice.

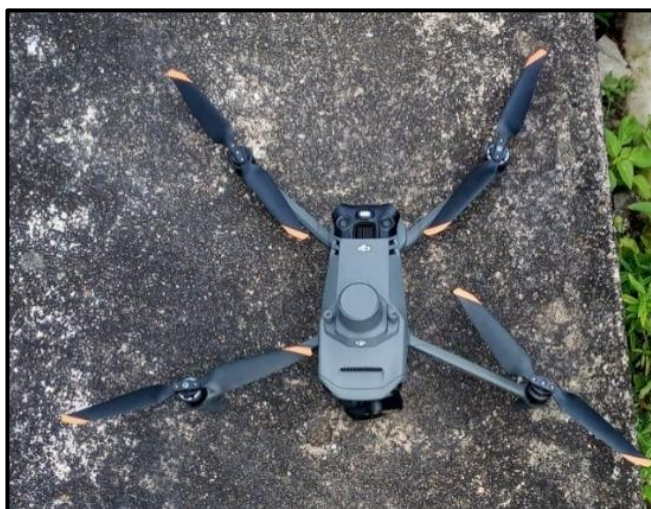


Figura09. Tomada de dados com uso de ARP Dji Mavic 3 Enterprise Multispectral e a câmera multispectral de baixo custo no campo varietal café, Estação Experimental Chã de Jardim, CCA, UFPB, Areia/PB, 2024.
Fonte: Arquivo do Autor, 2024.

A partir das 14 horas e 45 minutos aconteceu a toma de dados das plantas selecionadas com a câmera manual (Figura10: A-B), planta a planta das variedades selecionadas, sendo uma para cada variedade em cada um dos blocos, totalizando 6 plantas de café. As imagens foram registradas com auxílio de um suporte proporcionando uma altura média de 2,5 metros em vertical acima do dossel. Assim, para cada tomada, armazenou-se imagens em RGB (*Red; Green; Blue*) e NIR (*Near Infrared*) (Figura11: A-B).

O registro com a câmera manual iniciou-se pela variedade Araraçu, tomando-se imagens sempre da terceira planta de cada parcela: parcela 1, Bloco1; parcela 8, Bloco2; e parcela 13, Bloco3. Na variedade Acaiá imageou-se a também a terceira planta da parcela 2, Bloco1; parcela 27, Bloco2 e parcela 7, Bloco3. Também mensurou-se a altura de cada uma (da base no solo até o ápice da última gema foliar), após captura das imagens (Figura10: A-B).



Figura10. Tomada de dados com uso da câmera manual de baixo custo no campo varietal café: A) imageamento e B) aferição da altura da planta, Estação Experimental Chã de Jardim, CCA, UFPB, Areia/PB, 2024.
Fonte: Arquivo do Autor, 2024.

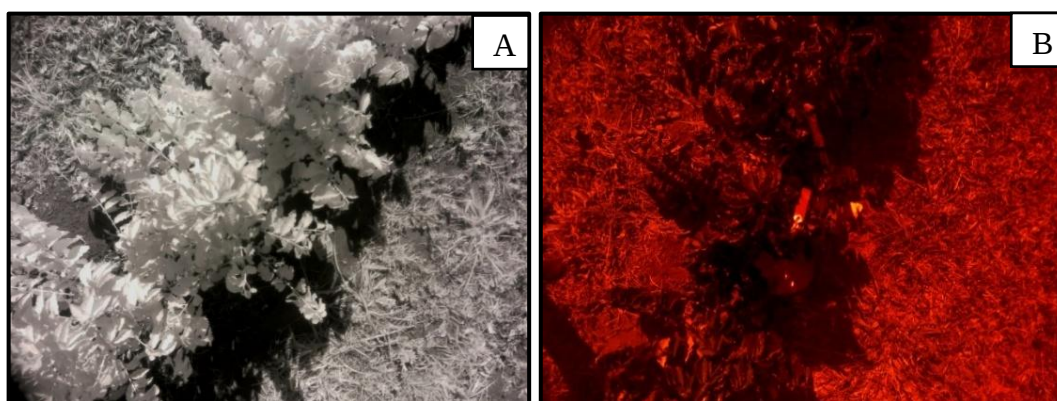


Figura11. Imagens geradas pela câmera manual (M) da variedade de café Acaiá no Bloco 1: A) Infravermelho Próximo (NIR) e B) vermelho (Red), LIASER, CCA/UFPB, Areia – PB, 2024.
Fonte: Arquivo do Autor, 2024.

3.5 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

As imagens geradas com uso da Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), o ARP DJI Mavic 3 Multispectral. Foram processadas utilizando o *software* Pix4Dmapper versão 4.8.4 para gerar o ortomosaico. Programa esse, responsável pela localização dos pontos que há em comum para diferentes imagens de modo automático (PIX4DMAPPER, 2024).

Na intenção de obter os valores de NDVI relativos à cada planta selecionada dentro das variedades de café nos tratamentos, utilizou-se a plataforma de geoprocessamento QGIS Desktop 3.16.1 por meio da aplicação da fórmula (Eq. 1). Em seguida, foram feitos recortes

de diâmetro de 1 m, exatamente sobre as plantas analisadas, tanto do ortomosaico gerado pelo mapeamento com o ARP, quanto em cada cena tomada pela câmera manual.

De cada recorte, os valores dos pixels foram extraídos e exportados em formato .csv, aplicando-se a ferramenta *Gdal xyz*. Posteriormente, foram escolhidos, aleatoriamente e sem repetição, 1000 valores (dados/pixel) de cada recorte, para realizar os testes estatísticos.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com os dados tabulados, realizou-se as análises estatísticas com o *software* SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*). Aplicou-se análise de variância unidirecional (ANOVA-ONEWAY), para verificar se há diferenças na média entre o NDVI gerados por cada dispositivo.

A ANOVA é um teste paramétrico que tem como hipótese nula que não há diferenças na média entre os grupos ($p > 0,05$) e a alternativa que há diferenças na média entre os grupos ($p < 0,05$), no qual, exige que as amostras sejam homogêneas.

O teste de Levene foi utilizado para verificar a homogeneidade das amostras. Enquanto, o de Shapiro-Wilk para averiguar a normalidade dos dados. Tais testes apresentam como hipótese nula que as variâncias são homogêneas ($p > 0,05$), e como hipótese alternativa que as variâncias não são homogêneas ($p < 0,05$). Quando as amostras não apresentaram homogeneidade foi aplicado um *Bootstrapping* (Efro; DiCiccio, 1996) para 500 re-amostragens para estimativa de distribuição, com intervalo de confiança de 95% e correção de *Bias Correction accelerated* (BCa) dessas estimativas. Não havendo homogeneidade, os testes não paramétricos foi o de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As condições no ambiente durante a tomada de dados podem ter influência nos valores de NDVI gerados pelas câmeras manual (M) e da embarcada na ARP (D) (Figura12-13). Situações como velocidade distinta durante obtenção das imagens entre os sensores pode corroborar em variações nos resultados e ângulo de visada, que quando ampliado, o tamanho do pixel aumenta, *vice-versa* (Giglio *et al.*, 2006). Assim como o horário que se realiza a mensuração desses dados, pode interferir diretamente nos resultados obtidos (Crusiol *et al.*, 2013).

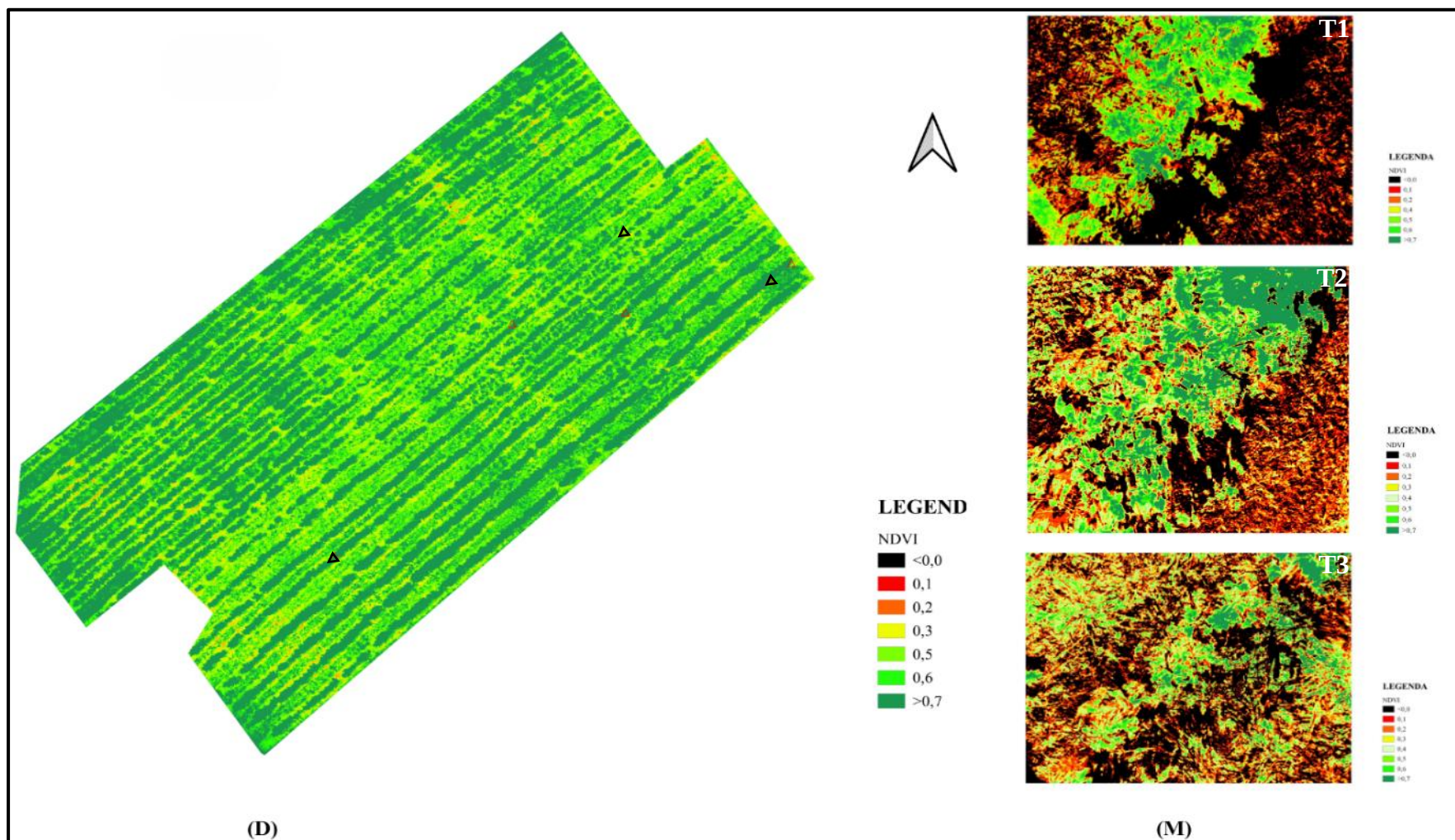


Figura12. Ortomosaico do NDVI gerado com a câmera embarcada DJI (D) e imagens do NDVI feitas com a câmera manual (M) da variedade Acaiá. Os triângulos (Δ) no ortomosaico destacam o local das plantas escolhidas para serem imageadas.

Legenda: T1: sem uso de remineralizador; T2: com uso de remineralizador e T3: sem uso de remineralizador.

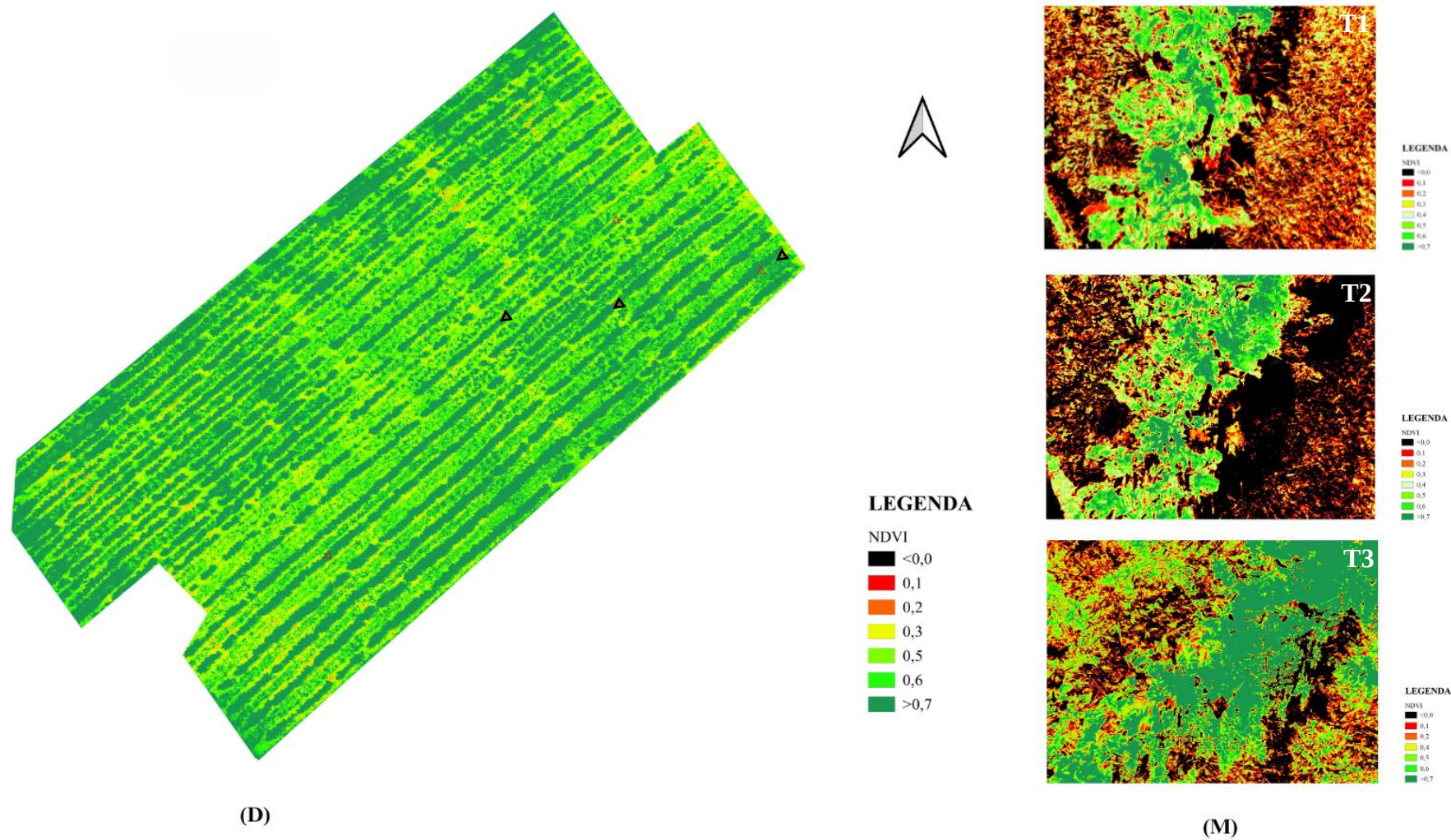


Figura13. Ortomosaico do NDVI gerado com a câmera embarcada DJI (D) e imagens do NDVI feitas com a câmera manual (M) da variedade Araraçu. Os triângulos (▲) no ortomosaico destacam o local das plantas escolhidas para serem imageadas.

Legenda: T1: sem uso de remineralizador; T2: com uso de remineralizador e T3: sem uso de remineralizador.

O gradiente de cores nas figuras 12 – 13 correspondem aos valores obtidos de NDVI para as variedades e plantas selecionadas. A tonalidade preta, sinaliza pixel com sombreamento, os quais, no NDVI da câmera manual foram negativos. O tom vermelho, demonstrou solo exposto ou nu (0 – 0,1), enquanto, o laranja vegetação seca ou rala, com baixo teor de biomassa (0,1 – 0,2). Nas demais cores, os níveis de biomassa com maiores atividade fotossintética (>0,4). Isso, porque segundo Arable (2024) quanto mais as plantas crescem e bloqueiam o solo, mais NIR é refletido e mais alto é o valor do NDVI.

Foi observado na câmera manual (M), sua capacidade em distinguir espacialmente a variabilidade do índice. Quanto ao sombreamento apresentar valores negativos, aconteceu por causa das limitações existentes pela câmera, principalmente falta de calibração radiométrica, vindo apresentar nas áreas sombreadas refletância do infravermelho, abaixo da refletância do vermelho.

Outro dado tomado foi a altura das variedades, com intuito de verificar a existência de correspondência entre altura e os valores obtidos do NDVI (Tabela02).

Tabela02. Alturas das variedades Acaiá – Araraçu e os resultados das médias NDVI das câmeras manual e embarcada ARP DJI.

Variedades/Blocos	Altura (m)	Médias (NDVI)	
		M	D
Acaiá/B1	1,26	0,441	0,679
Acaiá/B2	1,03	0,417	0,683
Acaiá/B3	0,50	0,374	0,553
Araraçu/B1	0,79	0,444	0,505
Araraçu/B2	0,58	0,456	0,661
Araraçu/B3	0,63	0,545	0,692

Legenda: **B1**: Tratamento 1 sem uso de remineralizador; **B2**: tratamento 2 com uso de remineralizador e **B3**: tratamento 3 sem uso de remineralizador; **m**: metros; **M**: médias NDVI da câmera manual; **D**: médias NDVI da câmera embarcada ARP DJI.

Como verificado na tabela 02, os valores de altura entre as duas variedades não seguiram uma sequência. Cabe ressaltar que o experimento ocorreu em condições de sequeiro. Significa que o cafeeiro pode ser afetado pelas adversidades climáticas, como a falta de água, o que reduz sua produção (Arruda; Grande, 2003). Além de variações extremas de temperatura do ar e seu estágio fenológico quando essas fases não são atendidas (EMBRAPA, 2009). O que pode reduzir seu vigor vegetativo, desenvolvimento como um todo.

A diferenciação de altura com as médias NDVI apresentadas, pode ter ocorrido devido as condições de campo e características genéticas existentes por cada variedade, no qual, a Acaiá apresenta porte alto, diâmetro da copa médio, cor das folhas jovens bronze, vigor

vegetativo alto e produtividade alta; e na Araraçu porte alto, diâmetro da copa grande, cor das folhas jovens verde, vigor vegetativo alto e produtividade muito alta (EMBRAPA, 2022). Haja vista, que o uso do remineralizar não apresentou desempenho significativo, em relação aos demais tratamentos, entre as variedades, vindo a influenciar os níveis de refletância recebido pelos sensores.

Sobre a fase fenológica das variedades durante a coleta de dados encontrava-se entre a 3^a-4^a, em processo de emissão da florada e expansão dos frutos. Assim, estudos como o dos autores Carrijo, Borges e Souza (2021) apontam que durante essa fase, valores de NDVI alcançam o máximo potencial, decorrente do aumento da biomassa da planta, nas condições tropicais do Brasil, com mínimas de 0,81 a máxima de 0,82, quando se tem o manejo realizado dentro das suas exigências.

Com isso, as médias do NDVI obtidos pelas câmeras: manual variou de 0,37 a 0,54; embarcada ARP DJI variando entre 0,50 e 0,69, apresentando valores superiores ao trabalho de Almeida (2019) que variou de 0,42 a 0,68, obtido a partir de uma câmera modificada, Zenmuse X3, Zenmuse X3 fabricada pela DJI e modificada pela Aerial Media Pros (Costa Mesa, Califórnia, EUA), com um sensor CMOS de 12 megapixels, acoplada a ARP, como um parâmetro indicativo do índice de maturação dos frutos, sendo esses valores justificado pela inadequação na calibração realizada nas imagens obtidas.

Porém, em estudos realizados pelos autores Rafaelli *et al.* (2006) utilizando imagens MODIS encontraram valores de NDVI entre 0,55 e 0,70, aproximados aos valores da câmera embarcada DJI (D) (0,50 e 0,69) e distante dos valores da câmera manual (M) (0,37 e 0,54). Já Almeida *et al.* (2021) com uso do satélite Sentinel-2 de 10 m de resolução, apontaram valores do NDVI variando entre 0,50 e 0,70, em situações semelhantes ao nosso trabalho, inclusive a fase fenológica.

Os resultados mostram que para cultura do café arábico, o NDVI sofre variações de mínima e máxima de acordo com suas fases fenológicas, tendo em vista que as alterações morfológicas da copa ocorrem em decorrência da espécie, espaçamento e manejo cultural (MATIELLO *et al.*, 2020). Segundo Volpato (2013) os valores de NDVI menores que 0,7 estão relacionados a déficit hídrico em áreas de café.

Para avaliar o desempenho da câmera manual (M), levou-se em consideração o comparativo da câmera embarcada na ARP DJI (D). A *posteriori*, quando realizado o teste de normalidade dos dados (Shapiro-Wilk) apresentou valor = 0,00, o que significa que as amostras não apresentam distribuição normal. Então, realizou-se o *bootstrapping* para realizar rea-

mostragem, que tem como técnica a substituição, para fins de estimativa na distribuição amostral (Melo Filho *et al.*, 2002).

Os resultados obtidos podem ser observados na tabela03, retratados pela estatística descritiva para variedade Acaiá nos três tratamentos, relacionados ao NDVI gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada na ARP DJI (D).

Tabela03. Estatística descritiva para variedade Acaiá nos três tratamentos, para o NDVI gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada na ARP DJI (D).

Tratamento	Câmera	Média	DP	CV (%)	Intervalo de confiança		Mínimo	Máximo
					Limite inferior	Limite superior		
1	M	0,44 ^a	0,20	45,45	0,43	0,45	0,10	1,00
	D	0,68 ^b	0,14	20,59	0,67	0,69	0,46	0,94
2	M	0,42 ^a	0,22	52,38	0,40	0,43	0,10	1,00
	D	0,68 ^b	0,16	23,53	0,67	0,69	0,37	0,96
3	M	0,37 ^a	0,23	62,16	0,36	0,38	0,10	0,74
	D	0,55 ^b	0,15	27,27	0,54	0,56	0,28	0,83

Médias seguidas de letra minúscula diferente, dentro do tratamento, diferem entre si estatisticamente, pelo teste ANOVA one-way, a 5% de probabilidade.

Legenda: DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Intervalo de confiança: 95% para média.

A tabela 03 mostra que nos tratamentos B1, B2 e B3 a câmera embarcada na ARP DJI (D) apresentaram diferença entre as médias quando comparadas a câmera manual (M), onde na câmera manual os valores de NDVI ficaram abaixo dos registrados pelo equipamento embarcado na ARP. Vale ressaltar, que o voo foi realizado em um tempo mais curto do que a tomada de dados com a câmera manual.

Na diferença de altura dos sensores e desuniformidade dada as condições de luminosidade existentes entre as tomadas de dado de campo, corroboraram para essa diferenciação. Logo, números digitais são sensíveis especialmente a luminosidade, o que inviabiliza uma comparação direta das imagens, quando obtidas em momentos diferentes (LU; HE, 2017). Realizar calibração radiométrica para câmera manual, seria uma possibilidade de aproximar-se dos resultados da embarcada na ARP DJI (D).

A câmera (M) obteve valores de desvio padrão (DP) superiores aos da câmera ARP DJI (D), o que significa que a câmera (M) apresenta uma maior instabilidade nos seus dados, o que permite sofrer maiores variações quanto a média. Fatores como luminosidade e ângulo de captura das imagens podem contribuir. Outro fator importante a ser destacado é a distância

existente entre o sensor e a planta durante o imageamento, possibilitando obter maior detalhamento e quantidade de pixels na imagem.

Para o coeficiente de variação, a câmera (M) obteve os maiores percentuais indicados nos tratamentos B1 (45,45%) e B2 (52,38%). Enquanto a câmera embarcada na ARP DJI (D) apresentou dados mais consistentes, indicados pelos valores do B1 (20,59%) e B3 (27,27%), respectivamente. Sendo assim, observa-se que a câmera (D) possui uma maior consistência e homogeneidade, diferentemente da câmera (M) que apresentou dados mais dispersos.

Quando avaliado os intervalos de confiança, os dados apresentados pela câmera manual (M) foram mais amplos, corroborando para maior incerteza, decorrente da variabilidade dos dados. Já a câmera (D) demonstrou maior precisão que a (M) em todos os blocos (Tabela03). Nos valores mínimos e máximos destacou-se como maior detentora de amplitude que variou de 0,10 a 1,00 no B1 e B2.

O valor de NDVI igual 1,0 identifica que houve saturação na tomada da luz refletida pela cultura, que pode estar relacionada com as configurações da câmera e aos filtros não terem sido tão eficientes.

A partir da aplicação da ANOVA, observou-se diferenças significativas entre as câmeras (Tabela04).

Tabela04. Análise de variância unidirecional para a variedade Acaiá, realizada após reamostragem (*bootstrapping*) para o NDVI gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada DJI (D).

Tratamentos	Soma dos Quadrados	GD	Quadrado Médio	Z	Sig.
1	28,304	1	28,304	937,611	0,00
2 Entre câmeras	35,388	1	35,388	994,852	0,00
3	15,963	1	15,963	792,385	0,00

Legenda: GD: graus de liberdade; z: Valor estatístico resultante do teste de hipótese; Sig.: P-valor associado ao teste.

Na tabela 04, os valores apresentados pela soma dos quadrados indicando que o B1 e B2 sofreram maior variação da média. No quadrado médio, o B2 (35,38) foi quem apresentou uma maior variação médias em relação aos demais. Quando observado os valores de Z, denotam altos com implicação de quem ambas as câmeras diferem entre si. Como reforço dessa diferença, os valores 0,00 no Sig. são indicativos diante os três tratamentos.

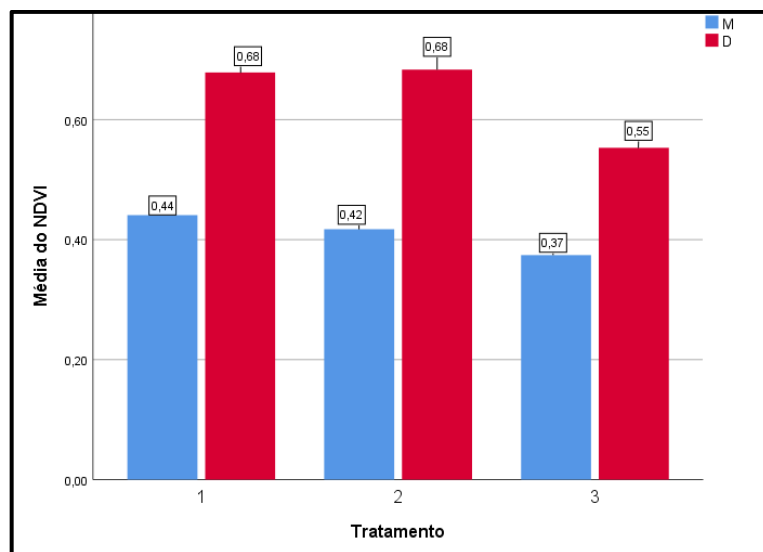


Figura14. Média do NDVI da variedade de café Acaiá gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada DJI (D).

Ao observar a figura 14, é possível verificar uma variação que ocorreu entre as duas câmeras para variedade Acaiá. Assim, ambas câmeras não apresentam NDVI correspondentes aos valores correlatos a fase fenológica, sendo de 0,81/0,82 como mencionado anteriormente para essa fase quando foram avaliadas as variedades. De acordo com Gama-Moreno *et al.* (2024) a presença de clorofila nas folhas estar estreitamente relacionadas com as condições nutricionais das plantas em algumas espécies, um valor NDVI alto ($\geq 0,5$) indica uma planta saudável. Assim, as médias estariam indicando condições diferentes, segundo a resposta de cada sensor.

Na tabela 05, está representada a estatística descritiva para variedade Araraçu nos três tratamentos, para o NDVI gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada na ARP DJI (D).

Tabela05. Estatística descritiva para variedade Araraçu nos três tratamentos, para o NDVI gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada na ARP DJI (D).

Tratamento	Câmera	Média	DP	CV (%)	Intervalo de confiança de 95% para média		Mínimo	Máximo
					Limite inferior	Limite superior		
1	M	0,44 ^a	0,19	43,18	0,43	0,46	0,10	0,85
	D	0,51 ^b	0,14	27,45	0,50	0,51	0,23	0,80
2	M	0,46 ^a	0,21	45,65	0,44	0,47	0,10	0,89
	D	0,66 ^b	0,10	15,15	0,65	0,67	0,37	0,83
3	M	0,54 ^a	0,32	59,26	0,52	0,57	0,10	1,00
	D	0,69 ^b	0,12	17,39	0,68	0,70	0,44	0,95

Médias seguidas de letra minúscula diferente, dentro do tratamento, diferem entre si estatisticamente, pelo teste ANOVA one-way, a 5% de probabilidade.

A médias obtidas nos três tratamentos da variedade Araraçu, com as duas câmeras foram maiores para embarcada na ARP DJI (D). O que significa que ambas as câmeras apresentaram estatisticamente diferenças significativas para essa variedade de café. Nesse sentido, a câmera manual apresentou ser inconsistente em vistas aos valores altos do coeficiente de variação em todos os tratamentos. Diferentemente da câmera embarcada, que apresentou valores mais baixos para o CV.

Na câmera manual (M) todos os tratamentos sofreram intervalos mais amplos, com maior dispersão.

Tabela06. Análise de variância unidirecional para a variedade Araraçu, realizada após reamostragem (*bootstrapping*) para o NDVI gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada DJI (D).

Tratamentos	Soma dos Quadrados	GD	Quadrado Médio	Z	Sig.
1	1,88	1,00	1,88	69,03	0,00
2	20,87	1,00	20,87	755,19	0,00
3	10,76	1,00	10,76	179,49	0,00

GD: graus de liberdade; z: Valor estatístico resultante do teste de hipótese; Sig.: P-valor associado ao teste.

Na tabela 06, os dados da ANOVA, após reamostragem via *bootstrapping* demonstram diferença significativa estatisticamente entre as câmeras em todos os tratamentos, materializada pelos valores altos da soma dos quadrados e o valor de Z, com significância de 0,00.

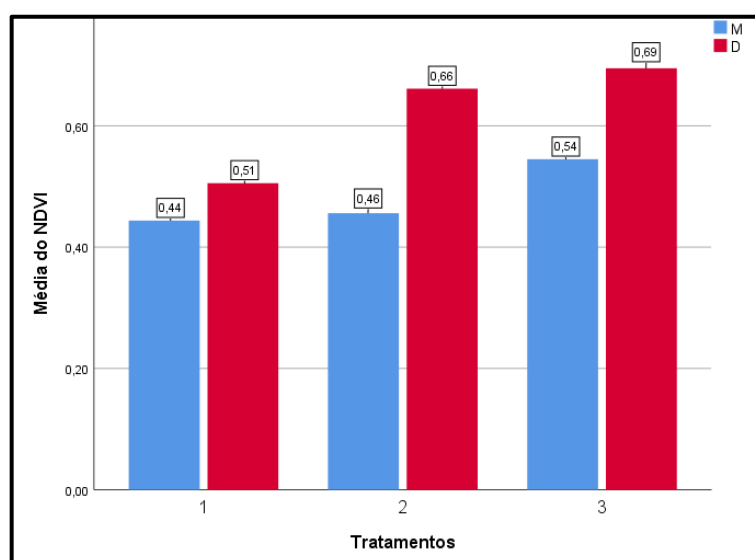


Figura15. Média do NDVI da variedade de café Araraçu gerado com a câmera manual (M) e a câmera embarcada DJI (D).

A figura 15, aponta que houve diferença entre as médias NDVI. Os valores seguiram uma relação mútua, variando a média de acordo com os tratamentos. Portanto, a câmera (M) se

demostrou ser eficiente para identificação nas variações do NDVI no cultivo do café, espaços vazios, área de solo exposto e a densidade do dossel vegetativo. Para algo mais complexo, como levantamento aéreo de alta precisão, a utilização da câmera profissional é recomendada.

No entanto, o NDVI de ambas as câmeras ficou abaixo de trabalhos como dos autores Fabri *et al.* (2023): média (0,75); Carijo, Borges e Souza (2021): média (0,82) no qual, utilizaram em seu experimento a Câmera Multiespectral MicaSense RedEdge, e imagens do Satélite Sentinel 2A e 2B, respectivamente. Nesse seguimento, Rosa (2007) salienta que a “fenologia e o manejo da cultura” pode ser indicativo de valores abaixo da média NDVI para cultura do café.

Isso acontece segundo Luiz, Santos e Pereira (2019) porque o vigor passa a apresentar uma queda que se intensifica até outubro [...] durante este período a planta está passiva a fatores bióticos e abióticos que influenciam na queda do NDVI.

Contudo, por se tratar de um projeto piloto esses valores obtidos pode sofrer alterações de acordo com a realização de melhorias na máquina como: adição de giroscópio, painel digital, bip disparo, botão liga/desliga no suporte próximo ao do disparo, voltímetro, acoplar o GPS para que as imagens sejam georreferenciadas e ativação do *Wifi* para envio em drive das imagens registradas em tempo real.

A fase fenológica da planta tem bastante influência nos dados resultantes do NDVI. Desse modo, como cada cor apresenta um grau indicativo de refletância ou absortância (Figuras 12-13), Almeida (2019) aponta que o sombreamento das fileiras de plantas, uma sobre a outra, também pode ser responsável pelos valores negativos.

Quando os fatores são condições climáticas da região, a tonalidade amarela pode ser um indicativo, segundo Tagliarini (2021) de presença, principalmente de vegetação de porte herbáceo com uma atividade fotossintética mais baixa, por serem mais sensíveis ao período de estiagem.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A câmera manual (M) conseguiu identificar as variações do NDVI no cultivo do café, mostrando vazios, área de solo exposto e a densidade do dossel vegetativo, com produção eficiente e de baixo custo.

Em comparação com a câmera comercial embarcada DJI, as médias apresentaram diferenças, sempre com valores abaixo ao gerado pelo sensor referência.

Alguns fatores podem ter colaborado para a diferença entre as médias de NDVI: variação temporal, luminosidade e ângulo de visada.

Filtros adicionados a câmera manual (M) podem não ter realizado filtragem das bandas desejadas corretamente.

A fase fenológica das variedades Acaiá e Araraçu, bem como a época de déficit hídrico, podem ter influenciado nos valores abaixo da média NDVI descritos na literatura para culturas de café arábico.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. L. H. **Monitoramento da maturação do café arábica utilizando câmera digital modificada a bordo de veículo aéreo não tripulado**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, mg, 2019. 51p.
- ALMEIDA, S. L. H.; SOUZA, J. B. C.; MARTINS, R. N.; VIANA, L. A.; PEREIRA, R. J.; QUEIROZ, D. M. Uso de sensoriamento remoto orbital na identificação do estágio de maturação do cafeeiro arábica. **Anais...** L Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, 2021.
- ALVES, M. C.; SILVA, F. M. **Ferramentas de cafeicultura de precisão**. In: SILVA, F. M.; ALVES, M. C. Cafeicultura de precisão. Lavras: Ed. UFLA, p. 39-80, 2013.
- AMARAL, G. S.; SILVA, V. E. R. **Automação residencial utilizando a plataforma Arduino e dispositivos móveis**. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Eletrônica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal: RN, 2017. 101p.
- ANTUNES, A. F. B. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto em Ambiente de Geoprocessamento**. Geoprocessamento, Universidade Federal do Paraná: UFRP, 2008. Disponível em: <<https://docs.ufpr.br/~felipe/apostilasr.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2024.
- ARABLE. **Um Guia sobre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). 2024. Disponível em:** <<https://www.arable.com/blog/um-guia-sobre-o-indice-de-vegetacao-por-diferenca-normalizada/>>. Acesso em: 16 dez. 2024.
- ARRUDA, B. F.; GRANDE, A. M. **Fator de resposta da produção do cafeeiro ao déficit hídrico em Campinas**. Bragantina, Campinas, v. 62, n. 1, p. 139-145, 2003.
- BRAZ, A. M.; DE ANDRADE ÁGUAS, T.; GARCIA, P. H. M. Análise de índices de vegetação NDVI e SAVI e Índice de Área Foliar (IAF) para a comparação da cobertura vegetal na bacia hidrográfica do córrego ribeirãozinho, município de Selvíria-MS. **Revista Percurso**, v. 7, n. 2, pp. 5-22, 2015. Disponível em: <<http://186.233.154.236/ojs/index.php/Percurso/article/view/28758>>. Acesso em: 13 jan. 2024.
- CABRAL, R. G.; COSTA, A. P.; ADORIAN, G. C.; SILVA, R. Z.; LEÃO, E. U.; MARTINS, A. L. L. Efeitos de diferentes substratos no desenvolvimento de mudas de maracujá. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas: TO, v. 9, Ed. Especial, e023014, p. 1 – 5, 2023. Disponível em: <<https://revista.unitins.br/index.php/agri-environmental-sciences/article/view/8625/5098>>. Acesso em: 16 dez. 2024.
- CAMARGO, A. P. CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v.60, n.1, p.65-68, 2001.
- CANDIAGO, S.; REMONDINO, F.; DE GIGLIO, M.; DUBBINI, M.; GATTELLI, M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. **Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 4026–4047, 2015.

CARRIJO, W. R.; BORGES, M. T.; SOUZA, F. G. Resposta espectral do índice NDVI em cada fase fenológica do café. **Anais...** Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, 2021. Disponível em: <<https://www.conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2021/livros-2021/geomatica-instrumentacao-e-agricultura-de-precisao-giap-2/3080-resposta-espectral-do-ndice-ndvi-em-cada-fase-fenologica-do-cafe/file>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

CARVALHO, A. A. **O papel do Arduíno e sensores de baixo custo na agropecuária digital: avanços e perspectivas no Brasil**. Especialização (Pós-Graduação Lato Sensu em Recursos Hídricos para o Semiárido) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Salgueiro: PE, 2023, 36p.

COELHO, A. P.; ROSALEN, D. L.; FARIA, R. T. Índices de vegetação na predição da biomassa e produtividade de grãos de aveia branca sob níveis de irrigação. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 48, n. 2, p. 109-117, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/pat/a/Rm5kcNyjjCxDKLqwqqjXTz/?lang=en>>. Acesso em: 17 dez. 2024.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Safra de café encerra em 54,2 milhões de sacas em 2024 impactadas por clima adverso. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5900-safra-de-cafe-encerra-em-54-2-milhoes-de-sacas-em-2024-impactada-por-clima-adverso#:~:text=Conab%20%2D%20Safra%20de%20caf%C3%A9%20encerra,2024%20impactada%20por%20clima%20adverso>>. Acesso em: 25 fev. 2025.

COSTA FILHO, J. F.; VELOSO JUNIOR, J. F.; SILVA, J. C. A. Análise da pluviometria no município de Areia- PB: I- estudo do início duração e término da estação chuvosa e ocorrência de veranicos. **Anais...** Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Florianópolis, SC. Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999. 7p.

CRAVO, E. **Arduino: guia completo sobre o que é, como funciona e mais. 2024**. Disponível em: <<https://blog.kalatec.com.br/arduino-o-que-e/>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

CRUSIOL, L. G. T.; NANNI, M. R.; FURLANETTO, R. H.; SILVA, G. F. C.; GUALBERTO, A. A. S.; GASPAROTTO, A. C.; PAULA, M. N. Calibração radiométrica de câmera fotográfica digital Vis/NIR para uso em sensoriamento remoto. **Anais...** XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPER, Santos – SP, 2023.

CRUSIOL, L. G. T.; NEIVERTH, W.; RIO, A.; SIBALDELLI, R. N. R.; FERREIRA, L. C.; CARVALHO, J. F. C.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. **Interferências metodológicas nos valores de NDVI: Posicionamento do sensor e área amostral**. In: Jornada Acadêmica da Embrapa Soja, 2013, Londrina. p. 82-86.

CUCHO-PADIN, G.; LOAYZA, H.; PALACIOS, S.; BALCAZAR, M.; CARBAJAL, M.; QUIROZ, R. Desenvolvimento de ferramentas e métodos de sensoriamento remoto de baixo custo para apoiar a agricultura de pequenos produtores. **App Geomatics**, v.12, pp. 247–63, 2019. Disponível: <<https://doi.org/10.1007/s12518-019-00292-5> .Return to ref 12 in article>. Acesso em: 16 dez. 2024.

DWORAK, V.; SELBECK, J.; DAMMER, K. H.; HOFFMANN, M.; ZAREZADEH, A. A.; BOBDA, C. Estratégia para o desenvolvimento de um sistema de câmera NDVI inteligente

para detecção de plantas externas e sistemas agrícolas embarcados. **Sensors**, v.13, n. 2, pp. 1523–38, 2013. <https://doi.org/10.3390/s130201523> .

EFRON, B.; DICICCIO, T. Bootstrap Confidence Intervals. **Statistical Science**, n.11, pp. 189-228, 1996. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1214/ss/1032280214>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Câmeras modificadas e multiespectrais embarcadas em drones: enfoque para estudos da vegetação. Embrapa Florestas: Colombo, PR, 2022, 32p.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Maracujá. 2023. Disponível em:<<https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/maracuja#:~:text=O%20cultivo%20tem%20grande%20import%C3%A2ncia,pequenos%2C%20m%C3%A9dios%20e%20grandes%20produtores>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Catálogo de cultivares de café arábica. Brasília, DF: Embrapa Café, 2022. 115p.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Fenologia do Cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004–2005. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 128p.

FABRI, T. M. P.; MELLO, G. M.; FERRARI, J. L.; PELUZIO, J. B. E.; SOUZA, M. N. Comportamento de índices de vegetação em cafeeiros utilizando sensor multiespectral em aeronave remotamente pilotada. **Revista Ifes Ciência**, v. 9, n. 1, p. 01-15, 2023. DOI: 10.36524/ric.v9i1.1850

FERREIRA, P. M. **Instrumentação de sensores de imagem IR InGaAs P-I-N eQWIP em modo de corrente**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008. 95p.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensorialmente Remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017, 49p.

FURLANETTO, R. H.; NANNI, M. R.; CRUSIOL, L. G. T.; SILVA, G. F. C.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Potencial de utilização de sensores multiespectral e hiperespectral no estudo de diferentes alvos agrícolas. In: Embrapa Soja-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, 12., 2017, Londrina. **Resumos expandidos...** Londrina: Embrapa Soja, 2017. p. 146-154., 2017. Disponível em:<<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1072792/1/146.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2024.

FURTADO, K. D. C.; CARVALHO, V. E. B.; BARBOSA, G. M. R.; FERREIRA, H. C. P.; BEZERRA, M. G. F. O papel dos drones na agricultura 4.0 e 5.0: Auxílio tecnológico para uma agricultura eficiente, produtiva e sustentável. **Tecnologia e Inovação em Ciências e Biológicas avanços para a sociedade atual**, [S. l.], p. 1-6, 2023. Disponível em:<<https://sevenpublicacoes.com.br/index.php/editora/article/view/1776>>. Acesso em: 17 dez. 2024.

GAMA-MORENO, L. A.; SOLTERO, V. H. P.; VADILLO, C. G. M.; PERALTA-NAVA, J. A.; RAMÍREZ-RAMÍREZ, F.; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, C.; BENÍTEZ-ORTEGA, A. V. Plataforma basada en RESTful para obtener índices de Nitrógeno en imágenes multiespectrales de plantas a través de NDVI. **Programación Matemática y Software**, v.1, n. 16, pp. 57-67. ISSN: 2007-3283. 2024

GIGLIO, L., VAN DER WERF, G. R., RANDERSON, J. T., COLLATZ, G. J., E KASIBHATLA, P. “Global estimation of burned area using MODIS active fire observations.” *Atmospheric Chemistry and Physics* 6 (2006): 957-974. Acesso em 01 Outubro, 2014. doi: 10.5194/acp-6-957-2006.

GOMES, A. P. A. **Calibração radiométrica de imagens obtidas por câmeras utilizadas em veículos aéreos não tripulados**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2020, 22p.

HERMINIA, C. **Modelos e tipos de Arduino**. 2020. Disponível em:<<https://blog.smartkits.com.br/tipos-de-arduino/>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística**. Produção Agrícola Municipal. Rio de Janeiro, 2022a.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Produção de Maracujá. 2022. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/maracuja/br>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

INCERES. **As vantagens do uso da tecnologia no Agronegócio**. 2016. Disponível em:<<http://inceres.com.br/as-vantagens-do-uso-da-tecnologia-no-agronegocio/>>. Acesso em: 29 mai. 2023.

JENKINS, J. P.; RICHARDSON, A. D.; BRASWELL, B. H.; OLLINGER, S. V.; HOLLINGER, D. Y.; SMITH, M. L. Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower-based carbon flux and radiometric measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 143, pp.64-79, 2007. ISSN 0168-1923. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.11.008>>. Acesso em: 26 nov. 2024

JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. **Uso de veículos aéreos não tripulados**. São Carlos – SP: **Embrapa Instrumentação – Ferramentas Para Agricultura De Precisão**, 2014. 25p. Disponível em:<<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1003485/1/CAP8.p>>. Acesso em: 29 mai. 2023.

KAIZU Y., IMOU K. A dual-spectral camera system for paddy rice seedling row detection. **Comput Electron Agric**. v.63, n.1, 49–56, 2008. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.01.012>>. Acesso em: 22 nov. 2024.

KÖPPEN, W. **Der geographische system der klimate**. In: KOPPE, W., GEIGER, R. (Ed.) *Handbuch der klimatologie*. Berlin: Borntrager, 1936. v.1 part c.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 2ªed. UNIDERP: Campo Grande, 2007. 881p.

LU, B.; HE, Y. Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) - acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 128, p. 73–85, 2017.

LUIZ, J.; SANTOS, W. J. R.; PEREIRA, A. A. Café, NDVI e dados climáticos: uma estreita relação. **Anais... 11ª Jornada Científica e Tecnológica e 8º Simpósio da Pós-Graduação do IFSULDEMINAS**.

MANGOLD, K., SHAW, J. A. and Vollmer, M. **The physics of near-infrared photography. European Journal of Physics**, v. 34, S51-S71, 2013. doi: 10.1088/0143-0807/34/6/S51.

MAPA. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Principais conceitos e expressões utilizados na agricultura de precisão. 2012. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/conceitos-relacionados-a-agricultura-de-precisao-1.pdf>>. Acesso em: 29 mai. 2023.

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D. R. **Cultura de café no Brasil: Manual de recomendações**. Fundação Procafé, 2 ed., 2020. 716p.

MCROBERTS, M. **Arduino Básico**. 2ª ed. São Paulo: Novatec, 2015. 505p.

MELO FILHO, J. F.; LIBARDI, P. L.; JONG van LIER, Q. de; CORRENTE, J. E. Método convencional e “bootstrap” para estimar o número de observações na determinação dos parâmetros da função $K(\Theta)$. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, n. 26, pp. 895-903, 2002.

MOSCOVINI, L.; ORTENZI, L.; PALLOTTINO, F.; FIGORILLI, S.; VIOLINO, S.; PANE, C.; CAPPARELLA, V. VASTA, S.; COSTA, C. An open-source machine-learning application for predicting pixel-to-pixel NDVI regression from RGB calibrated images. **Computers and Electronics in Agriculture**, Volume 216, January 2024, 108536. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169923009249>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

NERI, H. G. F. **Utilização da plataforma Arduino para controle de experimentos remotos de Física**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia: MG, 2014, 43p. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/26520/1/UtilizacaoPlataformaArduino.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2024.

NEVES, D. C. **Variabilidade de Índice de Vegetação e Produtividade do algodoeiro**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul – MS, 2016, 61p.

NOGUEIRA, C. A. **Narrativas de professores de Matemática: experiências com aprendizagem criativa em um curso de robótica educativa**. Tese (Doutorado em Educação) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Educação, Universidade de Brasília, Brasília: DF, 2021, 227p. Disponível

em:<http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/43193/1/2021_CleiaAlvesNogueira.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2024.

PAES, A. P. B. **Uso de séries temporais espectrais para estimar a produtividade do café.** Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, 2022. 48p.

PIX4DMAPPER. **PIX4Dmapper: o software líder em fotogrametria para o mapeamento profissional com drones.** 2024. Disponível

em:<<https://www.pix4d.com/pt/produto/pix4dmapper-software-fotogrametria/>>. Acesso em: 17 nov. 2024.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação.** São José dos Campos: A. Silva Vieira Ed., 2007. 127 p.

PRADO, E. V. Monitoramento de culturas agrícolas utilizando visão artificial. **Revista Gestão em Foco**, v.1, nº 13, pp. 232 – 243, 2021. Disponível

em:<<https://portal.unisepe.com.br/unifia/wp-content/uploads/sites/10001/2021/10/MONITORAMENTO-DE-CULTURAS-AGR%C3%8DCOLAS-UTILIZANDO-VIS%C3%83O-ARTIFICIAL-P%C3%A1g-232-%C3%A0-243.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

RAMLI, R. M.; JABBAR, W. A. Design and implementation of solar-powered with IoTEnabled portable irrigation system. **Internet of Things and Cyber-Physical Systems**, v. 2, p. 212-225, 2022.

RICHARDSON, A. D.; KEENAN, T. F.; MIGLIAVACCA, M.; RYU, Y.; SONNENTAG, O.; TOOMEY, M. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 169, pp.156-173, 2013. ISSN 0168-1923. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>>. Acesso em: 26 nov. 2024

ROSA, V. G. C. Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região sul/sudoeste do estado de Minas Gerais. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, 2007. 142p.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite).** In: PROCEEDINGS OF THE THIRD ERTS SYMPOSIUM, SP-351 Goddard Space Flight Center, 1973, Washington: NASA, 1973, p. 309–317.

SANTOS, A. M.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B. Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para identificação da cobertura fitogeográfica da Bacia Hidrográfica do Rio Goiana/PE. **Anais... II Simpósio de Geografia Física do NORDESTE**, João Pessoa - PB, 2008. João Pessoa, PB, p.1-9.

SANTOS, M. M.; SOUSA NETO, O. N.; GUERRA FILHO, P. A.; DIAS, N. S., ARAGÃO, A. R.; SOUZA, Y. C. S.; DUARTE, S. N.; SÁ, F. V. S.; MORENO-PIZANI, M. A. Intelligent system for automated soil moisture monitoring . **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental**, v.29, n. 2, e279856. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n2e279856>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

SCHIESSL, M. **8 maneiras de deixar sua lavoura mais inteligente utilizando sensores no campo**. 2023. Disponível em: <<https://blog.aegro.com.br/sensores-na-agricultura/>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

SENA JÚNIOR, D. G.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T.; KHOURY JÚNIOR, J. Discriminação entre estágios nutricionais na cultura de trigo com técnicas de visão artificial e medidor portátil de clorofila. **Engenharia Agrícola**, v.28, p.187-195, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/eagri/a/b9YVh9QH7VczwrJZb8cKJvv/?lang=pt>>. Acesso em: 29 MAI. 2023.

SENAR. **Serviço Nacional de Aprendizagem Rural**. Agricultura de precisão: operação de drones. Brasília: 2018, 88p.

SENTERA. **NDVI and Your Farm: Understanding NDVI for Plant Health Insights**. (2017). Disponível em: <<https://www.agriculture-xprt.com/news/ndvi-and-your-farmunderstanding-ndvi-for-plant-health-insights-702065>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. **Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão**. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília: EMBRAPA. Cap. 4. p.58-73, 2014.

SILVA S. F., MENDES D. F., FERRARI J. L., SOUSA E. F., GARCIA R. F., SANTOS A. R. Utilização do sensoriamento remoto na agricultura de precisão: uma análise bibliométrica. **Nucleus**, v. 11, n. 2, p. 459-470, 2014.

SILVA, L. C. **Monitoramento do vigor de cafeeiros submetidos a estratégias de manejo para atenuar os efeitos da escassez hídrica**. Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2019, 82p.

SONNENTAG, O.; HUFKENS, K.; TESHARA-STERNE, C.; YOUNG, A. M.; FRIEDL, M.; BRASWELL, B. H.; MILLIMAN, T.; O'KEEFE, J.; RICHARDSON, A. D. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 152, pp. 159-177, 2012. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.009>>. Acesso em: 26 nov. 2024.

SOUZA, F. F.; SANTOS, J. C. F.; COSTA, J. N. M.; SANTOS, M. M. Características das principais variedades de café cultivadas em Rondônia. Documentos 93, EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisa Agroflorestal de Rondônia, 2004. 26p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/54346/1/Doc93-cafe.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

SOUZA, L. S. B.; MAIA, Í.; COSTA, D. S.; BAS, V. Análise comparativa entre o NDVI obtido por imagens multiespectrais e visíveis (RGB) em câmera acoplada em drone em área de videira. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 13, n. 6, p. 741-751, 2023. DOI:10.29150/jhrs.v13.6.p741-751

STAMFORD, J. D.; VIALET-CHABRAND, S.; CAMERON, I.; LAWSON, T. Desenvolvimento de um sistema de imagem NDVI preciso e de baixo custo para avaliar a saúde das plantas. **Métodos de Planta**, v.19, n. 9, pp. 1-19, 2023. Disponível em:<<https://doi.org/10.1186/s13007-023-00981-8>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

STEFFEN, C. A. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais Divisão de Sensoriamento Remoto. Disponível em:<<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Acesso em: 15 dez. 2024.

TAGLIARINI, F.; RODRIGUES, M. T.; RODRIGUES, B. T.; GARCIA, Y. Imagens de veículo aéreo não tripulado aplicadas na obtenção do índice de Vegetação por Diferença Normalizada. **Revista Energia na Agricultura**, v. 36, n.1, pp. 111-122, 2021. DOI:10.17224/EnergAgric.2021v36n1p111-122

VOLPATO, M. M. L.; ALVES, H. M. R.; MEIRELES, E. J. L.; SILVA, V. A.; INÁCIO, F. D.; CAMPOS, B. F. D. Relação entre índices de vegetação de áreas cafeeiras e variáveis do balanço hídrico, em Santo Antônio do Amparo, MG. **Anais... X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, Vitória, Espírito Santo – ES, pp. 1-4, 2019.

WAKULICZ, G. J. **Sistemas de Informações Gerenciais**. Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Rede e-Tec Brasil, Santa Maria: RS, 2016.88p. Disponível em:<<https://central3.to.gov.br/arquivo/453437/>>. Acesso em: 16 dez. 2024.

ZHANG, J.; HUANG, Y.; PU, R.; GONZALEZ-MORENO, P.; YUAN, L.; WU, K.; HUANG, W., 2019. Monitoring plant diseases and pests through remote sensing technology: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 165, p. 104943, 2019.

APÊNDICE I – CÓDIGO PROGRAMAÇÃO CÂMERA MANUAL

```
#include "esp_camera.h"
#include "soc/soc.h"
#include "soc/rtc_cntl_reg.h"
#include "driver/rtc_io.h"

// MicroSD Libraries
#include "FS.h"
#include "SD_MMC.h"

// EEPROM Library
#include "EEPROM.h"

// Use 1 byte of EEPROM space
#define EEPROM_SIZE 1

// Counter for picture number
unsigned int pictureCount = 0;

// Pin definitions for CAMERA_MODEL_AI_THINKER
#define PWDN_GPIO_NUM    32
#define RESET_GPIO_NUM   -1
#define XCLK_GPIO_NUM     0
#define SIOD_GPIO_NUM     26
#define SIOC_GPIO_NUM     27
#define Y9_GPIO_NUM       35
#define Y8_GPIO_NUM       34
#define Y7_GPIO_NUM       39
#define Y6_GPIO_NUM       36
#define Y5_GPIO_NUM       21
#define Y4_GPIO_NUM       19
#define Y3_GPIO_NUM       18
#define Y2_GPIO_NUM       5
#define VSYNC_GPIO_NUM    25
#define HREF_GPIO_NUM     23
#define PCLK_GPIO_NUM     22

void configESPCamera() {
    // Configure Camera parameters

    // Object to store the camera configuration parameters
    camera_config_t config;

    config.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0;
    config.ledc_timer = LEDC_TIMER_0;
    config.pin_d0 = Y2_GPIO_NUM;
    config.pin_d1 = Y3_GPIO_NUM;
```

```

config.pin_d2 = Y4_GPIO_NUM;
config.pin_d3 = Y5_GPIO_NUM;
config.pin_d4 = Y6_GPIO_NUM;
config.pin_d5 = Y7_GPIO_NUM;
config.pin_d6 = Y8_GPIO_NUM;
config.pin_d7 = Y9_GPIO_NUM;
config.pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM;
config.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM;
config.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM;
config.pin_href = HREF_GPIO_NUM;
config.pin_sscb_sda = SIOD_GPIO_NUM;
config.pin_sscb_scl = SIOC_GPIO_NUM;
config.pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM;
config.pin_reset = RESET_GPIO_NUM;
config.xclk_freq_hz = 20000000;
config.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG; // Choices are YUV422, GRAYSCALE,
RGB565, JPEG

// Select lower framesize if the camera doesn't support PSRAM
if (psramFound()) {
    config.frame_size = FRAMESIZE_UXGA; // FRAMESIZE_ +
QVGA|CIF|VGA|SVGA|XGA|SXGA|UXGA
    config.jpeg_quality = 10; //10-63 lower number means higher quality
    config.fb_count = 2;
} else {
    config.frame_size = FRAMESIZE_SVGA;
    config.jpeg_quality = 12;
    config.fb_count = 1;
}

// Initialize the Camera
esp_err_t err = esp_camera_init(&config);
if (err != ESP_OK) {
    Serial.printf("Camera init failed with error 0x%x", err);
    return;
}

// Camera quality adjustments
sensor_t * s = esp_camera_sensor_get();

// BRIGHTNESS (-2 to 2)
s->set_brightness(s, 2);
// CONTRAST (-2 to 2)
s->set_contrast(s, 0);
// SATURATION (-2 to 2)
s->set_saturation(s, 0);
// SPECIAL EFFECTS (0 - No Effect, 1 - Negative, 2 - Grayscale, 3 - Red
Tint, 4 - Green Tint, 5 - Blue Tint, 6 - Sepia)
s->set_special_effect(s, 0);

```

```

// WHITE BALANCE (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_whitebal(s, 1);
// AWB GAIN (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_awb_gain(s, 1);
// WB MODES (0 - Auto, 1 - Sunny, 2 - Cloudy, 3 - Office, 4 - Home)
s->set_wb_mode(s, 3);
// EXPOSURE CONTROLS (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_exposure_ctrl(s, 1);
// AEC2 (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_aec2(s, 1);
// AE LEVELS (-2 to 2)
s->set_ae_level(s, 2);
// AEC VALUES (0 to 1200)
s->set_aec_value(s, 800);
// GAIN CONTROLS (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_gain_ctrl(s, 1);
// AGC GAIN (0 to 30)
s->set_agc_gain(s, 20);
// GAIN CEILING (0 to 6)
s->set_gainceiling(s, (gainceiling_t)0);
// BPC (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_bpc(s, 0);
// WPC (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_wpc(s, 1);
// RAW GMA (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_raw_gma(s, 1);
// LENC (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_lenc(s, 1);
// HORIZ MIRROR (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_hmirror(s, 0);
// VERT FLIP (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_vflip(s, 0);
// DCW (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_dcw(s, 1);
// COLOR BAR PATTERN (0 = Disable , 1 = Enable)
s->set_colorbar(s, 0);
}

void initMicroSDCard() {
    // Start the MicroSD card

    Serial.println("Mounting MicroSD Card");
    if (!SD_MMC.begin()) {
        Serial.println("MicroSD Card Mount Failed");
        return;
    }
    uint8_t cardType = SD_MMC.cardType();
    if (cardType == CARD_NONE) {

```

```

        Serial.println("No MicroSD Card found");
        return;
    }
}

void takeNewPhoto(String path) {
    // Take Picture with Camera

    // Setup frame buffer
    camera_fb_t * fb = esp_camera_fb_get();

    if (!fb) {
        Serial.println("Camera capture failed");
        return;
    }

    // Save picture to microSD card
    fs::FS &fs = SD_MMC;
    File file = fs.open(path.c_str(), FILE_WRITE);
    if (!file) {
        Serial.println("Failed to open file in write mode");
    }
    else {
        file.write(fb->buf, fb->len); // payload (image), payload length
        Serial.printf("Saved file to path: %s\n", path.c_str());
    }
    // Close the file
    file.close();

    // Return the frame buffer back to the driver for reuse
    esp_camera_fb_return(fb);
}

void setup() {

    // Disable brownout detector
    WRITE_PERI_REG(RTC_CNTL_BROWN_OUT_REG, 0);

    // Start Serial Monitor
    Serial.begin(115200);

    // Initialize the camera
    Serial.print("Initializing the camera module...");
    configESPCamera();
    Serial.println("Camera OK!");

    // Initialize the MicroSD
    Serial.print("Initializing the MicroSD card module... ");

```

```
initMicroSDCard();

// initialize EEPROM with predefined size
EEPROM.begin(EEPROM_SIZE);
pictureCount = EEPROM.read(0) + 1;

// Path where new picture will be saved in SD Card
String path = "/image" + String(pictureCount) + ".jpg";
Serial.printf("Picture file name: %s\n", path.c_str());

// Take and Save Photo
takeNewPhoto(path);

// Update EEPROM picture number counter
EEPROM.write(0, pictureCount);
EEPROM.commit();

// Bind Wakeup to GPIO13 going LOW
esp_sleep_enable_ext0_wakeup(GPIO_NUM_13, 0);

Serial.println("Entering sleep mode");
delay(1000);

// Enter deep sleep mode
esp_deep_sleep_start();
}

void loop() {
}
```