

**Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias**



**PROTOCOLO EFICIENTE PARA CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS
MULTIESPECTRAIS**

Autor: Caio Eduardo Lavanholli Ibanha

**Jaboticabal-SP
Outubro 2024**

Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias

**PROTOCOLO EFICIENTE PARA CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS
MULTIESPECTRAIS**

Autor: Caio Eduardo Lavanholli Ibanha
Orientador: Rouverson Pereira da Silva
Coorientadora: Samira Luns Hatum de Almeida

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA
AGRONÔMICA

Jaboticabal-SP
Outubro 2024

I12p

Ibanha, Caio Eduardo Lavanholli

Protocolo eficiente para calibração radiométrica de imagens multiespectrais / Caio Eduardo Lavanholli Ibanha. -- Jaboticabal, 2024

35 p. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Rouverson Pereira da Silva

Coorientadora: Samira Luns Hatum de Almeida

1. Etileno. 2. Ciência metodologia. 3. Drone. 4. Software de aplicação. 5. Software gratuito. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

CAIO EDUARDO LAVANHOLLI IBANHA

PROTOCOLO EFICIENTE PARA CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva

Coorientadora: Samira Luns Hatum de Almeida

Área de Concentração: Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola

Data da defesa: 09 / 10 / 2024

Aprovado

Reprovado

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



ROUVERSON PEREIRA DA SILVA
Data: 12/11/2024 14:54:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente



JARLYSON BRUNNO COSTA SOUZA
Data: 13/11/2024 09:55:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jarlyson Bruno Costa Souza

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente



BRENO DOS SANTOS SILVA
Data: 13/11/2024 10:37:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Breno dos Santos Silva

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: _____ / _____ / _____

Documento assinado digitalmente



LUIZ FABIANO PALARETTI
Data: 18/11/2024 21:50:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Fabiano Pallareti

Chefe do Departamento

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso. Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder saúde, perseverança e sabedoria ao longo desta jornada acadêmica. Aos meus pais, pelo apoio incondicional, amor e incentivo constante em cada etapa do meu percurso. Sem a força e o exemplo de vocês, este momento não seria possível. Agradeço também à minha família por toda a motivação, aos meus amigos e colegas de turma, que compartilharam comigo momentos de aprendizado, desafios e conquistas, tornando esta trajetória mais leve e significativa.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador, Rouverson Pereira da Silva, e a minha coorientadora, Samira Luns Hatum de Almeida, por toda orientação, paciência e disponibilidade ao longo de todo o processo. Suas valiosas contribuições, críticas construtivas e incentivos foram fundamentais para a concretização deste trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de Iniciação Científica. Agradeço também à Unesp FCAV e ao LAMMA (Laboratório de máquinas e mecanização agrícola) e a banca examinadora, que contribuíram para a minha formação acadêmica e pessoal. À minha namorada, Ana Laura Tomaz Porfirio, minha eterna gratidão por seu apoio incondicional, compreensão e incentivo. Sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho e para minha motivação ao longo dessa jornada. Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para que

eu alcançasse este marco tão importante na minha vida, meu sincero muito obrigado.

RESUMO

O uso de sensores acoplados a plataformas aéreas permite o monitoramento das lavouras, com identificação da variabilidade espacial e a adoção de estratégias de gestão mais assertivas. Para que os sensores possam ser utilizados para analisar a variabilidade temporal dos atributos das plantas torna-se necessário realizar o processo de calibração radiométrica. Este artigo apresenta a metodologia empregada para a coleta de imagens multiespectrais a partir de plataforma aérea, visando o desenvolvimento de um plugin para a calibração radiométrica dessas imagens no software QGIS. A pesquisa utilizou alvos de EVA, como placas de calibração, previamente caracterizadas quanto a reflectância por meio de espectrorradiômetro. O método da linha empírica, fundamentado em regressão linear, foi aplicado para ajustar os dados coletados e melhorar a acurácia das imagens e posteriormente, ocorreu o desenvolvimento na linguagem de programação Python, de um plugin de calibração para a plataforma QGIS. Os resultados demonstram a eficácia do plugin na etapa de geração da linha empírica, fundamental para calibração dos dados radiométricos, mostrando-se uma ferramenta facilitadora para a aplicação das imagens no monitoramento de lavouras e cálculo dos Índices de Vegetação.

PALAVRAS-CHAVE: Etileno Acetato de vinila, Linha Empírica, Mavic, Plugin, Qgis.

ABSTRACT

The use of sensors mounted on aerial platforms enables crop monitoring, allowing for the identification of spatial variability and the adoption of more precise management strategies. For sensors to analyze the temporal variability of plant attributes effectively, radiometric calibration is essential. This article outlines the methodology used for collecting multispectral images from an aerial platform to develop a plugin for the radiometric calibration of these images in QGIS software. The research employed EVA targets, such as calibration plates, previously characterized for reflectance using a spectroradiometer. The empirical line method, based on linear regression, was applied to adjust the collected data and enhance image accuracy. A calibration plugin for QGIS was subsequently developed using Python, and results demonstrated the plugin's effectiveness in generating the empirical line—crucial for calibrating radiometric data. This tool has proven beneficial for applying imagery in crop monitoring and calculating Vegetation Indices.

KEYWORDS: Ethylene Vinyl Acetate, Empirical Line, Mavic, Plugin, QGIS.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS II

RESUMO III

ABSTRACT IV

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. SENSORIAMENTO REMOTO.....	4
2.2. NÍVEIS DE COLETA E RESOLUÇÃO	7
2.3. IMAGENS COMO FONTE DE DADOS RADIOMÉTRICOS	8
2.3.1. CONVERSÃO DE ND PARA VALORES FÍSICOS.....	8
2.4. SENSORES.....	9
2.4.1. RGB.....	9
2.4.2. MULTIESPECTRAL.....	9
2.4.3. HIPERESPECTRAL.....	10
2.5. CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA.....	10
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
3.1. AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA - ARP.....	12
3.2. ALVOS DE CALIBRAÇÃO	13
3.3. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS	14
3.4. CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA.....	16
4. RESULTADOS	18
5. DISCUSSÃO	24
6. CONCLUSÕES.....	25
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

1. INTRODUÇÃO

É notável que as aeronaves remotamente pilotadas (ARP's) têm sido de grande ajuda na agricultura de precisão. O uso de sensores acoplados a estas plataformas aéreas permitem o monitoramento das lavouras, com identificação da variabilidade espacial e a adoção de estratégias de gestão mais assertivas. A maior resolução espacial e a flexibilidade de voo, tornam às ARP'S importantes alternativas ao imageamento via aviões ou plataformas orbitais, o que facilita o acompanhamento das culturas ao longo do espaço e do tempo (CANDIAGO et al., 2015).

Dentre os sensores que podem ser acoplados às ARP's, existem os sensores RGB, multiespectrais e hiperespetrais, sendo os multiespectrais os de maior aplicação na agricultura. A partir destes sensores se tem a possibilidade de gerar índices de vegetação que estão relacionados à diversas propriedades fisiológicas da cultura (JORGE & INAMASU, 2014). Tais informações são adquiridas através da detecção da radiação eletromagnética (REM) refletida, proveniente da interação com a cobertura vegetal em diferentes faixas do espectro eletromagnético.

Os Índices de Vegetação (IV's) gerados por esses sensores são combinações algébricas de várias bandas espectrais, como por exemplo: RGB (vermelho, verde e azul) e infravermelho e NIR (infravermelho próximo). Dentre os possíveis índices de vegetação existentes, os mais utilizados na agricultura e deriváveis a partir de um sensor multiespectral são: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Verde da Diferença Normalizada (GNDVI) e Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) (DE BORATTO, 2013).

Para registrar as intensidades radiantes em cada uma das bandas espectrais, que gerarão os IV's, os sensores são fabricados com detectores que possuem sensibilidade e amplitude específicos. Essa condição faz com que os detectores discretizem as intensidades do fluxo radiante em níveis de cinza (números digitais) de forma distinta entre bandas, seguindo critérios próprios. Como resultado, os níveis de cinza das bandas não devem ser comparados ou usados para cálculo de índices de vegetação (PONZONI et al 2012).

Na ausência de calibrações radiométricas, usadas para converter os números digitais em reflectância, os cálculos dos índices brutos baseiam-se em números digitais (KELCEY J.; LUCIEER, 2012). Estes índices brutos, gerados por imagens não calibradas, podem fornecer uma boa descrição das condições de vegetação no que diz respeito à visualização. No entanto, é importante notar que essas faixas de escala podem ser afetadas por modificações. Isso significa que certas alterações, como mudanças na composição vegetal, densidade ou saúde das plantas, podem influenciar os valores dos índices de vegetação, levando a uma interpretação menos precisa das condições de vegetação, principalmente em avaliações temporais. Além disso, os números digitais são sensíveis às condições de luminosidade, fato que inviabiliza a comparação de imagens obtidas em momentos distintos, assim sendo, a conversão dos valores de pixel das imagens para reflectâncias é fundamental para a extração de informações espectrais.

Para que as câmeras possam ser utilizadas para analisar a variabilidade temporal dos atributos das plantas torna-se necessário realizar o processo de calibração radiométrica (ALMEIDA, 2019). Este processo tem por finalidade retirar efeitos ambientais ou efeitos do sensor, que possam alterar os dados

associados à superfície observada, gerando assim imagens com informações de reflectância da superfície, parâmetro mais apropriado para cálculos de índices de vegetação (LÓPEZ et al., 2011; LU; HE, 2017).

Um dos métodos mais usados para calibração de imagens obtidas por câmeras multiespectrais é o da linha empírica (KELCEY; LUCIEER, 2012; WANG; MYINT, 2015). Nesse método, a coleta dos pixels centrais em um alvo de calibração é realizada para calcular os números digitais médios. Em seguida, é realizada uma análise de regressão entre os valores de reflectância dos alvos de calibração e os valores dos números digitais nas diferentes bandas de comprimento de onda da câmera (WANG; MYINT, 2015).

Por mais que existam placas para calibração radiométrica no mercado, essas placas apresentam custos elevados de aquisição, e na maioria dos casos, são desenvolvidas para um sensor específico. Dito isso, a utilização de materiais de baixo custo, e que sejam aplicáveis a uma variedade de sensores, como as confeccionadas em MDF pintadas por GOMES (2020), pode solucionar um gargalo de vários usuários dessa tecnologia, que optam por não calibrar devido às dificuldades que encontram. Para disseminar essa etapa do processamento, é importante o desenvolvimento de sistemas automáticos e mais intuitivos, o que pode ser feito por meio da criação de plugins em softwares GIS (Geographic Information System).

Uma vez que o processo de calibração radiométrica é fundamental para a obtenção de dados espectrais mais confiáveis, partimos da premissa de que é possível criar uma solução mais acessível, e que traga facilidade e agilidade para o sistema de calibração de sensores. Assim, objetivamos neste

trabalho desenvolver um plugin para a plataforma QGIS, visando facilitar a calibração radiométrica de imagens multiespectrais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sensoriamento remoto

O termo sensoriamento remoto, ciência que permite obter informações de um alvo sem que haja contato direto entre sensor e alvo, foi criado em meados dos anos 1960 e vem sendo utilizado para fins agrícolas desde 1970 (MENESES et al., 2012). Podendo ser caracterizado como a medição de quantidades físicas à distância, geralmente por métodos espectroscópicos quantitativos, com foco no estudo da atmosfera e da superfície da Terra a partir de diferentes níveis de coleta (TAYLOR, F., 1996). Com o lançamento do satélite Landsat em 1972, os Estados Unidos foi o país que deu início à utilização do sensoriamento remoto para o monitoramento da agricultura (FORMAGGIO E SANCHES, 2017), com isso, JENSEN (2007) apresentou uma definição mais aprofundada dizendo que: “sensoriamento remoto é o registro da informação das regiões do ultravioleta, visível, infravermelho e micro-ondas do espectro eletromagnético, sem contato, por meio de instrumentos tais como câmeras, escâneres, lasers, dispositivos lineares e/ou matriciais localizados em plataformas como aeronaves ou satélites, e a análise da informação adquirida por meio visual ou processamento digital de imagens”.

O sensoriamento remoto apresenta diversas aplicações, de acordo com FORMAGGIO E SANCHES (2017), destaca-se a realização de estimativas de biomassa e produtividade, mapeamento de distúrbios e estresses, e o mapeamento do desenvolvimento fenológico das culturas. Aplicações que só

são possíveis devido a interação com a radiação eletromagnética (REM). A REM ao incidir sobre um alvo, seja ela oriunda de uma fonte de energia, seja essa o sol ou de alguma fonte artificial, pode ser absorvida, refletida ou transmitida (Figura 1). O comportamento da REM é definido através de características físicas e químicas do alvo, onde tratando-se de uma superfície vegetada, a região do espectro eletromagnético em que ocorre maior absorção é a do visível, realizada pelos pigmentos fotossintéticos (clorofila, xantofila e caroteno) (PONZONI et al., 2012).

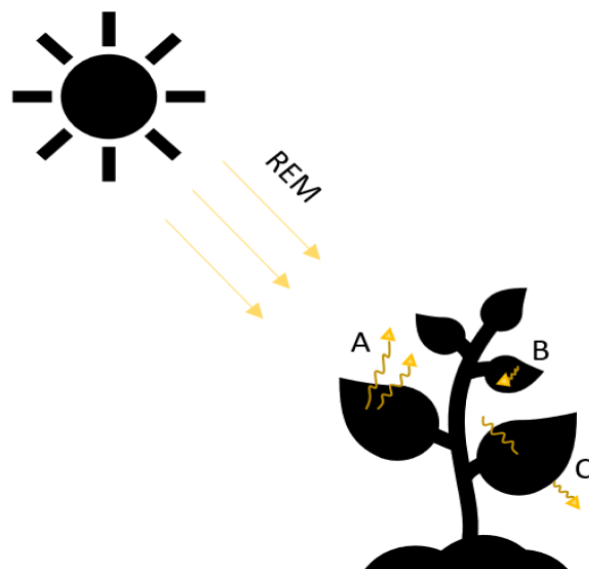


Figura 1. Interação da radiação eletromagnética (REM) com o alvo. A – Reflectância; B – Absorção; C – Transmissão. Fonte: ALMEIDA (2022).

Segundo MOLIN et al. (2015), a região do infravermelho próximo (NIR) junto à região do visível compõe a principal faixa de interesse para o estudo da vegetação. Isso se deve ao fato de que, no NIR, o comportamento da radiação está relacionado às estruturas celulares e alterações que afetam a absorção, que geralmente é baixa (menos de 15%), com uma reflectância que pode atingir

50% (TUCKER E GARRATT, 1977). As condições fisiológicas e morfológicas que influenciam diretamente a absorção da radiação em diferentes comprimentos de onda estão ligadas, principalmente, ao tipo de folha, estágio de maturação e senescência (FORMAGGIO E SANCHES, 2017) (Figura 2). Com base nisso, a aplicação do sensoriamento remoto na identificação de estádios fenológicos, incluindo a identificação do grau de maturação das culturas, pode gerar resultados satisfatórios.

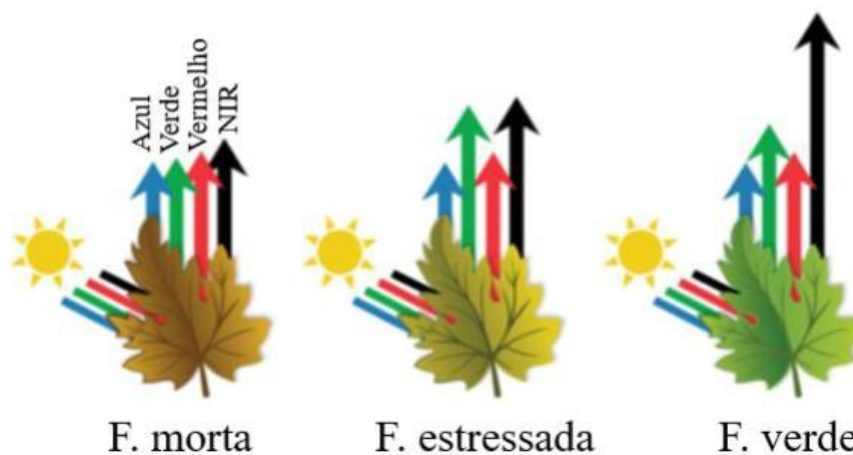


Figura 2. Comportamento da REM diante da vegetação em diversas condições.

F – Folha; NIR – Infravermelho próximo. Fonte: Adaptado de blog.droneng.com.br/radiacao-eletromagnetica-e-plantas/.

O comportamento da folha isolada difere do comportamento do dossel vegetativo, condição que permite a estimativa da biomassa por meio do sensoriamento remoto. De acordo com PONZONI et al. (2012), o aumento do número de camadas de folhas resulta em uma diminuição da reflectância na região visível do espectro eletromagnético e um aumento na região do infravermelho próximo (NIR). No entanto, culturas com alta densidade de biomassa podem atingir um ponto de saturação, ou seja, mesmo que a

vegetação continue a crescer, isso não é refletido pelos valores de reflectância nas regiões do visível e NIR. Essa ocorrência, se deve, pois, a partir do momento em que a cultura apresenta o dobro ou triplo de área de folhas em relação à área do terreno, não são observadas alterações de reflectância na região do visível (PONZONI et al., 2012). Já na região do NIR, essa saturação é atingida quando a relação varia entre 6 e 8, o que torna a utilização dessa faixa do espectro ainda mais importante para estudos da vegetação (PONZONI et al., 2012).

2.2. Níveis de coleta e resolução

Dentro do contexto de sensoriamento remoto existem diferentes níveis de coleta de dados, podendo ser: orbital, aéreo, terrestre/proximal (Figura 3).

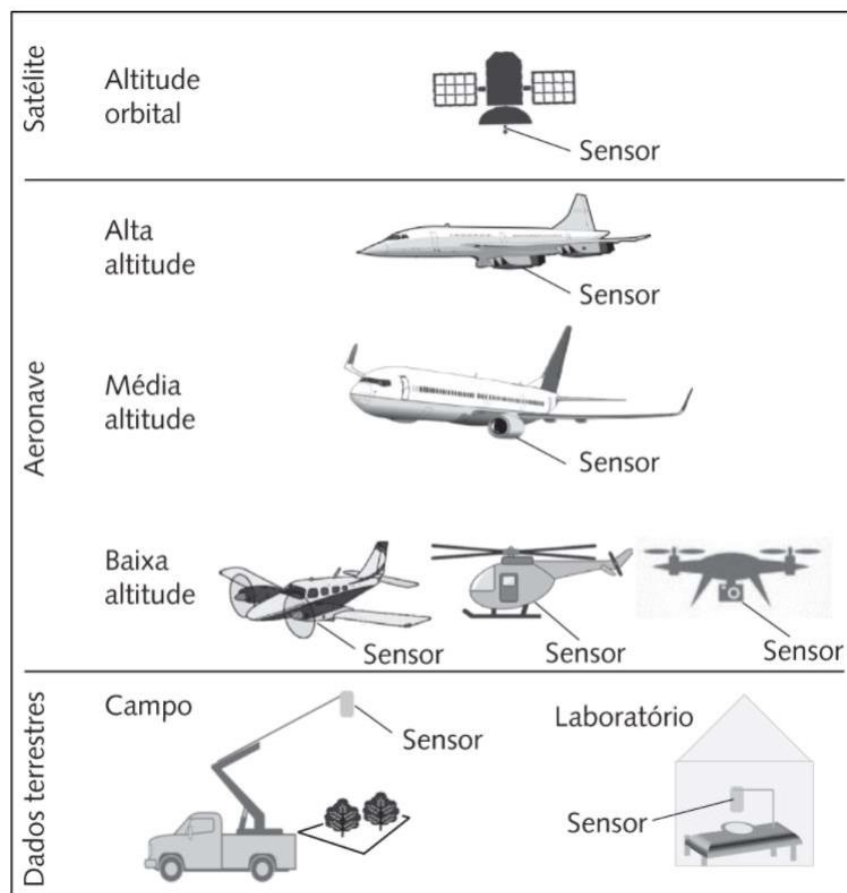


Figura 3. Níveis de coleta de sensoriamento remoto. Fonte: FORMAGGIO E SANCHES, 2017.

Tendo em vista que a metodologia de calibração para sensores orbitais já se apresenta bem consolidada, como a exposta por PONZONI (2015), e que os sensores terrestres são comumente numéricos e não imageadores, sendo assim o drone o maior desafio para a calibração radiométrica, por se tratar de uma tecnologia mais recente, não apresentando muitos métodos difundidos.

Além dos níveis de coleta, existem quatro resoluções (espacial, temporal, espectral e radiométrica), as quais devem ser consideradas para a escolha de um sensor em um determinado fim agrícola. Segundo MORAES (2002) a resolução espacial está relacionada à capacidade do sensor em distinguir os alvos. Para FORMAGGIO E SANCHES (2017), “corresponde ao tamanho individual do menor elemento da imagem”, o pixel, com isso, objetos individuais só serão detectados quando maiores que o tamanho do pixel. A resolução temporal é a frequência de revisita do sensor sobre um mesmo alvo. A resolução espectral é baseada em quais faixas do espectro eletromagnético (comprimento de onda/ banda) o sensor opera. Já a resolução radiométrica “é limitada pelo número discreto de níveis de quantização utilizado para digitalizar um valor de intensidade contínuo”, ou seja, o número de BITS (dígito binário) da imagem (FORMAGGIO E SANCHES, 2017).

2.3. Imagens como fonte de dados radiométricos

2.3.1. Conversão de ND para valores físicos

A conversão de números digitais (ND), para valores físicos (reflectância) tem como objetivo permitir a caracterização espectral de objetos, bem como a elaboração de cálculos que incluem dados de imagens de diferentes bandas

espectrais ou de diferentes sensores (PONZONI et al., 2012). Isso porque de acordo com PONZONI et al., (2012), um valor de ND de uma imagem em uma banda específica não está na mesma escala do ND correspondente de outra banda espectral. Isso traz como consequência a impossibilidade de comparação entre NDs de bandas diferentes, ainda que se trate de um mesmo sensor, bem como de sensores diferentes.

Como forma de solucionar essa limitação, faz-se a conversão dos NDs para valores físicos, mediante o conhecimento de algumas características; tanto do sensor que gera as imagens como das condições ambientais as quais as imagens foram geradas (PONZONI et al., 2012).

2.4. Sensores

Sensores de imagem, como imagem RGB, sensores multiespectrais e hiperespectrais, desempenham um papel crucial na detecção e quantificação de doenças em plantas com alta precisão, beneficiando a agricultura de precisão e a fenotipagem de plantas (MAHLEIN, A. 2016). Com estes sensores é possível gerar índices de vegetação relacionados à diversas propriedades fisiológicas da cultura, como vigor, estresse hídrico, entre outros (JORGE & INAMASU, 2014).

2.4.1. RGB

Sensores RGB são usados na agricultura para sistemas de detecção automatizados, objetivos e reproduzíveis para detecção precoce de doenças de plantas em epidemias. Este sensor captura imagens nas bandas vermelha, verde e azul. Ele é comumente usado devido à sua simplicidade e custo-benefício. A imagem RGB pode detectar sintomas visíveis de doenças em

plantas, como descoloração, murcha e lesões, entretanto, tem seu uso limitado pela saturação diante da alta densidade de biomassa (MAHLEIN, A. 2016).

2.4.2. Multiespectral

Esses sensores capturam dados em várias bandas específicas de comprimento de onda além do espectro visível, tipicamente incluindo bandas do infravermelho próximo (NIR) e da borda vermelha. A imagem multiespectral ajuda a detectar sinais iniciais de estresse e doenças nas plantas antes que sejam visíveis a olho nu. Ao analisar os padrões de reflectância em diferentes bandas espectrais, esses sensores podem identificar mudanças na fisiologia e morfologia das plantas associadas a doenças (MAHLEIN, A. 2016).

2.4.3. Hiperespectral

Os sensores hiperespectrais são aqueles em que as bandas são mais estreitas e apresentam unidades a dezenas de nanômetros, e geralmente capturam dados em centenas de bandas, fornecendo informações detalhadas sobre as propriedades espectrais das plantas. Esta alta resolução espectral permite a identificação precisa de assinaturas espectrais de doenças, possibilitando a detecção e quantificação de doenças em plantas em um estágio inicial (JORGE & INAMASU, 2014). A imagem hiperespectral é particularmente útil para diferenciar os múltiplos fatores de estresse que afetam as plantas (MAHLEIN, A. 2016). O principal limitante para a popularização destes sensores é o alto custo de aquisição.

2.5. Calibração radiométrica

A calibração radiométrica, se trata de uma correção dos pixels de uma imagem, transformando os números digitais presentes na imagem em valores de reflectância. Na ausência de calibrações radiométricas, os cálculos dos índices de vegetação são baseados em números digitais (KELCEY J.; LUCIEER, 2012).

Segundo ALMEIDA (2019), para que as câmeras possam ser utilizadas para analisar a variabilidade temporal dos atributos das plantas torna-se necessário realizar o processo de calibração radiométrica. Gerando imagens com informações de reflectância da superfície, parâmetro mais apropriado para cálculos de índices de vegetação (LÓPEZ et al., 2011; LU; HE, 2017).

Segundo KHANNA et al. (2017) a variação da quantidade de energia eletromagnética que incide sobre o alvo imageado e a variação do ângulo de visada do objeto impedem a existência de sistema de calibração permanente do sensor. Diante disso, e como alternativa o método da linha empírica é muito utilizado por pesquisadores, para realizar a calibração radiométrica das imagens. Este método consiste na extração dos pixels centrais de um alvo de calibração para cálculo dos números digitais brutos médios. Posteriormente, é realizada uma análise de regressão entre os valores de reflectância conhecidos dos alvos de calibração, obtidos em laboratório, e os valores do número digital bruto em cada banda espectral da câmera (WANG; MYINT, 2015).

HRUSKA et al. (2012); WANG; MYINT (2015); IQBAL; LUCIEER; BARRY (2018); CAO et al. (2019); GUO et al. (2019) vêm utilizando de dois a quatro alvos de calibração em diferentes tons de cinza para a aplicação do método da linha empírica. Os autores notaram que o problema desses alvos era a superfície não ser lambertiana, que de acordo com MORAES (2002) se trata de uma

superfície perfeitamente difusa, cuja radiância é a mesma em todas as direções do hemisfério.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção, apresentamos como foi desenvolvida a pesquisa, com a descrição da ARP e dos alvos de calibração que foram utilizados. Foram abordadas também as etapas do processamento realizado no software Qgis e no Agisoft Metashap, que incluíram desde a aquisição das imagens aéreas até a obtenção do ortomosaico com informações de reflectância, geradas após a calibração radiométrica.

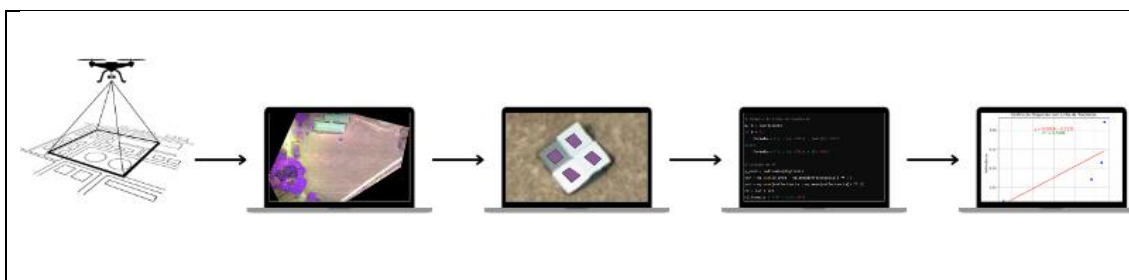


Figura 4. Resumo das etapas realizadas (aquisição de imagens, processamento de imagens, extração de números digitais, desenvolvimento do plugin e plugin funcionando).

3.1. Aeronave remotamente pilotada – ARP

A ARP para realização da coleta de dados, foi o DJI Mavic 3 Multispectral RTK, sendo este uma plataforma de quatro rotores, com autonomia de voo de aproximadamente 43 minutos, com câmera RGB e multispectral integrada. O sensor RGB apresenta um CMOS de 4/3, sendo um sensor de 20 MP, uma velocidade do obturador mecânico de 1/2000 s, e um disparo de 0,7 s. A câmera multispectral integrada contém quatro sensores CMOS 4/3", que capta diferentes comprimentos de onda, sendo estes: Verde (G): 560 nm \pm 16 nm,

vermelho (R): $650 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$, borda vermelha (RE): $730 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$, infravermelho próximo (NIR): $860 \text{ nm} \pm 26 \text{ nm}$.



Figura 5. DJI Mavic 3 Multiespectral RTK para realização do voo para aquisição de imagens.

3.2. Alvo de Calibração

Para calibração radiométrica das imagens, foram utilizadas placas de Etileno Acetato de Vinila (EVA), um polímero emborrachado, com dimensões de 50 cm x 50 cm, em quatro diferentes tons de cinza. Utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec® HandHeld 2TM Spectroradiometer (Boulder, Colorado, EUA) foi determinada a assinatura espectral de cada um dos quatro tons de cinza, sendo realizadas cinco leituras para cada alvo. De posse da assinatura espectral, foi possível fazer a simulação da reflectância correspondente para cada uma das bandas do sensor.



Figura 6. Alvos de calibração. Fonte: imagem própria.

3.3. Aquisição e Processamento de Imagens

A aquisição das imagens foi feita através de um voo em uma área situada no município de Jaboticabal – SP, com cerca de 1 ha. O voo foi efetuado no dia 09/08/2024, e para sua execução, foi utilizado o aplicativo DJI FLY para elaboração do plano de voo. O voo foi realizado com altitude de 80 metros, sobreposição frontal de 80% e lateral de 70%. Durante os voos, os quatro alvos em tons de cinza foram colocados na área para o imageamento.

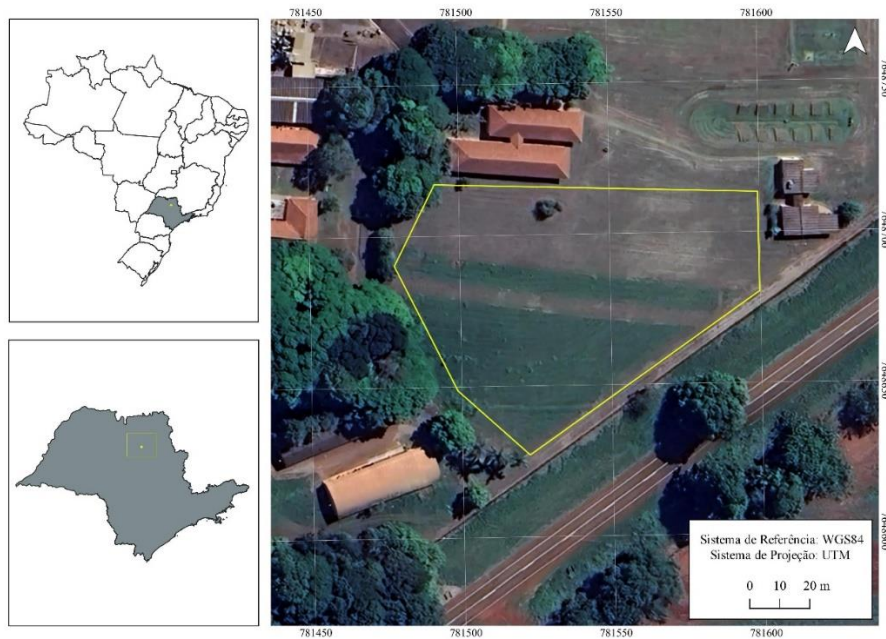


Figura 7. Área do experimento e posicionamento das placas. Fonte: Google Earth.

Após a etapa de aquisição de imagens, estas foram unidas por meio da elaboração de um mosaico, o qual foi realizado pelo software computacional Agisoft Metashape Professional na versão 1.8.4, em que as imagens foram alinhadas, gerando uma nuvem de pontos fotogramétricos. A etapa seguinte consistiu na construção de um modelo de elevação em 2D, completando assim a etapa de ortorretificação e criação do mosaico com a obtenção de um único produto para o voo.

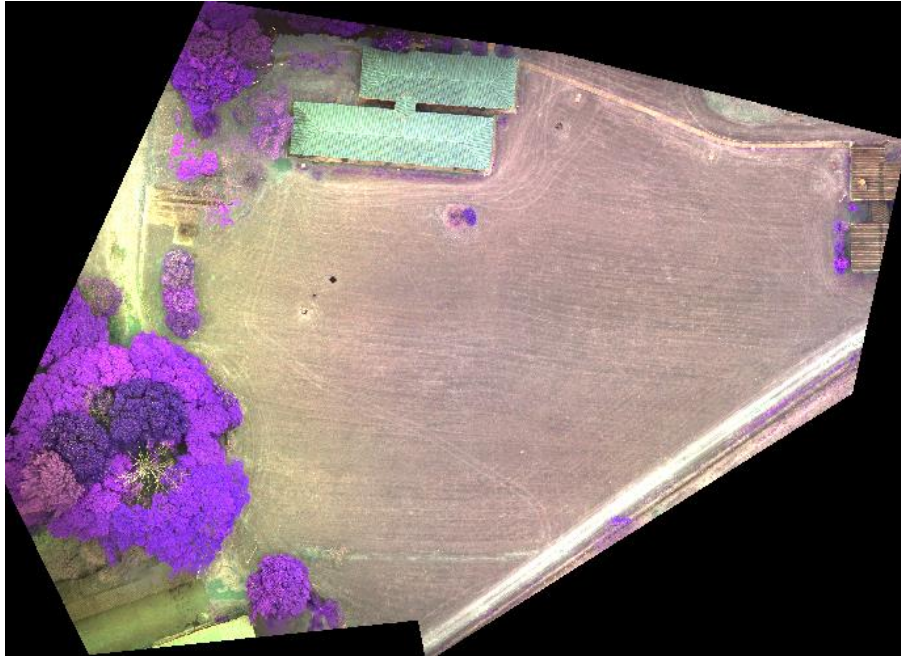


Figura 8. Ortomosaico obtido após o processamento pelo Agisoft Metashape Professional na versão 1.8.4.

Após a obtenção do ortomosaico, foi utilizado o software computacional QGIS 3.28.11 (QGIS Development Team, Open Source Geospatial Foundation, Chicago, IL, EUA) para a realização do processamento de imagens. Nessa etapa, foram extraídos os números digitais de cada banda, dos quatro alvos. Para isso, foi criado um shapefile composto de quatro polígonos, como mostrado na Figura 9, que abrangeram aproximadamente dez pixels, para que se tenha uma média dos números digitais, que foram extraídos com a ferramenta Zonal Statistic.

3.4. Calibração Radiométrica

Para a calibração radiométrica, o conjunto de dados compostos pela reflectância dos alvos, retirados a partir do espectrorradiômetro, que realiza a leitura espectral dos alvos, e obtém valores que passam por uma simulação de

bandas de acordo com o comprimento de onda captado pelo sensor do drone, e de números digitais extraídos das imagens, foi usado para geração de modelos de regressão linear dentro do software computacional Excel. Inicialmente, foi gerado um modelo de calibração para o voo. A calibração radiométrica foi realizada através do ortomosaico, utilizando o software computacional Qgis 3.28.11 por meio da calculadora raster. Nele, as bandas com informações de números digitais foram isoladas, e então foram aplicados os respectivos modelos, gerando uma imagem com reflectância para cada banda.

Após confrontar os dados de reflectância obtidos com o que consta na literaturade Formaggio e Sanches (2017) e Gomes (2020), foi confirmada a efetividade dos alvos propostos para calibrar as imagens radiometricamente. A partir disso, foi criado um plugin em linguagem de programação Python no ambiente de desenvolvimento Visual Basics Studio, que é inicializado dentro do Qgis 3.28.11, tendo um comando que realizasse esta regressão linear de forma instantânea, sem a necessidade do uso do Excel, este por sua vez apresenta dependências nas bibliotecas: Numpy (biblioteca para cálculos matemáticos e estatísticos) e Matplotlib (biblioteca para criação de gráficos).

Seu código é estruturado com a extração de valores digitais, em que ocorre a extração dos valores das camadas vetoriais, que por sua vez são utilizados para a criação do gráfico. A criação de gráficos, na qual é gerado um gráfico de dispersão com uma linha de tendencia e sua fórmula exibida para posterior aplicação na calculadora raster. Nesse ambiente, ocorre a verificação de todos os campos de entrada para que não sejam geradas mensagens de erro, caso estes campos não apresentem valores numéricos. Automatizando assim

uma das etapas do processo de calibração e trazendo maior aplicabilidade para o uso de alvos alternativos.

4. RESULTADOS

Com o processo de criação do plugin, obteve-se uma extensão para o Qgis, fazendo com que o processo de calibração se torne mais prático e rápido. O plugin apresenta uma interface simples e intuitiva para uso.

O plugin apresenta as seguintes funcionalidades.

- **Escolha de Camada:** Oferece ao usuário a possibilidade de selecionar uma camada vetorial que é criada quando ocorre a extração dos números digitais dentro do projeto QGIS. (Figura 10)
- **Inserção de Valores de Reflectância:** Permite ao usuário introduzir valores de reflectância para quatro categorias específicas (branco, cinza claro, cinza escuro e preto). (Figura 10)
- **Criação de Gráfico:** Gera um gráfico de dispersão mostrando a relação entre os valores digitais e os valores de reflectância, incluindo uma linha de tendência. (Figura 11)
- **Determinação da Linha de Tendência:** Ajusta uma linha de tendência aos dados e apresenta sua equação, que será utilizada como equação de regressão linear e calcula o coeficiente de determinação (R^2), para análise de proximidade do valor real. (Figura 11)

Como entrada para utilização do plugin, pede-se para que ocorra a extração dos números digitais brutos médios (Tabela 1) das placas de calibração, dentro do software Qgis antes de inicializar o plugin, na ordem da mais clara para a mais escura.



Figura 9. Aquisição de números digitais brutos médios das placas de calibração.

Tabela 1. Números digitais brutos médios da imagem obtidos pelo Qgis.

NÚMERO DIGITAL BRUTO				
ALVOS	BANDA 1 (GREEN)	BANDA 2 (RED)	BANDA 3 (RE)	BANDA 4 (NIR)
BRANCO	60097	59717	59891	44379
CINZA CLARO	60366	29902	36502	23830
CINZA ESCURO	45748	23026	27428	18145
PRETO	15394	7767	10239	8839

Após a obtenção dos números digitais brutos médios, iniciamos o plugin, e nele adicionamos os valores reais de reflectância (Tabela 2) das placas de calibração que foram obtidos através do espectrorradiômetro.

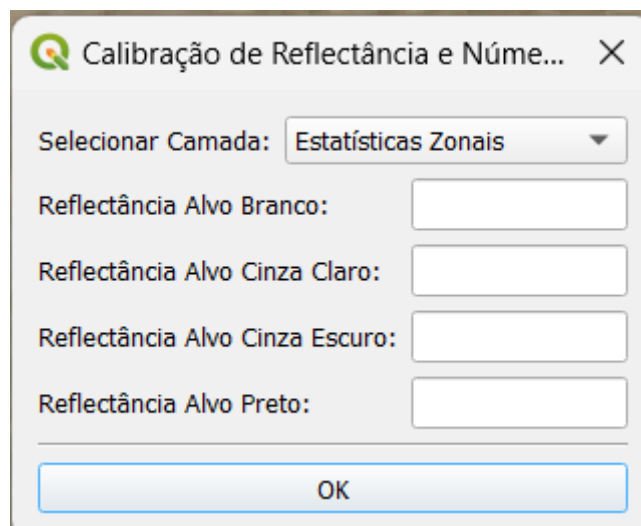


Figura 10. Tela do plugin para inserção dos valores reais de reflectância dos alvos de calibração.

Tabela 2. Reflectância real obtida por meio do espectrorradiômetro.

REFLECTÂNCIA REAL				
ALVOS	BANDA 1 (GREEN)	BANDA 2 (RED)	BANDA 3 (RE)	BANDA 4 (NIR)
BRANCO	0,657	0,682	0,7	0,712
CINZA CLARO	0,330	0,354	0,369	0,385
CINZA ESCURO	0,199	0,217	0,231	0,248
PRETO	0,038	0,042	0,045	0,048

Assim que os valores reais de reflectância são inseridos, o plugin nos apresenta um gráfico de dispersão, com a linha de tendência, o valor de R^2 e a fórmula da linha de tendência, que é usada para o cálculo da regressão linear e calibração das imagens.

Na Figura 11, consegue-se observar que para as bandas 2, 3 e 4 (RED, RE e NIR) os gráficos apresentam pontos que seguem uma linha crescente, sendo estes próximos da linha de tendência e com um valor de R^2 na faixa de 0.99, sendo assim mais próximos de 1, enquanto na banda 1 (GREEN), os

pontos encontram-se espalhados, distantes da linha de tendência, e demonstra um valor de $R^2 = 0.65$, que se encontra mais afastado de 1.

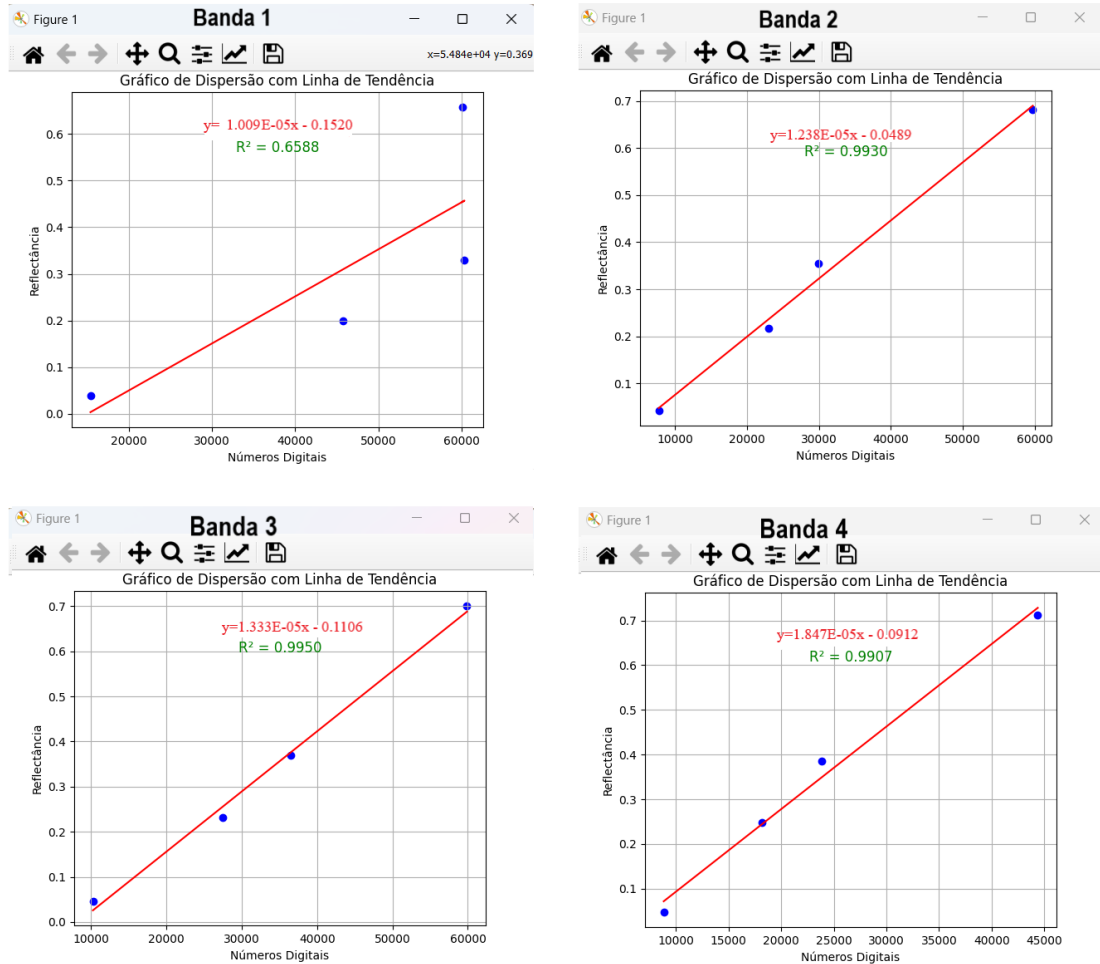


Figura 11. Gráficos de dispersão com fórmula de regressão e valor de R^2 de cada banda, apresentados pelo plugin.

Após o gráfico ser apresentado, utilizamos a fórmula na calculadora raster integrada ao Qgis, para que a calibração pudesse de fato ser finalizada e a imagem corrigida.

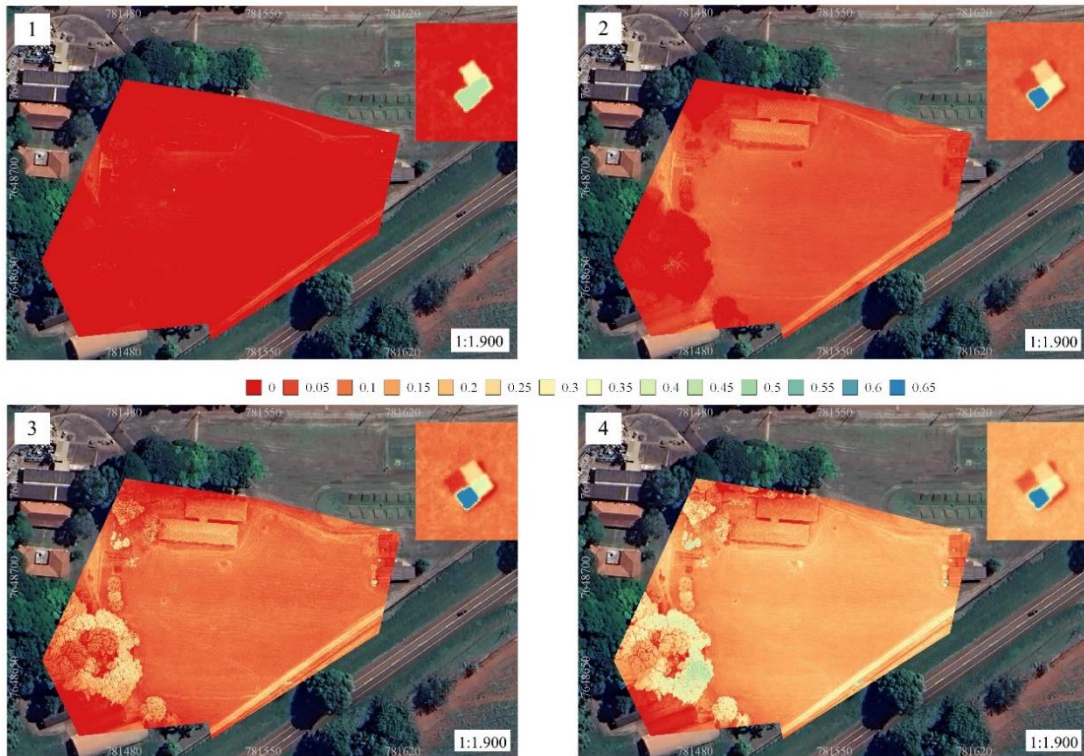


Figura 12. Imagens calibradas (1 – Banda 1), (2 – Banda 2), (3 – Banda 3), (4 – Banda 4), utilizando a calculadora raster do software Qgis.

Diante dos mapas apresentados na Figura 12, observa-se que a área contém diferentes alvos, que exibem comportamentos distintos, como as árvores, apresentando resultados variados em cada uma das bandas. Na banda 2, a reflectância não ultrapassou 0.1, enquanto que na banda 4 variou entre 0.3 e 0.4. O solo exposto da estrada, na parte inferior da imagem, apresentou reflectância nas bandas 2 a 4 entre 0.2 e 0.3. Para as bandas do vermelho (banda 2), borda do vermelho (banda 3) e NIR (banda 4), é um comportamento esperado para o solo, conforme descrito por Formaggio e Sanches (2017).

Quanto às placas, apresentadas na parte superior direita das imagens, é possível observar as respostas espectrais após a calibração. Para melhor compreensão, os valores de reflectância obtidos via espectrorradiômetro (REF)

e pós calibração das imagens, encontram-se na Tabela 3. Observa-se que para a banda 1 (GREEN), os valores de reflectância variam de 0,038 à 0,657, enquanto os valores obtidos na calibração, de 0,003 a 0,454. Na banda 2 (RED), a variação dos valores de reflectância e os valores extraídos na calibração, não apresentam uma grande divergência, estando de 0,042 a 0,682 para a reflectância e de 0,047 a 0,690 após a calibração. Para as a bandas 3 (RE) e 4 (NIR), os resultados mantém a baixa variação entre calibração e reflectância, apresentando a reflectância entre 0,045 e 0,7 na banda 3 e 0,048 e 0,712 na banda 4; tendo as respectivas calibrações 0,026 a 0,688 e 0,069 a 0,731. O que demonstra um resultado mais preciso, em relação a banda 1.

Tabela 3. Comparação entre os valores de reflectância e os valores obtidos após a calibração.

Reflectância x calibração								
Alvos	Banda 1		Banda 2		Banda 3		Banda 4	
	Ref	Calib	Ref	Calib	Ref	Calib	Ref	Calib
Branco	0,657	0,454	0,682	0,690	0,7	0,688	0,712	0,731
Cinza claro	0,330	0,457	0,354	0,327	0,369	0,379	0,385	0,358
Cinza escuro	0,199	0,309	0,217	0,236	0,231	0,258	0,248	0,246
Preto	0,038	0,003	0,042	0,047	0,045	0,026	0,048	0,069

Legenda. Ref (reflectância), calib (calibração), banda 1 (green), banda 2 (red), banda 3 (re) banda 4 (nir).

Após a calibração, a imagem pode ser utilizada para gerar índices de vegetação para que possam ser realizadas análises de maneira mais confiável e auxiliar em tomadas de decisões mais assertivas.

5. DISCUSSÃO

Apesar de KHANNA et al. (2017) afirmar que devido à variação da quantidade de energia eletromagnética que incide sobre o alvo imageado, e a variação do ângulo de visada do objeto não é possível se ter um sistema de calibração permanente do sensor, o método da linha empírica é muito utilizado por pesquisadores, para realizar a calibração radiométrica das imagens. Pois se trata de uma metodologia rápida e prática, que vem gerando imagens com informações de reflectância da superfície, parâmetro mais apropriado para cálculos de índices de vegetação (LÓPEZ et al., 2011; LU; HE, 2017). Com isso acaba por fornecer resultados confiáveis para a realização de análises.

HRUSKA et al, (2012) notaram que a aplicação do método da linha empírica em alvos em tons de cinza confeccionados em lona, apresenta um problema devido a superfície não ser lambertiana, que de acordo com MORAES (2002) se trata de uma superfície perfeitamente difusa, cuja radiância é a mesma em todas as direções do hemisfério. Ainda assim, trata-se de um método confiável e econômico que apresenta resultados significantes para avaliações dos índices de vegetação, tendo em vista que por se tratar de uma tecnologia recente, os ARP's e os sensores necessitam de mais análises, e estudos para obterem tecnologias de correção mais avançadas e em um preço acessível.

Os mapas apresentados na Figura 12 nos mostram visualmente a calibração realizada, apresentando os valores obtidos nas placas de calibração que estão em destaque (Tabela 3). Estes apresentaram-se muito condizentes e próximos dos valores obtidos via espectrorradiômetro, tendo exceção dos valores do primeiro mapa (Banda 1), em que é observa-se valores inferiores e distintos aos da reflectância real. A partir da aplicação do método da linha empírica é gerado

o coeficiente de determinação R^2 que indica a porcentagem de ajuste do modelo em relação às condições reais variando entre valores de 0 e 1, sendo 1 como modelo 100% ajustado, pois, R^2 permite avaliar a coerência do modelo (HENRIQUES et.al; 2017). Esta banda, foi a que exibiu o menor valor de R^2 , sendo este de 0.6588 como pode-se observar na Figura 10, o que afetou a qualidade da calibração.

Para as outras bandas (2, 3, e 4), temos um valor de R^2 mais próximo de 1, o que preconiza os resultados da calibração que podem ser observados na tabela 3. Nestas bandas, os resultados de reflectância são mais próximos dos valores obtidos a partir do espectrorradiômetro, sendo estes mais confiáveis para a obtenção de índices de vegetação e realização de análises.

É fundamental realizar avaliações em diversas condições de voo e aumentar o número de experimentos. As inconsistências observadas na banda 1 demandam uma investigação aprofundada, pois podem estar relacionadas a falhas no sensor, e não no método de calibração. Os resultados podem indicar potenciais problemas no detector do sensor para essa banda, mas a natureza desses problemas requer estudos adicionais. Dada a limitação de um único voo realizado, se faz necessário incrementar a quantidade de voos e testar diferentes condições dos mesmos. Persistindo as inconsistências, será imprescindível investigar suas causas.

6. CONCLUSÃO

Tendo em vista toda a demanda e complexidade que a calibração radiométrica de imagens apresenta, concluímos que a criação deste plugin foi de grande importância para um avanço não somente científico, mas também

tecnológico. Proporciona agilidade e eficiência para os profissionais que utilizam o software Qgis para realizar a calibração de imagens. A calibração proposta e os painéis mostraram-se satisfatórios para calibração radiométrica das bandas do vermelho, borda do vermelho, e infravermelho próximo do sensor acoplado ao MAVIC, o que aumenta a precisão na tomada de decisão de quem o utiliza.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Samira Luns Hatum de. Monitoramento da maturação do café arábica utilizando câmera digital modificada a bordo de veículo aéreo não tripulado. 2019.

ALMEIDA, Samira Luns Hatum de. Sensoriamento remoto aplicado ao modelo SAFER na estimativa de parâmetros biofísicos de cultivos. 2022.

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.

CAO, S. et al. Radiometric calibration assessments for UAS-borne multispectral cameras: Laboratory and field protocols. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 149, n. July 2018, p. 132–145, 2019.

DA, Adriano Pereira. Uso de drone na agricultura 4.0. 2021.

DE BORATTO, I. M.; GOMIDE, Reinaldo Lúcio. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. 2013.

FIGUEIREDO, Divino. Conceitos básicos de sensoriamento remoto. **São Paulo**, 2005.

Formaggio, A.R., Sanches, I.D.A. 2017. Sensoriamento remoto em agricultura. Oficina de Textos.

GOMES, Amanda Pereira Assis. Calibração radiométrica de imagens obtidas por câmeras utilizadas em veículos aéreos não tripulados. 2020.

GUO, Y. et al. Radiometric calibration for multispectral camera of different imaging conditions mounted on a UAV platform. Sustainability (Switzerland), v. 11, n. 4, 2019.

HENRIQUES, Renata Jordan; VALADÃO, Roberto Célio. Contribuições do modelo de regressão não-linear logarítmico aplicado à análise de perfis longitudinais em geomorfologia fluvial. **Revista Geografias**, p. 54-70, 2017.

HRUSKA, R. et al. Radiometric and geometric analysis of hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle. Remote Sensing, v. 4, n. 9, p. 2736–2752, 2012.

IQBAL, F.; LUCIEER, A.; BARRY, K. Simplified radiometric calibration for UAS-mounted multispectral sensor. European Journal of Remote Sensing, v. 51, n. 1, p. 301–313, 2018.

Kelcey J.; Lucieer A. Sensor correction and radiometric calibration of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing. In Proceedings of the 2012 XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 25 August–1 September 2012; Volume 39(B1).

KHANNA, R. et al. On field radiometric calibration for multispectral cameras. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, p. 6503–6509, 2017.

LÓPEZ, D. H.; GARCÍA, B. F.; PIQUERAS, J. G.; ALCÁZAR, G. V. An approach to the radiometric aerotriangulation of photogrammetric images. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 66, n.6, p. 883-893, 2011.

Mahlein, A. (2016). "Detection of plant diseases through image sensors - parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant disease.*, 100 2, 241-251.

MORAES, EC de. Fundamentos de sensoriamento remoto. **São José dos campos: INPE**, p. 1-7, 2002.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO Y. E.; KUPLICH, T. M.; Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. Oficina de textos, São Paulo, 2012.

PONZONI, Flávio Jorge et al. **Calibração de sensores orbitais**. Oficina de Textos, 2015.

REJEB, Abderahman et al. Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. **Computers and electronics in agriculture**, v. 198, p. 107017, 2022.

STEFFEN, Carlos Alberto; SOLAR, RADIAÇÃO. Introdução ao sensoriamento remoto. Divisão de Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais—INPE, São José dos Campos São—SP. Available online: <http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm> (accessed on 26 August 2021), 2011.

Taylor, F. (1996). "Earth remote sensing from space." *Contemporary Physics* , 37, 391-405.

WANG, C.; MYINT, S. W. A Simplified Empirical Line Method of Radiometric Calibration for Small Unmanned Aircraft Systems-Based Remote Sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 8, n. 5, p. 1876–1885, 2015.