

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

AMANDA PEREIRA ASSIS GOMES

**CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS OBTIDAS POR CÂMERAS
UTILIZADAS EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

AMANDA PEREIRA ASSIS GOMES

**CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS OBTIDAS POR CÂMERAS
UTILIZADAS EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz

Coorientadores: Francisco de A. de C. Pinto
Domingos Sárvio M. Valente
Elpídio Inácio F. Filho

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

G633c
2020
Gomes, Amanda Pereira Assis, 1995-
Calibração radiométrica de imagens obtidas por câmeras
utilizadas em veículos aéreos não tripulados / Amanda Pereira
Assis Gomes. – Viçosa, MG, 2020.
53 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Daniel Marcal de Queiroz.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Veículos aéreos não
tripulados. 3. Imagens multiespectrais. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 631.1

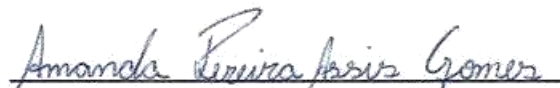
AMANDA PEREIRA ASSIS GOMES

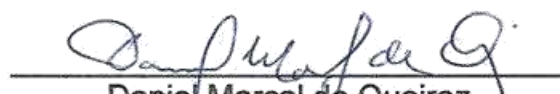
**CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS OBTIDAS POR CÂMERAS
UTILIZADAS EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2020.

Assentimento:


Amanda Pereira Assis Gomes
Autora


Daniel Marçal de Queiroz
Orientador

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil", da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

RESUMO

GOMES, Amanda Pereira Assis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Calibração radiométrica de imagens obtidas por câmeras utilizadas em veículos aéreos não tripulados**. Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Domingos Sárvio Magalhães Valente e Elpídio Inácio Fernandes Filho.

A utilização de veículo aéreo não tripulado (VANT) equipado com câmeras multiespectrais para uso em sensoriamento remoto vem propiciando novas oportunidades para aplicações agrícolas relacionadas a mapeamento e monitoramento dos campos de produção. Câmeras multiespectrais de uso comercial normalmente trabalham na faixa do visível. Entretanto, estudos envolvendo vegetação as vezes carecem de imagens em bandas diferentes das trabalhadas por câmeras comerciais. Com isso algumas câmeras digitais são modificadas para captarem imagens em comprimentos de onda específicos, de acordo com a finalidade do estudo. Ainda assim, para estudos quantitativos as imagens multiespectrais devem passar por processo de calibração radiométrica. Essa calibração converte cada número digital da imagem em valores de reflectância da cena para poder ser utilizada no sensoriamento remoto quantitativo. Com isso se torna necessário um método sistemático de calibração radiométrica que gere imagens multiespectrais com valores de reflectância unitária. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivos: (1) analisar diferentes materiais para confecção de alvos de calibração radiométrica; (2) comparar o desempenho de uma câmera com um sensor com uma câmera multisensor na obtenção de NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada). No primeiro estudo foram testados quatro tipos de painéis para confecção dos alvos de calibração, um painel composto por lona e feltro, outro por placas de MDF pintada com tinta fosca, outro por napa, e um quarto painel contendo os quatro materiais lona, feltro, napa e MDF pintada. Foi utilizada uma câmera modificada que coleta imagens nas bandas do vermelho verde e infravermelho próximo. A coleta das imagens foi realizada durante três dias seguidos no mesmo horário e em quatro alturas de voo diferentes sendo elas 20, 40, 60 e 80m. A área de estudo é uma área plana cultivada com gramínea. Durante a coleta das imagens foi determinado o NDVI, com auxílio de sensor ativo, de dez pontos experimentais espalhados aleatoriamente na área. As

imagens coletadas passaram por calibração radiométrica pelo método da linha empírica em que foram coletados números digitais brutos de cada painel que foram utilizados para gerar a regressão de calibração juntamente com a assinatura espectral de cada painel medida em laboratório. Os resultados mostram que dentre os materiais testados a napa apresentou os melhores resultados para auxílio na calibração radiométrica de imagens multiespectrais. Para as condições estudadas a altura de voo não influenciou significativamente na calibração radiométrica. No segundo estudo foram utilizadas duas câmeras multiespectrais, uma câmera com um único sensor CCD modificada para captar os comprimentos de onda da banda do infravermelho próximo, e uma câmera composta por cinco sensores capaz de coletar imagens em cinco bandas. As câmeras foram acopladas em VANTs para levantamento dos dados. A área de estudo é uma área montanhosa cultivada com a cultura do café. As coletas das imagens foram realizadas no mesmo horário do dia e durante três dias a um intervalo de vinte dias cada coleta. Durante a aquisição das imagens foram coletados com sensor ativo o NDVI de trinta e seis pontos experimentais dispostos aleatoriamente na área de estudo. Para calibração radiométrica das imagens foi utilizado quatro alvos de calibração de napa nas cores branca, preta, cinza claro e cinza escuro. As imagens obtidas com a câmera modificada após a calibração radiométrica apresentou padrão de variabilidade espacial do NDVI semelhante ao sensor de NDVI e as imagens da câmera composta por cinco sensores. No entanto, os valores de NDVI obtidos com as imagens calibradas da câmera modificada foram sempre inferiores aos valores determinados pelo sensor ativo e pela câmera equipada com cinco sensores. Em câmeras modificadas não é possível configurar os parâmetros separadamente para cada banda da imagem, com isso uma banda sobrepõe a outra, não sendo possível determinar exatamente a reflectância em cada banda. A câmera modificada é apta para observação dos padrões da cultura, uma vez que apresentou correlação significativa com o sensor ativo de NDVI, entretanto, seu uso não é recomendado para estudo da variabilidade temporal da cultura. Por outro lado, câmeras multisensor mostram-se adequadas para o estudo da variabilidade temporal da cultura.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Veículo aéreos não tripulados. Imagens multiespectrais.

ABSTRACT

GOMES, Amanda Pereira Assis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Radiometric calibration of images obtained by cameras used unmanned aerial vehicles.** Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Co-advisers: Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Domingos Sárvio Magalhães Valente and Elpídio Inácio Fernandes Filho.

The use of an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with multispectral cameras for use in remote sensing has provided new opportunities for agricultural applications related to the mapping and monitoring of production fields. Multispectral cameras for commercial use usually work in the visible range. However, studies involving vegetation sometimes need images in bands other than those used by commercial cameras. Therefore, some digital cameras are modified to capture images at specific wavelengths, according to the purpose of the study. Even so, for quantitative studies, multispectral images must undergo a radiometric calibration process. This calibration converts each digital number in the image into reflectance values of the scene so that it can be used in quantitative remote sensing. Therefore, a systematic method of radiometric calibration is required, which generates multispectral images with unit reflectance values. Thus, the present work had as objectives: (1) to analyze different materials for making radiometric calibration targets; (2) to compare the performance of a camera with a sensor with a multi-sensor camera in obtaining NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). In the first study, four types of panels were tested for making the calibration targets, one panel made of canvas and felt, another made of MDF boards painted with matte paint, another made of napa, and a fourth panel containing the four materials canvas, felt, napa and painted MDF. A modified camera was used that collects images in the bands of green, red and near infrared. The images were collected during three consecutive days at the same time and at four different flight heights, 20, 40, 60 and 80m. The study area is a flat area cultivated with grass. During the collection of the images, the NDVI was determined, with the aid of an active sensor, of ten experimental points randomly scattered in the area. The collected images were submitted to radiometric calibration using the empirical line method in which raw digital numbers were collected from each panel. The radiometric calibration was done using the spectral signature of each panel measured in the laboratory. The

results show that among the materials tested, napa presented the best results to aid in the radiometric calibration of multispectral images. For the conditions studied, the flight height did not significantly influence the radiometric calibration. In the second study, two multispectral cameras were used, a camera with a single CCD sensor modified to capture the wavelengths of the near infrared band, and a camera composed of five sensors capable of collecting images in five bands. The cameras were coupled to UAVs for data collection. The study area is a mountainous area cultivated with coffee. Image acquisitions were performed at the same time of day and for three days at an interval of twenty days between each collection. During the acquisition of the images, the NDVI of thirty-six experimental points were randomly measured in the study area with an active sensor. For radiometric calibration of the images, four napa calibration targets in white, black, light gray and dark gray were used. The images obtained with the modified camera after radiometric calibration showed a pattern of spatial variability of the NDVI similar to the NDVI sensor and the images of the camera composed of five sensors. However, the NDVI values obtained with the modified camera's calibrated images were always lower than the values determined by the active sensor and the camera equipped with five sensors. In modified cameras, it is not possible to configure the parameters separately for each band of the image, thus one band overlaps the other, and it is not possible to determine exactly the reflectance in each band. The modified camera is capable of observing the culture patterns, since it showed a significant correlation with the active NDVI sensor, however, its use is not recommended for studying the temporal variability of the culture. On the other hand, multi-sensor cameras are suitable for monitoring of the crop temporal variability.

Keywords: Precision agriculture. Unmanned aerial vehicles. Multispectral images.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	9
1.1. OBJETIVOS	13
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO DA DISSERTAÇÃO	13
1.4. REFERÊNCIAS	14
2. ARTIGO I: CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS UTILIZANDO ALVOS DE BAIXO CUSTO	17
RESUMO	17
ABSTRACT	18
2.1. INTRODUÇÃO	19
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	21
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
2.4. CONCLUSÃO	32
2.5. REFERÊNCIAS	32
3. ARTIGO II: COMPARAÇÃO DE CÂMERAS MULTIESPECTRAIS RGB MODIFICADA E MULTISENSOR NA OBTENÇÃO DE IMAGENS PARA MONITORAMENTO DA CULTURA DO CAFÉ.	35
RESUMO	35
ABSTRACT	36
3.1. INTRODUÇÃO	37
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	38
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
3.4. CONCLUSÃO	51
3.5. REFERÊNCIAS	51
4. CONCLUSÃO GERAL	53

1. INTRODUÇÃO GERAL

A população mundial atualmente apresenta um crescimento de 1,1% ao ano e estima-se que em 2050 a população chegará a 9,7 bilhões (UNITED NATIONS, 2019). Segundo Skog & Steinnes (2016), para atender essa população a produção de alimentos terá que praticamente ser dobrada nos próximos 30 anos. A expansão de áreas agrícolas pode prejudicar o meio ambiente, sendo assim uma solução para atender a demanda de alimentos seria uma melhor gestão da produção agrícola (SKOG; STEINNES, 2016).

A agricultura de precisão faz o uso de tecnologias visando melhorar a eficiência dos sistemas de produção agrícola. O objetivo é ter um maior retorno financeiro e reduzir os impactos ambientais. Isso é feito com base numa análise das variabilidades espacial e temporal do sistema solo/planta/clima. Com o uso da agricultura de precisão, os insumos agrícolas são aplicados de forma eficiente reduzindo-se as perdas (MURUGAN; GARG; SINGH, 2017). No entanto, para isso são necessários sistemas de monitoramento de culturas que permitam realizar o gerenciamento das áreas de produção de tal forma a atingir a eficiência desejada (DONG et al., 2017).

Uma das técnicas mais utilizadas para o monitoramento das culturas na agricultura de precisão é o sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto pode ser explicado como o conjunto de técnicas e procedimentos que permitem a representação e coleta de dados sem que haja contato com alvo. A obtenção de informações sobre a interação da radiação eletromagnética com a superfície do alvo possibilita o monitoramento das culturas além de permitir a visualização de fatores que podem vir a causar perdas na produtividade (ZHANG; KOVACS, 2012; BÉGUÉ et al., 2018). Assim, o sensoriamento remoto pode ser aplicado usando sensores embarcados em plataformas próximas (BOURGEON et al., 2016; MATESE et al., 2018), plataformas aéreas (HRUSKA et al., 2012; SHI et al., 2017; IQBAL; LUCIEER; BARRY, 2018) e orbitais (COMPAIN et al., 2015; JIN et al., 2017; MURUGAN; GARG; SINGH, 2017).

De natureza óptica, os sensores embarcados em plataformas próximas processam a luz em diferentes comprimentos de onda, podendo ser a luz natural ou emitida pelo próprio sensor. Também necessitam estar próximo do objeto em estudo,

podendo ou não haver contato. Esses sensores podem ser portáteis ou acoplados diretamente às máquinas de aplicação à taxa variada (ROSSEL et al., 2001) e seu princípio de funcionamento são basicamente o mesmo de sensores localizados em plataformas aéreas ou orbitais de sensoriamento remoto. Enquanto sensores de plataformas orbitais e aéreas cobrem áreas extensas, os sensores que são acoplados em plataformas próximas envolvem informações espectral detalhada em locais específicos (DAVID et al., 2015). Apesar de não permitirem uma visão completa da variabilidade espacial do estado da cultura em todo campo de produção os sensores embarcados em plataformas próximas têm sido utilizados na agricultura de precisão e em trabalhos envolvendo mapeamento digital de solos, permitindo a tomada de decisão em escalas detalhadas.

Mesmo permitindo o imageamento de grandes áreas, as plataformas orbitais de sensoriamento remoto apresentam problemas relacionados a resolução temporal e espacial. A aquisição de imagens desse sistema está diretamente ligada as características orbitais do satélite e do ângulo de abertura do sensor (COMPAIN et al., 2015). Com isso, as imagens não podem ser obtidas a qualquer momento, pois depende da passagem do sensor no local. Já a resolução espacial de uma imagem refere-se ao tamanho que seu pixel representa na realidade. Contudo, a distância entre a plataforma e o alvo a ser imageado acaba fazendo com que esses sistemas tendem a apresentar uma resolução espacial menor que a dos demais (MENESES et al., 2012).

As plataformas aéreas atuam numa altitude menor que plataformas orbitais. Com isso, cada imagem obtida por essas plataformas abrangem uma área menor que as orbitais. Uma vantagem desse sistema é que permitem a aquisição de imagens de acordo a necessidade do usuário desde que as condições climáticas sejam favoráveis e possibilitam um imageamento com maior resolução espacial. Dentre as plataformas aéreas, os veículos aéreos não tripulados (VANT) têm sido utilizados devido sua flexibilidade para aquisição de imagens e por apresentarem um custo relativamente baixo (WANG; MYINT, 2015). Atualmente, os VANT's têm sido empregados em diversas áreas desde a agricultura até o monitoramento ambiental (NOCERINO et al., 2017), a vigilância aérea (ZAHEER et al., 2016), o monitoramento de área de risco (WALLAR; PLAKU; SOFGE, 2015), a detecção de incêndios (CRUZ et al., 2016), a agricultura de precisão (MOGILI; DEEPAK, 2018), entre outros.

Há diversos sensores que estão sendo acoplados aos VANTs para monitoramento de culturas. Os sensores podem ser classificados de acordo com o número de bandas espectrais captadas, assim são classificados como multiespectrais e hiperespectrais. Enquanto sensores multiespectrais trabalham normalmente de três a vinte bandas do espectro, os hiperespectrais são capazes de trabalhar com dezenas, até centenas de bandas. Outra questão é que as câmeras hiperespectrais são formadas por bandas espectrais contíguas, enquanto em câmeras multiespectrais as bandas não têm que ser necessariamente contíguas entre si.

Entretanto, sistemas multiespectrais apresentam um menor custo e maior facilidade de aquisição e manuseio, por isso têm sido mais utilizados. A maioria das câmeras multiespectrais disponíveis foram desenvolvidas especificamente para trabalhar em determinados comprimentos de ondas como na faixa do visível (POZO et al., 2014; NOCERINO et al., 2017). Outras câmeras têm sido produzidas a partir da modificação de câmeras multiespectrais que trabalham no espectro do visível para obtenção de imagens em bandas específicas (WANG; MYINT, 2015; LOGIE; COBURN, 2018).

É muito comum em sensoriamento remoto o uso de câmeras digitais que captam a energia no espectro do visível. Seu uso se aplica na avaliação de propriedades biofísicas como fenologia, clorofila, nível crítico de nitrogênio, biomassa, índice de área foliar, pragas e doenças, e muitas outras relacionados à agricultura de precisão (PUTRA; SONI, 2017). Contudo, ao se trabalhar com vegetação pode ser necessário utilizar faixas do espectro que não se encontram na faixa do visível, como o espectro do infravermelho próximo.

Apesar do espectro do infravermelho próximo ser importante para trabalhos com vegetação (NIJLAND et al., 2014), há uma limitação de disponibilidade de sensores digitais com canal no infravermelho próximo. Com isso, as câmeras digitais do espectro do visível passam por uma modificação onde é retirado um filtro de rejeição interna do canal do infravermelho próximo (PUTRA; SONI, 2017). Essas câmeras, mais conhecidas como câmeras modificadas, apresentam potencial de uso na agricultura (HUNT et al., 2011; NIJLAND et al., 2014; PUTRA; SONI, 2017).

O uso de câmeras digitais comuns e modificadas tem crescido dentro do ramo da agricultura. Seu uso tem-se aplicado em diversas áreas, incluindo o monitoramento

do vigor da vegetação. Os índices de vegetação calculados a partir de duas bandas espectrais são utilizados para inferir sobre o vigor da vegetação (LIMA-CUETO et al., 2019). Esses índices mantêm dados espectrais da cultura e fornecem informações referente a cobertura vegetal (LIMA-CUETO et al., 2019). Os índices de vegetação são derivados de operações aritméticas realizadas com informações de reflectância da vegetação em diferentes comprimentos de onda e são utilizados para avaliar várias características da vegetação.

Ao se trabalhar com imagens dentro do sensoriamento remoto é necessário arquivar informações referente a reflectância do objeto imageado. A reflectância é uma razão do fluxo de energia eletromagnética que está sendo incidida no objeto com o fluxo refletido. Entretanto, os elementos sensores da câmera, modificada ou não, reproduzem a intensidade da radiância proveniente da área de acordo com o comprimento de onda para o qual o sensor foi desenvolvido. Por isso, há necessidade de se realizar a calibração radiométrica (WANG; MYINT, 2015).

A calibração radiométrica tem como objetivo transformar os Números Digitais presentes nas imagens em valores de reflectância, adequando os dados da imagem para uso no sensoriamento remoto. Devido a 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 (KHANNA et al., 2017). Embora se tenha muitas tecnologias dentro do sensoriamento remoto, ainda não foi desenvolvido um método de calibração radiométrica que seja sistemático, viável e conveniente para imagens obtidas por câmeras utilizadas em VANTs (WANG; MYINT, 2015).

Devido a simplicidade de implementação, o método da linha empírica está sendo muito utilizado atualmente para calibração de dados captados remotamente (KELCEY; LUCIEER, 2012; WANG; MYINT, 2015). Esse método baseia-se na extração dos pixels centrais em um alvo de calibração para cálculo dos números digitais brutos médios. Posteriormente, é realizada uma análise de regressão entre os valores de reflectância dos alvos de calibração e os valores do número digital bruto em cada banda espectral da câmera (WANG; MYINT, 2015). Porém ainda existem desafios técnicos para tornar a calibração radiométrica uma prática que seja de fácil utilização e que permita a determinação da reflectância com a exatidão necessária.

Um dos maiores desafios para a calibração radiométrica está no sistema que se irá utilizar para realizar a calibração. Atualmente as calibrações decorrem da utilização de sensores capazes de mensurar a energia incidente e alvos de calibração.

Diversos pesquisadores vêm utilizando de dois a quatro alvos de calibração em diferentes tons de cinza para a aplicação do método da linha empírica (HRUSKA et al., 2012; WANG; MYINT, 2015; IQBAL; LUCIEER; BARRY, 2018; CAO et al., 2019; GUO et al., 2019). Contudo, independentemente da cor e quantidade dos alvos, um dos problemas da utilização desse método de calibração é que a superfície do alvo nem sempre se comporta próximo a uma superfície lambertiana. Quando a superfície do alvo não é lambertiana, o ângulo de inclinação da iluminação de incidência tem forte influência no número digital bruto do alvo (POZO et al., 2014; WANG; MYINT, 2015; MINAŘÍK; LANGHAMMER; HANUŠ, 2019). Por esse motivo, é importante estudar os diferentes materiais utilizados para a confecção dos alvos de calibração.

1.1. OBJETIVOS

Diante da necessidade de se aprimorar os métodos de calibração radiométrica de imagens obtidas a partir de câmeras multiespectrais acopladas a veículos aéreos não tripulados, esse trabalho foi desenvolvido com os seguintes objetivos específicos:

- Analisar diferentes materiais para confecção dos alvos de calibração radiométrica;
- Avaliar a influência da altura de voo na calibração radiométrica de imagens multiespectrais;
- Validar o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) obtidos a partir de imagens geradas por câmera multiespectral após a calibração radiométrica; e,
- Comparar o desempenho de uma câmera com um sensor com uma câmera multisensor na obtenção de NDVI.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO DA DISSERTAÇÃO

O texto da dissertação foi dividido em dois artigos. O primeiro artigo, cujo título é “Calibração radiométrica de imagens multiespectrais utilizando alvos de baixo

custo”, trata de uma análise de diferentes materiais de baixo custo para a produção de alvos de calibração radiométrica de imagens obtidas por VANTs. Além disso, investiga-se o efeito que a altitude de voo a exatidão no processo de mapeamento do índice de vegetação da diferença normalizada, quando se utiliza alvos de calibração construído com material de baixo custo.

O segundo artigo, cujo título é “Comparação de câmeras multiespectrais RGB modificada e multisensor na obtenção de imagens para monitoramento de culturas”, trata da análise comparativa entre uma câmera multiespectral RGB modificada para obtenção de imagens na banda do infravermelho próximo com uma câmera multiespectral dotada de um sensor para cada banda. Os valores de NDVI obtidos pelas duas câmeras são comparados aos valores de NDVI obtidos com um sensor proximal de NDVI.

1.4. REFERÊNCIAS

BÉGUÉ, A. et al. Remote Sensing and Cropping Practices : A Review. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 1–32, 2018.

BOURGEON, M. A. et al. Field radiometric calibration of a multispectral on-the-go sensor dedicated to the characterization of vineyard foliage. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 184–194, 2016.

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.

COMPAIN, E. et al. VNIR, MWIR, and LWIR source assemblies for optical quality testing and spectro-radiometric calibration of earth observation satellites. **Proc. SPIE**, v. 9626, n. 0, p. 962626, 2015.

CRUZ, H. et al. Efficient forest fire detection index for application in Unmanned Aerial Systems (UASs). **Sensors (Switzerland)**, v. 16, n. 6, 2016.

DAVID, W. C. et al. Proximal Sensor Identification of Lithologic Discontinuities in Eastern Europe. **ProEnvironment/ProMediu**, v. 8, n. 22, p. 176–185, 2015.

DONG, J. et al. **4D crop monitoring: Spatio-temporal reconstruction for agriculture**. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. **Anais...IEEE**, 2017.

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.

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.

HUNT, E. et al. NIR-green-blue high-resolution digital images for assessment of winter cover crop biomass. **GIScience and Remote Sensing**, v. 48, n. 1, p. 86–98, 2011.

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.

JIN, Z. et al. Crop model- and satellite imagery-based recommendation tool for variable rate N fertilizer application for the US Corn system. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 5, p. 779–800, 2017.

KELCEY, J.; LUCIEER, A. Sensor Correction and Radiometric Calibration of a 6-Band Multispectral Imaging Sensor for Uav Remote Sensing. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXIX-B1, n. September, p. 393–398, 2012.

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

LIMA-CUETO, F. J. et al. Using vegetation indices and a UAV imaging platform to quantify the density of vegetation ground cover in olive groves (*Olea Europaea* L.) in Southern Spain. **Remote Sensing**, v. 11, n. 21, 2019.

LOGIE, G. S. J.; COBURN, C. A. An investigation of the spectral and radiometric characteristics of low-cost digital cameras for use in UAV remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 15–16, p. 4891–4909, 2018.

MATESE, A. et al. Estimation of Water Stress in grapevines using proximal and remote sensing methods. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 1–16, 2018.

MENESES, P. R. et al. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB, 2012.

MINAŘÍK, R.; LANGHAMMER, J.; HANUŠ, J. Radiometric and Atmospheric Corrections of Multispectral μ MCA Camera for UAV Spectroscopy. **Remote Sensing**, v. 11, n. 20, p. 2428, 2019.

MOGILI, U. R.; DEEPAK, B. B. V. L. Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. **Procedia Computer Science**, v. 133, p. 502–509, 2018.

MURUGAN, D.; GARG, A.; SINGH, D. Development of an Adaptive Approach for Precision Agriculture Monitoring with Drone and Satellite Data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 12,

p. 5322–5328, 2017.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Population Prospects 2019: Highlights (ST/ESA/SER.A/423)**. (2019).

NIJLAND, W. et al. Monitoring plant condition and phenology using infrared sensitive consumer grade digital cameras. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 184, p. 98–106, 2014.

NOCERINO, E. et al. Geometric calibration and radiometric correction of the maia multispectral camera. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 42, n. 3W3, p. 149–156, 2017.

POZO, S. D. et al. Vicarious radiometric calibration of a multispectral camera on board an unmanned aerial system. **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1918–1937, 2014.

PUTRA, B. T. W.; SONI, P. Evaluating NIR-Red and NIR-Red edge external filters with digital cameras for assessing vegetation indices under different illumination. **Infrared Physics and Technology**, v. 81, p. 148–156, 2017.

ROSSEL, R. A. V. et al. Proximal sensing of soil pH and lime requirement by mid infrared diffuse reflectance spectroscopy. **Third European conference on precision agriculture (3 ecpa): proceedings.**, n. 2001, p. 274–275, 2001.

SHI, Y. et al. A case study of comparing radiometrically calibrated reflectance of an image mosaic from unmanned aerial system with that of a single image from manned aircraft over a same area. **Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping II**, v. 10218, n. May 2017, p. 102180B, 2017.

SKOG, K. L.; STEINNES, M. How do centrality, population growth and urban sprawl impact farmland conversion in Norway? **Land Use Policy**, v. 59, p. 185–196, 2016.

WALLAR, A.; PLAKU, E.; SOFGE, D. A. Reactive Motion Planning for Unmanned Aerial Surveillance of Risk-Sensitive Areas. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 12, n. 3, p. 969–980, 2015.

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.

ZAHEER, Z. et al. Aerial surveillance system using UAV. **IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, WOCN**, v. 2016-Novem, p. 1–7, 2016.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 693–712, 2012.

2. ARTIGO I: CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS UTILIZANDO ALVOS DE BAIXO CUSTO

RESUMO

A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs) para a aquisição de imagens multiespectrais de alta resolução tem atraído a atenção de agricultores. No entanto nenhum método de calibração radiométrica viável e conveniente foi desenvolvido para o uso em sensoriamento remoto com VANTs. Ainda existem desafios técnicos perante a calibração radiométrica como por exemplo os alvos utilizados para a calibração. Nesse contexto este trabalho teve como objetivo analisar diferentes materiais para confecção dos alvos de calibração, avaliar a influência da altura de voo na calibração de imagens multiespectrais, e validar o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) obtidos a partir de imagens geradas por câmera multiespectral após a calibração. Para isso foram desenvolvidos quatro alvos de calibração em gradientes de cinza com diferentes materiais, sendo eles, napa, lona, feltro e placa de MDF pintada. A coleta das imagens foi realizada por meio de uma câmera digital com um sensor CCD capaz de coletar imagens na banda do vermelho, verde e infravermelho próximo. Esta câmera foi acoplada ao VANT e foram coletadas imagens nas alturas de voo de 20, 40, 60 e 80m. Os resultados mostram que o alvo de napa é o mais adequado para calibração radiométrica de imagens multiespectrais e para as condições utilizadas neste estudo a altura de voo não influenciou significativamente na calibração. No entanto os valores calculados do NDVI se mostraram baixos comparado aos resultados de um sensor de NDVI. Portanto apesar da calibração apresentar bons resultados a câmera utilizada não está apta para estudos de variabilidade temporal de culturas agrícolas.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, VANT, calibração radiométrica.

RADIOMETRIC CALIBRATION OF MULTIESPECTRAL IMAGES USING LOW COST TARGETS

ABSTRACT

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for the acquisition of high-resolution multispectral images has attracted the farmers attention. However, no viable and convenient radiometric calibration method has been developed for use in remote sensing with UAVs. There are still technical challenges regarding radiometric calibration, such as the targets used for calibration. In this context, the objective of this work was to analyze different materials for making calibration targets, to evaluate the influence of flight height on the calibration of multispectral images, and to validate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained from images generated by camera multispectral after calibration. For this purpose, four calibration targets were developed in gray gradients with different materials, namely, napa, canvas, felt and painted MDF board. The collection of images was carried out by means of a digital camera with a CCD sensor capable of acquiring images in the red, green and near infrared bands. This camera was attached to the UAV and images were collected at flight heights of 20, 40, 60 and 80m. The results show that the napa target is the most suitable for radiometric calibration of multispectral images and for the conditions used in this study, the flight height did not significantly influence the calibration. However, the calculated values of the NDVI proved to be low compared to the results of an NDVI active sensor. Therefore, despite the calibration showing good results, the camera used is not suitable for studies of temporal variability of agricultural crops.

Keywords: Precision agriculture, UAV, radiometric calibration.

2.1. INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão propicia um melhor gerenciamento dos sistemas de produção agrícola, uma vez que os insumos agrícolas são aplicados levando em consideração as variabilidades espacial e temporal do sistema solo/planta e do clima. A utilização de técnicas de agricultura de precisão (AP) visa à otimização do retorno financeiro e à redução dos impactos ambientais (MULLA, 2013; MURUGAN; GARG; SINGH, 2017). Para aplicação das técnicas de AP são necessários sistemas eficientes de monitoramento das culturas, com o propósito de verificar os fatores que podem vir a causar perdas de produtividade.

Em sistemas de agricultura de precisão, uma das técnicas de monitoramento das culturas que pode ser utilizada é o sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto permite a obtenção de informações sobre alvos na superfície terrestre por meio do registro da interação da radiação eletromagnética com a superfície (MENESES et al., 2012). Dessa forma, essa técnica pode ser usada para monitorar o desenvolvimento das culturas e detectar possíveis estresses que as plantas estão submetidas (ZHANG; KOVACS, 2012; BÉGUÉ et al., 2018). O sensoriamento remoto pode ser aplicado utilizando plataformas proximais (BOURGEON et al., 2016; MATESE et al., 2018), plataformas aéreas (HRUSKA et al., 2012; SHI et al., 2017; IQBAL; LUCIEER; BARRY, 2018), plataformas orbitais (ZHANG; RIVARD; SANCHEZ-AZOFEIFA, 2004; COMPAIN et al., 2015; JIN et al., 2017; MURUGAN; GARG; SINGH, 2017).

As plataformas aéreas vêm se tornando cada vez mais populares por permitirem o imageamento com uma maior resolução espacial e possibilitar um maior controle da resolução temporal. Dentre as plataformas aéreas, as que utilizam veículos aéreos não-tripulados (VANTs) vêm ganhando mais atenção devido ao seu menor custo e maior flexibilidade na aquisição das imagens (WANG; MYINT, 2015). Existem vários tipos de sensores que estão sendo acoplados a VANTs para o monitoramento de culturas. As câmeras multiespectrais disponíveis comercialmente têm sido produzidas para trabalhar em comprimentos de onda determinados como o espectro do visível (POZO et al., 2014; NOCERINO et al., 2017). Já outras câmeras, passam por modificação para obtenção de imagens em bandas específicas (WANG; MYINT, 2015; LOGIE; COBURN, 2018).

As câmeras multiespectrais fornecem resoluções espectral e espacial favorável para geração de mapas de variabilidade espacial e temporal de índices de vegetação (CANDIAGO et al., 2015; PEÑA et al., 2015). Os índices de vegetação são obtidos por combinações algébricas das bandas espectrais. Esses índices auxiliam na determinação do vigor da vegetação e suas propriedades, afim de estabelecer comparações espaciais e temporais da lavoura.

Seja qual for o tipo de câmera multiespectral, um ponto crítico na sua utilização é a calibração radiométrica. A calibração radiométrica é necessária porque os elementos sensores da câmera não medem a reflectância dos objetos imageado, mas sim, reproduzem a quantidade de energia eletromagnética que chega ao sensor no comprimento de onda para o qual o sensor foi desenvolvido. Devido a 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 (KHANNA et al., 2017). Além disso, as imagens produzidas pelo sensor precisam ser ortorretificadas para corrigir as distorções geométricas dos objetos imageados (NOCERINO et al., 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). Esse método consiste na coleta dos pixels centrais em um alvo de calibração para cálculo dos números digitais brutos médios. Em seguida é feita uma análise de regressão entre os valores de reflectância dos alvos de calibração e os valores do número digital bruto nos comprimentos de onda de cada banda da câmera (WANG; MYINT, 2015). Entretanto, ainda existem desafios técnicos quando se trata do alvo de calibração como custo e material empregado. Com isso, os objetivos do presente estudo foram analisar diferentes materiais para confecção dos alvos de calibração, avaliar a influência da altura de voo na calibração de imagens multiespectrais, e validar o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) obtidos a partir de imagens geradas por câmera multiespectral após a calibração.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Caracterização do VANT

Foi utilizado no experimento um VANT, modelo Phantom 4 Pro (SZ DJI Technology Co., Shenzhen, Guangdong, China). Esse modelo dispõe de sistema com sensores de visão para detecção de obstáculos dianteiro, traseiro, direito e esquerdo. Foi utilizado uma estação terrestre em um ponto estratégico da área experimental, para controle aéreo do VANT. O controle do voo foi realizado por meio de rádio controle e com o auxílio de um tablet Samsung Galaxy Tab A 4G SM-P355M 16GB (GSM Arena) com plataforma Android 8.0 e de aparelhos de telemetria embarcado.

2.2.2. Caracterização da câmera/sensor

Foi utilizado a câmera MAPIR Survey3W (MAPIR, Peau Productions, Inc., CA, USA), sendo que esta é uma câmera RGB que foi modificada pelo fabricante para coletar imagens na banda do Infravermelho Próximo (com centro em 850nm). Além do infravermelho, a câmera é capaz de coletar imagens no canal do Verde (com centro em 550nm) e do Vermelho (com centro em 660nm). O sensor da câmera é de 12 megapixels, com uma resolução de imagem de 4032x3024 pixels. A câmera produz imagens no formato RAW (12bit) e JPG (8bit). As configurações da câmera foram fixadas: para Balanço de branco foi utilizado personalizado 10/10, para ISO 100, para abertura do obturador 1/500 e para Exposição +0.0.

2.2.3. Alvos utilizados para calibração radiométrica das imagens

Os alvos de referência empregados na calibração radiométrica de imagens disponíveis comercialmente apresentam custos elevados e costumam ser constituídos de materiais frágeis, o que reduz a sua vida útil. Com o intuito de construir alvos de baixo custo e fácil confecção, o presente estudo analisou quatro alvos de calibração em gradientes de cinza, semelhante ao usados por Wang e Myint (2015), Yu et al. (2016) e Zhou et al. (2017). Um painel foi confeccionado em lona cinza e branca, e feltro cinza e preto, outro painel foi construído usando napa (tecido composto por laminado de PVC e polyester) nas cores preta, branca, cinza claro e cinza escuro. Um terceiro painel foi confeccionado usando MDF (placa de fibra de média densidade) e pintada com tinta esmalte para metais da marca Suvinil, linha Cor & Proteção, nas cores grafite escuro, grafite claro, branca e preta, ambas com acabamento fosco. As tintas foram diluídas em aguarrás, sendo 10% de aguarrás e 90% da tinta, e aplicadas as placas de MDF em 4 demãos dando um intervalo de uma hora entre cada demão.

Para diminuir intervalo referente a reflectância de cada alvo, foi confeccionado um quarto painel contendo napa branca e cinza claro, lona branca e cinza, feltro preto e MDF pintada de branco (nas mesmas condições do painel de MDF pintada).

Para dar rigidez estrutural aos alvos, os tecidos foram presos às placas de MDF com as dimensões de 25 x 25 cm e 3 mm de espessura. As placas foram unidas e emolduradas conforme mostrado na Figura 1. Em laboratório foram coletadas as assinaturas espectrais de cada alvo com o auxílio do espectrorradiômetro ASD FieldSpec® HandHeld 2 (Analytical Spectral Devices, Inc., Boulder, Colorado, EUA). As coletas foram realizadas uma vez por mês durante seis meses, seguindo recomendações do manual. Foram coletados pontos aleatórios de cada alvo totalizando cinco repetições para cada alvo. Os painéis foram dispostos no campo somente durante o tempo de aquisição das imagens.

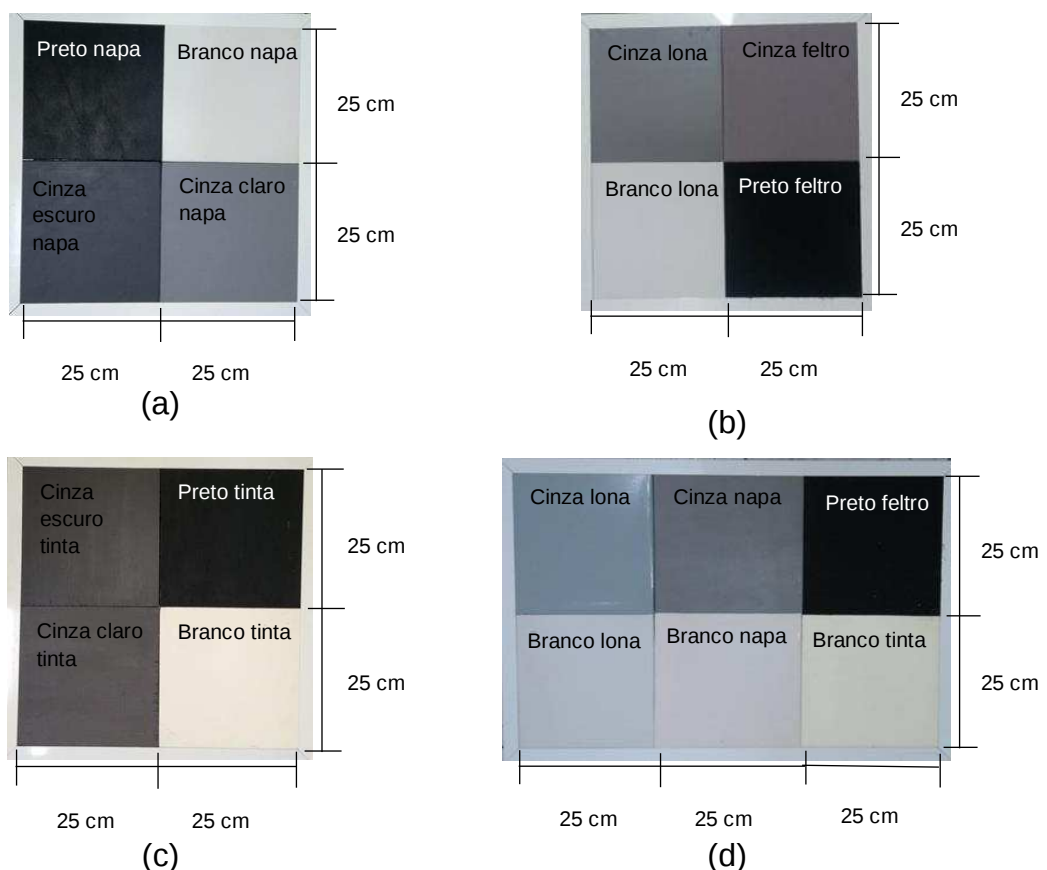


Figura 1 - Paineis de calibração: (a) napa; (b) lona; (c) MDF pintada; (d) misto.
Fonte: Autoria própria

2.2.4. Coleta de imagens em condições de campo

Os testes dos alvos foram realizados no Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa, Minas Gerais. O centroide da área de teste está localizado nas coordenadas 20°46'24,72"S e 42°52'23,01"W. A área experimental utilizada possui relevo plano e é cultivada com a gramínea Tifton 85. Na área foram dispostos quatro pontos de controle para georreferenciamento das imagens e dez pontos de medição de NDVI (índice de vegetação da diferença normalizada) com a utilização do sensor GreenSeeker® HandHeld crop (Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, CA, USA). Os pontos de coleta foram distribuídos de forma aleatória na área de estudo sendo nove pontos localizados sob a classe vegetação e um na classe solo. O NDVI foi coletado por meio de média de três repetições de medida com o sensor GreenSeeker. Todos os pontos foram georreferenciados com GNSS topográfico, modelo PRO-XT (Trimble Navigation Ltd. Sunnyvale, CA, USA), com correção diferencial pós-processada.

As imagens foram coletadas às 13:00 hs em três dias seguidos e obtidas em quatro diferentes alturas de voo de 20 (resolução de 0,9cm), 40 (resolução de 1,8cm), 60 (resolução de 2,7cm) e 80m (resolução de 3,6cm) acima do ponto mais elevado da área. Foram coletadas uma imagem para cada altura de voo. Durante o imageamento os painéis foram dispostos na área. Após a aquisição das imagens foi utilizado o sensor GreenSeeker para a determinação do NDVI nos dez pontos experimentais.

2.2.5. Processamento das imagens adquiridas com a utilização do VANT

Todas as imagens multiespectrais foram adquiridas no formato RAW e convertidas para TIFF pelo programa de computador MAPIR Camera Control (MCC), fornecido pelo próprio fabricante da câmera. Esse programa preenche as imagens transformando-as de 12bits para 16bits. Em seguida as imagens foram georreferenciadas de acordo os pontos de controle distribuídos na área, com o auxílio do software QGIS (Quantum GIS, desenvolvido pelo QGIS Development Team), versão 2.18. Sobre as imagens georreferenciadas foram coletados os números digitais brutos (NDs) dos alvos de calibração. O ND foi extraído calculando a média dos pixels centrais de cada alvo. A refletância de uma superfície de um objeto é um parâmetro físico próprio do material e não muda em curto período de tempo. No entanto, os NDs da imagem são alterados de acordo a radiação solar incidente no local. Dessa forma

foi necessário desenvolver equações de calibração para transformar NDs em refletância para cada banda da imagem. Usando o programa de computador R, versão 3.6.1, foram empregados os valores de NDs e a refletância de cada alvo para gerar as equações empíricas para calibração radiométrica. As equações foram determinadas para cada banda das imagens. Em seguida foi efetuado a correção de cada imagem referente a equação gerada. A partir das imagens corrigidas nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, o valor de NDVI de cada pixel da imagem foi calculado utilizando a Equação (1).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Em que:

- NDVI = índice de vegetação da diferença normalizada, adimensional;
- R = refletância na banda do vermelho, adimensional;
- NIR = refletância na banda do infravermelho próximo, adimensional.

2.2.6. Análise de desempenho da câmera multiespectral

As equações de calibração foram avaliadas pelo coeficiente de determinação (R^2) e pelo erro quadrático médio (RMSE) gerado com base na regressão de cada painel. Com base na Equação (2) foram calculados também a diferença relativa entre o valor de NDVI calculado a partir das imagens coletadas pela câmera Mapir Survey3W e o valor de NDVI obtido pelo sensor GreenSeeker.

$$DR = 100 \frac{|NDVI_s - NDVI_c|}{|NDVI_s|} \quad (2)$$

Em que,

- DR = Diferença relativa entre o NDVI obtido pelo sensor e o obtido pela câmera, %;
- $NDVI_s$ = Valor de NDVI obtido pelo sensor GreenSeeker, adimensional;
- $NDVI_c$ = Valor de NDVI obtido a partir das imagens nas bandas do vermelho e infravermelho próximo, após calibração radiométrica, adimensional.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta a assinatura espectral de cada alvo para cada painel testado. Com exceção do alvo de feltro cinza, todos os demais apresentam praticamente a mesma resposta espectral para os comprimentos de onda de 500 a 860nm. O feltro cinza expressa um comportamento semelhante a cor vermelha, apresentando baixa reflectância na banda do visível e alta reflectância na banda do infravermelho. A assinatura espectral de cada alvo está associada ao material e a cor, no caso do feltro cinza o fabricante pode ter usado alguma composição de tinta vermelha na composição do material.

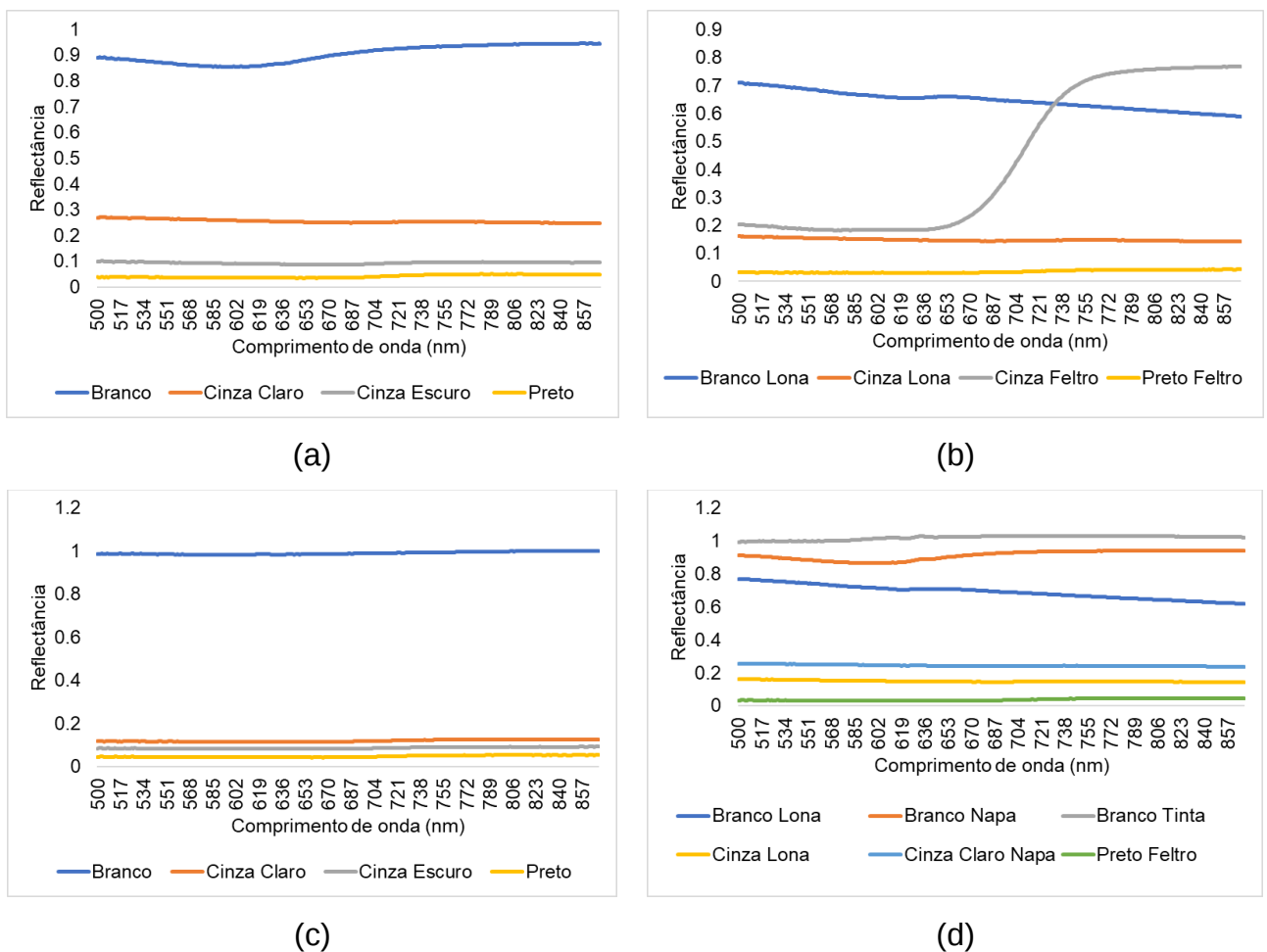


Figura 2 - Assinatura espectral dos alvos de calibração: (a) napa; (b) lona; (c) MDF pintada; (d) misto.

Fonte: Autoria própria.

O coeficiente de determinação e o erro quadrático médio das equações de calibração são apresentadas na Tabela 1. Na tabela o coeficiente de determinação

está representado com mínimos e máximos devido a quantidade de equações geradas no experimento. Os alvos de placa MDF pintada e napa apresentaram os melhores ajustes. A justificativa para esse resultado pode ser devido a que esses painéis eram compostos por apenas um material. O coeficiente de determinação do alvo de placa MDF pintada apresentou resultado semelhante ao obtido por Wang & Myint (2015). O RMSE médio para o alvo de napa foi inferior ao RMSE dos demais alvos para todas as três bandas (vermelho, verde e infravermelho próximo). Os resultados de R^2 para o alvo de lona foram baixos comparado aos obtidos por Crusiol et al. (2017) e Herrero-Huerta et al. (2014), porém em ambos os trabalhos foram utilizadas lonas coloridas além de preta e cinza. Além disso, os valores do coeficiente de determinação para todos alvos e as bandas do vermelho (R), verde (G) e NIR foram elevados, o que significa a reflectância dos alvos variou linearmente com os valores de ND obtidos pela câmera.

Tabela 1 - Máximos e mínimos do coeficiente de determinação e erro quadrático médio das equações de calibração para as bandas do Vermelho (R), Verde (G) e Infravermelho Próximo (NIR) e para cada alvo de calibração.

Banda	Alvo	R^2		RMSE (adimensional)	Reflectância Média (adimensional)
		Mín	Máx		
R	Lona e feltro	0,846	0,903	1,12E-01	0,261
R	Misto	0,987	0,998	1,61E-02	0,509
R	Napa	0,995	1,000	1,13E-02	0,316
R	MDF pintada	0,992	1,000	1,51E-02	0,307
G	Lona e feltro	0,965	0,986	1,07E-01	0,265
G	Misto	0,991	0,999	3,09E-02	0,511
G	Napa	0,999	1,000	4,02E-02	0,316
G	MDF pintada	0,996	0,999	2,57E-01	0,307
NIR	Lona e feltro	0,782	0,880	3,32E-02	0,387
NIR	Misto	0,958	0,984	2,92E-02	0,503
NIR	Napa	0,971	1,000	6,29E-03	0,334
NIR	MDF pintada	0,980	0,999	1,13E-02	0,318

Na Tabela 2 são apresentados a média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de NDVI obtidos com a utilização do GreenSeeker e dos valores de NDVI obtidos com câmera após a calibração radiométrica. Os valores obtidos com câmera se referem aos obtidos em três coletas de imagens realizadas em dias diferentes. Nessa comparação foram utilizados os alvos de napa, pois foi o painel que gerou os melhores resultados referente as regressões. O valor médio do NDVI foi

maior para o sensor GreenSeeker, com um menor coeficiente de variação. O coeficiente de variação dessas determinações foi de apenas 1,18% para as três datas de coleta. Já o NDVI obtido com as imagens coletadas pela câmera resultou em um coeficiente de variação de 10,80%. Um dos motivos que pode explicar esse maior coeficiente de variação são as características da assinatura espectral do material. Já no caso do GreenSeeker apresentar baixo coeficiente de variação é porque ele é um sensor ativo.

A razão para os valores de NDVI obtidos com o sensor GreenSeeker ser bem superiores aos obtidos com a câmera, provavelmente, pode estar associada às características dos alvos utilizados na calibração radiométrica. Os alvos apresentavam um padrão de assinatura espectral diferente do padrão da área cultivada. Enquanto as plantas apresentam uma baixa reflectância na banda do vermelho e uma elevada reflectância na banda do infravermelho próximo, os alvos apresentavam praticamente a mesma reflectância nas três bandas imageadas. Como a câmera apresenta apenas um sensor, não é possível ajustar os parâmetros separadamente para cada banda, com isso, uma banda tem sobreposição da outra.

Tabela 2 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação das leituras de NDVI do sensor GreenSeeker versus os valores de NDVI obtidos com a calibração das imagens com o alvo de napa, referente as datas de levantamento.

	Valor médio de NDVI	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
Sensor GreenSeeker	0,67	0,01	1,18
Câmera	0,34	0,04	10,80

Nas Figuras 3, 4, 5 e 6 são apresentados os gráficos de dispersão do NDVI gerado com a calibração radiométrica para os alvos de napa versus o NDVI obtido com o sensor GreenSeeker, para cada altura de voo estudada. Foi escolhido o alvo de napa para calibração radiométrica por ele ter apresentado o melhor desempenho dentre os alvos testados (Tabela 1). Embora o coeficiente de determinação das regressões apresente uma redução conforme se aumenta a altura do voo, essa redução não gerou diferenças em termos de levantamento. O teste t pareado realizado

ao nível de significância de 5% não apresentou resultados significativos ao se comparar o NDVI gerado com a calibração as imagens para as diferentes alturas. Isso mostra que as alturas de voo não apresentaram diferença significativa utilizando essa metodologia.

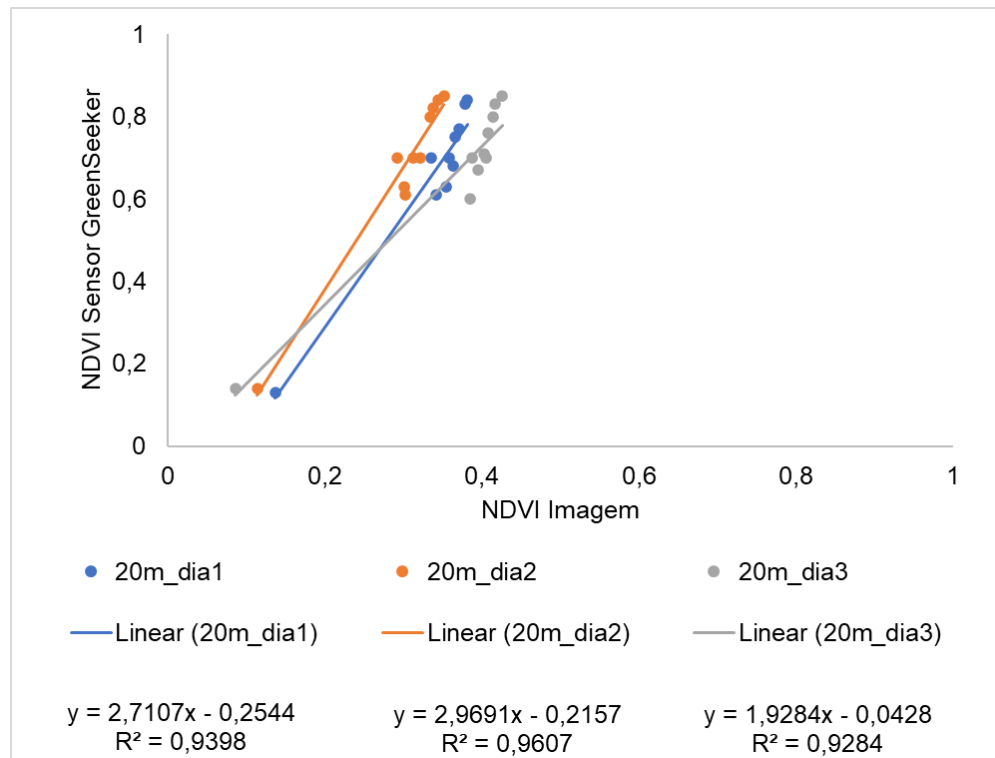


Figura 3 - Gráficos de dispersão do NDVI gerado com a calibração radiométrica com o alvo de napa versus o NDVI obtido o sensor GreenSeeker, para a altura de voo de 20m.

Fonte: Autoria própria.

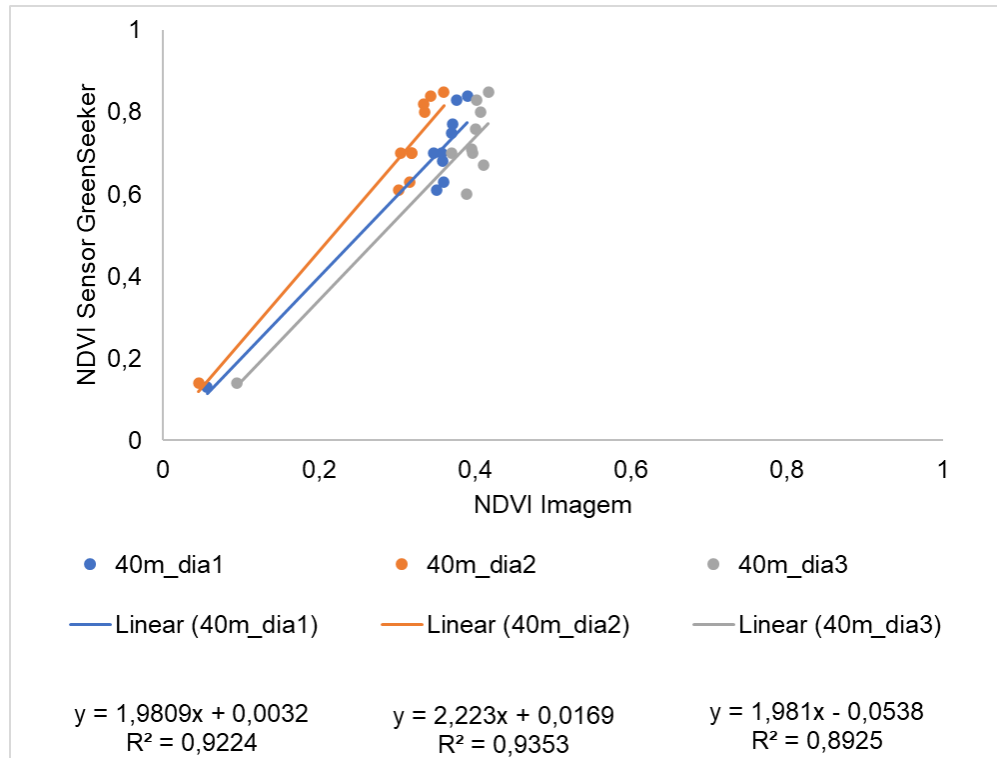


Figura 4 - Gráficos de dispersão do NDVI gerado com a calibração radiométrica com o alvo de napa versus o NDVI obtido o sensor GreenSeeker, para a altura de voo de 40m.

Fonte: Autoria própria.

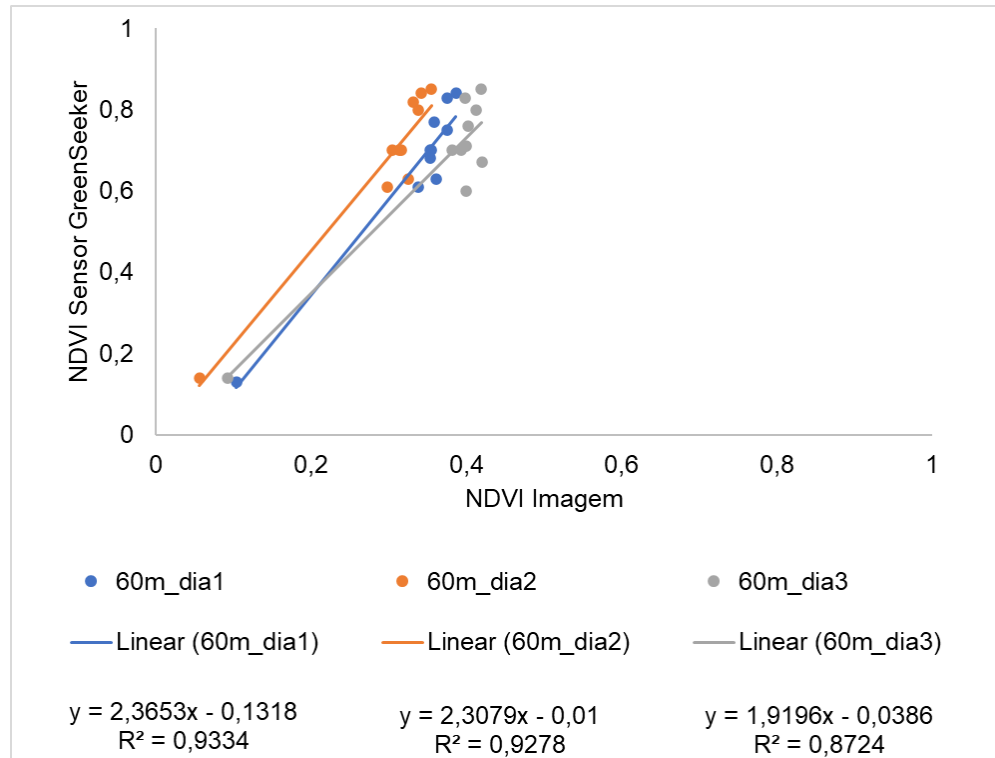


Figura 5 - Gráficos de dispersão do NDVI gerado com a calibração radiométrica com o alvo de napa versus o NDVI obtido o sensor GreenSeeker, para a altura de voo de 60m.

Fonte: Autoria própria.

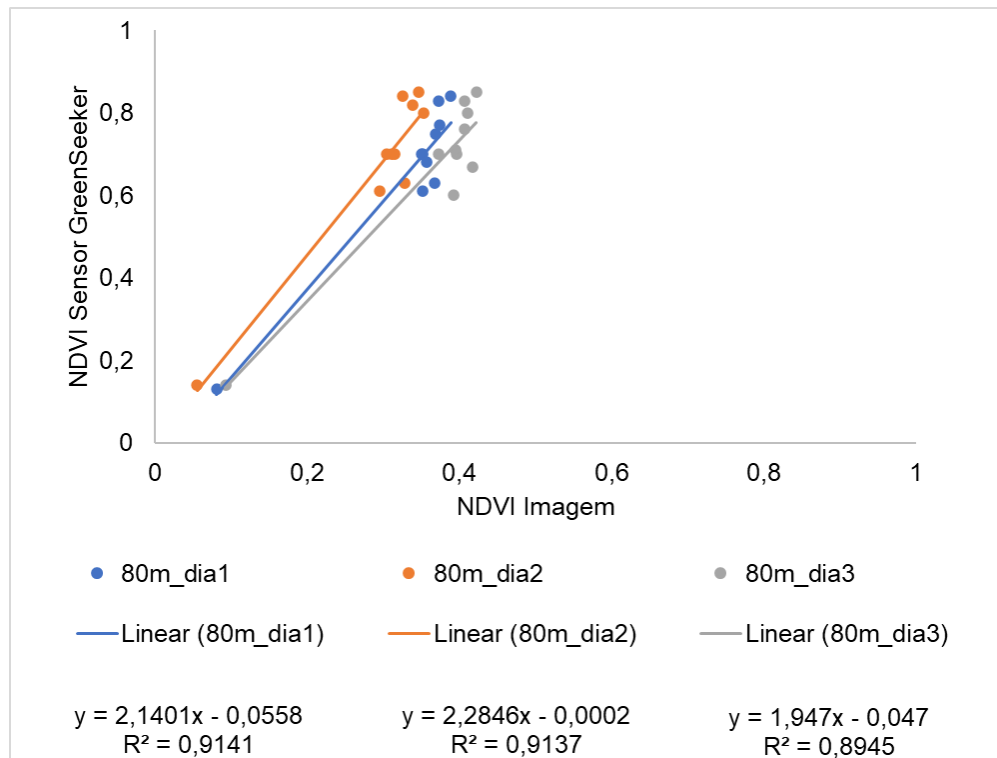


Figura 6 - Gráficos de dispersão do NDVI gerado com a calibração radiométrica com o alvo de napa versus o NDVI obtido o sensor GreenSeeker, para a altura de voo de 80m.

Fonte: Autoria própria.

A diferença relativa média entre os valores de NDVI coletados com o sensor GreenSeeker e os valores de NDVI obtidos com o uso dos alvos de napa para calibração radiométrica das imagens estão apresentados na Tabela 3. Não houve diferença significativa entre as diferenças relativas obtidas para as quatro alturas de voo testadas. O aumento da altura de voo acarreta num aumento do tamanho do pixel e modifica o ângulo de incidência da energia eletromagnética captada pela câmera e que foi refletida pelo alvo. Essas alterações não foram suficientes para alterar a diferença relativa entre o valor de NDVI obtido pelo sensor GreenSeeker e o obtido por meio as imagens.

Tabela 3 - Diferença Relativa Média do NDVI coletado com o sensor GreenSeeker versus ao NDVI obtido com a calibração radiométrica das imagens utilizando o alvo de napa.

Altura de voo (m)	Diferença Relativa
20	0,47
40	0,49
60	0,49
80	0,49

2.4. CONCLUSÃO

As equações de calibração apresentaram altos coeficientes de determinação para os alvos de calibração de napa, já os alvos confeccionados por lona e feltro apresentaram resultados baixos quando comparado aos demais alvos. O painel de napa se destacou como o melhor painel dentre os materiais estudados. O efeito da altura de voo resultou numa relação linear, onde os resultados afirmam que para essas condições não houve diferença significativa com relação à altura de voo. Mesmo apresentando bons resultados não se deve confiar no valor absoluto do NDVI obtido com a câmera. O que torna a câmera apta para observar padrões na cultura, mas não é recomendado seu uso para estudo da variabilidade temporal da cultura.

2.5. REFERÊNCIAS

BÉGUÉ, A. et al. Remote Sensing and Cropping Practices : A Review. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 1–32, 2018.

BOURGEON, M. A. et al. Field radiometric calibration of a multispectral on-the-go sensor dedicated to the characterization of vineyard foliage. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 184–194, 2016.

CANDIAGO, S. et al. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. **Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 4026–4047, 2015.

COMPAIN, E. et al. VNIR, MWIR, and LWIR source assemblies for optical quality testing and spectro-radiometric calibration of earth observation satellites. **Proc. SPIE**, v. 9626, n. 0, p. 962626, 2015.

CRUSIOL, L. G. T. et al. Semi professional digital camera calibration techniques for Vis/NIR spectral data acquisition from an unmanned aerial vehicle. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8–10, p. 2717–2736, 2017.

HERRERO-HUERTA, M. et al. Vicarious radiometric calibration of a multispectral sensor from an aerial trike applied to precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 108, p. 28–38, 2014.

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.

JIN, Z. et al. Crop model- and satellite imagery-based recommendation tool for variable rate N fertilizer application for the US Corn system. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 5, p. 779–800, 2017.

KELCEY, J.; LUCIEER, A. Sensor Correction and Radiometric Calibration of a 6-Band Multispectral Imaging Sensor for Uav Remote Sensing. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXIX-B1, n. September, p. 393–398, 2012.

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

LOGIE, G. S. J.; COBURN, C. A. An investigation of the spectral and radiometric characteristics of low-cost digital cameras for use in UAV remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 15–16, p. 4891–4909, 2018.

MATESE, A. et al. Estimation of Water Stress in grapevines using proximal and remote sensing methods. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 1–16, 2018.

MENESES, P. R. et al. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB, 2012.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358–371, 2013.

MURUGAN, D.; GARG, A.; SINGH, D. Development of an Adaptive Approach for Precision Agriculture Monitoring with Drone and Satellite Data. v. 10, n. 12, p. 5322–5328, 2017.

NOCERINO, E. et al. Geometric calibration and radiometric correction of the maia multispectral camera. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 42, n. 3W3, p. 149–

156, 2017.

PEÑA, J. M. et al. Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (UAV) technology for weed seedling detection as affected by sensor resolution. **Sensors (Switzerland)**, v. 15, n. 3, p. 5609–5626, 2015.

POZO, S. D. et al. Vicarious radiometric calibration of a multispectral camera on board an unmanned aerial system. **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1918–1937, 2014.

SHI, Y. et al. A case study of comparing radiometrically calibrated reflectance of an image mosaic from unmanned aerial system with that of a single image from manned aircraft over a same area. **Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping II**, v. 10218, n. May 2017, p. 102180B, 2017.

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.

YU, N. et al. Remote Sensing of Environment Development of methods to improve soybean yield estimation and predict plant maturity with an unmanned aerial vehicle based platform. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 91–101, 2016.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 693–712, 2012.

ZHANG, J.; RIVARD, B.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A. Derivative Spectral Unmixing of Hyperspectral Data Applied to Mixtures of Lichen and Rock. v. 42, n. 9, p. 1934–1940, 2004.

ZHOU, X. et al. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 130, p. 246–255, 2017.

3. ARTIGO II: COMPARAÇÃO DE CÂMERAS MULTIESPECTRAIS RGB MODIFICADA E MULTISENSOR NA OBTENÇÃO DE IMAGENS PARA MONITORAMENTO DA CULTURA DO CAFÉ.

RESUMO

O desenvolvimento de pequenos veículos aéreos não tripulados e os avanços na tecnologia de sensores tornaram as câmeras multiespectrais adequadas para o sensoriamento remoto da vegetação. No entanto muitos estudos necessitam da banda do infravermelho próximo para trabalhos com vegetação e câmeras comerciais que trabalham com esse comprimento de onda tendem a ser mais caras. Existe no mercado duas opções de câmeras digitais que produzem imagens em bandas do infravermelho, câmera coloridas modificadas dotadas de um único sensor e câmeras multisensores. Também o uso de câmeras multiespectrais para monitoramento da cultura necessita passar pelo processo de calibração radiométrica. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi comparar o desempenho de uma câmera com um sensor com uma câmera multisensor na obtenção de NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) em uma área cultivada com café. Foram utilizadas duas câmeras multiespectrais, uma com cinco sensores e outra com apenas um sensor para aquisição das imagens. Os alvos foram confeccionados de napa em quatro tons de cinza, no qual foram utilizados na calibração radiométrica das imagens adquiridas pelas câmeras. As imagens passaram por calibração radiométrica pelo método da linha empírica. A câmera modificada permite obter o padrão de variabilidade do NDVI. No entanto os valores apresentados pela câmera modificada são inferiores aos valores reais. Por isso, esse tipo de câmera não é adequado para fazer estudos envolvendo análise de variabilidade temporal do NDVI.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, VANT, calibração radiométrica, câmera modificada.

ONE SENSOR VERSUS MULTISENSOR MULTISPECTRAL CAMERA FOR COFFEE CROP MONITORING

ABSTRACT

The development of small unmanned aerial vehicles and advances in sensor technology have made multispectral cameras suitable for remote sensing of vegetation. However, many studies require the near infrared band for work with vegetation and commercial cameras that work with this wavelength tend to be more expensive. There are two options for digital cameras on the market that produce images in infrared bands, modified color cameras with a single sensor and multi-sensor cameras. Also, the use of multispectral cameras for crop monitoring needs to go through the radiometric calibration process. In this context, the objective of this work was to compare the performance of a camera with a sensor with a multi-sensor camera in obtaining NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) on a coffee field. Two multispectral cameras were used, one with five sensors and the other with only one sensor for image acquisition. The targets were made of napa in four shades of gray, which were used in the radiometric calibration of the images acquired by the cameras. The images were submitted to radiometric calibration using the empirical line method. The modified camera allows to obtain the NDVI variability pattern. However, the NDVI values obtained by the modified camera are lower than the actual values. Therefore, this type of camera is not suitable for studies involving the analysis of temporal variability of NDVI.

Keywords: Precision agriculture, UAV, radiometric calibration, modified camera.

3.1. INTRODUÇÃO

O uso apropriado e eficiente de insumos agrícolas pode ser uma alternativa para a crescente demanda alimentar e para a sustentabilidade ambiental. Isso pode ser obtido aplicando insumos em dosagens de acordo com a condição da cultura em cada ponto da área (MULLA, 2013; MURUGAN; GARG; SINGH, 2017). Para monitorar uma cultura e detectar a variabilidade existente na área de produção pode-se usar imagens multiespectrais. As imagens de satélites são bastante utilizadas para monitoramento de culturas, no entanto, o seu uso depende da resolução temporal do sensor (CORTI et al., 2019).

Atualmente há um crescimento no uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) para fins agrícolas. Uma de suas vantagens é a flexibilidade no agendamento da coleta de dados, pois depende apenas da disponibilidade do operador e das condições ambientais. Esses dispositivos são equipados com câmeras digitais multiespectrais que se caracterizam por ser de baixo custo, permitir a obtenção de imagens de elevadas resoluções temporal e espacial. As câmeras são acopladas aos VANTs e usadas para obter informações espectrais periódicas da cultura. Informações sobre o desenvolvimento da vegetação a partir de imagens geralmente se baseiam em índices que comparam a refletância de vegetação em mais de uma banda espectral (NIJLAND et al., 2014). Os índices mais comuns utilizam diferença da refletância dos alvos entre as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (R) ou de outras faixas do espectro (HUNT et al., 2011; NIJLAND et al., 2014).

Câmeras de uso comercial trabalham geralmente na banda do visível e os sensores que podem adquirir dados de imagem NIR tendem a ser mais caros, reduzindo tanto a flexibilidade na implantação quanto a quantidade de unidades implantadas (HUNT et al., 2011; LOGIE; COBURN, 2018). Com isso, algumas dessas câmeras passaram por processo de modificação de filtros para conseguirem adquirir dados em bandas específicas, como na banda do Infravermelho próximo (NIR). No entanto, sensores para avaliar a condição da vegetação devem passar por uma calibração que analise o comportamento radiométrico de cada pixel nas diferentes regiões do espectro em que as informações foram registradas (CORTI et al., 2019; POZO et al., 2014; PUTRA; SONI, 2017). Esse comportamento irá depender das características do sensor e também das condições climáticas, dentre elas a variação da luz ambiente (WANG; MYINT, 2015). Existem alguns métodos para calibração

radiométrica de imagens de câmeras multiespectrais, entre eles o método da linha empírica se sobressai, pois é um método direto e simples (WANG; MYINT, 2015).

A escassez de métodos para calibração radiométrica de imagens obtidas por câmeras multiespectrais e de informações sobre as características radiométricas das câmeras tem limitado o uso do sensoriamento remoto na agricultura. Por isso, o objetivo desse trabalho foi comparar o desempenho de uma câmera com um sensor com uma câmera multisensor na obtenção de NDVI.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Área de estudo

O experimento foi realizado na Fazenda Jatobá localizada no município de Paula Cândido, Minas Gerais (Figura 1). Na Fazenda Jatobá se cultiva café da espécie *Coffea arábica*. A área de estudo possui relevo montanhoso com área total de 65ha.

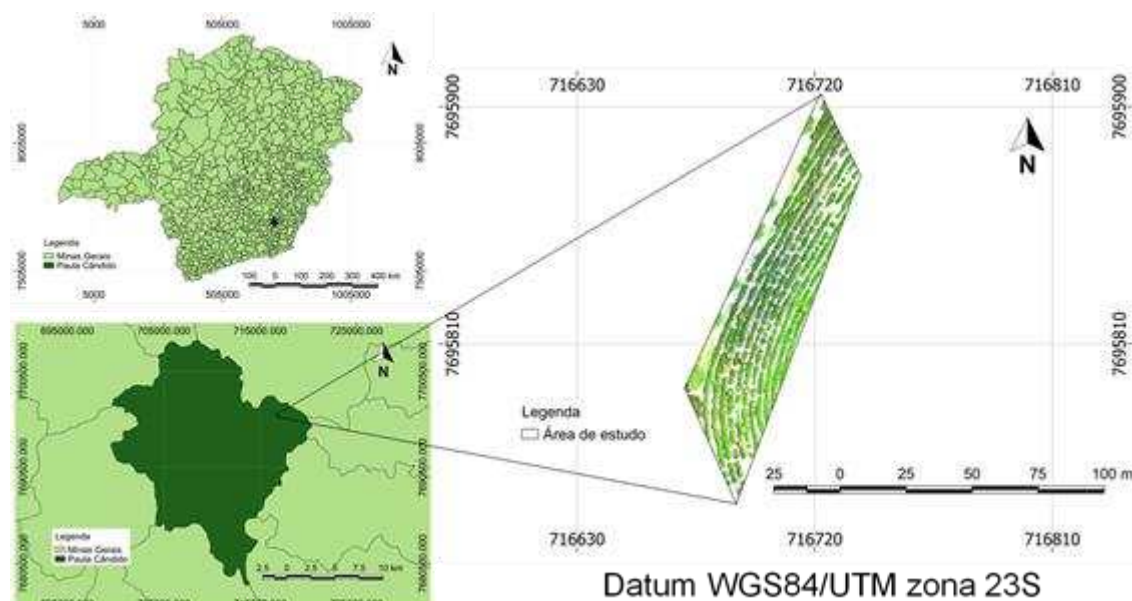


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, Fazenda Jatobá, Paula Cândido-MG.

Fonte: Autoria Própria.

3.2.2. Caracterização do VANT e da câmera/sensor

O estudo contou com a utilização de duas câmeras multiespectrais e para tal necessitou de dois VANTs. Um dos VANTs utilizados foi o modelo Matrice 100 (SZ DJI Technology Co., Shenzhen, Guangdong, China) de asas rotativas, com

acionamento elétrico. Esse VANT é dotado de quatro rotores por isso é chamado de quadricóptero. O segundo VANT foi o modelo Phantom 4 Pro (SZ DJI Technology Co., Shenzhen, Guangdong, China). Esse modelo possui sistema com sensores de visão para detecção de obstáculos dianteiro, traseiro, direito e esquerdo. Para controle aéreo do VANT, foi utilizada uma estação terrestre em um ponto estratégico da área experimental. O controle do voo foi realizado por meio de rádio controle com rotas e disparo das câmeras previamente planejado no plano de voo e com o auxílio de um tablet Samsung Galaxy Tab A 4G SM-P355M 16GB (GSM Arena) com plataforma Android 8.0 e de aparelhos de telemetria embarcado.

As câmeras utilizadas foram a MAPIR Survey3W (MAPIR, Peau Productions, Inc., CA, USA) e a Micasense RedEdge-MX (MicaSense, Inc., Seattle, WA, USA). A MAPIR foi acoplada ao Phantom enquanto a Micasense foi instalada no Matrice 100. A câmera MAPIR é uma câmera modificada que coleta imagens nas bandas do Vermelho (centro de 660nm), Verde (centro de 550nm), e Infravermelho Próximo (centro de 850nm). O sensor da câmera é de 12 megapixels, com uma resolução de 4032x3024 capaz de produzir imagens nos formatos RAW (12bit) e JPG (8bit). As configurações da câmera Mapir foram fixadas utilizando personalizado 10/10 para Balanço de branco, 100 para ISO, Abertura do obturador de 1/500 e Exposição +0.0. A Micasense possui uma estrutura metálica e coleta imagens nas bandas do Vermelho (centro de 668nm), Verde (centro de 560nm), Azul (centro de 475nm), RedEdge (centro de 717nm), e Infravermelho Próximo (centro de 840nm), e é capaz de produzir imagens no formato TIFF (12bit). É composta por um módulo DSL-2 que mede irradiância, o ângulo dos raios solares e tem sensor GNSS integrado. As configurações da Micasense são reguladas pela própria câmera de acordo com a iluminação ambiente determinada pelo módulo DSL-2.

3.2.3. Coleta de dados

Na área foram instalados quatro pontos de controle ao longo da área de estudo, além de trinta e seis pontos experimentais. Os pontos experimentais são os locais onde as coletas dos dados para estudo foram realizadas. Esses pontos foram distribuídos na área de forma aleatória, marcando pontos nas plantas de café e nas entre linhas. Todos os pontos foram georreferenciados com GNSS topográfico, modelo PRO-XT (Trimble Navigation Ltd. Sunnyvale, CA, USA) e passaram por correção diferencial pós-processada. Em cada ponto experimental determinou-se o

NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) com o auxílio do sensor GreenSeeker® HandHeld crop (Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, CA, USA). O NDVI foi determinado calculando-se uma média de três medições realizadas com o sensor GreenSeeker.

Foi utilizado napa (tecido composto por laminado de PVC e polyester) com dimensões de 1,00 por 1,50 m nas cores branca, preta cinza claro e cinza escuro como alvos para calibração radiométrica que ficaram dispostos na área durante os voos (Figura 2). Em laboratório foram obtidas a assinatura espectral (Figura 3) de cada alvo com o auxílio do spectrorradiômetro ASD FieldSpec® HandHeld 2 (Analytical Spectral Devices, Inc., Boulder, Colorado, EUA). Foi realizada uma medição com cinco repetições em pontos aleatórios de cada alvo e calculado a média.

As imagens foram coletadas em três dias sempre às 11:00 hs. Os dias de realização das coletas tiveram um intervalo de vinte dias, sendo a primeira coleta realizada no mês de novembro, a segunda no mês de dezembro e a terceira no mês de janeiro. Os voos foram executados a uma altitude de 50 m garantindo uma resolução de 2,5cm para as imagens da câmera Mapir e 3,5cm para as imagens da câmera Micasense, e uma sobreposição de imagens de 75%.



Figura 2 - Alvos de calibração dispostos sobre o solo durante os dias de teste.
Fonte: Autoria própria.

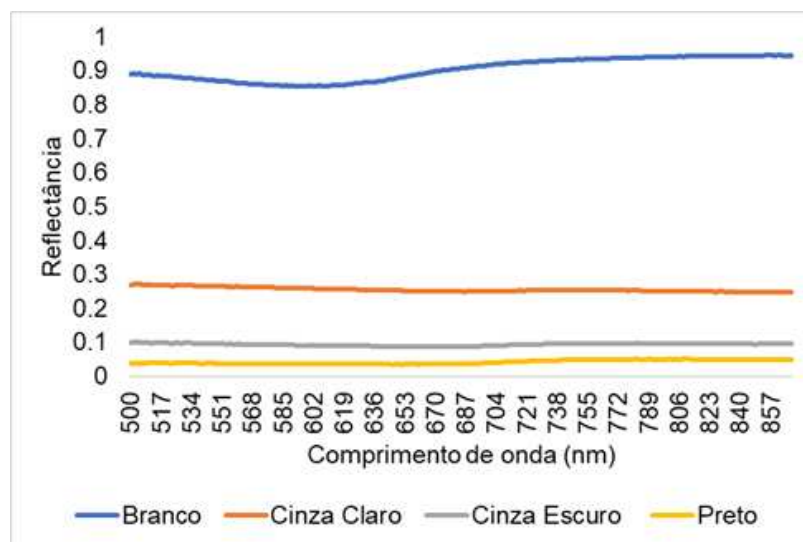


Figura 3 – Assinatura espectral dos alvos de calibração radiométrica.
Fonte: Autoria própria.

3.2.4. Processamento de dados

As imagens obtidas com a câmera MAPIR passaram por processo de conversão de formato de RAW para TIFF com o auxílio do software MAPIR Camera Control (MCC). Esse software durante o processo de conversão realiza um

preenchimento transformando a imagem de 12bits para 16bits. Em seguida, para as imagens de ambas as câmeras, foram gerados os mosaicos por meio do software Agisoft Metashape Professional versão 1.5.0 (Desenvolvido pela Agisoft LLC, Rússia), que foram georreferenciados utilizando o Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS (Quantum GIS, desenvolvido pelo QGIS Development Team), versão 2.18.

O método da linha empírica para calibração radiométrica de imagens multiespectrais consiste em gerar regressões utilizando o número digital (ND) dos alvos de calibração com seus respectivos valores de reflectância. Essas regressões são então utilizadas para corrigir as imagens. Com isso, após o georreferenciamento do mosaico, foram coletados os NDs dos alvos de calibração, fazendo uma média dos NDs centrais de cada alvo. Os valores de ND e de reflectância dos alvos foram utilizados para gerar regressões para calibração radiométrica de cada banda dos mosaicos.

Com as regressões calculadas foi possível realizar a calibração radiométrica de cada banda dos mosaicos e estimar o NDVI, esses processos foram realizados utilizando o QGIS. Assim, foram geradas as correlações entre o NDVI obtido com o sensor GreenSeeker, com o NDVI das imagens corrigidas da Câmera MAPIR e da câmera Micasense. Também foram gerados gráficos de comportamento dos valores de NDVI obtidos por meio de planilhas eletrônicas.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações de calibração, coeficiente de determinação, média da reflectância para as bandas do Vermelho e Infravermelho Próximo de cada alvo, e o erro quadrático médio (RMSE) referente aos alvos de calibração estão dispostos na Tabela 1. A relação entre a reflectância do alvo de calibração e os números digitais (NDs) brutos da imagem varia conforme o sensor utilizado e o tipo de alvo de calibração. Guo et al. (2019) obtiveram uma relação linear utilizando a câmera Mini MCA 6 e dois alvos de calibração de tecido com reflectância cerca de 65% e 5% (referente as cores branca e preta respectivamente), e alvos personalizados com reflectâncias de 20, 30, 40, 60%. Enquanto Crusiol et al. (2017) encontraram uma relação polinomial de segundo grau trabalhando com câmeras Fujifilm S200-EXR e alvos de lona nas cores branca, preta, cinza, amarela, vermelha e verde.

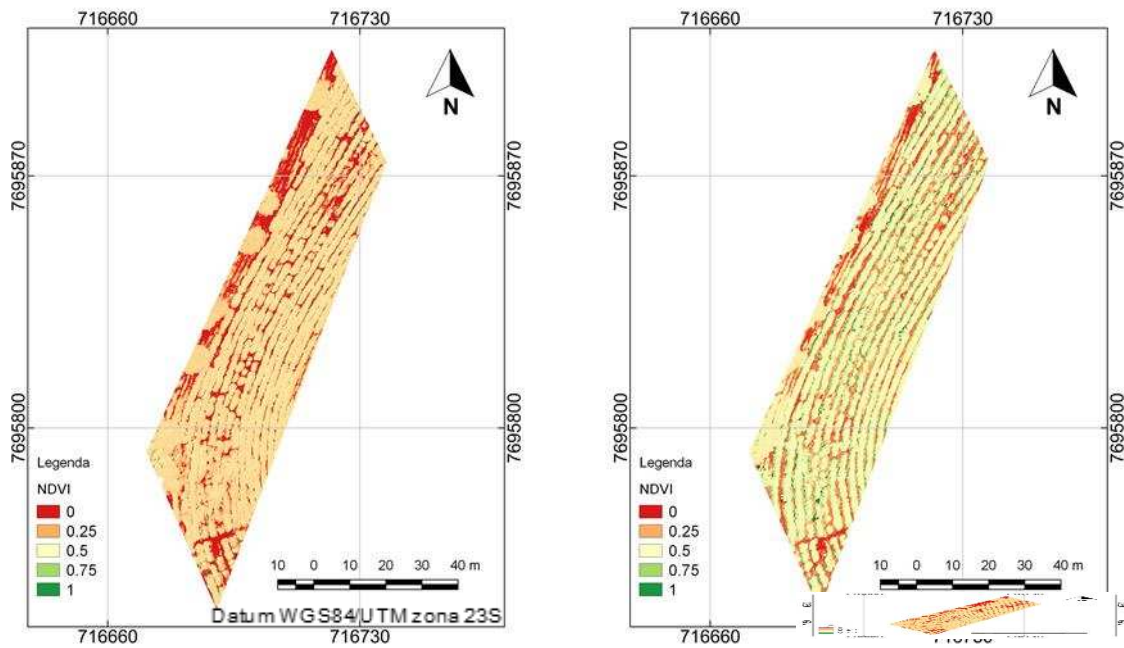
É possível perceber pela Tabela 1 que para a câmera Mapir obteve-se uma relação linear para entre reflectância do alvo de calibração e os NDs, no entanto a câmera Micasense apresentou uma relação exponencial para a banda do vermelho, resultados semelhantes foram obtidos por Deng et al. (2018). Quando a câmera não tem uma resposta linear, métodos empíricos modificados podem ser aplicados usando mais de dois alvos, foi o que ocorreu no estudo de Wang e Myint (2015), que utilizaram nove tons de cinza para modelar a relação exponencial de uma Câmera RGB modificada reflex de lente única para obtenção de imagem no infravermelho próximo.

Para ambas as câmeras, o coeficiente de determinação para a regressão entre o ND e a reflectância obtida em laboratório para os diferentes alvos e para cada uma das bandas foi superior a 90%, demonstrando que a calibração radiométrica foi eficiente. A câmera Mapir apontou menores RMSE que a Micasense, porém no terceiro dia, o RMSE obtido com a Mapir foi maior para a banda do NIR e o segundo menor valor para a banda do R. Isso acontece porque em câmeras modificadas não é possível ajustar os parâmetros separadamente para cada banda. O terceiro dia estava nublado, com isso a configuração de abertura do obturador utilizada favoreceu o canal do vermelho, enquanto prejudicou o canal do infravermelho. Isso porque com uma maior iluminação nos outros dias a abertura do obturador utilizada nesse estudo favoreceu o registro de uma maior quantidade luminosa e assim os valores de refletância referente a banda do vermelho ultrapassaram os valores usuais para vegetação.

Tabela 1 - Equações de calibração, coeficiente de determinação, erro quadrático médio e média da reflectância para as bandas do Vermelho (R) e Infravermelho Próximo (NIR).

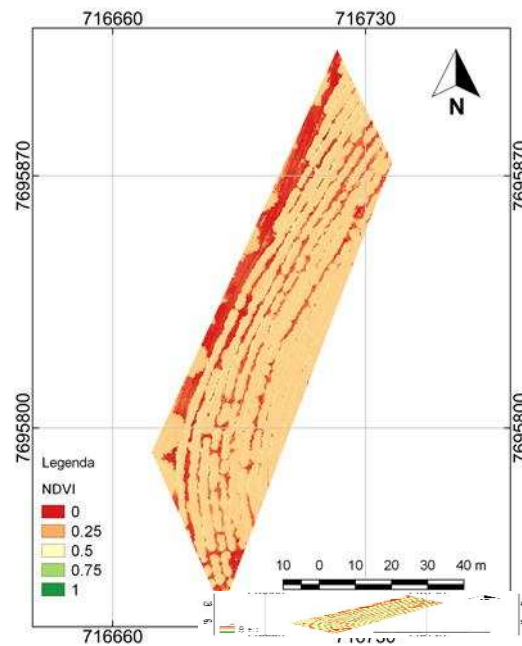
Mapir					
Dia	Banda	Regressão	R ²	RMSE	Média reflectância
1	R	$3,192E-05 \cdot x - 9,635E-02$	0,998	1,564E-02	0,316
	NIR	$6,842E-05 \cdot x - 1,897E-01$	0,999	1,106E-02	0,334
2	R	$2,148E-05 \cdot x - 1,243E-01$	0,999	1,003E-02	0,316
	NIR	$4,573E-05 \cdot x - 1,762E-01$	0,996	2,064E-02	0,334
3	R	$7,286E-05 \cdot x - 1,492E-01$	0,998	1,264E-02	0,316
	NIR	$1,442E-04 \cdot x - 2,531E-01$	0,995	2,416E-02	0,334
Micasense					
Dia	Banda	Regressão	R ²	RMSE	Média reflectância
1	R	$1,635E-02 \cdot \exp(5,728E-05 \cdot x)$	0,951	8,421E-02	0,317
	NIR	$1,843E-05 \cdot x - 2,028E-01$	0,998	1,624E-02	0,334
2	R	$3,138E-02 \cdot \exp(5,312E-05 \cdot x)$	0,964	3,418E-02	0,317
	NIR	$1,679E-05 \cdot x - 1,417E-01$	0,997	1,785E-02	0,334
3	R	$1,789E-02 \cdot \exp(5,788E-05 \cdot x)$	0,919	1,293E-01	0,317
	NIR	$2,197E-05 \cdot x - 2,592E-01$	0,997	1,824E-02	0,334

Nas Figuras 4 e 5 estão dispostos os mapas de NDVI referentes a cada dia de coleta e para cada câmera utilizada. Nas imagens é possível observar as linhas de plantio do café pois estas apresentam cores de alaranjado a verde, simbolizando maiores valores do índice. Como pode ser observado nos mapas, os valores de NDVI obtidos com a calibração radiométrica das imagens da Micasense são maiores que os calculados a partir das imagens calibradas da câmera Mapir. No terceiro dia, as áreas entre linhas apontaram para valores menores de NDVI, uma vez que o proprietário da fazenda havia realizado o controle de plantas daninhas.



(a)

(b)



(c)

Figura 4 - Mapa do NDVI obtido com a calibração radiométrica da câmera Mapir: (a) dia1; (b) dia 2; (c) dia 3.

Fonte: Autoria própria.

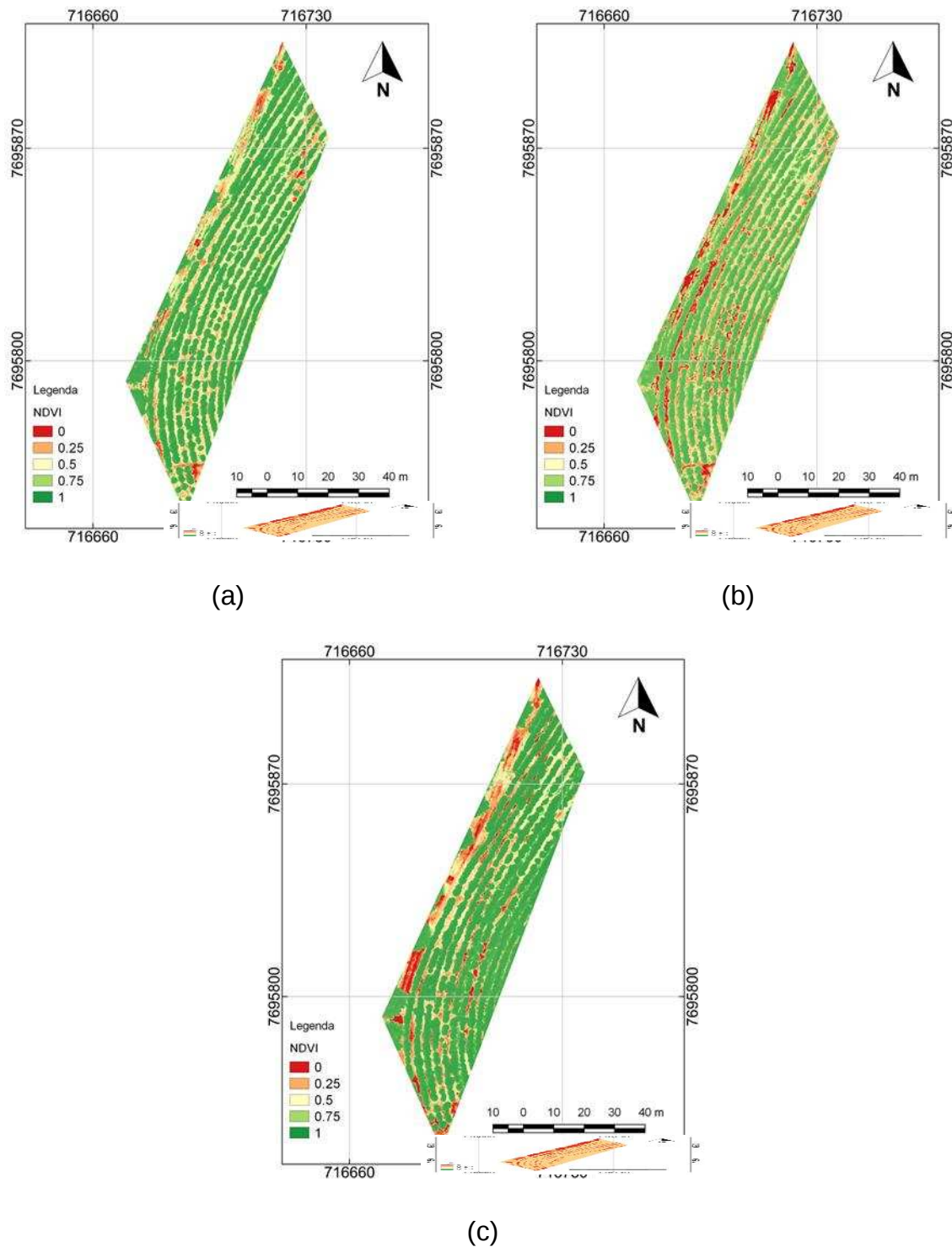
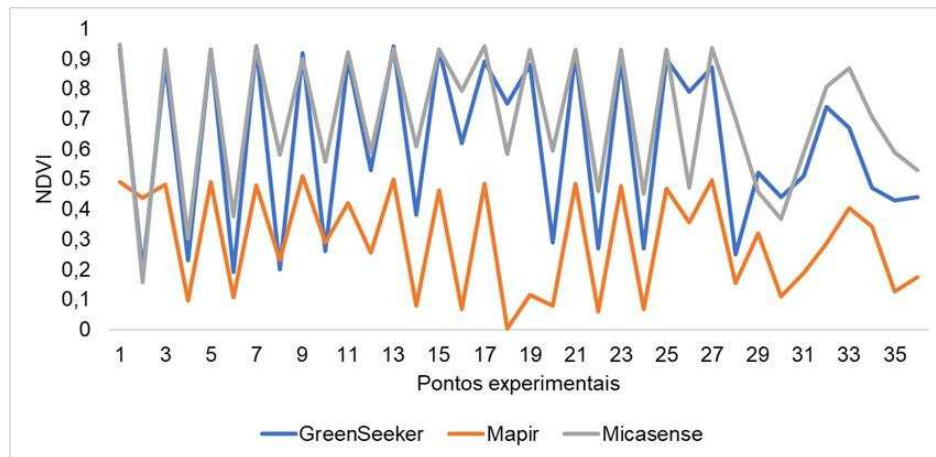


Figura 5 - Mapa do NDVI obtido com a calibração radiométrica da câmera Micasense: (a) dia1; (b) dia 2; (c) dia 3.

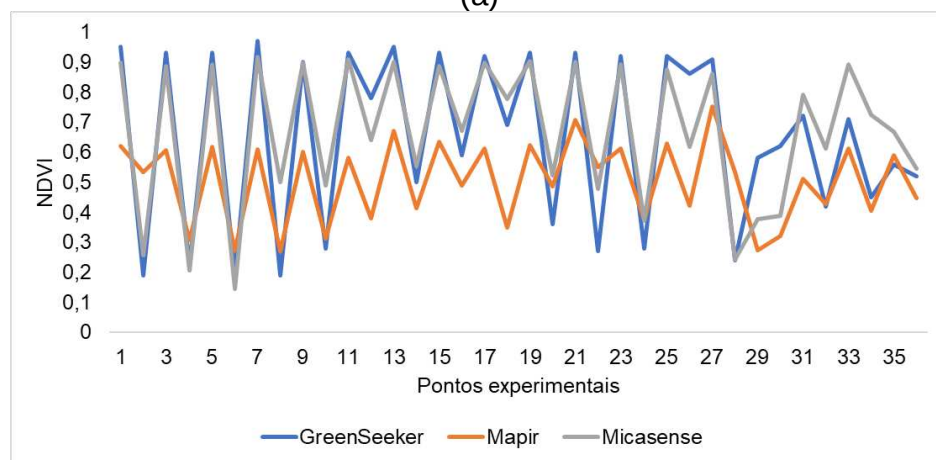
Fonte: Autoria própria.

A Figura 6 mostra o comportamento do NDVI nos pontos experimentais para cada dia e sensor utilizado, GreenSeeker, Mapir e Micasense. Os pontos ímpares

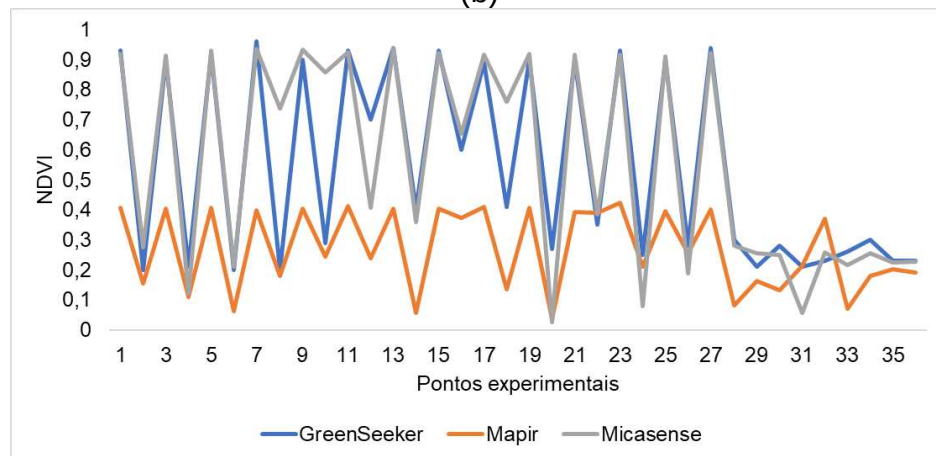
representam pontos nas linhas de plantio enquanto os pontos pares representam os pontos entre linhas. Os pontos de 29 a 36 que estavam localizados próximo a borda do plantio onde havia sombreamento causado pelas árvores em volta, tiveram seus valores de NDVI alterados devido ao sombreamento. Também é possível perceber que os valores de NDVI obtidos com a calibração das imagens da Mapir são mais baixos quando comparado aos valores obtidos com o sensor GreenSeeker e com as imagens calibradas da câmera Micasense. Já as imagens da Micasense, após passarem pela calibração, resultaram em valores de NDVI próximos aos obtidos com o GreenSeeker.



(a)



(b)



(c)

Figura 6 - Comportamento do NDVI entre os três sensores utilizados, GreenSeeker, Mapir e Micasense: (a) dia 1, (b) dia2 e (c) dia 3.

Fonte: Autoria própria.

Algumas causas podem ser levantadas para explicar o comportamento dos valores de NDVI obtidos a partir de imagens adquiridas pela câmera Mapir ser inferior ao obtido pela câmera Micasense RedEdge-MX. O primeiro pode estar associado ao

processo de calibração em si, os materiais utilizados nos alvos, por não serem lambertianos, podem ter afetado o processo de calibração. Outro ponto é que a radiação solar que estava incidindo sobre os alvos de calibração ser diferente da radiação solar incidindo sobre os 36 pontos em que foram realizadas a medição com o sensor Greenseeker. Isso porque os alvos ficaram localizados na estrada que era a área plana localizada ao lado da plantação.

Outra possível causa para os valores de NDVI obtidos com câmera Mapir pode estar associada a característica da câmera. Um problema é que o fabricante não divulga a curva de resposta de cada banda para o sensor que compõe a Mapir. Entretanto, sabe-se que essa câmera é dotada de um único sensor para captar as imagens nas três bandas. Assim, o sinal de cada banda pode estar sendo afetado pela abertura do obturador que não pode ser regulado separadamente para cada banda, bem como os demais parâmetros da câmera. Com isso, a radiação eletromagnética processada pelo sensor pode estar interferindo no valor bandas do espectro. Então, na banda do vermelho a câmera Mapir capta não só a energia no comprimento de onda da banda do vermelho, como capta uma parte do infravermelho próximo e do verde, o que gera um aumento na reflectância do vermelho e que pode estar reduzindo os valores de NDVI.

Os alvos utilizados no processo de calibração radiométrica tinham praticamente a mesma reflectância nas bandas do infravermelho próximo, do verde e do vermelho. Como a vegetação tem uma reflectância no infravermelho próximo maior que a reflectância na banda do vermelho, a calibração radiométrica pelo método da linha empírica pode estar interferindo nas reflectâncias nas bandas do vermelho e do infravermelho, acarretando erro na determinação do NDVI da vegetação.

O comportamento do NDVI obtido a partir das imagens coletadas pela câmera Mapir foi similar ao obtido pelo sensor Greenseeker e pela câmera Micasense RedEdge-MX. Para reforçar a hipótese de que as características da câmera Mapir podem ser a causa dos menores valores de NDVI, pode-se observar que a resposta da Mapir foi melhor na determinação do NDVI dos pontos das entre linhas, que tinha uma menor densidade de vegetação, do que nos pés de café. A explicação é que as reflectâncias do solo nas bandas do vermelho e do infravermelho são próximas,

comportamento semelhante ao encontrado nos alvos utilizados na calibração radiométrica.

Mesmo havendo diferença entre os valores de NDVI obtidos pelas duas câmeras e pelo sensor GreenSeeker, verifica-se pela Tabela 2 que os valores de NDVI obtidos pelos três métodos apresentam correlação significativa. No caso da câmera Mapir o NDVI coletado após calibração das imagens mostrou uma correlação significativa, porém com tendência de menor valor comparado aos demais sensores, exceto pelo terceiro dia. Nesse dia, o tempo estava nublado e nessa condição obteve-se um valor de coeficiente de correlação maior entre o NDVI obtido com base na Mapir e o NDVI obtido pelo sensor GreenSeeker.

A Figura 8 mostra que o maior NDVI gerado foi com o GreenSeeker, no entanto as imagens calibradas da Mapir tendem apresentar menores valores e uma menor variabilidade, já as imagens calibradas da câmera Micasense tenderam a uma maior variabilidade dos valores de NDVI. A grande questão em relação a câmera Mapir é o fato de não ser possível regular os parâmetros separadamente para cada banda, isso porque essa câmera apresenta somente um sensor. Por esse motivo quando se regula os parâmetros para uma banda as outras acabam ficando prejudicadas e tem seus valores alterados, e no caso do NDVI, acabou diminuindo a variabilidade dos dados, mas também reduziu seus valores.

Tabela 2. Correlação entre o NDVI obtido com os sensores GreenSeeker, câmera Mapir e câmera Micasense.

Dia 1			
	GreenSeeker	Mapir	Micasense
GreenSeeker	1	0,636*	0,803*
Mapir	-	1	0,711*
Micasense	-	-	1
Dia 2			
	GreenSeeker	Mapir	Micasense
GreenSeeker	1	0,726*	0,896*
Mapir	-	1	0,786*
Micasense	-	-	1
Dia 3			
	GreenSeeker	Mapir	Micasense
GreenSeeker	1	0,930*	0,895*
Mapir	-	1	0,913*
Micasense	-	-	1

*significativo ao nível de 5%.

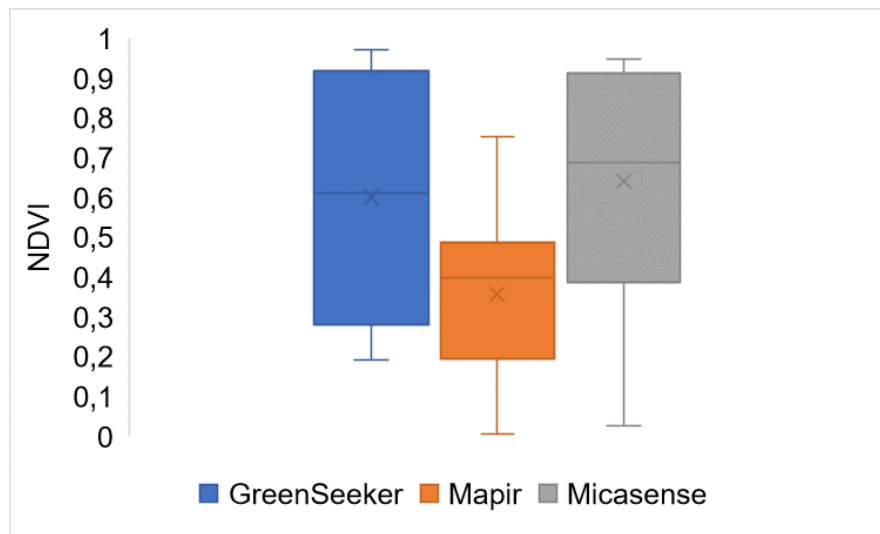


Figura 8 - Comparação da distribuição do NDVI obtido pelos sensores para os três dias de coleta de dados.

Fonte: Autoria própria.

3.4. CONCLUSÃO

As câmeras digitais são ferramentas promissoras não só no monitoramento da vegetação, mas como em vários outros estudos. Câmeras modificadas como a Mapir não são eficientes para a determinação do índice NDVI da lavoura, elas auxiliam apenas na determinação do padrão de variabilidade espacial desse índice, não sendo apta para trabalhos com variabilidade temporal de culturas. Já a câmera Micasense apresentou resultados satisfatórios para se trabalhar com monitoramento de culturas.

3.5. REFERÊNCIAS

CORTI, M. et al. Application of a low-cost camera on a UAV to estimate maize nitrogen-related variables. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 4, p. 675–696, 2019.

CRUSIOL, L. G. T. et al. Semi professional digital camera calibration techniques for Vis/NIR spectral data acquisition from an unmanned aerial vehicle. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8–10, p. 2717–2736, 2017.

DENG, L. et al. A Subband Radiometric Calibration Method for UAV-Based Multispectral Remote Sensing. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n. 8, p. 2869–2880, 2018.

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.

HUNT, E. et al. NIR-green-blue high-resolution digital images for assessment of winter cover crop biomass. **GIScience and Remote Sensing**, v. 48, n. 1, p. 86–98, 2011.

LOGIE, G. S. J.; COBURN, C. A. An investigation of the spectral and radiometric characteristics of low-cost digital cameras for use in UAV remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 15–16, p. 4891–4909, 2018.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358–371, 2013.

MURUGAN, D.; GARG, A.; SINGH, D. Development of an Adaptive Approach for Precision Agriculture Monitoring with Drone and Satellite Data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 5322–5328, 2017.

NIJLAND, W. et al. Monitoring plant condition and phenology using infrared sensitive consumer grade digital cameras. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 184, p. 98–106, 2014.

POZO, S. D. et al. Vicarious radiometric calibration of a multispectral camera on board an unmanned aerial system. **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1918–1937, 2014.

PUTRA, B. T. W.; SONI, P. Evaluating NIR-Red and NIR-Red edge external filters with digital cameras for assessing vegetation indices under different illumination. **Infrared Physics and Technology**, v. 81, p. 148–156, 2017.

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.

4. CONCLUSÃO GERAL

As câmeras digitais estão assumindo cada vez mais a área agrícola e são ferramentas promissoras não só no monitoramento da vegetação como em outros estudos. Dos materiais testados para alvos de calibração a napa obteve os melhores resultados, apresentando altos coeficientes de determinação e baixos RMSE. Para essas condições de estudo a altura de voo não interferiu significativamente na calibração radiométrica. No entanto, mesmo apresentando bons resultados na calibração radiométrica, não se deve confiar no valor absoluto do NDVI obtido com a calibração das imagens da câmera Mapir. A câmera é apta para observação dos padrões da cultura, por obter correlação com o sensor GreenSeeker, mas seu uso não é recomendado para estudo da variabilidade temporal da cultura. Por outro lado, câmeras como a Micasense mostram-se adequadas para o estudo da variabilidade temporal da cultura.