

SAMIRA LUNS HATUM DE ALMEIDA

**MONITORAMENTO DA MATURAÇÃO DO CAFÉ ARÁBICA UTILIZANDO CÂMERA
DIGITAL MODIFICADA A BORDO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO**

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.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A447i
2019
Almeida, Samira Luns Hatum de, 1994-
Monitoramento da maturação do café arábica utilizando
câmera digital modificada a bordo de veículo aéreo não tripulado
/ Samira Luns Hatum de Almeida. – Viçosa, MG, 2019.
xi, 51 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

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

1. Agricultura de precisão. 2. Drone. 3. Reflectância.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

SAMIRA LUNS HATUM DE ALMEIDA

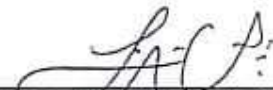
**MONITORAMENTO DA MATURAÇÃO DO CAFÉ ARÁBICA UTILIZANDO
CÂMERA DIGITAL MODIFICADA A BORDO DE VEÍCULO AÉREO NÃO
TRIPULADO**

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: 27 de fevereiro de 2019.



Nerilson Terra Santos



Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Coorientador)



Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

“Quem não luta por alguma coisa, paralisa
por qualquer coisa. Quem tem um motivo
forte, não desiste por qualquer razão.”
(Caio Carneiro)

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos primeiramente a Deus e à Nossa Senhora por me abençoarem e iluminarem meu caminho possibilitando que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais Samir e Jeanne e aos meus tios Soraya e Clóvis por todo incentivo e apoio e por terem me passado ensinamentos essenciais para eu que me tornasse a pessoa que sou hoje.

Agradeço à minha irmã Sayanne, pessoa que esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, sendo uma grande conselheira, companheira e incentivadora para que eu lutasse pelos meus sonhos.

À minha irmã Renata e meus familiares que me apoiam e torcem pelo meu crescimento.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola pelo ótimo convívio e apoio ao longo destes dois anos.

Aos colegas do PROVISAGRO, Amélia, Emanuel, Marcelo, Jorge, Amanda, Elder, Rodrigo, André, Vinícius, Fernando, Guilherme, Lucas, Wilson e Gabriel que contribuíram na execução deste trabalho.

Aos amigos da UFES e de Cachoeiro de Itapemirim pela amizade e companheirismo ao longo destes anos.

Ao professor Samuel de Assis Silva, agradeço pelos ensinamentos e por todo apoio e incentivo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de realizar o mestrado.

Agradeço ao professor Daniel Marçal de Queiroz pela orientação e pelos ensinamentos.

Aos professores Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Domingos Sárvio Magalhães Valente agradeço pela coorientação e pelos aconselhamentos.

Ao Senhor Edson, agradeço por disponibilizar a área para a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro na execução deste projeto.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
2. Calibração Radiométrica de Imagens de Câmera Digital Modificada a bordo de Veículo Aéreo Não Tripulado.	5
Resumo	5
Abstract	6
2.1. Introdução.....	7
2.2. Material e Métodos	8
2.2.1 Veículo aéreo não tripulado utilizado no estudo.....	8
2.2.2. Câmera Digital Modificada.....	8
2.2.3. Alvo de Calibração e Caracterização Espectral.....	10
2.2.4. Aquisição das imagens e dos pontos de controle.....	11
2.2.5. Processamento das imagens – Mosaicagem e Georreferenciamento.....	12
2.2.6. Obtenção do número digital dos alvos.....	12
2.2.7. Análise estatística.....	13
2.2.8. Calibração radiométrica.....	13
2.3. Resultados e Discussão	14
2.3.1 Caracterização Espectral dos Alvos.....	14
2.3.2. Imageamento aéreo.....	14
2.3.3. Calibração Radiométrica.....	21
2.4. Conclusões.....	28
2.5. Agradecimentos	28
2.6. Referências Bibliográficas.....	29
3. Uso de técnicas de Sensoriamento Remoto na identificação do estágio de maturação do café arábica	31
Resumo	31
Abstract	32
3.1. Introdução.....	33

3.2. Material e Métodos	34
3.2.1 Área de estudo.....	34
3.2.2. Colheita dos frutos para avaliação, coleta de pontos de controle e obtenção de dados de NDVI utilizando greenseker.....	35
3.2.3. Aquisição das imagens utilizando veículo aéreo não tripulado e processamento.....	35
3.2.4. Aquisição das imagens de satélite e processamento.....	37
3.2.5. Análise estatística.....	37
3.3. Resultados e Discussão	38
3.4. Conclusões.....	47
3.5. Agradecimentos	48
3.6. Referências Bibliográficas.....	48
4. CONCLUSÕES GERAIS	50

LISTA DE TABELAS

2. Calibração Radiométrica de Imagens de Câmera Digital Modificada a bordo de Veículo Aéreo Não Tripulado

Tabela 2.1. Reflectância dos alvos nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo obtidos por meio do espectroradiômetro	14
Tabela 2.2. Valores médios de número digital dos alvos obtidos em diferentes condições de voo no dia 06 de junho de 2018	16
Tabela 2.3. Modelos ajustados para estimativa da reflectância a partir do número digital da imagem para o dia 06 de junho de 2018 para a banda do vermelho	17
Tabela 2.4. Modelos ajustados para estimativa da reflectância a partir do número digital da imagem para o dia 06 de junho de 2018 para a banda do infravermelho próximo....	17
Tabela 2.5. Modelos melhores ajustados para estimativa da reflectância na banda do vermelho nos onze dias avaliados	19
Tabela 2.6. Modelos melhores ajustados para estimativa da reflectância na banda do infravermelho próximo nos onze dias avaliados	19
Tabela 2.7. Modelos utilizados para estimativa da reflectância na banda do infravermelho próximo nos onze dias avaliados	21

3. Uso de técnicas de Sensoriamento Remoto na identificação do estágio de maturação do café arábica

Tabela 3.1. Dados de NDVI, reflectância na banda do vermelho e do infravermelho próximo obtidos a partir de câmera modificada acoplada ao VANT.	41
Tabela 3.2. Correlação de Sperman entre a porcentagem de frutos verdes e o NDVI obtido a partir de diferentes técnicas de sensoriamento remoto	45

LISTA DE FIGURAS

2. Calibração Radiométrica de Imagens de Câmera Digital Modificada a bordo de Veículo Aéreo Não Tripulado

Figura 2.1. Câmera Zenmuse X3 modificada. a) Com polarizador. b) Com Filtro ND...	9
Figura 2.2. Acessórios utilizados na câmera Zemmuse X3 modificada. a) Polarizador. b) Filtro ND	9
Figura 2.3. Placa para calibração radiométrica composta de oito alvos.	10
Figura 2.4. Plano de voo desenvolvido utilizando o aplicativo Precision Flight.	11
Figura 2.5. Mosaicos dos voos realizados no dia 06 de junho de 2018. a) oito horas da manhã com filtro ND. b) oito horas da manhã com polarizador. c) meio dia com filtro ND. d) meio dia com polarizador	15
Figura 2.6. Mosaico da banda do vermelho do dia 06 de junho e ampliação do mosaico dos demais dias avaliados obtidos após calibração radiométrica. a) 06 de junho. b) 13 de junho. c) 20 de junho. d) 27 de junho. e) 04 de julho. f) 11 de julho. g) 18 de julho. h) 25 de julho. i) 01 de agosto. j) 08 de agosto. k) 15 de agosto	22
Figura 2.7. Mosaico da banda do infravermelho do dia 06 de junho e ampliação do mosaico dos demais dias avaliados obtidos após calibração radiométrica. a) 06 de junho. b) 13 de junho. c) 20 de junho. d) 27 de junho. e) 04 de julho. f) 11 de julho. g) 18 de julho. h) 25 de julho. i) 01 de agosto. j) 08 de agosto. k) 15 de agosto	23

3. Uso de técnicas de Sensoriamento Remoto na identificação do estágio de maturação do café arábica

Figura 3.1. Mosaico e ampliação dos mosaicos com resultados de NDVI obtidos a partir de câmera modificada acoplada ao VANT. a) 06 de junho; b) 13 de junho; c) 20 de junho; d) 27 de junho; e) 04 de julho de 2018	39
Figura 3.2. Mapas de NDVI obtidos a partir de imagens de satélite Sentinel-2. a) 13 de junho; b) 28 de junho, c) 03 de julho de 2018.	40
Figura 3.3. Média dos dados de porcentagem de frutos verdes e NDVI obtidos a partir de diferentes técnicas de sensoriamento remoto para os cinco dias de avaliação.	45

RESUMO

ALMEIDA, Samira Luns Hatum, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Monitoramento da maturação do café arábica utilizando câmera digital modificada a bordo de veículo aéreo não tripulado.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Domingos Sárvio Magalhães Valente e Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

O café é uma cultura de expressiva importância econômica e social para o Brasil. O país é o principal produtor e exportador mundial desse produto. A qualidade da bebida do café é influenciada por aspectos como as condições climáticas do local, as técnicas manejo empregadas, a maturação dos frutos no momento da colheita, o manejo pós-colheita, dentre outros. Para agregar valor ao produto, os agricultores vêm buscando utilizar formas de se produzir que propiciem a obtenção de um produto de melhor qualidade. Uma das formas de se conseguir isso é realizar a colheita com a menor quantidade possível de frutos verdes na planta. Uma das alternativas para identificação do momento ideal de se realizar a colheita é a partir do uso de técnicas de sensoriamento remoto. Com a utilização dessas técnicas é possível monitorar as culturas e estudar o comportamento da vegetação, por meio de índices de vegetação como o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo geral desenvolver um sistema de sensoriamento remoto, utilizando câmera modificada acoplada a VANT, para prever o grau de maturação dos frutos como indicativo do momento ideal da colheita com base em dados de índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). Para isso, a primeira parte do trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de calibração para câmera modificada acoplada ao VANT para bandas do vermelho e do infravermelho próximo. Neste sistema foram definidas condições de voo (horário e utilização de filtro de densidade neutra, ND) e grupo de alvos que devem ser utilizados para calibração de dados de reflectância. A metodologia aplicada consistiu na realização de voos semanais em lavoura de café arábica nos horários de oito horas e meio dia, sendo dois voos em cada horário, um com filtro ND e outro com polarizador. Placas compostas de oito alvos em cores diferentes tiveram sua reflectância medida previamente com a utilização do espectroradiômetro e foram inseridas na área imageada no momento do voo, permitindo gerar modelos de calibração para as bandas do vermelho e do infravermelho a partir destes oito alvos e de cinco dos alvos que possuíam tons de cinza. Na segunda parte do trabalho objetivou-se identificar o grau de maturação dos frutos como indicativo do momento ideal para colheita do café arábica com derriça total com base em dados de NDVI obtidos a partir de câmera modificada acoplada ao VANT, NDVI obtidos a partir do GreenSeeker

e de imagens coletadas pelo Satélite Sentinel-2. A cada aquisição de imagens, amostras de café foram coletadas nas áreas imageadas para determinação do estágio de maturação dos frutos. Foram determinados os coeficientes de correlação entre a porcentagem de frutos verdes e o NDVI calculado a partir de imagem adquirida pela câmera Zenmuse X3 modificada acoplada ao VANT, com o NDVI medido com o sensor GreenSeeker e o NDVI obtido a partir de imagens do satélite Sentinel-2. Os voos realizados às oito horas da manhã com a presença de filtro ND, e um grupo de cinco alvos em tons de cinza foram os que apresentaram modelos com melhor ajuste para calibração das bandas do vermelho e do infravermelho próximo. Apesar de erros quadráticos médios inferiores a 6% para os modelos de calibração em 81,82% dos dias, os valores de reflectância encontrados após calibração radiométrica não apresentaram concordâncias com os observados na literatura. O NDVI calculado com as bandas do vermelho e do infravermelho próximo das imagens obtidas a partir da câmera modificada acoplada ao VANT não apresentou correlação com a porcentagem de frutos verdes do cafeeiro. Já o NDVI obtido a partir do GreenSeeker e do Sentinel-2 apresentou correlação em somente um dos dias analisados. Dessa forma, conclui-se que o índice NDVI obtidos a partir dos três sensores utilizados neste estudo não são indicados para avaliar o grau de maturação dos frutos do cafeeiro arábica.

ABSTRACT

ALMEIDA, Samira Luns Hatum, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Monitoring the coffee ripeness using modified digital camera on unmanned aerial vehicle.** Advisor: Daniel Marçal de Queiroz. Co-advisors: Domingos Sárvio Magalhães Valente and Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

The coffee is an important crop in Brazil due to its economic and social contributions. The country is the main world's coffee producer and exporter. The coffee quality is influenced by many aspects such as the local climatic conditions, the management techniques adopted, the fruit ripeness at the harvesting period, the post-harvest management, among others. To add value to the product, the farmers have tried to use ways of producing that lead to product with better quality. One way to achieve this is to perform the harvest with minimum amount of green fruits in the plant. One of the alternatives to identify the ideal moment of harvesting is by using remote sensing techniques. With the use of these techniques, it is possible to perform crop monitoring and to analyze the vegetation behavior by the determination of vegetation indexes such as the normalized difference vegetation index (NDVI). Therefore, the objective of this work was to develop a remote sensing system, using a modified camera coupled to the UAV, in order to predict the coffee ripeness as an indicator of the ideal harvest time based on the NDVI. For this, the first part of this work had as objective to develop a calibration system for a modified camera coupled to the UAV to acquire images in red and near-infrared bands. In this system, flight conditions were defined (time and use of neutral density filter, ND) and group of targets that should be used for reflectance data calibration. The applied methodology consisted in the schedule of weekly flights in arabica coffee crop, at 8:00 AM and 12:00 PM with two flights at each hour, one with ND filter and another with polarizer. Composite plates of eight targets with different colors had their reflectance measured previously, with the use of the spectroradiometer and were inserted in the area at the time of flight, allowing to generate calibration models for the red and infrared bands from these eight targets and from five of the targets that had scales of gray. In the second part of this work, the objective was to identify the fruit ripeness as an indicator of the ideal harvest period for arabica coffee with total strip based on NDVI data obtained through a modified camera coupled to the UAV, on NDVI obtained from the GreenSeeker and on images collected by the Sentinel-2 Satellite. At each image acquisition, coffee samples were collected in the imaged areas to determine the fruit ripeness. The correlation coefficient between the percentage of green fruits and

the NDVI calculated from the image acquired by the modified Zenmuse X3 camera coupled to the VANT was determined. Also, the correlation coefficients between the percentage of green fruits and the NDVI measured with the GreenSeeker sensor and the NDVI obtained from the images Sentinel-2 satellite were calculated. The flights performed at 8:00 AM with the use of the ND filter, and a group of five grayscale targets presented the best fit models for calibration of the red and near-infrared bands. Although the mean squared errors (MSE) were less than 6% for the calibration models in 81.82% of the days, the reflectance values observed after radiometric calibration did not correspond to those observed in the literature. The NDVI calculated with the red and near-infrared bands of images obtained from the modified camera coupled to the UAV showed no correlation with the percentage of green fruits of the coffee tree. Nevertheless, the NDVI obtained from the GreenSeeker and Sentinel-2 showed correlation in only one of the days. Thus, it was concluded that the NDVI indexes obtained by these three sensors are not a good indicator of the coffee ripeness.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Cultura de destaque, o café ocupa segundo lugar entre as commodities globalmente comercializadas. Com um parque cafeeiro de 2,16 milhões de hectares e produção de, aproximadamente, 61 milhões de sacas na safra 2017/2018, dos quais 78% são de café arábica, o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café (CONAB, 2018). Em 2016, o Brasil foi responsável pela exportação de 34,3 milhões de sacas de café gerando uma receita de 5,5 bilhões de dólares. Tais fatos consolidam a expressiva força econômica e importância social desta cultura para o Brasil.

Uma forma de agregar valor ao café brasileiro tornando-o ainda mais atrativo ao mercado internacional é por meio da melhoria da qualidade da bebida. Para isso, os produtores de café têm buscado medidas capazes de influir positivamente sobre a produtividade e a qualidade do café. Segundo Matiello (1986) e Vaast et al. (2016), dentre os fatores relativos à lavoura que podem impactar na produtividade e qualidade citam-se: as condições climáticas da região, o relevo, a fertilidade do solo, o manejo agrícola empregado, o grau de maturação dos frutos no momento da colheita e as condições em que são executadas as operações pós-colheita.

De acordo com Fagan et al.(2011), frutos verdes, ardidos e pretos são considerados os piores defeitos do café, prejudicando potencialmente a qualidade do mesmo. Quando os frutos atingem o estágio cereja eles estão na condição ideal de colheita se o objetivo for a obtenção de um produto final de melhor qualidade. Entretanto, diante da desuniformidade na maturação dos frutos na lavoura, defeitos como os anteriormente citados são comuns. Visando reduzir ao máximo frutos defeituosos, recomenda-se que a colheita do café arábica seja iniciada quando a lavoura apresentar menos que 15% de frutos verdes. Para que isso seja possível de ser identificado, o produtor tem que monitorar o grau de maturação durante o período de colheita.

Para o monitoramento das lavouras cada vez mais têm-se usado técnicas de agricultura de precisão. A agricultura de precisão é uma importante ferramenta que permite monitorar e otimizar os sistemas de produção agrícola. Além disso, a agricultura de precisão reduz o impacto ambiental causado pelas práticas agrícolas. Diante disso, a agricultura de precisão vem se transformando numa ferramenta importante quando se deseja produzir café de forma mais eficiente.

No contexto de monitoramento das culturas, o sensoriamento remoto está se tornando uma das técnicas mais estudadas atualmente. Nessa técnica, o sistema de

medição não tem contato com o objeto a ser medido, o que lhe confere a característica de não ser destrutivo. Os veículos aéreos não tripulados, também conhecidos como VANTs, são plataformas que obedecem às diretrizes do sensoriamento remoto, em que é possível realizar um monitoramento sem o contato direto com o alvo em questão. A aplicação de veículos aéreos não tripulados está em franca expansão no mundo. A previsão do mercado mundial de VANTs é que a produção destas aeronaves atinja US\$ 73,5 bilhões na próxima década. Neste cenário, a agricultura se destaca como o segundo setor que mais adota VANTs (TEAL, 2017).

A possibilidade de acoplar sensores aos VANTs fez com que esse tipo de plataforma se tornasse uma importante ferramenta para o monitoramento e mapeamento das culturas agrícolas. Um dos motivos está relacionado ao tempo de revisita, característica facilmente manejada nos veículos aéreos não tripulados (ZHANG & KOVACS, 2012). Além disso, os VANTs possibilitam a aquisição de imagens com resoluções espaciais de centímetros, o que os coloca como alternativa à outras plataformas, como satélites artificiais de alta resolução (ZHANG & KOVACS, 2012). Imagens geradas a partir de sensores a bordo destes satélites demandam um maior investimento, sofrem interferência de nuvens e possuem um processamento mais lento, aspectos que limitam sua utilização na agricultura de precisão (WU et al., 2006).

Dentre os sensores que podem ser acoplados ao VANT, os sensores multiespectrais são capazes de captar a radiação eletromagnética proveniente do alvo em diferentes faixas espectrais (MOREIRA, 2005). As imagens geradas a partir destes sensores vem sendo utilizadas para detectar estresse nutricional (RUIJIAO et al., 2012; HERWITZ et al., 2004) e estresse hídrico (DETAR et al., 2006); para determinar parâmetros biofísicos das culturas (LELONG, 2008); e também para estimar a produtividade e a quantidade de biomassa nas culturas (SWAIN et al., 2010).

Os sensores multiespectrais possuem um elevado valor de aquisição, com isso câmeras digitais coloridas de baixo custo (bandas do vermelho, verde e azul) têm sido modificados de modo a permitir a passagem do comprimento de onda do infravermelho próximo (SOLECKI, 2017), comprimento de onda de interesse para o estudo da vegetação por meio de índices de vegetação. Para que as imagens multiespectrais sejam utilizadas essas devem passar por um processo de calibração radiométrica responsável por eliminar efeitos ambientais e aqueles associados à superfície de observação ou do sensor resultando em imagens com informações de reflectância da superfície (LÓPEZ et al., 2011; LU; HE, 2017).

Diante do exposto o objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um sistema de sensoriamento remoto capaz de prever o grau de maturação dos frutos em lavouras de café arábica com base em dados de índice de vegetação da diferença normalizada, o NDVI. O sistema em questão utiliza uma câmera colorida modificada, a Zenmuse X3, a bordo de veículo aéreo não tripulado.

Este trabalho é composto de dois capítulos. O primeiro capítulo tem por objetivo desenvolver uma metodologia de calibração radiométrica para câmeras coloridas modificadas acopladas a VANTs com a finalidade de calibrar as bandas do vermelho e do infravermelho próximo, bandas essas necessárias para o cálculo do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). O sistema em questão para calibração destas bandas define quais condições de voo (horário e a utilização de filtro de densidade neutra - ND), e o grupo de alvos que devem ser utilizados. O segundo capítulo trata da análise do uso de câmera modificada acoplada a VANT, Sentinel-2 e sensor GreenSeeker para identificar o índice de maturação dos frutos do cafeeiro como indicativo de ponto ideal de colheita do café arábica com base em dados de índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de café, v. 5– Safra 2018, n.4- Quarto levantamento, Brasília, p. 1-84, 2018. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe> > Acesso em: 20 de jan de 2019.
- DETAR, W.R.; PENNER, J.V.; FUNK, H.A. Airborne remote sensing to detect plant water stress in full canopy cotton. **Transactions of the ASABE**. v. 49, n.3, p.655-665, 2006.
- FAGAN, E. B.; SOUZA, C. H. E.; PEREIRA, N. M. B.; MACHADO, V. J. Efeito do tempo de formação do grão de café (*Coffea* sp) na qualidade da bebida. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 5, 2011.
- HERWITZ, S.R.; JOHNSON, L.F.; DUNAGAN, S.E.; HIGGINS, R.G.; SULLIVAN, D.V.; ZHENG, J.; LOBITZ, B.M.; LEUNG, J.G.; GALLMEYER, B.A.; AOYAGI, M.; SLYE, R.E.; BRASS, J.A. Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. **Computer and electronics in agriculture**, v.44, p. 49-61, 2004.
- LELONG, C. C.; BURGER, P.; JUBELIN, G.; ROUX, B.; LABBÉ, S.; & BARET, F. Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots. **Sensors**, v.8, n.5, p.3557–85, 2008.

- 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.
- LU, B.; HE, Y. Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) - acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 128, p. 73–85, 2017.
- MATIELLO, J. B. Fatores que Afetam a Produtividade do Café no Brasil. In: RENA, A B; MALAVOLTA, E; ROCHA, M; YAMADA, T. Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade. SIMPÓSIO SOBRE FATORES QUE AFETAM A PRODUTIVIDADE DO CAFEIEIRO, 1984, Poços de Caldas – MG, **Anais...** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato - POTAFÓS. 447 p. 1986
- RUIJAO, Z.; MINZAN, L.; HONG, S.; YANE, Z.; WEI, Y. Application of multi-spectral images and remote sensing in precision crop management. ASABE paper n. 12-1340915. 9 pages. 2012.
- SOLECKI, C. F. Evaluating Unmanned Aerial Vehicle Based Crop Indexing Techniques: Modified Consumer Grade RGB Vs. Multispectral. Retrieved from Kamloops. 2017.
- SWAIN, K.C.; THOMPSON, S.J.; JAYASURIYA, H.P.W. Adoption of an unmanned helicopter for low-altitude remote sensing to estimate yield and total biomass of a rice crop. **Transactions of ASABE**, v.53, n.1, p. 21-27. 2010.
- Teal Group Predicts Worldwide Civil Drone Production Will Soar \$73.5 Billion Over the Next Decade. <https://www.prnewswire.com/news-releases/teal-group-predicts-worldwide-civil-drone-production-will-soar-735-billion-over-the-next-decade-300474645.html>. Visitado em 24 de outubro de 2017.
- VAAST, P.; BERTRAND, B.; PERRIOT, J. J.; GUYOT, B.; GENARD, M. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 2, p. 197-204, 2006.
- WU, J.; WANG, D.; ROSEN, C. J.; BAUER, M. E. Comparison of petiole nitrate concentrations, SPAD chlorophyll readings, and QuickBird satellite imagery in detecting nitrogen status of potato canopies. **Field Crops Research**, v.101, n.1, p. 96-103. 2007.
- ZHANG C.; KOVACS J.M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture : a review. **Precision Agriculture**, v.13, p. 693–712, 2012.

2. Calibração Radiométrica de Imagens de Câmera Digital Modificada a bordo de Veículo Aéreo Não Tripulado

RESUMO

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) têm se mostrado um importante aliado da agricultura de precisão. Acoplado aos VANTs, os sensores multiespectrais permitem o estudo de diversas propriedades fisiológicas da cultura. Diante dos elevados custos dos sensores multiespectrais, sensores RGB têm sido modificados de modo a permitir a passagem do comprimento de onda do infravermelho próximo. Para analisar a variabilidade temporal dos atributos das plantas, os resultados obtidos a partir das câmeras multiespectrais necessitam de calibração radiométrica. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi desenvolver uma metodologia de calibração radiométrica para câmeras RGB modificadas acopladas a VANTs que define quais condições de voo e grupo de alvos que devem ser utilizados para calibração de dados de reflectância nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo. Voos foram realizados semanalmente no período de 06 de junho a 15 de agosto de 2018 em área cultivada com café arábica. Em cada dia, foram realizados dois voos às oito horas da manhã, um com filtro de densidade neutra (ND) e outro com polarizador, e da mesma forma, dois voos ao meio dia. Placas inseridas no momento do voo, permitiram gerar modelos de calibração para as bandas do vermelho e do infravermelho. Os modelos foram gerados a partir dos oito alvos e a partir de cinco destes alvos em tons de cinza. Em 63,64% dos dias avaliados, os voos realizados as oito horas da manhã com filtro ND apresentaram modelos de melhores ajustes para calibração. Em 90,91% dos dias os melhores modelos foram gerados a partir do grupo de alvos composto de cinco alvos em tons de cinza. Apesar de a calibração proposta ter gerado valores abaixo de 6% de raiz quadrada do erro quadrático médio em 81,82% dos dias avaliados, não foram observados valores de reflectância em total concordância com o encontrado na literatura.

Palavras-chave: VANT, agricultura de precisão, sensoriamento remoto, reflectância.

ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have proven to be an important tool for precision agriculture. The multispectral sensors connected to the UAVs allow the study of several crop physiological properties. Due to the high costs of multispectral sensors, RGB (red, green and blue bands) cameras have been modified to sense near-infrared wavelengths. In order to analyze the temporal variability of the plant attributes, the results obtained from multispectral cameras require radiometric calibration. Therefore, the objective of this work was to develop a radiometric calibration methodology for modified RGB cameras coupled to UAVs that defines which flight conditions and group of targets are to be used for calibration of reflectance data in the red and near infrared bands. Flights were done weekly from June 6 to August 15, 2018 in area field planted with Arabica coffee. Each day, two flights were performed at eight o'clock in the morning (8:00 am), one with a neutral density filter (ND) and the other with a polarizer. Similar procedures were repeated at noon (12:00 pm). Plates inserted at the time of flight, allowed the generation of calibration models for the red and infrared bands. The models were generated from the eight targets being five of these targets in shades of gray. In 63.64% of the evaluated days, the flights performed at 8 o'clock in the morning with ND filter presented models of better performance for calibration. In 90.91% of the days the best models were generated from the target group composed of five gray targets. Although the proposed calibration generated values below 6% mean square error in 81.82% of the evaluated days, no reflectance values were observed in total accord with those found in the reviewed literature.

Keywords: UAVs, precision agriculture, remote sensing, reflectance.

2.1. INTRODUÇÃO

A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTS) como plataforma de sensoriamento remoto está em ascensão. Sua aplicação se dá nos mais diversos setores, sendo o setor agrícola um dos principais a utilizar as informações obtidas por esse tipo de plataforma. Importante aliado da agricultura de precisão, os VANTS surgem como uma ferramenta de monitoramento das áreas de produção agrícola (ARTIOLI & BELONI, 2016).

Com melhor resolução espacial e temporal, os sistemas de sensoriamento acoplados a VANTS são alternativas ao imageamento utilizando aviões ou ao imageamento orbital, facilitando o acompanhamento da cultura ao longo do espaço e do tempo (CANDIAGO et al., 2015). Por se deslocarem a baixas altitudes, as imagens obtidas a partir de VANTS apresentam alta resolução espacial. Além disso não são afetados pela presença de nuvens, fator limitante nas plataformas orbitais.

No sensoriamento remoto, a obtenção das informações é baseada em sensores que captam a radiação eletromagnética refletida resultante da interação de diferentes superfícies. Os sensores utilizados permitem a geração de índices de vegetação relacionados à diversas propriedades fisiológicas da cultura, como vigor, estresse hídrico, entre outros (JORGE & INAMASU, 2014).

Capazes de captar a radiação eletromagnética refletida em diferentes bandas, os sensores multiespectrais são importantes ferramentas para a agricultura de precisão. Entretanto, sua aplicação torna-se limitada diante da necessidade de altos investimentos.

Com o objetivo de ampliar a faixa de dados que podem ser gerados por este sensor, sensores RGB (bandas do vermelho, verde e azul) têm sido modificados de modo a permitir a passagem do comprimento de onda do infravermelho próximo (SOLECKI, 2017). Com isso, torna-se possível estudar características da cultura por meio de índices de vegetação como o NDVI (índice de vegetação da diferença normalizada) a partir de uma câmera multiespectral modificada, relativamente mais acessível do que as câmeras multiespectrais encontradas no mercado. A qualidade dos resultados obtidos por meio destes sensores modificados pode ser comprometida, uma vez que os sensores utilizados não são rigorosamente calibrados e fornecem imagem brutas associadas a números digitais. Os números digitais são sensíveis às condições de luminosidade, fato que inviabiliza a comparação de imagens obtidas em momentos distintos, assim sendo, para

a extração de informação espectral é importante a conversão dos valores de pixel das imagens para reflectâncias (LU; HE, 2017).

Para que as câmeras multiespectrais possam ser utilizadas para analisar a variabilidade temporal dos atributos das plantas torna-se necessário realizar o processo de calibração radiométrica. Esse processo responsável por eliminar efeitos ambientais e aqueles associados à superfície de observação ou do sensor. Como resultado são geradas imagens com informações de reflectância da superfície, parâmetro mais apropriado para cálculos de índices de vegetação (LÓPEZ et al., 2011; LU; HE, 2017).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi desenvolver uma metodologia de calibração radiométrica para câmeras RGB modificadas acopladas a VANTs para determinação de índices de vegetação. Esse sistema define quais condições de voo (horário e utilização de filtro de densidade neutra, ND) e grupo de alvos que devem ser utilizados para calibração de dados de reflectância nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Veículo aéreo não tripulado utilizado no estudo

O VANT utilizado para a coleta de dados foi o multi-rotor DJI Matrice 100 (Shenzhen, China). O vant em questão é uma plataforma de quatro rotores feita em fibra de carbono com acoplamento para a câmera e gimbal Zenmuse X3. Seu controlador remoto permite trabalhar com distância operacional de até 5km. Por possuir compartimento de bateria duplo, o Matrice 100 pode atingir autonomia de 40 minutos.

2.2.2. Câmera Digital Modificada

A câmera utilizada foi uma Zenmuse X3 fabricada pela DJI e modificada pela Aerial Media Pros (Costa Mesa, Califórnia, EUA), com um sensor CMOS de 12 megapixels. Originalmente, a Zenmuse X3 é uma câmera que captura as bandas do vermelho, verde e azul – RGB. A modificação realizada na câmera pela Aerial Media Pros consistiu na retirada do filtro de bloqueio do infravermelho, e em seguida, adicionou-se um filtro alternativo que permite a passagem dos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo (NIR). Com a presença dessas duas bandas torna-se possível o cálculo do NDVI (SOLECKI, 2017).

As imagens geradas pela câmera Zenmuse X3 modificada são compostas de três bandas, sendo as bandas 1 e 3 as de interesse para o cálculo do NDVI. Na banda 1 manteve-se o comprimento de onda no vermelho, e na banda 3 o comprimento de onda no infravermelho próximo.

A câmera Zenmuse X3 modificada veio acompanhada de um polarizador e um filtro ND (densidade neutra) (Figura 2.1). O Polarizador (Figura 2.2a) não interfere na quantidade de luz que entra no sensor, apenas impede reflexões e brilho. Já o filtro ND (Figura 2.2b), atua reduzindo a luz que atinge o sensor. Ambos os filtros foram usados no presente trabalho.

Para a aquisição das imagens adotou-se um padrão de configuração da câmera Zenmuse X3 modificada. O Balanço de Branco foi mantido como Automático. Para o ISO, indicador de sensibilidade do sensor da câmera à luz ambiente, foi usado o valor 100, configuração essa em que o sensor da câmera possui uma menor sensibilidade à luz. O Shutter, velocidade do obturador, foi de 1/200 s.

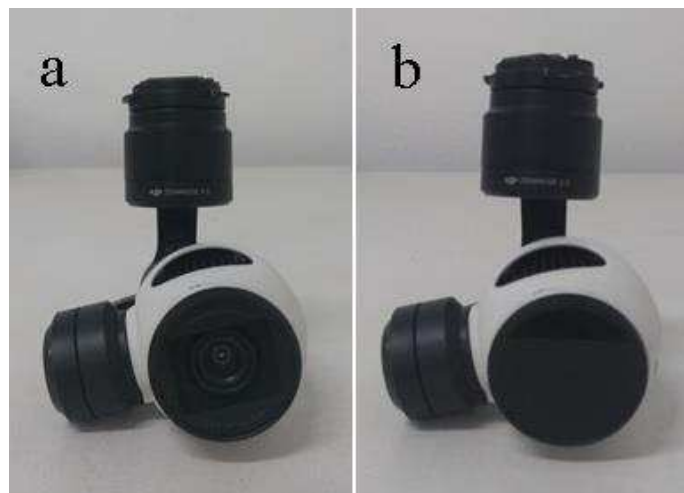


Figura 2.1. Câmera Zenmuse X3 modificada. a) Com polarizador. b) Com Filtro ND.

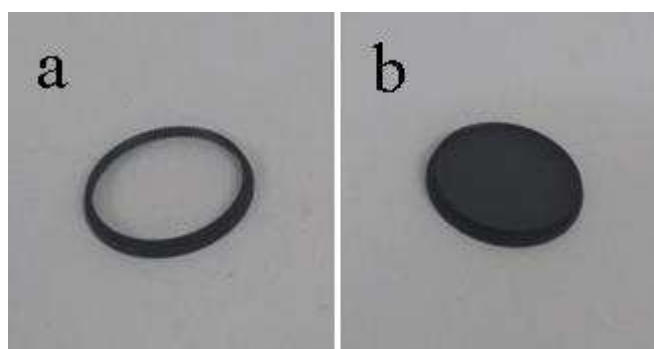


Figura 2.2. Acessórios utilizados na câmera Zemmuse X3 modificada. a) Polarizador. b) Filtro ND.

2.2.3. Alvo de Calibração e Caracterização Espectral

Para a calibração radiométrica das imagens foram confeccionadas duas placas, nas dimensões 136 cm x 46,8 cm, com um total de oito alvos de cores distintas. O material utilizado para os alvos foi tecido Napa sintética nas cores branco, preto, cinza claro, cinza intermediário, cinza escuro, vermelho, azul e marrom.



Figura 2.3. Placa para calibração radiométrica composta de oito alvos.

Com a utilização do espectroradiômetro FieldSpec® HandHeld 2TM Spectroradiometer (Boulder, Colorado, EUA) foi possível determinar a assinatura espectral para cada um desses oito alvos. Para cada alvo, foram realizadas dez leituras. Uma vez obtida a assinatura espectral de cada alvo, foram retirados os valores médios de reflectância nos comprimentos de onda de interesse, que foram o comprimento de onda do vermelho, 660 nanômetros, e o comprimento de onda do infravermelho, 850 nanômetros. Esses comprimentos de onda correspondiam aos picos de absorção da reflectância do vermelho e do infravermelho na câmera Zenmuse X3 modificada, respectivamente (SOLECKI, 2017).

Baseado em estudos realizados por Hruska et al. (2012) e Wang & Myint (2015) testou-se neste trabalho também a utilização de alvos apresentando diferentes tons de cinza para a calibração radiométrica, sendo estes alvos: o branco, o preto, cinza claro, cinza intermediário e cinza escuro. Dessa forma, foram gerados dois modelos de calibração para cada mosaico, um utilizando quatro alvos e outro utilizando oito alvos.

2.2.4. Aquisição das imagens e dos pontos de controle

Os voos foram realizados em uma Fazenda cultivada com café arábica localizada na Cidade de Paula Cândido- MG, coordenada 20,82° S e 42,91° W. O cafeeiro, da cultivar Catuaí, possuía cerca de 15 anos e espaçamento de 2,5m entre fileiras e 1m entre plantas. A área imageada tinha um total de 4,4. O plano de voo foi elaborado por meio do aplicativo Precision Flight (Precision Hawk, Raleigh, Carolina do Norte, EUA), conforme apresentado na Figura 2.4. A altitude de voo foi de 50 metros, resultando em uma resolução espacial de 2,1 cm, com sobreposição frontal e lateral de 70%. Os voos tiveram duração de aproximadamente 6 minutos. Com o intuito de georreferenciar as imagens, foram coletadas em campo seis pontos de controle com aparelho GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) topográfico (L1), da marca Trimble (Trimble Navigation, Sunnyvale, Califórnia, EUA), modelo Pro XT.

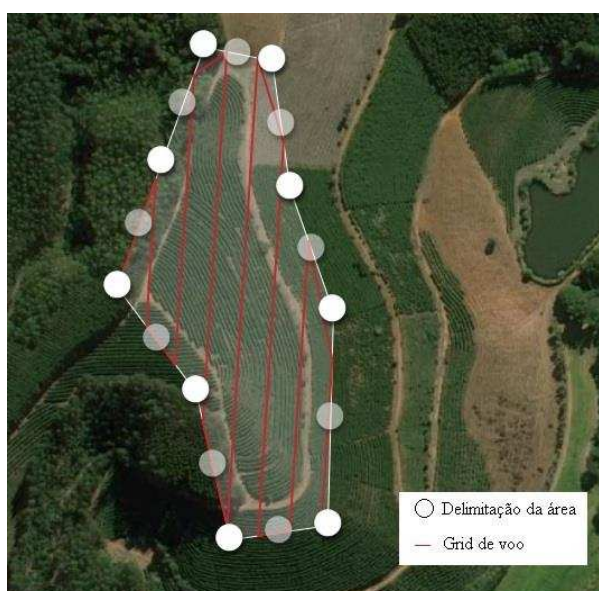


Figura 2.4. Plano de voo desenvolvido utilizando o aplicativo Precision Flight.

A colheita do cafeeiro na área foi iniciada no dia 04 de julho. Os voos foram realizados semanalmente no período de 6 de junho à 15 de agosto de 2018, nos dias 6, 13, 20, e 27 de junho, 04, 11, 18, e 25 de julho, 01, 08, e 15 de agosto. As placas de calibração foram inseridas na área imageada durante os voos, na rua localizada entre o talhão avaliado e o adjacente. Em cada dia eram realizados quatro voos, com o intuito de definir qual horário do dia e tipo de filtro apresentaria os melhores resultados de calibração. Foram dois voos no horário de oito horas da manhã, um com polarizador e outro com filtro ND, e dois ao meio dia, seguindo o mesmo procedimento do voo das oito.

Nos dias 20 de junho, 11 de julho, 01 e 08 de agosto não foram realizados voos no horário do meio dia em decorrência das condições climáticas adversas. No dia 13 de junho, o voo de meio dia com polarizador foi realizado, entretanto por problemas na câmera, as imagens não foram gravadas. Este fato ocorreu também no dia 18 de julho, com o voo de oito horas da manhã com filtro ND.

2.2.5. Processamento das imagens – Mosaicagem e Georreferenciamento

Foram geradas aproximadamente 126 imagens por voo. Para a análise da área foi necessário unir essas imagens por meio de mosaicagem. A mosaicagem foi realizada utilizando o software computacional Agisoft PhotoScan (Agisoft LLC., St. Petersburg, Russia) versão 1.43

No Agisoft, cada conjunto de imagens passou por três etapas até a geração do ortomosaico. Inicialmente, as imagens foram alinhadas, de modo a gerar uma nuvem de pontos fotogramétricos. A etapa seguinte consistiu em construir o modelo digital de elevação em 2D. Em seguida, de posse das imagens raster 2D, as imagens foram ortorretificadas e mosaicadas gerando um único produto para cada voo.

Com a utilização do software computacional QGis 3.0 (QGIS Development Team, Open Source Geospatial Foundation, Chicago, IL, EUA), os mosaicos foram georreferenciados. Para isso foram utilizados os seis pontos previamente coletados com aparelho GNSS topográfico na área de interesse.

2.2.6. Obtenção do número digital dos alvos

Para a extração dos números digitais dos alvos foi utilizado o software computacional QGis 3.0. Nesse processo foi criado um shapefile composto de oito polígonos, abrangendo aproximadamente dez pixels, cada um posicionado na porção central dos distintos alvos. Com a ferramenta Zonal Statistic foi retirado o número digital médio de cada um dos alvos, para os comprimentos de onda do vermelho (Banda 1) e do infravermelho (Banda 3). Este procedimento foi realizado para cada mosaico.

2.2.7. Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada por meio da utilização do software estatístico R Studio (RStudio Inc, Boston, MA, EUA) versão 1.0.136. Para a estimativa de valores de reflectância a partir dos números digitais, foram ajustados modelos de regressão linear entre os valores de número digital de cada alvo (Figura 2.3) para cada banda da imagem obtida pela câmera digital modificada (variável X) e o valor de reflectância de cada alvo determinado utilizando o espectroradiômetro (variável Y). Com o intuito de identificar qual grupo de alvos teria melhor ajuste no modelo para estimativa das reflectâncias nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, foram ajustados modelos com todos os oito alvos e modelos com somente os alvos em tons de cinza (preto, branco, cinza claro, cinza intermediário e cinza escuro) para cada mosaico. Isso foi realizado para todos os voos dos onze dias de captura de imagens.

Afim de identificar a melhor condição de voo para cada dia, quanto ao horário e a presença de filtro, e o grupo de alvos que se apresentasse com melhor ajuste, realizou-se o teste F nos modelos gerados ao nível de 5% de significância. Entre os modelos que apresentaram significância, avaliou-se o erro médio quadrático para definir o voo e o grupo de alvos que melhor estimava as reflectâncias nas duas bandas a partir dos números digitais.

Como as bandas do vermelho e do infravermelho foram analisadas separadamente, em alguns casos, a condição do voo de melhor ajuste para a banda do vermelho não foi a mesma que apresentou melhor ajuste para a banda do infravermelho. Diante disso, usou-se como critério de escolha, o melhor ajuste para a banda do vermelho. Isso porque, pelo fato de as plantas refletirem menos vermelho do que infravermelho, um RMSE alto na banda do vermelho afetaria mais o cálculo de índices de vegetação do que um alto RMSE na banda do infravermelho.

2.2.8. Calibração radiométrica

A calibração radiométrica foi realizada nos onze mosaicos, utilizando os modelos que apresentaram os melhores ajustes para cada dia, considerando horário, presença de filtro e grupo de alvos usados na geração do modelo. Os mosaicos foram calibrados no Qgis 3.0. Com a utilização da calculadora raster, as bandas de interesse com informações de números digitais foram isoladas (Banda 1 e 3). Após separadas, ainda na calculadora raster aplicou-se os modelos respectivos para cada banda. Dessa forma, a partir de cada

mosaico foram obtidas duas imagens, uma com a reflectância na banda do vermelho e outra com a reflectância na banda do infravermelho.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Caracterização Espectral dos Alvos

Os valores de reflectância dos alvos obtidos, por meio da medição com espectrorradiômetro, para as bandas do vermelho (660 nm) e do infravermelho (850 nm) encontram-se na Tabela 2.1. O alvo de cor preta que tem por característica uma maior absorção de energia eletromagnética ao longo do espectro foi o que apresentou os menores valores de reflectância para a banda do vermelho e do infravermelho, 0,0416 e 0,0372, respectivamente. Na banda do vermelho, a maior reflectância foi do branco, cor que reflete grande parte da energia eletromagnética do espectro que o atinge, seguido do vermelho, cinza claro, cinza intermediário, marrom, cinza escuro e azul. Na banda do infravermelho, os maiores valores de reflectância também foram dos alvos branco e vermelho, com valores de 0,8331 e 0,6776, respectivamente, seguidos do azul, cinza claro, cinza intermediário, marrom e cinza escuro.

Tabela 2.1. Reflectância média dos alvos nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo obtidos por meio do espectrorradiômetro.

ALVOS	Comprimento de onda			
	660 nm		850 nm	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio Padrão
Preto	0,042	0,002	0,037	0,002
Azul	0,050	0,001	0,436	0,003
Cinza intermediário	0,169	0,004	0,265	0,005
Vermelho	0,668	0,005	0,678	0,007
Branco	0,818	0,013	0,833	0,011
Cinza claro	0,240	0,002	0,223	0,002
Cinza escuro	0,086	0,003	0,078	0,003
Marrom	0,155	0,002	0,144	0,002

2.3.2. Imageamento aéreo

A partir das imagens coletadas nos onze dias do período de colheita de café foram gerados 34 mosaicos. Na Figura 2.5 encontram-se os mosaicos obtidos pela câmera Zenmuse X3 modificada, com 8 bits, previamente a calibração radiométrica, com informações do pixel em número digital. Esses mosaicos são apresentados com o objetivo

de exemplificar o comportamento observado em condições distintas de voo do dia 6 de junho de 2018, primeiro dia de aquisição de imagens.

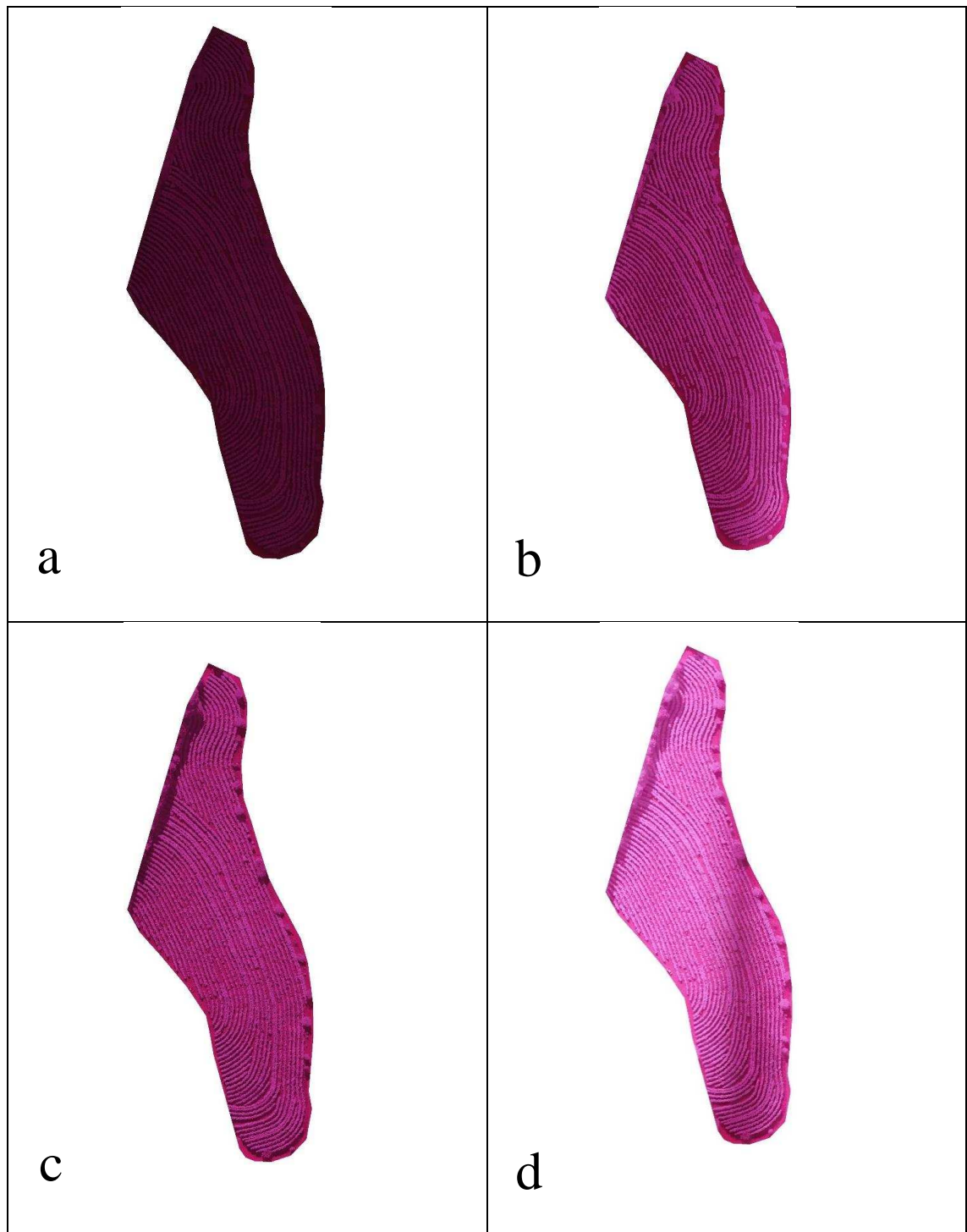


Figura 2.5. Mosaicos em falsa cor dos voos realizados no dia 06 de junho de 2018. a) oito horas da manhã com filtro de densidade neutra (ND). b) oito horas da manhã com polarizador. c) meio dia com filtro de densidade neutra. d) meio dia com polarizador.

Os mosaicos apresentados na Figura 2.5 são resultados de uma composição falsa cor das bandas do vermelho e do infravermelho próximo. O voo das oito horas da manhã com filtro ND resultou em um mosaico mais escuro, em comparação com o gerado a partir do voo com polarizador. Isso ocorreu em decorrência das características do filtro que reduzem a luz que atinge o sensor da câmera. No voo de meio dia, diante de maior incidência de radiação, as imagens ficaram mais claras, porém seguindo o mesmo comportamento de imagens com filtro ND mais escuras. A faixa mais escura presente no mosaico do voo com polarizador é resultado da presença de nuvens no momento da captura das imagens.

Na Tabela 2.2 encontram-se os valores de número digital extraídos dos alvos para os voos realizados no dia 6 de junho de 2018. Diante de uma menor radiação solar no horário das oito horas da manhã, os números digitais encontrados para os alvos foram inferiores aos encontrados no horário de meio dia, período do dia de maior intensidade de radiação. A presença de filtro ND na câmera reduziu, nos dois horários e em cada uma das bandas, o valor de número digital em comparação com os valores obtidos nos voos com polarizador.

Tabela 2.2. Valores médios de número digital dos alvos obtidos em diferentes condições de voo no dia 06 de junho de 2018.

Alvos	8cf		8sf		12 cf		12 sf	
	R	NIR	R	NIR	R	NIR	R	NIR
Preto	57,6	20,2	96,9	36,8	91,0	41,9	200,9	131,4
Azul	82,5	41,9	159,8	104,5	168,4	120,7	245,5	221,9
Cinza intermediário	87,8	28,8	167,3	74,7	179,5	93,4	241,0	192,2
Vermelho	146,5	46,5	229,8	115,3	232,5	141,9	250,0	239,6
Branco	168,2	60,8	237,7	135,0	234,6	154,3	247,7	239,3
Cinza claro	91,2	24,4	176,0	71,4	184,8	86,7	236,9	184,3
Cinza escuro	65,4	22,4	115,5	38,8	116,1	45,4	220,1	144,8
Marrom	79,4	23,0	147,4	54,3	156,1	67,2	237,5	162,1

8cf= voo de oito horas com filtro ND, 8sf= voo de oito horas com polarizador, 12cf= voo de meio dia com filtro ND, 12sf= voo de meio dia com polarizador, R= banda do vermelho, NIR= banda do infravermelho próximo.

As Tabelas 2.3 e 2.4 apresentam as equações obtidas para modelo que estima a reflectância nas bandas do vermelho e do infravermelho a partir do número digital, respectivamente, do dia 06 de junho de 2018. Para cada voo são apresentados o modelo

ajustado com os oito alvos de calibração (TA) e o modelo ajustado somente com os alvos em tons de cinza (AC).

Tabela 2.3. Modelos ajustados para estimativa da reflectância a partir do número digital da imagem para o dia 06 de junho de 2018 para a banda do vermelho.

Horário	Filtro	Grupo de Alvos	Equação	R ²	RMSE (Adimensional)
8	cf	TA	$R_{660} = 7,46E-3 * x - 0,448$	0,96	0,05
		AC	$R_{660} = 7,15E-3 * x - 0,401$	0,99	0,03
	sf	TA	$R_{660} = 5,46E-3 * x - 0,629$	0,82	0,12
		AC	$R_{660} = 5,20E-3 * x$	0,84	0,11
12	cf	TA	$R_{660} = 5,01E-3 * x - 0,575$	0,72	0,15
		AC	$R_{660} = 4,68E-3 * x - 0,484$ ns	0,73	0,15
	sf	TA	$R_{660} = 1,05E-2 * x - 2,184$ ns	0,34	0,22
		AC	$R_{660} = 1,18E-2 * x - 2,444$ ns	0,50	0,20

RMSE= raiz quadrada do erro quadrático médio, cf – com filtro ND, sf – sem filtro ND, somente com polarizador, TA=todos alvos, AC= alvos em tons de cinza, ns – não significativo ao nível de 5%. * - significativo ao nível de 5%, x= número digital da imagem, R₆₆₀ = reflectância na faixa do vermelho, adimensional.

Tabela 2.4. Modelos ajustados para estimativa da reflectância a partir do número digital da imagem para o dia 06 de junho de 2018 para a banda do infravermelho próximo.

Horário	Filtro	Grupo de Alvos	Equação	R ²	RMSE (Adimensional)
8	cf	TA	$R_{850} = 1,94E-2 * x - 0,313$	0,96	0,05
		AC	$R_{850} = 1,88E-2 * x - 0,304$	0,98	0,04
	sf	TA	$R_{850} = 7,80E-3 * x - 0,279$	0,96	0,06
		AC	$R_{850} = 7,94E-3 * x - 0,279$	0,97	0,05
12	cf	TA	$R_{850} = 6,65E-3 * x - 0,288$	0,95	0,06
		AC	$R_{850} = 6,82E-3 * x - 0,288$	0,94	0,07
	sf	TA	$R_{850} = 6,53E-3 * x - 0,900$	0,89	0,09
		AC	$R_{850} = 7,06E-3 * x - 0,972$	0,89	0,10

RMSE= raiz quadrada do erro quadrático médio, cf – com filtro ND, sf – sem filtro ND, somente com polarizador, TA=todos alvos, AC= alvos em tons de cinza, ns – não significativo ao nível de 5%. * - significativo ao nível de 5%, x= número digital da imagem, R₈₅₀ = reflectância na banda do infravermelho próximo, adimensional.

Ao analisar as equações obtidas para a calibração da banda do vermelho (Tabela 2.3) utilizando todos os alvos, pode-se verificar ausência de significância do coeficiente angular do modelo linear ao nível de 5% para o voo realizado ao meio dia, somente com

polarizador. Diante de alta intensidade luminosa no momento deste voo e a sensibilidade do número digital à essa variável, verificou-se que a variação entre o número digital do alvo de menor reflectância e o de maior reflectância foi de apenas 50, o que pode ter influenciado na não significância do coeficiente angular do modelo linear gerado a partir do voo realizado ao meio dia, sem a utilização do filtro ND. O voo de oito da manhã com filtro ND foi o que apresentou um melhor ajuste ao modelo com um r^2 de 0,96 e raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) de 0,05.

Com os modelos ajustados (Tabela 2.3) a partir dos alvos em tons de cinza, os coeficientes angulares dos dois modelos lineares referentes aos voos realizados ao meio dia não se diferiram de zero ao nível de 5%. Além da alta luminosidade verificada ao meio dia, a não significância do coeficiente angular do modelo linear referente ao voo de meio dia com filtro ND, não verificada na condição anterior, pode ter sido em decorrência da redução do número de variáveis de entrada para a geração do modelo, reduzida de oito para cinco. O valor mínimo do RMSE obtido entre os voos das oito horas, de 0,03, foi no voo em que a câmera se encontrava com o filtro ND. IQBAL et al. (2018), ao proporem calibração radiométrica para sensor multiespectral, encontraram RMSE no comprimento de onda de 670 nm, referente a banda do vermelho, de 0,064. Os modelos de calibração obtidos a partir do voo das oito horas da manhã com o filtro ND foram os que apresentaram melhores resultados para a estimativa dos valores de reflectância na banda do vermelho a partir dos números digitais no dia 06 de junho de 2018.

Para a banda do infravermelho (Tabela 2.4), o coeficiente angular dos modelos lineares gerados a partir dos quatro voos apresentaram significância ao nível de 5%. Novamente, o voo de oito horas da manhã com filtro ND apresentou melhor ajuste, com destaque para o modelo gerado a partir dos alvos em tons de cinza, com r^2 de 0,98, e RMSE de 0,04. Estes resultados aproximam-se de resultados obtidos por Lu e He (2017) ao calibrar câmera modificada utilizando a reflectância do dossel das plantas e do solo, que encontraram na banda NIR coeficiente de determinação de cerca de 0,95 e RMSE de aproximadamente 0,3. Segundo os autores, os valores por eles obtido são aceitáveis diante de altas reflectâncias da planta na banda do infravermelho próximo.

As condições de voo que resultarem em melhor ajuste de modelo para os dias avaliados são apresentadas nas Tabelas 2.5 e 2.6, para as bandas do vermelho e do infravermelho próximo, respectivamente. Dos onze dias avaliados, os voos realizados às oito horas da manhã com a presença de filtro ND obtiveram melhores ajustes de modelo em sete dias para a banda do vermelho, o que equivale a 63,64% dos dias avaliados. Em

90,91% dos dias, a geração de modelos a partir do grupo de cinco alvos em tons de cinza apresentou melhores ajustes do que quando gerados a partir de todos os alvos. A maior raiz quadrada do erro quadrático observado nos modelos ajustados para os dias avaliados na banda do vermelho foi de 0,9, com exceção do dia 18 de julho, com RMSE de 0,17. No dia em questão, o voo de oito horas da manhã com a presença de filtro ND apresentou erro, o que impediu a captura das imagens. Tal fato pode ter influenciado sobre a condição de voo que apresentou melhor ajuste.

Tabela 2.5. Modelos melhores ajustados para estimativa da reflectância na banda do vermelho nos onze dias avaliados.

Dia	Horário/ Filtro	Grupo de alvos	Equação	R ²	RMSE (Adimensional)
6-Jun	8 CF	AC	$R_{660} = 7,15E-3 x - 0,401$	0,99	0,03
13-Jun	8 CF	AC	$R_{660} = 5,05E-3 x - 0,451$	0,89	0,09
20-Jun	8 CF	AC	$R_{660} = 8,97E-3 x - 0,394$	0,96	0,06
27-Jun	8 SF	AC	$R_{660} = 5,71E-3 x - 0,454$	0,98	0,04
4-Jul	12 CF	AC	$R_{660} = 6,71E-3 x - 0,403$	0,99	0,03
11-Jul	8 SF	AC	$R_{660} = 6,90E-3 x - 0,335$	0,98	0,04
18-Jul	12 CF	TA	$R_{660} = 5,16E-3 x - 0,631$	0,62	0,17
25-Jul	8 CF	AC	$R_{660} = 5,46E-3 x - 0,400$	0,96	0,06
1-Ago	8 CF	AC	$R_{660} = 7,68E-3 x - 0,356$	0,97	0,05
8-Ago	8 CF	AC	$R_{660} = 6,45E-3 x - 0,411$	0,99	0,03
15-Ago	8 CF	AC	$R_{660} = 6,19E-3 x - 0,354$	0,99	0,03

RMSE= raiz quadrada do erro quadrático médio, cf – com filtro ND, sf – sem filtro ND, somente com polarizador, TA=todos alvos, AC= alvos em tons de cinza, x= número digital da imagem, R₆₆₀ = reflectância na banda do vermelho, adimensional.

Tabela 2.6. Modelos melhores ajustados para estimativa da reflectância na banda do infravermelho próximo nos onze dias avaliados.

Dia	Horário/ Filtro	Grupo de alvos	Equação	R ²	RMSE (Adimensional)
6-Jun	8 CF	AC	$R_{850} = 1,88E-2 x - 0,304$	0,98	0,04
13-Jun	8 CF	AC	$R_{850} = 8,89E-3 x - 0,243$	0,99	0,02
20-Jun	8 CF	AC	$R_{850} = 4,14E-2 x - 0,596$	1,00	0,01
27-Jun	12 CF	AC	$R_{850} = 1,02E-2 x - 0,223$	0,99	0,02
4-Jul	8 CF	AC	$R_{850} = 9,99E-3 x - 0,204$	0,98	0,04
11-Jul	8 CF	AC	$R_{850} = 6,18E-2 x - 0,249$	0,97	0,05
18-Jul	8 SF	AC	$R_{850} = 6,23E-3 x - 0,602$	0,97	0,05
25-Jul	8 CF	AC	$R_{850} = 1,06E-2 x - 0,235$	0,98	0,04
1-Aug	8 SF	AC	$R_{850} = 8,20E-3 x - 0,299$	0,98	0,04

8-Aug	8 CF	TA	$R_{850} = 1,33E-2 x - 0,188$	0,98	0,04
15-Aug	8 CF	TA	$R_{850} = 1,38E-2 x - 0,186$	0,98	0,04

RMSE= raiz quadrada do erro quadrático médio, cf – com filtro ND, sf – sem filtro ND, somente com polarizador, TA=todos alvos, AC= alvos em tons de cinza, x= número digital da imagem, R850 = reflectância na faixa do infravermelho próximo, adimensional.

Na banda do infravermelho próximo (Tabela 2.6), o voo das oito horas da manhã com filtro ND apresentou melhor ajuste de modelo em 72,73% dos dias avaliados. Em 81,82% dos dias o grupo com alvos em tons de cinza gerou melhores ajustes do que o grupo com todos os alvos. O RMSE dos modelos gerados a partir dos voos escolhidos para a calibração não ultrapassou 0,5 em nenhum dos dias analisados.

Em sete dias avaliados, as condições de voo e grupo de alvos que apresentaram os modelos de melhor ajuste para as bandas do vermelho e do infravermelho foram diferentes. Tal fato pode ser em decorrência das características do material utilizado para a confecção das placas de calibração. Os alvos apresentaram comportamento espectral, medido utilizando um espectroradiômetro, distintos nas duas bandas avaliadas. Diante disso, torna-se possível que a condição de voo e o grupo de alvos de melhor ajuste para a banda do vermelho não seja o de melhor ajuste para a banda do infravermelho próximo. Este comportamento também foi observado por Wang e Myint (2015) ao proporem método de calibração radiométrica, no qual o alvo utilizado refletia mais energia no visível do que na região do infravermelho próximo, sendo necessário equações de calibração específicas para cada banda. Além disso, por mais que se trate de um mesmo sensor de captura das imagens, não necessariamente o valor de número digital das distintas bandas apresenta a mesma escala, com isso o ajuste para elas será diferente (PONZONI et al., 2012). Dessa forma, como as imagens encontram-se compostas dessas duas bandas é necessário que seja utilizado uma condição em comum para a calibração.

A partir das Tabelas 2.3 e 2.4 pode-se perceber que os modelos ajustados para todos voos, com exceção do de oito horas da manhã com filtro ND apresentaram RMSE acima de 0,11 para a banda do vermelho. Já para a banda do infravermelho, em todas as condições de voo os valores RMSE obtidos foram iguais ou menores à 0,10. Este comportamento, com maiores erros quadráticos médios para a banda do vermelho foi verificado em todos os dias avaliados. Diante disso, optou-se por definir as condições de voo e o grupo de alvos de calibração para cada dia com base nos melhores ajustes de modelo encontrados na banda do vermelho.

Na Tabela 2.7 são apresentados os modelos utilizados para a calibração da banda do infravermelho, em concordância com as condições de voo e grupo de alvos com melhor resposta para a banda do vermelho. Nos dias 6, 13 e 20 de junho e 25 de julho os modelos utilizados para calibração foram os que apresentaram melhores ajustes também na banda do infravermelho. Para os outros dias, por mais que não tenham sido escolhidos os melhores ajustes para a banda do infravermelho, o coeficiente de determinação encontrado foi acima de 0,94 com raiz quadrada do erro quadrático médio máximo de 0,07.

Tabela 2.7. Modelos utilizados para estimativa da reflectância na banda do infravermelho próximo nos onze dias avaliados.

Dia	Horário/ Filtro	Grupo de alvos	Equação	R ²	RMSE (Adimensional)
6-Jun	8 CF	AC	$R_{660} = 1,88E-2 x - 0,304$	0,98	0,04
13-Jun	8 CF	AC	$R_{660} = 8,89E-3 x - 0,243$	0,99	0,02
20-Jun	8 CF	AC	$R_{660} = 4,14E-2 x - 0,596$	1,00	0,01
27-Jun	8 SF	AC	$R_{660} = 1,05E-2 x - 0,208$	0,99	0,03
4-Jul	12 CF	AC	$R_{660} = 1,73E-2 x - 0,276$	0,96	0,05
11-Jul	8 SF	AC	$R_{660} = 1,72E-2 x - 0,274$	0,96	0,06
18-Jul	12 CF	TA	$R_{660} = 5,52E-3 x$	0,94	0,07
25-Jul	8 CF	AC	$R_{660} = 1,06E-2 x - 0,235$	0,98	0,04
1-Ago	8 CF	AC	$R_{660} = 2,73E-2 x - 0,385$	0,98	0,04
8-Ago	8 CF	AC	$R_{660} = 1,34E-2 x - 0,193$	0,97	0,05
15-Ago	8 CF	AC	$R_{660} = 1,40E-2 x - 0,203$	0,97	0,05

RMSE= raiz quadrada do erro quadrático médio, cf – com filtro ND, sf – sem filtro ND, somente com polarizador, TA=todos alvos, AC= alvos em tons de cinza, x= número digital da imagem, R₆₆₀ = reflectância na banda do vermelho, adimensional.

2.3.3. Calibração Radiométrica

Nas Figuras 2.6 e 2.7 são apresentados os mosaicos obtidos após a calibração radiométrica dos mesmos para a banda do vermelho e do infravermelho, respectivamente. As Figuras são compostas de um mosaico do dia 06 de junho (Figuras 2.6a e 2.7a) e de ampliações de uma área do mosaico comum à todos os outros dez dias avaliados (Figuras 2.6b a 2.6k e Figuras 2.7b a 2.7k).

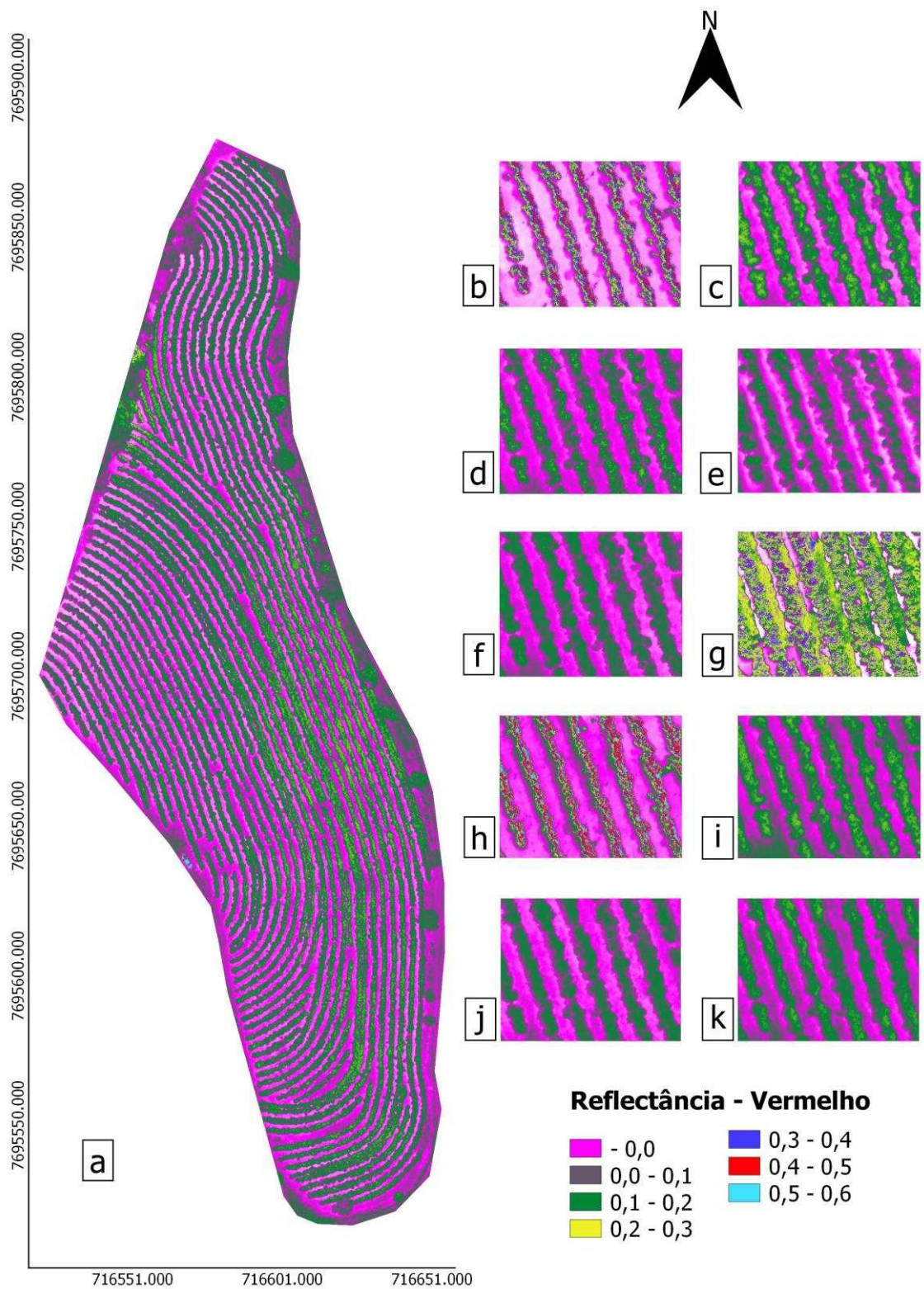


Figura 2.6. Mosaico da banda do vermelho do dia 06 de junho e ampliação do mosaico dos demais dias avaliados obtidos após calibração radiométrica. a) 06 de junho. b) 13 de junho. c) 20 de junho. d) 27 de junho. e) 04 de julho. f) 11 de julho. g) 18 de julho. h) 25 de julho. i) 01 de agosto. j) 08 de agosto. k) 15 de agosto.

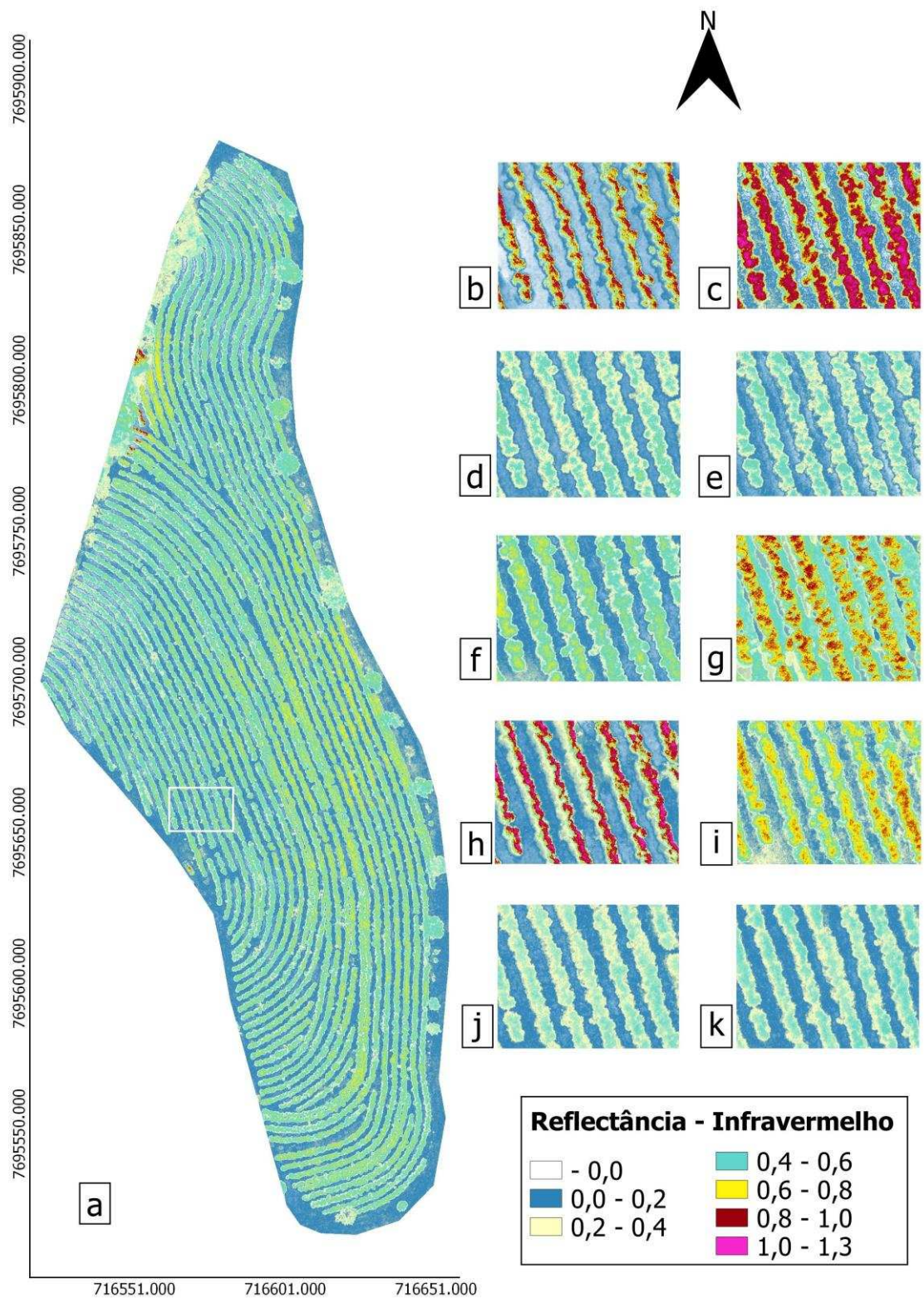


Figura 2.7. Mosaico da banda do infravermelho do dia 06 de junho e ampliação do mosaico dos demais dias avaliados obtidos após calibração radiométrica. a) 06 de junho. b) 13 de junho. c) 20 de junho. d) 27 de junho. e) 04 de julho. f) 11 de julho. g) 18 de julho. h) 25 de julho. i) 01 de agosto. j) 08 de agosto. k) 15 de agosto.

Em todos os dias avaliados, com exceção do dia 18 de julho, foi possível distinguir o solo das fileiras de café arábica. De maneira geral, os valores de reflectância na banda do vermelho (Figura 2.6) encontrados para o solo por meio da calibração proposta foram negativos, atingindo em algumas áreas valores positivos de até 0,1.

A reflectância na banda do vermelho (Figura 2.6) encontrada para o solo não foi satisfatória, uma vez que este valor deve variar entre 0 e 1. Apesar de ainda possuir algumas áreas com reflectância positiva, os valores de até 0,1 não possuem concordância com o que é encontrado na literatura para um solo com as características em questão, Latossolo Vermelho Amarelo. Segundo D'Arco et al. (2003), essa classe de solo, em condições de laboratório, apresenta reflectância na banda do vermelho de aproximadamente 0,3, resultado também encontrado por Bahia et al. (2018). Estudo realizado por Vasques et al. (2014) encontraram para o Latossolo reflectância em torno de 0,2 na camada de 0-20 cm, fator de reflectância esse obtido também por Demattê et al. (2005) ao analisar dados ETM- Landsat 7.

Para as plantas de café arábica (Figura 2.6), em fase de maturação dos frutos e posterior colheita, foram encontrados valores de reflectância na banda do vermelho variando de 0,1 a aproximadamente 0,6 nos dias avaliados (Figura 2.6). No dia 06 de junho, as fileiras de planta apresentaram reflectância na banda do vermelho entre 0,1 e 0,3, em que as bordas possuíam valores até 0,2 e a parte central da copa das plantas valores até 0,3. Este comportamento foi verificado também para os dias 20 e 27 de junho, 04 e 11 de julho, e 01 e 15 de agosto.

A variação de reflectância na banda do vermelho (Figura 2.6) entre a parte central e copa da planta encontradas para os dias 6, 20 e 27 de junho, 4 e 11 de julho, e 01 e 15 de agosto pode ser decorrente do sombreamento de uma fileira de plantas sobre a outra. Isso porque, para a escolha das melhores condições de voo, incluindo o horário, levou-se em consideração as condições que apresentaram o melhor ajuste de modelo. Em 72,73% dos dias avaliados, a calibração foi realizada em imagens obtidas nos voos das oito horas da manhã, horário do dia, que na presença de céu limpo, acarreta em maior sombreamento do que o horário de meio dia. Além disso, o terreno declivoso aumenta o sombreamento entre fileiras. O sombreamento das fileiras de plantas, uma sobre a outra, também pode ser o responsável pelos valores negativos obtidos após a calibração para o solo, uma vez que nas imagens sem calibração, os valores em número digital dessas áreas sombreadas eram inferiores aos encontrados para o alvo de menor reflectância na banda do vermelho do painel de calibração.

No dia 13 de junho (Figura 2.6b) a reflectância na banda do vermelho das fileiras de planta ficou entre 0,3 e 0,6, assim como verificado no dia 25 de julho (Figura 2.6h), entretanto, neste dia, quase a totalidade da copa das plantas apresentou reflectância entre 0,5 e 0,6. No mapa de reflectância da banda do vermelho do dia 18 de julho, as fileiras de plantas não estavam visualmente definidas, o que dificultou a identificação do que efetivamente era copa da planta.

Em dois dos onze dias avaliados (Figuras 2.6e e 2.6f), porções da área de estudo obtiveram dados de reflectância na banda do vermelho negativa para solo e planta. Estes dias estão concentrados no mês de julho, dias 04, 11. Estes valores negativos encontrados após a calibração são justificados pela presença de nuvens no momento do voo. As nuvens não impedem a visualização da área, entretanto a sombra oriunda dessas nuvens prejudica o processo de calibração, uma vez que as condições de luminosidade sobre os alvos não são as mesmas sobre a totalidade da área da lavoura avaliada.

Os valores de reflectância na banda do vermelho observados na Figura 2.6 para as plantas de café são superiores aos encontrados na literatura. Bispo et al. (2014), ao analisarem imagens Modis, obtiveram valores de reflectância na banda do vermelho de aproximadamente 0,06 para o cafeeiro em situações de estação chuvosa e seca. Já Moreira et al. (2004), ao realizarem análise espectral da cultura do café arábica com imagens Landsat, encontraram valores médios de reflectância na banda do vermelho para o café em produção variando de 0,09 a 0,33. Os valores mais elevados encontrados por Moreira et al. (2004), acima de 0,21 foram obtidos após a colheita. Na colheita, ocorre maior derriça das folhas o que acarreta na redução da absorção de energia eletromagnética e na contribuição do solo – que possui reflectância maior que a planta no valor de reflectância do pixel, de 30 metros de resolução espacial.

Apesar de parte da aquisição das imagens obtidas pela câmera modificada ter sido realizada após o início da colheita de café na área, a derriça das folhas não gera redução no valor de reflectância devido a presença de solo na imagem, como acontece nas imagens de satélite no período pós colheita, em que há uma mistura espectral dos componentes solo e planta. A resolução espacial das imagens adquiridas a partir do VANT, de 2,1 cm, impede que haja essa mistura espectral entre solo e planta, sendo possível analisar pixels puros compostos somente de informação de reflectância da planta. Diante disso, os valores obtidos de reflectância na banda do vermelho para o cafeeiro arábica utilizando imagens obtidas a partir de veículo aéreo não tripulado devem se aproximar de dados de pixel puro com cafeeiro gerados a partir de imagens de satélite.

Na banda do infravermelho próximo (NIR) (Figura 2.7), assim como na banda do vermelho também foi possível a distinção entre o solo e as fileiras de café arábica, com exceção do dia 18 de julho. A reflectância para o solo em oito dos onze dias avaliados ficou entre 0,0 e 0,2. Nos dias 20 de junho e 01 de agosto os valores obtidos variaram entre 0,0 e 0,4. No dia 18 de julho, os modelos ajustados para a banda do vermelho e do infravermelho próximo foram os que apresentaram a maior raiz quadrada do erro quadrático médio quando comparado aos modelos ajustados para os demais dias. Tal fato pode ser o motivo pelo qual os valores de reflectância obtidos no dia 18 tenham apresentado comportamento muito distinto dos demais dias.

Os valores de reflectância na banda do infravermelho próximo entre 0,0 e 0,2 observados na Figura 2.7 são inferiores aos encontrados por Bahia et al. (2018) e Arco et al. (2003) que obtiveram fatores de reflectância para o Latossolo Vermelho-Amarelo entre 0,3 e 0,4. Já Bispo et al. (2014), ao analisarem imagens Modis em uma região com predominância de solos latossolo, entissolo, alfissolo e Argissolo, observaram valores de reflectância na banda NIR para o solo de em torno de 0,2 no período chuvoso, e de aproximadamente 0,25 no período seco.

Os valores de reflectância na banda do infravermelho próximo encontrados após a calibração radiométrica para o café arábica variaram entre 0,4 e 1,3 (Figura 2.7). Os dias 13, 20 de junho e 25 de julho obtiveram valores superiores à 1 na parte central da copa do cafeeiro, em discordância com os limites para este parâmetro. Nos mosaicos com informações em número digital obtidos nestes dias, o alvo de maior reflectância na banda do infravermelho, o branco, apresentou número digital inferior ao da planta o que acarretou em valores de reflectância após a calibração radiométrica acima de 1. Esse comportamento do alvo em relação a planta, específico para estes dias, pode ser em decorrência das características do material utilizado para a confecção dos alvos, material esse de comportamento anisotrópico, que reflete de forma distinta quando avaliada de diferentes ângulos.

No dia 01 de agosto (Figura 2.7i) foi observado para as bordas das fileiras de cafeeiro valores de reflectância na banda do infravermelho próximo entre 0,4 até 0,6, aumentando gradativamente até atingir valores aproximados de 1,0 na parte central da copa. Em seis dos onze dias avaliados, 6 e 27 de junho, 4 e 11 de julho, e 8 e 15 de agosto, parte predominante da área de estudo apresentou reflectâncias entre 0,4 e 0,8, principalmente valores próximos à 0,6.

Como já mencionado, os mosaicos são compostos pelas duas bandas aqui avaliadas, dessa forma, os efeitos observados na banda do vermelho em decorrência da presença de nuvens no momento do voo, também são observadas nos resultados obtidos na banda do infravermelho próximo. As sombras decorrentes da presença de nuvens presentes durante os voos dos dias 04, 11 de julho reduziram o fator de reflectância na banda do infravermelho encontrado para o solo, aproximando-o de 0, e também da planta para valores entre 0,2 e 0,4. Além do sombreamento ocasionado pela presença de nuvens, há o sombreamento das próprias fileiras, que novamente gera nas fileiras de café, bordas com fatores de reflectância na banda do infravermelho inferiores aos observados na parte central das copas.

Os valores de reflectância na banda do infravermelho próximos a 0,6 observados em seis dos onze dias avaliados (Figura 2.7a, 2.7d, 2.7e, 2.7f, 2.7j, 2.7k), corroboram os encontrados por Bispo et al. (2014) e Moreira et al. (2004). Bispo et al. (2014), ao analisarem pixels puros com cafeeiro em imagens Modis, encontraram reflectância na banda do infravermelho próximo a 0,6. Moreira et al. (2004) também encontraram valores variando de 0,4 a 0,6. Os menores valores obtidos foram na pós-colheita dos frutos de café, aumentando assim a contribuição do solo nos valores de reflectância. Ao contrário do que acontece na banda do vermelho, em que a presença de solo tende a aumentar a reflectância do pixel com café, na banda do infravermelho, essa contribuição tende a diminuir a reflectância da vegetação em questão. Isso porque, o solo apresenta reflectância neste comprimento de onda inferior ao do café.

Além dos fatores já mencionados que podem comprometer a confiabilidade dos dados gerados pela câmera Zenmuse X3 modificada, como presença de nuvens durante o voo e sombra entre as fileiras, outros fatores também podem afetar negativamente os resultados, como a geometria de aquisição dos dados e as características da câmera. A geometria de aquisição dos dados radiométricos relacionada aos ângulos de visada e de incidência da fonte de iluminação é de difícil controle, e conforme Monteiro et al. (2009) a variação destes ângulos pode afetar significativamente os valores de reflectância. Em seu estudo, Monteiro et al. (2009) verificaram que a planta do feijão, superfície de comportamento anisotrópico, apresentou reflectâncias distintas quando avaliada de diferentes ângulos de visada

Outro fator que pode estar influenciando negativamente, principalmente nos resultados observados para a banda do vermelho, é o sensor da câmera e a qualidade da mesma após o processo de modificação. O sensor da câmera Zenmuse X3, o CMOS é

sensível ao infravermelho próximo, porém um filtro que bloqueava a passagem da energia eletromagnética deste comprimento de onda foi retirado. Com a retirada deste filtro para a passagem desta energia, responsável por gerar a banda 3 – do infravermelho próximo – a banda do vermelho também passa a sofrer interferência da energia eletromagnética referente ao comprimento de onda do infravermelho próximo. Desta forma, na banda 1, referente a banda do vermelho, obtém-se energia eletromagnética referente ao comprimento de onda do vermelho, com acréscimo da referente ao do infravermelho próximo.

2.4. CONCLUSÕES

- Os voos realizados as oito horas da manhã com a presença de filtro densidade neutra foram os que apresentaram os modelos de melhores ajustes para calibração;
- O grupo de alvos composto pelos cinco alvos em tons de cinza (branco, cinza claro, cinza intermediário, cinza escuro e preto) permitiu a obtenção de modelos que apresentaram melhores ajustes para calibração do que o grupo composto de oito alvos;
- Não foram observados valores de reflectância após calibração radiométrica em total concordância com o encontrado na literatura. Com isso, a calibração proposta não é recomendada para a câmera Zenmuse X3 modificada.

2.5. AGRADECIMENTOS

Á Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro na execução deste projeto.

2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- D'ARCO, E.; ALVARENGA, B. S.; MOURA, P.; TEIXEIRA, C. G. Estudos de reflectância de amostras de 5 tipos de solos brasileiros, em condições de laboratório. **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Belo Horizonte, p. 2327-2334. 2003.
- ARTIOLI, F. & BELONI, T. Diagnóstico do perfil do usuário de Drones no Agronegócio Brasileiro. **Revista iPecege**, v. 2, n. 3, p. 40-56, 2016.
- BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES, J.; LA SCALA, N.; CERRI, P.; EDUARDO, C.; CAMARGO, L. A. Prediction and Mapping of Soil Attributes using Diffuse Reflectance Spectroscopy and Magnetic Susceptibility. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 6, p. 1450-1462, 2017.
- BISPO, R. C.; LAMPARELLI, R. A.; Rocha, J. V. Using fraction images derived from MODIS data for coffee crop mapping. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 102-111, 2014.
- 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.
- DEMATTÊ, J. A. M.; MORETI, D.; DE VASCONCELOS, A. C. F.; GENÚ, A. M. Uso de imagens de satélite na discriminação de solos desenvolvidos de basalto e arenito na região de Paraguaçu Paulista. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 7, p. 697-706, 2005.
- ESPIG, S. A.; REIS, I. A.; ARAÚJO, E. P.; FORMAGGIO, A. R. Relação entre o fator de reflectância e o teor de Óxido de Ferro em Latossolos Brasileiros. **Anais XII Simpósio De Sensoriamento Remoto**, v. 12, p. 371-379, 2005.
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. Oficina de Textos, 2007.
- JORGE, L. D. C. & INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. **Embrapa Instrumentação-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2014.
- HRUSKA, R.; MITCHELL, J.; ANDERSON, M.; GLENN, N. F. 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.
- 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.
- LU, B.; HE, Y. Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) - acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 128, p. 73–85, 2017.
- MIYOSHI, G. T. **Caracterização espectral de espécies de Mata Atlântica de Interior em nível foliar e de copa**. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Curso de Pós-graduação em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente – SP, 2016.
- MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 3, p. 223-231, 2004.

- MONTEIRO, P. F. C.; ANGULO FILHO, R.; MONTEIRO, R. O. C.; TAVARES, A. C. S. Influência da geometria de aquisição de dados radiométricos de campo no comportamento espectral da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Brazilian Journal Of Agriculture-Revista de Agricultura**, v. 84, n. 2, p. 134-144, 2015.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO Y. E.; KUPLICH, T. M.; **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. Oficina de textos, São Paulo, 2012.
- SOLECKI, C. F. Evaluating Unmanned Aerial Vehicle Based Crop Indexing Techniques: Modified Consumer Grade RGB Vs. Multispectral. Retrieved from Kamloops. 2017.
- VASQUES, G. M.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROSSEL, R. A. V.; RAMÍREZ-LÓPEZ, L.; TERRA, F. S. Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. **Geoderma**, v. 223, p. 73-78, 2014.
- 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.

3. Uso de técnicas de Sensoriamento Remoto na identificação do estágio de maturação do café arábica

RESUMO

Maiores produtor mundial de café arábica, o Brasil produziu cerca de 47,5 milhões de sacas beneficiadas no ano de 2018. Um dos aspectos que permite agregar valor ao café é a qualidade, aspecto esse influenciado por fatores como a maturação dos frutos no momento da colheita, geralmente desuniforme. Visando minimizar aspectos que podem depreciar o produto agrícola, técnicas de sensoriamento remoto tem sido utilizadas para monitorar e avaliar o desenvolvimento das culturas. Para isso, Veículos aéreos não tripulados (VANT)s, satélite, e sensores terrestres têm sido utilizado por permitirem a captura de dados de reflectância da vegetação, parâmetro importante para a estudo do comportamento da vegetação através de índices de vegetação como o NDVI, índice de vegetação da diferença normalizada. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo identificar o índice de maturação dos frutos como indicativo do momento ideal para colheita do café arábica com derriça total, momento este quando a porcentagem de frutos verdes na planta é inferior a 15%, com base em dados NDVI obtidos a partir de câmera colorida modificada acoplada ao VANT, Sentinel-2 e sensor GreenSeeker. Para isso, foi realizada colheita amostral dos frutos do cafeeiro arábica semanalmente ao longo de 5 semanas, frutos estes posteriormente separados em três estágios de maturação e contados. Dados de NDVI das plantas amostradas foram obtidas a partir de GreenSeeker, câmera modificada acoplada ao VANT e satélite Sentinel-2 e posteriormente correlacionados com a porcentagem de frutos verdes. Os valores de NDVIs gerados a partir da câmera modificada acoplada ao VANT, do GreenSeeker e do satélite Sentinel-2 não apresentaram correlação significativa com a porcentagem de frutos verdes, o que faz com que não sejam recomendados como indicativo de momento ideal de colheita.

Palavras-chave: Câmera modificada, Sentinel, GreenSeeker, agricultura de precisão.

ABSTRACT

Largest producer of Arabica coffee, Brazil produced about 47.5 million benefited bags in the year of 2018. One aspect that allows add value to coffee is its quality, this aspect is influenced by factors such as the fruit ripening at the time of harvest, which is usually ununiform. In order to minimize aspects that may depreciate the agricultural product, remote sensing techniques have been used to monitor and evaluate crop development. For this, unmanned aerial vehicles (UAVs), satellite, and ground sensors have been used to allow the capture of vegetation reflectance data, an important parameter for the study of vegetation behavior through vegetation indexes such as NDVI, normalized difference vegetation index. In view of the above, the objective of this study was to identify the maturation index of the fruits as an indicative of the ideal time to start harvesting the Arabica coffee with total meltdown, when the percentage of green fruits in the plant is lower than 15%, based on NDVI data obtained from the modified color camera coupled to the UAV, Sentinel-2 and GreenSeeker sensor. A sample of the fruits of the Arabica coffee was carried out weekly during 5 weeks. Afterwards, the fruits were separated in three maturation stages and counted. NDVI data from the plants sampled were obtained from GreenSeeker, a modified camera coupled to the UAV and Sentinel-2 satellite, and subsequently correlated with the percentage of green fruits in the samples. The values of NDVIs generated from the modified camera attached to the UAV, the GreenSeeker and Sentinel-2 satellite showed no significant correlation with the percentage of green fruits, which makes them not recommended as indicative of the ideal time to start the harvest.

Keywords : Modified camera, Sentinel , GreenSeeker , precision agriculture.

3.1. INTRODUÇÃO

Atividade de grande importância para o cenário agrícola Brasileiro, a cafeicultura ocupa aproximadamente 3,7% de toda área cultivada no país, com cerca de 2,16 milhões de hectares. Com uma produção expressiva de 61 milhões de sacas beneficiadas para o ano de 2018, o Brasil é o principal produtor mundial desse grão. O Estado de Minas Gerais destaca-se na produção do café arábica, detendo cerca de 69% de sua produção nacional, estimada em 47,5 milhões de sacas (CONAB, 2018).

A produção de café com qualidade da bebida superior é uma das formas que o produtor tem de agregar valor ao café arábica. Diversos fatores podem influenciar sobre a qualidade, entre os quais se destacam as condições climáticas da região, o manejo agrícola empregado, e as características genéticas do cultivar empregado, o índice de maturação dos frutos no momento da colheita e o processamento dos grãos (VAAST et al., 2006).

O cafeeiro arábica geralmente apresenta diversas floradas a cada safra, fato que acarreta em uma desuniformidade da maturação dos frutos. Essas múltiplas floradas são decorrentes de aspectos ambientais que incluem distribuição sazonal das chuvas, variações de temperatura e de fotoperíodo (GOUVEIA, 1984). Esse comportamento de florescimento do cafeeiro arábica resulta em frutos em diferentes estágios de maturação no momento da colheita

O ponto ideal para a colheita é quando os frutos atingem a fase de cereja, entretanto, em decorrência da desuniformidade na maturação dos frutos na lavoura, frutos verdes e secos também são colhidos juntamente ao café cereja. A redução na qualidade da bebida se dá pela presença destes frutos verdes, ardidos e pretos, considerados os piores defeitos do café (FAGAN et al., 2011; PIMENTA & VILELA et al., 2003). A maneira de contornar a desuniformidade da maturação dos frutos nas lavouras cafeeiras é por meio da utilização de colheita seletiva, que consiste na colheita de somente frutos maduros. Diante dos elevados custos demandados por este processo, devido à maior necessidade de mão de obra para a sua realização, a colheita com derriça total é a mais usada no Brasil. De modo a evitar ao máximo a presença de frutos com características indesejáveis, recomenda-se que a colheita com derriça total dos frutos seja iniciada no momento em que a lavoura tenha porcentagem de frutos verdes inferior a 15%.

Em meio aos desafios da agricultura, a agricultura de precisão surge com o objetivo de otimizar o processo produtivo. Para isso, técnicas de sensoriamento remoto tem sido cada vez mais empregadas no monitoramento dos cultivos, e incluem a utilização

de plataformas como veículos aéreos não tripulados, satélites e sensores terrestres. A partir destas plataformas é possível captar dados de reflectância da superfície terrestre de modo a monitorar o desenvolvimento das culturas e também o vigor por meio de índices de vegetação. A utilização de VANT para estes fins permite a obtenção de dados de maior resolução espacial, na casa de centímetros, enquanto, imagens obtidas a partir de satélite possuem menor resolução espacial, como no caso do Sentinel-2 de 10 metros. Além disso, imagens de satélite podem sofrer alta interferência de nuvens. O GreenSeeker, sensor terrestre, também permite o mapeamento do vigor da planta através de índice de vegetação e utiliza tais informações como indicador para a aplicação de adubo a taxas variáveis.

O NDVI, índice de vegetação da diferença normalizada, é amplamente utilizado por captar as variações de vigor da vegetação (FORMAGGIO & SANCHES, 2017). Por essa sensibilidade ao vigor, o NDVI apresenta comportamentos distintos ao longo do ciclo fenológico de algumas culturas, como o cafeeiro (ALMEIDA et al., 2017). Além de variações ao longo do ciclo fenológico da cultura, as plantas do cafeeiro podem apresentar respostas espectrais distintas ao longo do período de maturação dos frutos conforme observado por Herwitz et al. (2004), ao analisarem imagens da banda do visível obtidas a partir de VANT. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo identificar o momento ideal para colheita do café arábica com derriça total, momento este quando a porcentagem de frutos verdes na planta é inferior de 15%, com base em dados de índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) obtidos a partir de diferentes técnicas de sensoriamento remoto, que são elas: Imagens obtidas a partir de câmera modificada acoplada à VANT, imagens de satélite Sentinel-2 e dados de GreenSeeker. Além disso, visa comparar o NDVI obtido a partir da câmera modificada com as demais técnicas.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado na Fazenda do Alemão, localizada no município de Paula Cândido, região da Zona da Mata, MG. O talhão avaliado encontra-se na coordenada 20,82° S e 42,91 W. Segundo Köppen, o clima da região é classificado como Cwa, Subtropical úmido, com verão chuvoso e inverno seco. O talhão escolhido para a coleta de dados possui uma área de 2,56 ha e encontra-se cultivado com a cultura do café arábica,

cultivar Catuaí, espaçados 2,5m entre fileiras e 1,0m entre plantas. O cafeeiro tinha cerca de 15 anos.

3.2.2. Colheita dos frutos para avaliação, coleta de pontos de controle e obtenção de dados de NDVI utilizando greenseker

Com o intuito de avaliar a maturação dos frutos, foram colhidas amostras na lavoura semanalmente do período de 06 de junho à 04 de julho de 2018, data em que deu-se início a colheita total do talhão com derrigadoras. No total foram realizadas cinco avaliações. O número de plantas amostradas foi variável ao longo dos dias de avaliação, entre 19 e 23, uma vez que eram escolhidas ao acaso, adotando distância entre elas de, aproximadamente, 25 metros. O cafeeiro era colhida nos três terços: superior, médio e inferior, sendo meio litro de frutos por terço da planta. As plantas amostradas foram georreferenciadas com aparelho GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) topográfico (L1), da marca Trimble (Trimble Navigation, Sunnyvale, Califórnia, EUA), modelo Pro XT, e tiveram o NDVI medido, no mesmo momento da colheita de frutos, por meio da utilização do GreenSeeker (Trimble Navigation, Sunnyvale, Califórnia, EUA), com uma leitura por planta, posicionado-o acima da copa, a aproximadamente 60 centímetros de distância da planta. Também com o GNSS Topográfico foram coletados seis pontos ao acaso no entorno do talhão para posterior georreferenciamento dos mosaicos.

Em laboratório, os frutos colhidos de cada planta foram separados em três classes de maturação: verde, maduro e seco. Em seguida, contou-se a quantidade de frutos pertencentes a cada classe de modo a obter a porcentagem das mesmas para cada planta amostrada na área.

3.2.3. Aquisição das imagens utilizando veículo aéreo não tripulado e processamento

Para aquisição das imagens foi utilizado o VANT multi-rotor DJI Matrice 100 com acoplamento para câmera Zenmuse X3. A câmera em questão, originalmente RGB de fabricação DJI, foi modificada pela Aerial Media Pros (Costa Mesa, Califórnia, EUA), resultando em uma câmera capaz de capturar imagens na banda do vermelho e do infravermelho, bandas de interesse para o cálculo do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI).

As imagens foram coletadas simultaneamente à colheita de frutos, nos cinco dias de avaliação no horário das oito horas da manhã. A elaboração do plano de voo foi feito

pelo aplicativo Precision Flight (Precision Hawk, Raleigh, Carolina do Norte, EUA), em que foi fixado altitude de voo de 50 metros, resultando em uma duração aproximada de seis minutos. Com o intuito de reduzir efeitos da configuração da câmera nas imagens adquiridas, estipulou-se um padrão para todos os voos. O indicador de sensibilidade do sensor da câmera à luz ambiente, ISO, utilizado foi 100. A velocidade do obturador, o Schutter, foi de 1/200 s, e o balanço de branco mantido como automático. Além disso, empregou-se na câmera o filtro de densidade neutra (ND), responsável por reduzir a quantidade de luz que chega até o sensor da câmera.

Os voos geraram aproximadamente 126 imagens cada, fazendo-se necessário a união das mesmas através da mosaicagem. Para isso, utilizou-se o software computacional AgiSoft PhotoScan (Agisoft LLC., St. Petersburg, Russia), seguindo as etapas de alinhamento dos pontos, construção do modelo digital de elevação em 2D, ortorretificação e por último, geração dos mosaicos. Os mosaicos foram georreferenciados utilizando o software computacional QGIS 3.0 (QGIS Development Team, Open Source Geospatial Foundation, Chicago, IL, EUA) com base nos seis pontos previamente coletados com aparelho GNSS topográfico na área de interesse.

Para calibração radiométrica das imagens, um painel confeccionado com Napa sintética composto de cinco alvos em tons de cinza (preto, branco, cinza claro, cinza intermediário e cinza escuro) foi inserido na área imageada no momento dos voos. Estes mesmos alvos tiveram seus valores de reflectância medidos, em laboratório, por meio da utilização do espectroradiômetro (Boulder, Colorado, EUA). De posse destes dados foi possível gerar um modelo de calibração para cada banda em cada dia. No QGIS 3.0, as bandas foram calibradas separadamente e posteriormente utilizadas para o cálculo de NDVI, com base na equação (3.1), proposta por Rouse et al. (1973).

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (3.1)$$

Em que: ρ_{IV} é a reflectância no comprimento de onda do infravermelho próximo; e ρ_V é a reflectância no comprimento de onda do vermelho.

3.2.4. Aquisição de imagens de satélite e processamento

Imagens Sentinel 2 foram selecionadas do catálogo de imagens do Programa Copernicus, vinculado à Agência Espacial Europeia (ESA), disponível em <https://scihub.copernicus.eu>. Para seleção das imagens utilizou-se como critério imagens obtidas no mesmo dia da colheita dos frutos ou com até um dia de diferença. Diante da presença de nuvens no local de interesse e os dias de passagem do satélite, somente em três datas os critérios propostos foram atendidos, são elas: 13 de junho, 28 de junho e 03 de julho.

As imagens Sentinel 2, de dez metros de resolução espacial, foram processadas no software computacional QGIS 3.0. O pré-processamento foi realizado com a utilização da ferramenta Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), em que os números digitais foram convertidos em valores de reflectância. De posse das reflectâncias das bandas do vermelho (Banda 4) e do infravermelho (Banda 8), o cálculo do NDVI foi realizado conforme a equação (3.1).

3.2.5. Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada por meio da utilização do software estatístico R Studio (RStudio Inc, Boston, MA, EUA) versão 1.0.136. Realizou-se o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade das variáveis porcentagem de frutos verdes, NDVI obtidos a partir de GreenSeeker, câmera a bordo de VANT, e Sentinel-2. Diante da não normalidade observada nas variáveis em questão, utilizou-se a correlação de Spearman para correlacionar os dados de porcentagem de frutos verdes com as variáveis NDVI geradas a partir do Greenseeker, da câmera modificada a bordo de veículo aéreo não tripulado e do satélite Sentinel-2. A reflectância das bandas do vermelho e do infravermelho próximo obtidas a partir da câmera modificada também foram correlacionadas com a porcentagem de frutos verdes. Além disso, de modo a verificar a confiabilidade dos dados de NDVI obtidos a partir da câmera modificada acoplada ao VANT, correlacionou-se seus resultados com os obtidos a partir do GreenSeeker e Sentinel-2 por meio da correlação de Spearman. Para verificar a significância ao nível de 5% das correlações foi aplicado Teste-T.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de NDVI obtidos a partir da câmera modificada acoplada ao VANT e imagens de satélite encontram-se nas Figuras (3.1) e (3.2), respectivamente. A Figura (3.1) é composta de um mosaico do dia 6 de junho e de ampliações de uma área do mosaico comum aos outros quatro dias de avaliação. Na Figura (3.2) são apresentadas imagens de satélite de três dos cinco dias de avaliação, uma vez que para os outros dois dias não haviam imagens Sentinel-2 disponíveis. Como o NDVI é a razão da diferença da banda do infravermelho próximo e da banda do vermelho pelo somatório destas duas bandas, é importante analisar as bandas separadamente que geraram estes valores de NDVI. Essas informações encontram-se na Tabela (3.1).

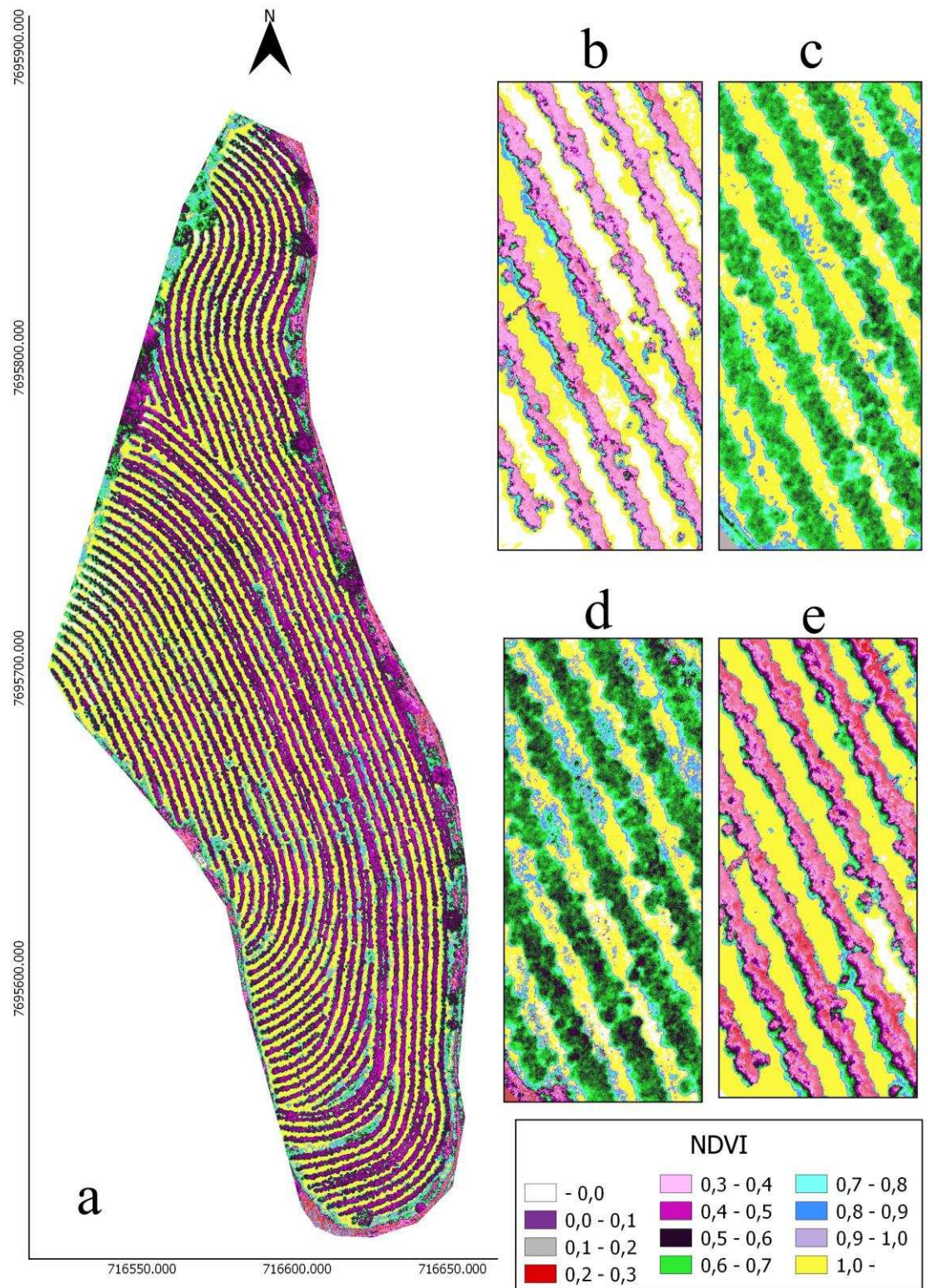


Figura 3.1. Mosaico e ampliação dos mosaicos com resultados de NDVI obtidos a partir de câmera modificada acoplada ao VANT. a) 06 de junho; b) 13 de junho; c) 20 de junho; d) 27 de junho; e) 04 de julho de 2018.

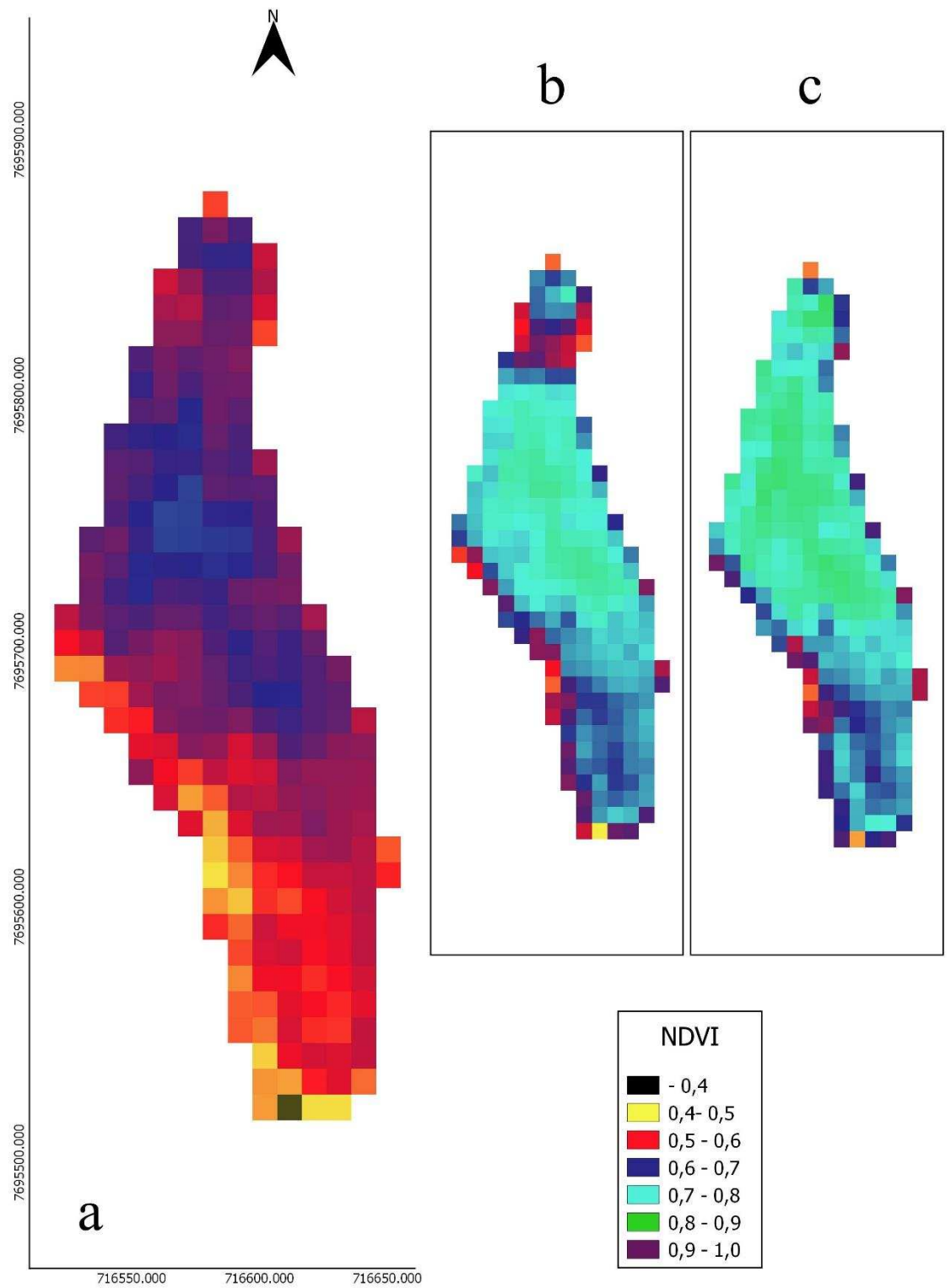


Figura 3.2. Mapas de NDVI obtidos a partir de imagens de satélite Sentinel-2. a) 13 de junho; b) 28 de junho, c) 03 de julho de 2018.

Tabela 3.1. Dados de NDVI, reflectância na banda do vermelho e do infravermelho próximo obtidos a partir de câmera modificada acoplada ao VANT.

Planta	6 De Junho			13 De Junho			20 De Junho			27 De Junho			04 De Julho		
	NDVI	Ver.	Infra.	NDVI	Ver.	Infra.	NDVI	Ver.	Infra.	NDVI	Ver.	Infra.	NDVI	Ver.	Infra.
1	0,57	0,17	0,62	0,50	0,24	0,66	0,66	0,20	0,98	0,66	0,22	1,09	0,41	0,37	0,87
2	0,62	0,14	0,58	0,40	0,36	0,84	0,72	0,13	0,77	0,68	0,18	0,92	0,47	0,23	0,61
3	0,54	0,19	0,64	0,40	0,37	0,84	0,69	0,18	0,96	0,63	0,14	0,63	0,42	0,31	0,75
4	0,52	0,20	0,64	0,39	0,40	0,92	0,65	0,20	0,95	0,60	0,22	0,91	0,44	0,23	0,58
5	0,52	0,20	0,64	0,41	0,34	0,80	0,68	0,16	0,84	0,64	0,25	1,16	0,37	0,49	1,06
6	0,56	0,18	0,63	0,61	0,14	0,47	0,71	0,15	0,89	0,66	0,19	0,93	0,54	0,19	0,56
7	0,55	0,19	0,65	0,85	0,09	0,43	0,68	0,20	1,08	0,67	0,18	0,94	0,42	0,32	0,75
8	0,53	0,20	0,65	0,56	0,16	0,49	0,71	0,16	0,93	0,64	0,23	1,05	0,51	0,16	0,47
9	0,52	0,21	0,67	0,40	0,40	0,93	0,68	0,21	1,10	0,65	0,21	0,98	0,43	0,28	0,66
10	0,54	0,19	0,62	0,41	0,38	0,89	0,68	0,20	1,07	0,64	0,24	1,06	0,40	0,36	0,82
11	0,55	0,20	0,68	0,41	0,38	0,91	0,68	0,19	1,00	0,65	0,25	1,16	0,42	0,30	0,70
12	0,59	0,15	0,58	0,41	0,36	0,87	0,66	0,20	0,98	0,65	0,22	1,02	0,46	0,21	0,55
13	0,54	0,18	0,62	0,39	0,45	1,04	0,68	0,21	1,09	0,65	0,24	1,13	0,38	0,36	0,81
14	0,51	0,22	0,69	0,40	0,40	0,92	0,67	0,22	1,08	0,65	0,19	0,90	0,38	0,42	0,92
15	0,58	0,14	0,52	0,41	0,37	0,88	0,66	0,22	1,10	0,64	0,21	0,97	0,41	0,35	0,79
16	0,50	0,22	0,66	0,39	0,41	0,93	0,68	0,18	0,96	0,64	0,24	1,09	0,43	0,30	0,73
17	0,52	0,22	0,69	0,39	0,40	0,91	0,66	0,22	1,06	0,62	0,26	1,14	0,38	0,42	0,93
18	0,52	0,22	0,68	0,40	0,40	0,92	0,74	0,13	0,84	0,60	0,24	0,93	0,37	0,43	0,93
19	0,51	0,22	0,68	0,43	0,32	0,77	0,73	0,13	0,81	0,66	0,23	1,13	0,39	0,44	0,99
20	0,56	0,19	0,67	0,48	0,25	0,66	0,64	0,20	0,94	0,62	0,21	0,90	-	-	-
21	0,53	0,18	0,60	0,42	0,31	0,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	0,54	0,20	0,67	0,43	0,31	0,74	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	0,42	0,30	0,72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	0,54	0,19	0,64	0,45	0,33	0,79	0,68	0,18	0,97	0,64	0,22	1,00	0,42	0,32	0,76

NDVI (Adimensional); Ver. = Reflectância na banda do vermelho (Adimensional); Infra. = Reflectância na banda do infravermelho próximo (Adimensional).

Ao analisar a Figura (3.1), pode-se observar uma variação de NDVI ao longo dos dias avaliados para a copa do cafeeiro arábica entre 0,30 e 0,70. Nas plantas georreferenciadas na área no dia 6 de junho de 2018, o NDVI encontrado a partir de câmera modificada acoplada ao VANT variaram entre 0,50 e 0,62, com valor médio de 0,54 (Tabela 3.1). Estes valores resultam de um valor médio na banda do infravermelho próximo de 0,64 e na banda do vermelho de 0,19. No dia 13 de junho, com exceção de três plantas que apresentaram NDVI acima de 0,56, as demais tiveram NDVI entre 0,39 e 0,43, no qual os valores médios de reflectância encontrados após a calibração radiométrica para as bandas do infravermelho próximo e do vermelho, foram de 0,79 e 0,33 respectivamente. As plantas número 6, 7 e 8 apresentaram NDVI acima de 0,56. Estes valores de NDVI mais elevados quando comparados ao demais são decorrentes da presença de sombra de outras plantas, fato que reduziu os valores de número digital nas bandas de interesse e acarretou em menores reflectâncias. A planta número 13 com NDVI de 0,39, apresentou reflectância na banda do infravermelho acima de 1,0, valor acima do limite para este parâmetro que varia de 0 a 1. Plantas com reflectância acima de 1,00 após calibração radiométrica na banda do infravermelho próximo também foram verificadas nos dias 20 e 27 de junho e 04 de julho (Figura 3.1c, 3.1d e 3.1e). Os valores médios de NDVI obtidos para as plantas nestes dias foram de 0,68 e 0,64, e 0,42 respectivamente. Estudo realizado por Santos et al. (2009), utilizando imagens MODIS, apresentou média de NDVI para o cafeeiro de 0,71, valor este próximo aos observados nos dias 20 e 27 de junho (Tabela 3.1). Entretanto, os valores de reflectância na banda do infravermelho próximo utilizados para o cálculo de NDVI dos dias 20 e 27 de junho após calibração radiométrica foram superiores a 1, que representa um erro no processo de calibração.

Os valores obtidos após calibração radiométrica acima de 1, que se referem a reflectância para a banda do infravermelho próximo (Tabela 3.1) obtida a partir de câmera Zenmuse X3 modificada podem ser em decorrência de problemas no processo de calibração. Um dos fatores que pode ter influenciado sobre o processo de calibração radiométrica utilizado neste trabalho é a natureza do material utilizado como alvo. O material em questão, a napa sintética é uma superfície anisotrópica, dessa forma, não reflete de maneira igual quando avaliada de diferentes ângulos. Com isso, em alguns dias, o imageamento da placa pode ter sido feito de uma angulação em que não foi captada a máxima reflectância, ainda com informação em número digital. Diante disso, áreas da lavoura apresentaram valores de número digital superiores ao encontrado para o alvo de maior reflectância, medido com espectroradiômetro, o alvo branco, o que ocasionou em

reflectância após a calibração radiométrica acima de 1,00 para a planta de café. Além disso, as camadas de folhas que compõem a copa do cafeeiro podem ter contribuído para valores de reflectância na banda do infravermelho próximo superiores a 1, uma vez que a câmera ao capturar a reflectância, pode ter capturado um somatório das reflectâncias das camadas de folhas dos terços inferiores juntamente ao do terço superior. A disposição destas folhas também pode ter relação com os altos valores de reflectância, já que a inclinação do alvo de interesse, neste caso a planta não reflete de forma igual quando analisada de distintas direções, e não apresenta a mesma inclinação que o alvo utilizado na calibração.

Para o solo, classificado como Latossolo Vermelho-amarelo, quase totalidade da área em todos os dias apresentou NDVI acima de 1 (Figura 3.1). Estes resultados não são satisfatórios, uma vez que o NDVI varia de -1 a 1. Estes valores acima de 1 para NDVI são resultados de valores de reflectância na banda do vermelho inferior a 0 após a calibração, uma vez que esta banda do vermelho é utilizada para o cálculo deste índice de vegetação. A reflectância é um parâmetro que varia de 0 a 1, desta forma os valores de reflectância obtidos após calibração radiométrica para a banda do vermelho também não foram satisfatórios. A presença de valores inferiores a 0 na banda do vermelho se deu em decorrência do sombreamento ocasionado pelas fileiras de plantas. Ao sombrear o solo, os valores de número digital na banda do vermelho dessas áreas foram inferiores aos encontrados para o alvo de menor reflectância, o alvo preto. Com isso, após a calibração radiométrica foram obtidos valores na banda do vermelho inferiores a 0, valor fora dos limites para o parâmetro reflectância. Ao utilizar estes dados negativos na equação de NDVI, os resultados observados foram superiores a 1. Além de ultrapassarem o valor 1, os valores de NDVI são muito superiores aos encontrados por Demarchi et al. (2011) que observaram valores de NDVI para o solo exposto em imagens de satélite MODIS variando entre -1 e 0,2.

Na Figura (3.2), composta de mapas de NDVI obtidos a partir de imagens de satélite Sentinel-2, é possível observar valores de NDVI variando de 0,50 a 0,85. No dia 13 de junho, o NDVI variou entre 0,50 e 0,70. Enquanto nos outros dois dias, dias 28 de junho e 3 de julho os valores de NDVI variaram entre 0,60 e 0,85. Na parte superior da área nos mapas é possível verificar os maiores valores de NDVI para os três dias, isso aconteceu provavelmente devido ao maior adensamento de plantas nessa região. Com maior adensamento de plantas, a contribuição de solo no pixel de 10 por 10 metros, é menor do que nas áreas onde as plantas encontram-se menos adensadas. Dessa forma, o

adensamento de plantas contribui para maiores valores de NDVI quando trabalhado com menores resoluções espaciais, como é o caso do satélite Sentinel-2 de 10 m de resolução.

Os valores de NDVI observados para o café arábica e apresentados na Figura (3.2) corroboram com os obtidos por Mesquita Júnior et al. (2011) que ao estudar as etapas fenológicas do café arábica em imagens MODIS encontraram valores de NDVI variando entre 0,62 e 0,82. Santos et al. (2009), também utilizando imagens MODIS encontraram valores de NDVI para áreas cafeeiras variando entre 0,65 e 0,77, assim como Rafaelli et al. (2006) que encontraram valores de NDVI entre 0,55 e 0,70. Por mais que estes resultados estejam em concordância com os observados na Figura (3.1) para os dias 20 e 27 de junho, os resultados de NDVI obtidos a partir de câmera modificada acoplada ao VANT extrapolam os limites para o parâmetro reflectância na banda do infravermelho próximo. Além disso, os valores de reflectância para a banda do vermelho não estão de acordo com a reflectância de 0,06 encontrada por Bispo et al. (2014) para a planta do café arábica.

Os valores médios de NDVI obtidos a partir da câmera modificada acoplada ao VANT, do Greenseeker e do satélite Sentinel-2 para cada dia de coleta são apresentados na Figura (3.3). Além disso, estão dispostos também o índice de maturação de cada planta para todos os dias, demonstrados na forma de % de frutos verde. Os dados de NDVI extraídos das imagens de satélite, de 10 metros de resolução espacial são referentes ao pixel que continha a planta georreferenciada. Na Tabela (3.2) estão dispostas as correlações de Spearman entre a porcentagem de frutos verdes e o NDVI obtido por diferentes técnicas de sensoriamento remoto, além da correlação entre o NDVI obtido através da câmera modificada acoplada ao VANT e o NDVI obtido pela imagem Sentinel-2 e o obtido pelo sensor Greenseeker.

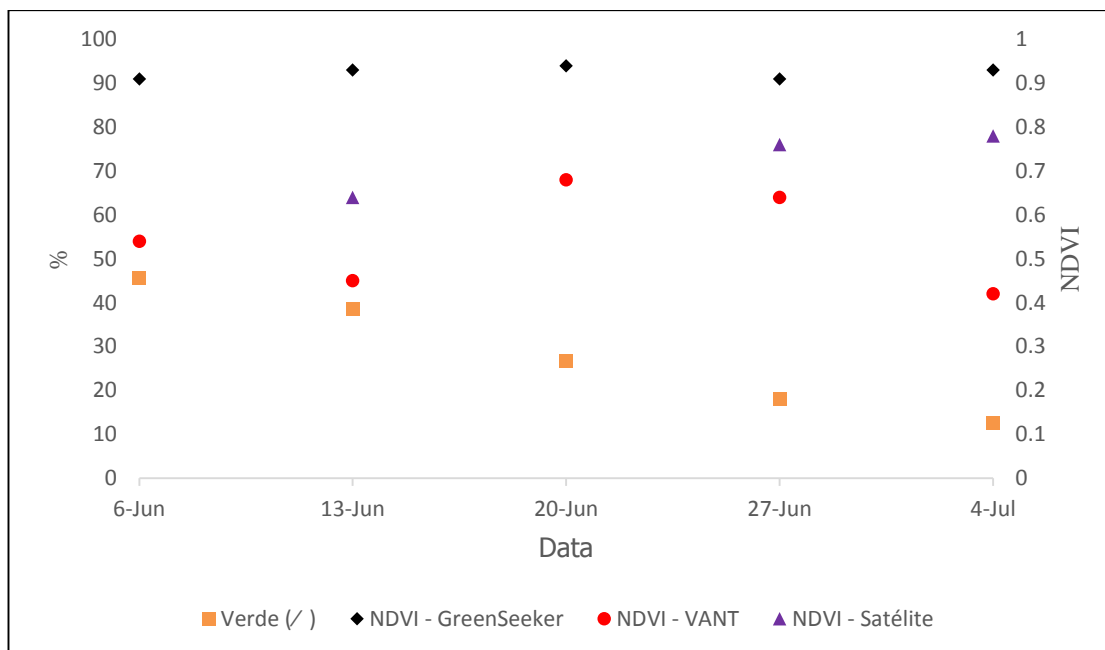


Figura 3.3. Média dos dados de porcentagem de frutos verdes e NDVI obtidos a partir de diferentes técnicas de sensoriamento remoto para os cinco dias de avaliação.

Tabela 3.2. Correlação de Spearman entre a porcentagem de frutos verdes e o NDVI obtido a partir de diferentes técnicas de sensoriamento remoto.

Variáveis/ Data	6-Jun	13-Jun	20-Jun	27-Jun	04 jul
Verde (%) x NDVIg	-0,1344 ns	0,1256 ns	-0,5828*	0,1706 ns	0,0707 ns
Verde (%) x NDVID	-0,3159 ns	-0,3369 ns	-0,1265 ns	-0,1500 ns	-0,0600 ns
Verde (%) x NDVI _s	-	0,4583*	-	0,1930 ns	-0,0405 ns
Verde (%) x Ver.	0,2059 ns	0,3017 ns	0,0535 ns	-0,0121 ns	0,1380 ns
Verde (%) x Infra.	0,1175 ns	0,3059 ns	-0,1476 ns	-0,0256 ns	0,1273 ns
NDVID x NDVIg	0,1458 ns	-0,0366 ns	-0,1175 ns	0,2113 ns	0,1384 ns
NDVID x NDVI _s	-	-0,6736*	-	-0,2972 ns	-0,0788 ns

NDVIg= NDVI greenseeker (Adimensional); NDVID= NDVI por câmera modificada acoplada ao VANT (Adimensional); NDVI_s= NDVI por imagem de satélite (Adimensional).

Ao analisar a Figura (3.3) pode-se observar que a média de NDVI obtido a partir do Greenseeker para os dias avaliados variou entre 0,91 e 0,94. Valores de NDVI acima de 0,90 obtidos por essa mesma técnica de sensoriamento também foram encontrados por Silva et al. (2015). O elevado valor de NDVI encontrado é decorrente do grande volume de folhas nas plantas no período de realização do estudo, previamente ao início da colheita do café. Durante essas cinco semanas de avaliação, a maturação dos frutos apresentou elevada variação. Na primeira semana, as plantas amostradas apresentaram (Figura 3.3) porcentagem de frutos verdes variando entre 20 e 70%, com uma média de 45,61% de

frutos verdes. Nas semanas seguintes as médias de frutos verdes caíram para 38,54%, 26,78%, 18,11%, até atingir na última semana 12,64% de frutos verdes, dentro da faixa de porcentagem de fruto verde ideal para a colheita de café em uma única etapa ideal para o início da colheita (Figura 3.3). Essa elevada variação de maturação não foi acompanhada pela variação de NDVI captado pelo sensor Greenseeker, o que pode ter feito com que a correlação dessas duas variáveis não fosse significativa ao nível de 5% em todos os dias avaliados, com exceção de um dos dias avaliados, 20 de junho (Tabela 3.2). Comportamento também verificado entre os valores de NDVI obtidos por câmera modificada acoplada ao VANT e o GreenSeeker.

O NDVI médio obtido a partir da câmera modificada acoplada ao VANT variou nos dias avaliados entre 0,42 e 0,68 (Tabela 3.1). Seu comportamento não apresentou correlação significativa ao nível de 5% com a variável porcentagem de frutos verdes (Tabela 3.2), com isso não é possível indicar o NDVI obtido a partir desta câmera modificada, Zenmuse X3, acoplada a VANT, como um parâmetro indicativo do índice de maturação dos frutos. Isso porque, além de não ter sido significativo, os valores de reflectância da banda do vermelho e do infravermelho apresentaram médias muito distintas ao longo dos dias, e em alguns casos, ultrapassou o limite máximo possível para reflectância de 1 na banda do infravermelho próximo (Tabela 3.1). Tal fato leva a inferir que possivelmente a calibração realizada nas imagens obtidas a partir da câmera modificada acoplada ao VANT não foi adequada, sendo um provável motivo a natureza do material utilizado para a confecção da placa de calibração. Além disso, a câmera Zenmuse X3 ao ser modificada, teve seu filtro que bloqueava a passagem da energia eletromagnética referente ao comprimento de onda do infravermelho próximo retirada, o que pode ter influenciado sobre os resultados gerados pela câmera, uma vez que o sensor da câmera é sensível a este comprimento de onda. Com isso, a banda do vermelho também passou a sofrer interferência da energia eletromagnética do infravermelho próximo.

O NDVI obtido a partir de imagens Sentinel-2 apresentou correlação positiva com a porcentagem de frutos verdes em um dos dias, 13 de junho (Tabela 3.2). Nos demais dias a correlação entre estas variáveis foi não significativa ao nível de 5%. O dia em questão foi o que apresentou os menores valores de NDVI quando comparado aos demais dias, 28 de julho e 03 de agosto, fato que pode explicar porque somente a correlação do NDVI obtido a partir do Sentinel-2 no dia 13 de junho e a porcentagem de frutos verdes fosse significativa ao nível de 5%. O NDVI obtido por meio do Sentinel-2 apresentou correlação com o NDVI obtido através da câmera modificada acoplada ao VANT, em

apenas um dos dias avaliados (Tabela 3.2). Entretanto, diante dos resultados de reflectância para as bandas do vermelho e do infravermelho obtidos a partir da câmera modificada utilizados para o cálculo do NDVI, não é possível afirmar correlação entre os NDVIs obtidos a partir destas técnicas de sensoriamento remoto, principalmente em razão da não significância observada nos outros dois dias.

As bandas do vermelho e do infravermelho obtidas a partir da câmera modificada acoplada ao VANT também não apresentaram correlação significativa ao nível de 5% com a porcentagem de frutos verdes (Tabela 3.2). A elevada variação de reflectância observada (Tabela 3.1) nestes dias nas duas bandas pode ser em decorrência do processo de calibração utilizado, não permitindo que as alterações de vigor na planta do cafeeiro ao longo da maturação dos frutos se tornassem perceptíveis. Apesar das informações obtidas a partir da plataforma VANT, com câmera modificada acoplada, não terem apresentado correlação com a porcentagem de frutos verdes na planta, utilizado como indicativo de momento ideal para colheita, Furfaro et al. (2005) propôs um modelo de estimativa de maturação dos frutos do cafeeiro com base em parâmetros incluindo a reflectância na banda do vermelho, infravermelho próximo obtidos por meio da plataforma VANT, entretanto com câmera originalmente multiespectral. Tal fato mostra que a reflectância oriunda de sensores específicos acoplados a VANTs pode sim ser um parâmetro capaz de captar variação de maturação dos frutos, não sendo este o caso da câmera Zenmuse X3 modificada, originalmente RGB. Estudo realizado por Herwitz et al. (2004) também demonstra isso, uma vez que a partir de índice de vegetação derivado de bandas do visível verificou-se relação positiva com a porcentagem de frutos maduros.

3.4. CONCLUSÕES

- O NDVI gerado a partir da câmera modificada acoplada ao VANT não apresentou correlação com a porcentagem de frutos verdes. Já os NDVIs obtidos a partir do GreenSeeker e do satélite Sentinel-2 apresentaram correlação com a porcentagem de frutos verdes em apenas um dos dias avaliados.

- Diante disso, nenhuma das técnicas de sensoriamento remoto aqui propostas são indicadas para a identificação do índice de maturação dos frutos e como indicativo de momento ideal de colheita.

3.5. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro na execução deste projeto.

3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, T. S.; SEDIYAMA, G. C.; ALENCAR, L. P. Estimativa da produtividade de cafeeiros irrigados pelo método zona agroecológica espectral. **Revista Engenharia Na Agricultura-REVENG**, v. 25, n. 1, p. 1-11, 2017.
- BISPO, R. C.; LAMPARELLI, R. A.; ROCHA, J. V. Using fraction images derived from Modis data for coffee crop mapping. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 102-111, 2014.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de café, v. 5– Safra 2018, n.4- Quarto levantamento, Brasília, p. 1-84, 2018. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe> > Acesso em: 20 de jan de 2019.
- DE CAMARGO, A. P. Florescimento e frutificação de café arábica nas diferentes regiões (cafeiras) do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 20, n. 7, p. 831-839, 1985.
- DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; & ZIMBACK, C. R. L. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz do Rio Pardo–SP usando imagens LANDSAT-5. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 21, 2011.
- FAGAN, E. B.; SOUZA, C. H. E.; PEREIRA, N. M. B.; MACHADO, V. J. Efeito do tempo de formação do grão de café (*Coffea* sp) na qualidade da bebida. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 5, 2011.
- FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. Sensoriamento remoto em Agricultura. **São Paulo: Oficina de Textos**, 2017.
- FURFARO, R.; GANAPOL, B. D.; JOHNSON, L. F.; HERWITZ, S. "Model-based neural network algorithm for coffee ripeness prediction using Helios UAV aerial images," Proc. SPIE 5976, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VII, 59760X, 2005.
- GOUVEIA, N.M. **Estudo da diferenciação e crescimento das gemas florais de Coffea arabica L.: observações sobre antese e maturação dos frutos**. 237 f. Dissertação (Mestrado em Biologia) – Instituto de Biologia, UNICAMP, Campinas. 1984.
- HERWITZ, S. R.; JOHNSON, L. F.; DUNAGAN, S. E.; HIGGINS, R. G.; SULLIVAN, D. V.; ZHENG, J.; LOBITZ, B. M.; LEUNG, J. G.; GALLMEYER, B. A.; AOYAGI, M.; SLYE, R. E.; BRASS, J. A. Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. **Computers and electronics in agriculture**, v. 44, n. 1, p. 49-61, 2004.
- MESQUITA JÚNIOR, C.H.; VOLPATO, M.M.L.; ALVES, H.M.R.; VIEIRA, T.G.C.; MEIRELES, E.J.L. Comportamento do índice espectral NDVI em áreas cafeiras

- de Prês Pontas, MG, nos anos de 2008-2009. In: VII Simpósio de Pesquisas dos Cafés do Brasil. 2011. Araxá. **Anais...Araxá: 2011.**
- PIMENTA, C.J.; VILELA, E.R. Efeito do tipo e época de colheita na qualidade do café (*Coffea arabica* L.). **Acta Scientiarum: Agronomy**, v.25, p.131-136, 2003.
- RAFAELLI, D. R.; MOREIRA, M. A.; FARIAS, R. Análise do potencial de dados MODIS para monitorar o impacto de geada em nível estadual e em lavouras de café. **Agricultura em São Paulo**, v. 53, n. 1, p. 5-15, 2006.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3. Washington. Proceedings...Washington: NASA, Goddard Space Flight Center, 1973. v.1, p. 309-317. 1973.
- SANTOS, W.J.R.; VOLPATO, M.M.L.; ALVES, H.M.R.; VIEIRA T.G.C.; SOUZA, V.C.O. **Variação** Temporal do Índice de Vegetação de Lavouras Cafeeiras Utilizando Produtos do Sensor MODIS/TERRA. In: VI Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, **Anais...** Belo Horizonte, 2009.
- SILVA, L. C. D.; SILVA FILHO, M. P. D.; FERNANDA, A. A.; NAVES, V. L.; LIRA, J. M. S.; RAMBAL, S.; Mouillot, F.; BARBOSA, J. P. R. A. D. (2015). Uso do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na avaliação do desenvolvimento de cafeeiros do Sul de Minas Gerais. In. IX Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, **Anais...**Curitiba, 2015.
- VAAST, P.; BERTRAND, B.; PERRIOT, J. J.; GUYOT, B.; GENARD, M. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 2, p. 197-204, 2006.

4. CONCLUSÕES GERAIS

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um sistema de sensoriamento remoto para prever o grau de maturação dos frutos em lavouras de café. Para isso, utilizou-se uma câmera RGB modificada, a Zenmuse X3, acoplada a veículo aéreo não tripulado (VANT).

O estudo foi dividido em duas partes. Na primeira, desenvolveu-se uma metodologia de calibração radiométrica para câmeras modificadas acopladas a VANT, sistema esse no qual foram definidas as condições de voo, em relação a horário e utilização de filtro de densidade neutra (ND) que devem ser adotadas para calibração dos dados de reflectância das duas bandas de interesse. Além disso, definiu-se também qual grupo de alvo seria utilizado no processo de calibração, grupo composto de oito alvos nas cores preta, marrom, azul, vermelho, cinza claro, cinza intermediário, cinza escuro e branco, ou grupo composto de cinco alvos em tons de cinza, preto, cinza escuro, cinza intermediário, cinza claro e branco.

Na segunda parte, dados de NDVI obtidos a partir de três sensores de sensoriamento remoto foram correlacionados com a porcentagem de frutos verdes na planta do cafeeiro arábica, como parâmetro de identificação do índice de maturação dos frutos como indicativo do momento ideal para a colheita do café arábica com derriça total. Os sensores utilizados foram: câmera modificada acoplada ao VANT, sensor orbital Sentinel-3, e sensor terrestre GreenSeeker.

Com base nos estudos realizados pode-se concluir que:

- O sistema em que os voos foram realizados as oito horas da manhã com a presença de filtro ND foram os que apresentaram modelos com melhor ajuste para calibração das bandas do vermelho e do infravermelho, sendo usados em 63,64% dos dias avaliados. Em 90,91% dos dias avaliados a calibração foi realizada com o grupo de alvos composto pelos cinco alvos em tons de cinza. Nos sistemas utilizados foram obtidos erros quadráticos médios inferiores a 6% em 81,82% dos dias, entretanto, os valores de reflectância gerados após a calibração radiométrica não apresentaram concordância com os encontrados na literatura. Na banda do vermelho, a reflectância observada para o cafeeiro neste trabalho foi superior as reflectâncias encontradas na literatura. Na banda do infravermelho próximo, os valores de reflectância para o cafeeiro estão de acordo com os encontrados na literatura. Já a reflectância observada para o solo não foi satisfatória em nenhuma das duas bandas avaliadas;

- Dados de NDVI obtidos a partir da câmera Zenmuse X3 modificada acoplada ao VANT não apresentaram correlação com a porcentagem de frutos verdes no cafeeiro. Os dados de NDVI obtidos a partir do GreenSeeker e a partir do Sentinel-2 apresentaram correlação com a porcentagem de frutos verdes em somente um dos dias avaliados. Diante disso, nenhum dos sensores utilizados neste estudo é recomendado para a utilização de NDVI como parâmetro de identificação do índice de maturação dos frutos como indicativo de momento ideal da colheita de café arábica com derriça total.