



RAFAEL ALEXANDRE PENA BARATA

**AVALIAÇÃO DE LAVOURAS DE CAFÉ POR ÍNDICES DE
IMAGENS MULTIESPECTRAIS OBTIDAS POR AERONAVE
REMOTAMENTE PILOTADA**

**LAVRAS – MG
2020**

RAFAEL ALEXANDRE PENA BARATA

**AVALIAÇÃO DE LAVOURAS DE CAFÉ POR ÍNDICES DE IMAGENS
MULTIESPECTRAIS OBTIDAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz
Orientador

**LAVRAS – MG
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Barata, Rafael Alexandre Pena.

Avaliação de lavouras de café por índices de imagens
multiespectrais obtidas por Aeronave Remotamente Pilotada /
Rafael Alexandre Pena Barata. - 2020.
88 p. : il.

Orientador(a): Gabriel Araújo e Silva Ferraz.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Café. 2. Sensoriamento Remoto. 3. ARP. I. Ferraz, Gabriel
Araújo e Silva. II. Título.

RAFAEL ALEXANDRE PENA BARATA

**AVALIAÇÃO DE LAVOURAS DE CAFÉ POR ÍNDICES DE IMAGENS
MULTIESPECTRAIS OBTIDAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA
ASSESSMENT OF COFFEE PLANTATIONS BY INDEXES OF MULTISPECTRAL
IMAGES OBTAINED BY UNMANNED AERIAL VEHICLE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA 6 de novembro de 2020.
Dr. Rubens José Guimarães - UFLA
Dr. Luis Carlos Cirilo Carvalho - UESC

Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz
Orientador

**LAVRAS – MG
2020**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por estar sempre presente, em todos os momentos e principalmente naqueles em que precisei de força e fé para me manter firme nas dificuldades.

A minha família: meus irmãos Pedro e Bruno, que além dos laços sanguíneos são verdadeiros amigos que sempre me incentivam e motivam; ao meu pai Amândio, que sempre acreditou na minha capacidade e me deu suporte; e em especial a minha mãe Maria Teresa que mesmo distante de Lavras, se fez presente, dando força, moral e carinho para que eu conseguisse chegar até aqui. A minha namorada Drucylla que foi o meu apoio, não só me proporcionando afeto e felicidade, mas também me ajudando com trabalhos de campo.

Ao professor Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz por ter me orientado e oferecido todo o suporte e ensinamento, sempre de forma clara e tranquila, além de toda a confiança depositada e motivação repassada durante a elaboração dessa pesquisa.

Aos professores membros da banca de qualificação e defesa que aceitaram prontamente ao convite e colaboraram para o engrandecimento desse trabalho, além de estarem sempre dispostos para sanar dúvidas durante o projeto: Dr^a. Margarete Marin Lordelo Volpato (EPAMIG), Dr. Rubens José Guimarães (UFLA) e Dr. Luis Carlos Cirilo Carvalho (UESC).

A equipe NESA, em especial as pessoas que ajudaram durante o desenvolvimento desse trabalho: Lucas, Brenon, Luana, Diego, Sabrina, Pedro, e especialmente a Nicole, companheira de mestrado que foi de enorme ajuda nos trabalhos de campo, nas análises e nas disciplinas.

A Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Engenharia Agrícola e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, por ter me concedido a oportunidade de cursar o e concluir o mestrado. A Helem, secretária do programa, pela ajuda com as burocracias.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), instituição de fomento, pela concessão das bolsas que ajudaram na minha subsistência e no financiamento da pesquisa.

A Fazenda Samambaia, por autorizar o desenvolvimento dessa pesquisa nas áreas da propriedade, em especial ao Daniel, que foi o mediador dessa parceria.

Ao Dr. Joao Paulo Pennacchi do departamento de Fisiologia Vegetal, pelo empréstimo do clorofilômetro, crucial para as medições de campo, e pela disponibilidade para quaisquer dúvidas.

Por fim, agradeço a todos os demais que puderam contribuir de alguma forma para que eu chegasse à conclusão do mestrado e conseguisse obter o título de mestre.

Muito obrigado!

RESUMO

O Brasil se destaca mundialmente na produção do café. A produção nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Espírito Santo representa mais de três quartos do total do país. A cafeicultura de precisão se apresenta como abordagem eficaz para manter e aumentar a produtividade no país aumentando também a competitividade dos produtores. O sensoriamento remoto e as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) são tecnologias para melhorar a gestão na cafeicultura, favorecendo redução de uso de insumos e de passivos ambientais, e elevando a lucratividade e qualidade do produto. Nesse sentido, objetivou-se com este trabalho avaliar por meio de imagens multiespectrais de alta resolução, obtidas por ARP e índices de vegetação (IV) a eficácia de dois diferentes tipos de manejo implementados no cafeeiro. O estudo foi realizado na Fazenda Samambaia em Santo Antônio do Amparo, MG, onde foram adotadas duas diferentes práticas agrícolas e que foram confrontadas com áreas separadas como controle, referente aos manejos predominantes nas demais lavouras da propriedade: aplicação de calcário em profundidade (entre 0,60 m e 0,80 m) vs. aplicação de calcário na projeção da copa do cafeeiro; plantio com mudas produzidas em tubete vs. plantio com mudas produzidas em saquinho de polietileno multifuros. Para essa avaliação foram realizados voos bimestrais com ARP com posterior processamento das imagens obtidas e medições de altura, diâmetro de copa e teor de clorofila das plantas no campo. Os resultados dos IVs foram comparados com as demais medições de campo, de forma temporal gráfica e por meio de análises de correlação. Foram desenvolvidos também modelos lineares para predição do parâmetro biofísico melhor correlacionado com os IVs. Além disso, para o estudo de plantio de mudas produzidas em tubetes vs. saquinhos, avaliou-se o percentual de falhas decorrente do não pegamento das mudas. Como resultado do estudo relativo à aplicação de calcário em profundidade, foi constatado diferença significativa apenas para o teor de clorofila, com maior valor médio na área onde o manejo foi realizado (clorofila total de 86,04 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ contra 83,87 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$). Já no estudo envolvendo diferentes recipientes (tubetes vs. saquinhos multifuros) não houve diferença significativa entre as características avaliadas. No entanto, na avaliação de falhas, constatou-se que a área implantada com mudas produzidas em saquinhos multifuros apresentou resultados significativamente menores (6,4% de falha contra 11,7% para os tubetes). A maioria dos índices obtiveram alta correlação com os parâmetros de campo com exceção para o teor de clorofila, com destaque para o GNDVI, NDVI, GCI e área do dossel vetorizada (cm^2). Os dois últimos obtiveram para ambos os experimentos valores próximos de 0,90 com o Índice de Área Foliar (IAF). Foi possível desenvolver modelos lineares para a predição de parâmetros biofísicos como o IAF em função do GCI para ambos os manejos estudados, com valores de R^2 acima de 0,75. A ARP se mostrou uma ferramenta eficaz para monitorar o cafeeiro e avaliar práticas de manejo.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Café. Manejo. Transplântio de mudas. ARP.

ABSTRACT

Brazil stands out in worldwide coffee production. In Minas Gerais, São Paulo and Espírito Santo states the production represents more than three quarters of the country's total. Precision coffee farming is an effective approach to keep the country with high production numbers and increase producers competitiveness. Remote sensing and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are able to improve the way coffee is managed, favoring a reduction in the use of agricultural inputs and in environmental liabilities, increasing profitability and product quality. In this context, the objective of this work was to evaluate the effectiveness of two different types of management implemented in the coffee tree, through high resolution multispectral images, obtained by UAV and vegetation indexes (VI). The study was carried out at Fazenda Samambaia in Santo Antônio do Amparo, MG, where two different agricultural practices were adopted as objects of study in this work and that were confronted with separate areas as control, which represented the conventional for coffee farming: deep liming (between 0.60 m and 0.80 m) vs. limestone application in the projection of the coffee canopy; planting seedlings produced in tubes vs. seedlings produced in multihole polyethylene bags. For this evaluation, bimonthly UAV flights were performed with subsequent processing of the images obtained. Measurements of plants height, crown diameter and chlorophyll content were conducted in field. The VI results were compared to the other field measurements, via temporal graphics and through correlation analyzes. Linear models were also developed to predict the biophysical parameter best correlated with VIs. In addition, for the study of planting seedlings produced in tubes vs. multihole bags, the percentage of failures resulting from seedlings not “taking on” was assessed. As a result of the deep liming study, a significant difference was found only for the chlorophyll parameter, that obtained a higher mean value in the section where the management was carried out (total chlorophyll of 86.04 $\mu\text{g} / \text{cm}^2$ against 83.87 $\mu\text{g} / \text{cm}^2$). In the study involving different containers (tubes vs. multihole bags), there was no significant difference between the parameters evaluated. However, in the failures assessment, it was found that the area with seedlings produced in multihole bags obtained a significantly lower result (6.4% failure versus 11.7% for the tubes). Most of the indices had a high correlation with field parameters except for chlorophyll, with emphasis on the GNDVI, NDVI, GCI and vectorized canopy area (cm^2). For both experiments, the last two obtained values close to 0.90 with the Leaf Area Index (IAF). It was possible to develop linear models for the prediction of biophysical parameters, such as the LAI, as a function of the GCI for both assessed managements, with R^2 values above 0.75. The UAV proved to be an effective tool to monitor the coffee crop and to evaluate management practices.

Keywords: Remote sensing. Coffee. Agricultural practices. Seedling transplanting. UAV.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1.	Cafeicultura brasileira: histórico e contexto atual	12
2.2.	Práticas de manejo na cafeicultura	13
2.2.3.	Diferentes recipientes na produção e plantio de mudas de cafeeiro	19
2.2.3.1.	Plantio de mudas produzidas em tubetes.....	20
2.2.3.2.	Plantio de mudas produzidas em saquinhos multifuros	23
2.3.	Sensoriamento Remoto, índices de vegetação e aplicações na agricultura	24
2.4.	Aeronaves Remotamente Pilotadas: contexto atual e enfoque agrícola	29
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1.	Visão geral	32
3.2.	Área de estudo	33
3.3.	Tratos culturais.....	35
3.4.	Aeronave utilizada para obtenção de imagens	37
3.5.	Planos de voo.....	38
3.6.	Sensor multiespectral	39
3.7.	Processamento das imagens	40
3.8.	Índices de Vegetação.....	42
3.9.	Levantamento de falhas.....	44
3.10.	Amostragem a campo	44
3.11.	Variáveis meteorológicas.....	49
3.12.	Organização dos dados e análises estatísticas.....	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1.	Observações gerais dos cafeeiros	50
4.2.	Análise temporal bimestral	56
4.3.	Análise estatística.....	62
4.3.1.	Plantio com calcário em profundidade vs. calagem em superfície.....	64
4.3.2.	Mudas produzidas em tubetes vs. mudas produzidas em saquinhos multifuros.	66
4.4.	Correlação de Spearman.....	67
4.5.	Modelos lineares	70
4.6.	Levantamento de falhas.....	74
5.	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	81

1. INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se na produção mundial de café com um parque cafeeiro de mais de dois milhões de hectares, sendo o responsável por ser o maior exportador mundial. Privilegiado na classe climática e na variedade de relevos, é possível encontrar em diferentes regiões do país a produção de variados tipos de plantios de café, desde os mais comuns até os chamados cafés especiais. Os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo são os mais representativos na produção nacional, sendo responsáveis por mais de três quartos da produção. Na região Sul de Minas Gerais prevalece o cultivo do café arábica (*Coffea Arabica* L.), onde são produzidos mais da metade do café de todo o estado.

Entretanto o clima e o relevo não são os únicos responsáveis para o sucesso na cafeicultura. A tecnologia empregada pode representar um diferencial em diversos aspectos como a manutenção e melhora da qualidade do solo, a melhoria do aspecto nutricional das plantas, gestão do plantio e colheita, economia de insumos, incremento do lucro e preservação do meio ambiente. Nesse contexto, a agricultura de precisão se apresenta como uma grande aliada da cafeicultura, sendo nomeada nessa área de “cafeicultura de precisão”. Nesse segmento, uma das tecnologias que vem sendo amplamente utilizada nas últimas décadas são as Aeronaves Remotamente Pilotadas - ARP, também conhecidas como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) ou, mais popularmente como drones.

As ARPs foram desenvolvidas para fins militares, como muitas das tecnologias que se conhece hoje. Atualmente, graças aos avanços na tecnologia e na engenharia, a facilidade na condução e ao custo relativamente baixo, essas aeronaves estão muito difundidas no meio civil e seu uso se estende por diversos setores que vão desde a recreação até o monitoramento ou pesquisa envolvendo plantio de culturas. Porém a facilidade em adquirir uma ARP tem feito com que profissionais com pouca experiência e capacitação gerem mapas ou outros produtos com baixa qualidade e acurácia, trazendo incertezas quanto aos resultados obtidos. O fato gera desconfiança para alguns produtores, principalmente os mais conservadores, fazendo com que ainda exista uma resistência à adoção dessa tecnologia.

Por outro lado, a praticidade, rapidez e flexibilidade para obtenção de imagens torna as ARPs um grande atrativo para análise de culturas quando comparadas ao uso de imagens provenientes de satélites. As imagens possuem melhor resolução temporal e espacial, sendo possível obter produtos de diferentes naturezas (RGB-visível, multiespectral, termal, entre outras) e em tempo real. Diferentes trabalhos com ARPs já foram realizados em plantios como

milho, pastagem, soja, cana-de-açúcar entre outros, mas o grande desafio tem sido na cafeicultura.

O café, por se tratar de uma cultura perene em que o produto comercial é o fruto, não tem a homogeneidade das outras grandes culturas que existem no Brasil, como a soja e o milho e por esse motivo pesquisas com a cafeicultura são ao mesmo tempo desafiadoras e promissoras. A heterogeneidade das lavouras de café faz com que haja ainda grandes lacunas para serem pesquisadas. Uma delas é, por meio de sensoriamento remoto, avaliar a relação entre as bandas de imagens multiespectrais e os possíveis índices gerados, como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), NDRE (Normalized Difference Red Edge Index), CIg (Chlorophyll Index Green), MSAVI2 (Modified Secondary Soil Adjusted Vegetation Index), MCARI1 (Modified Chlorophyll Absorption In Reflectance Index 1), com outros parâmetros ou índices físicos, como altura de plantas, diâmetro de copa e o derivado Índice de Área Foliar (IAF), teor de clorofila entre outros. O cruzamento dessas informações pode resultar em estimativa de produtividade, vigor da planta, deficiência de nutrientes ou indicativo de doenças e pragas, tornando possível atuar diretamente no problema, realizar aplicações a taxas variáveis ou adotar um manejo mais adequado na implantação das lavouras, como idealiza a agricultura de precisão.

Considerando o manejo, na cafeicultura são previstas diferentes práticas, desde o preparo do solo para o plantio, até a pós-colheita. Algumas práticas já são bem conhecidas e difundidas como o plantio com a utilização de culturas intercalares, sistema de cultivo sombreado, entre outras. Entretanto, outros modelos diferentes vêm sendo adotados em algumas propriedades e ainda carecem de pesquisa como: a aplicação de calcário em maiores profundidades e plantio de mudas produzidas em diferentes recipientes. As ARPs são tecnologias capazes de avaliar a efetividade desses manejos, podendo correlacionar os Índices de Vegetação (IVs) previamente citados com a medição de atributos obtidos no campo, para ratificar a significância das práticas de manejo em questão.

A hipótese é que esses manejos são capazes de melhorar a longevidade do cafeeiro, garantir nutrição apropriada e pH do solo adequado ao longo de grande parte do sistema radicular, além de representar menor custo para a manutenção da cultura e diminuição de perdas. Contudo, mediante as perspectivas, ainda existe resistência para adoção dos sistemas por parte dos cafeicultores devido à falta de dados que comprovem melhoria e receio de ocorrer justamente o contrário: prejudicar a lavoura em relação a maneira que tradicionalmente já é utilizada. Logo, a promessa de bons resultados no cafeeiro e a carência de estudos no segmento

justificam a importância de se realizar pesquisas nesse campo, servindo também de grande contribuição para a comunidade científica e para os produtores de café, disseminando a prática da cafeicultura de precisão.

Portanto, objetiva-se com o presente estudo avaliar os efeitos da adoção de duas práticas de manejo - aplicação de calcário em maiores profundidades em relação à superfície do solo e um comparativo entre a utilização de mudas produzidas em tubetes e em saquinhos multifuros – com o auxílio de índices de vegetação gerados por meio de imagens multiespectrais obtidas por Aeronave Remotamente Pilotada em cultivos de café. Para isso, foi realizado um estudo comparativo entre os índices provenientes das imagens aéreas com dados obtidos em campo como altura, diâmetro das plantas, o IAF derivado dessas medidas e teor de clorofila, por meio de análises gráficas temporais, correlações e modelos lineares, abrangendo a área onde foi adotado o respectivo manejo avaliado e área testemunha.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Cafeicultura brasileira: histórico e contexto atual

O café teve o início de seu cultivo no Brasil no século XVIII, ainda enquanto colônia portuguesa. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do Café (ABIC, 2016), após migração iniciada no estado do Pará, a cultura foi estabelecida no Vale do Rio Parnaíba e as condições climáticas favoreceram que a cultura se disseminasse rapidamente proporcionando o desenvolvimento econômico do país. No século seguinte já se tratava de um produto de grande importância para exportação. O cultivo do café foi responsável por desenvolver muitas regiões brasileiras com destaque para o Sudeste. Atualmente, os estados com maior produção são Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo. Os três somados representaram no ano de 2019 um total de 90,5% da produção nacional (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2020)

Minas Gerais é destaque no cenário nacional, sendo aquele que possui maior área destinada ao cultivo de café. Segundo dados da CONAB (2020), a área do estado destinada à produção é de 1.230.007,0 hectares, mais da metade da produção de todo o Brasil que é de 2.131.826,0 hectares. As principais espécies plantadas são o café arábica (*Coffea Arabica* L.) e o café conilon (*Coffea canephora* P.). A espécie arábica representa mais de 95% da produção em Minas Gerais. Ainda segundo a avaliação anual da CONAB (2020), estima-se para o estado uma produção de 31.749,2 mil sacas de café, representando 31,01 sacas por hectare, um incremento de 30,7% em comparação ao ano anterior, impactado pelo acréscimo da área em produção, mas também pela bienalidade positiva no ano.

O fenômeno da bienalidade é um ciclo característico do café, principalmente em condições tropicais, quando é produzido em pleno sol. Nesse ciclo a cultura apresenta um ano de grande florada, de produtividade elevada e o seguinte com menor florada (RENA; MAESTRI, 1985). O fato ocorre pelo esgotamento da planta no período de alta produtividade, o que, conforme Barros et al. (1999), se deve a um maior direcionamento de fotoassimilados aos frutos (relação fonte-dreno), causando uma redução de produtividade no ano seguinte, quando ela se recupera para novamente poder produzir em grande escala. Rena e Maestri (1985) afirmam que a variação bienal é uma característica fisiológica da planta. Segundo os autores, o café precisa vegetar em um ano para que produza no próximo. A bienalidade pode ser melhor compreendida quando se considera o comportamento fenológico do cafeeiro durante o período de 24 meses (2 anos fenológicos).

Segundo Camargo e Camargo (2001), o cafeeiro (*Coffea arabica* L.) possui 6 fases distintas para esse período. A 1ª fase e 2ª fase estão inseridas no primeiro ano fenológico. A 1ª fase corresponde à vegetação e formação das gemas foliares enquanto na 2ª fase ocorre a indução e maturação das gemas florais. O segundo ano fenológico começa com a 3ª fase na qual há a ocorrência de floradas com o aumento de precipitação e do potencial hídrico das gemas. Em seguida, na 4ª fase, há a granação dos frutos e posteriormente, na 5ª fase, a maturação dos mesmos. Finalmente, na 6ª fase, o cafeeiro entra em repouso com a senescência dos ramos terciários e quaternários, para dar início a um novo ciclo.

O atual contexto de alta representatividade do café oriundo de Minas, tanto no próprio estado quanto no país deve-se a um conjunto de fatores. A partir da década de 1960 observou-se o crescimento da cafeicultura por meio novas políticas agrícolas, incentivos, programas econômicos no segmento e desenvolvimento de pesquisas agronômicas (OLIVEIRA et al., 2008; SIMÕES; PELEGRINI, 2010).

Na década de 90, com o crescente emprego da tecnologia, começou a surgir o conceito de agricultura de precisão (AP) que, de acordo com Schueller (1992), é um conjunto de tecnologias implementadas na agricultura que proporcionam um manejo baseado na variabilidade espacial do solo e que considera os atributos da própria cultura, promovendo sustentabilidade e uso racional dos insumos. Quando implementada no cafeeiro a AP passa a ser chamada de cafeicultura de precisão, como afirmam Ferraz et al. (2012), que definem cafeicultura de precisão como técnicas e tecnologias que auxiliam o cafeicultor no manejo da sua lavoura, levando em consideração os aspectos espaciais do solo e planta, o que resultam na melhoria da qualidade final do produto e na maximização da renda. No presente contexto, a cafeicultura de precisão é intrínseca ao cafeeiro; em uma cultura em que a qualidade influencia amplamente no preço da saca (MOLIN et al., 2010), a tecnologia, aliada à condução precisa, tem se tornado indispensável no auxílio ao produtor.

Contudo, a tecnologia deve caminhar junto com as práticas manuais e o conhecimento de campo do produtor. Na agronomia, a busca constante por melhoria dos aspectos do solo e nutrição da planta tem sido determinantes para que a produtividade e qualidade do produto se mantivessem crescente. Dessa forma, práticas de manejo são de grande importância na cafeicultura.

2.2. Práticas de manejo na cafeicultura

A busca pela rentabilidade, produtividade no cultivo do café, aliados à sustentabilidade, faz com que boas práticas de manejo sejam cruciais para o produtor. De acordo com Petek e Patrício (2007), a permanência do produtor no segmento está atrelada a sistemas de cultivo que sejam capazes de oferecer maior longevidade e altos níveis de produtividade nas lavouras. Ademais, boas práticas de manejo representam não só um aumento na qualidade do produto, mas também uma exigência para que se obtenha certificações na cafeicultura (BSCA, 2005; MINAS, 2013).

Mesquita (2016), afirma que algumas particularidades devem ser consideradas ao implementar uma lavoura de café, tais como, características da área, temperatura (entre 18°C e 23°C), níveis de precipitação (1200 a 1800 mm anuais), altitude da região (600 a 1200 m) e o relevo, para que este seja compatível com as máquinas e equipamentos utilizados pelo produtor. As características físicas, químicas e biológicas do solo onde será feito o plantio devem ser apresentar as melhores condições possíveis, principalmente as primeiras, já que as correções são mais difíceis.

As práticas de manejo visam acima de tudo a conservação do solo e do meio-ambiente em geral de modo que também represente vantagens para o produtor. Em outras palavras, buscase o equilíbrio do ecossistema, mitigando a erosão e demais impactos estruturais no solo responsáveis pela rápida degradação da matéria orgânica e perda de nutrientes, fazendo com que a prática se torne economicamente viável favorecendo o armazenamento de água do solo e a oferta de nutrientes disponíveis para as plantas (BAYER et al., 2000; AN; DARBOUX; CHENG, 2013).

Na cafeicultura, mediante comprovação de melhoria por meio de pesquisas e das experiências do homem do campo, tipos de manejo dos mais variados vêm sendo comumente utilizados. A adoção está também associada as condições da área e a capacidade de investimento de capital do produtor. Pode-se destacar, por exemplo, o sistema agroflorestal, onde o plantio do café é realizado próximo a florestas fazendo com que o mesmo esteja sob sombra e a implementação de culturas intercalares que podem melhorar o desempenho do cafeeiro oferecendo melhores condições ambientais ao solo, elevando a microbiota, a disponibilidade de matéria orgânica do solo além de competir com plantas daninhas (a exemplo do plantio de braquiária), diminuindo sua ocorrência (LIMA et al., 2012; RAMOS et al. 2013; SILVA et al., 2013). O sistema AP Romero também merece destaque, pois, de acordo com Serafim (2011), além do plantio de braquiária nas entrelinhas se caracteriza a aplicação de altas doses de gesso e correção de fertilidade a 60 cm de profundidade do solo, que favorece maior

crescimento vertical das raízes, redução da toxidez por Alumínio e maior absorção de água subterrânea.

Porém, alguns manejos que são potenciais fontes de melhorias no plantio, considerando principalmente a qualidade, longevidade e produtividade, ainda carecem de dados que comprovem a sua real eficácia. Tais práticas são: a aplicação de calcário em maiores profundidades e o plantio de mudas produzidas em diferentes recipientes – tubetes e saquinhos multifuros. Ademais, pesquisas nesse segmento envolvendo sensoriamento remoto de alta resolução são escassas.

2.2.1. Aspectos gerais da adubação e nutrição do cafeeiro

Antes da implementação de um transplântio de mudas de cafeeiro na lavoura, algumas medidas são adotadas, principalmente no aspecto da adubação e calagem. A atenção com as raízes nessa etapa é importante, já que as mesmas, de acordo com Salton et al. (2008), são responsáveis pela absorção de nutrientes, água, pela sustentação da planta, além de serem cruciais para os processos de formação e estabilização dos agregados do solo. O sistema radicular no café ocupa apenas de 0,4 a 2,0% do solo. Dessa forma, é significativo conservá-las de forma adequada e garantir que as mesmas estejam em constante contato com água e nutrientes dissolvidos na solução do solo. Garantir que se desenvolvam em profundidade faz com que a cultura seja capaz de resistir aos possíveis períodos de seca ou veranicos (RAIJ, 2008; RENA; GUIMARÃES, 2000).

Tendo em vista a extensão e complexidade do sistema radicular do cafeeiro, é importante garantir que os nutrientes estejam disponíveis tanto nas camadas superficiais quanto nas mais profundas do solo. Na calagem, surge como manejo significativo a aplicação de calcário em profundidade, insumo importante para prover cálcio, corrigir o pH e melhorar a Capacidade de Troca de Cátions (CTC) do solo.

O sistema radicular do cafeeiro se divide em raízes pivotantes, axiais, raízes da placa superficial e de fora da placa superficial. De acordo com Rena e Guimarães (2000) e Rena e Maestri (1985), as pivotantes são grossas (base para o crescimento de outras raízes), crescem verticalmente e chegam até os 50 cm de profundidade. Já as axiais se originam das pivotantes, crescem no sentido descendente, vertical e horizontalmente, abrangendo superfícies maiores, ou seja, explorando melhor o solo. As axiais verticais se desenvolvem proporcionalmente ao diâmetro da copa alcançado pela planta de café podendo alcançar até 3m de profundidade, abrangendo as camadas intermediárias e profundas. Já as superficiais crescem lateralmente são

capazes de atingir 2 m de comprimento e ocupar cerca de 30 cm de profundidade do solo (LIVRAMENTO, 2010; RENA; GUIMARÃES, 2000; RENA; MAESTRI, 1985).

Considerando o aspecto nutricional, o café extrai uma grande quantidade de nutrientes do solo, sendo a água crucial para esse processo, haja visto que é necessária para translocar, absorver e transportar os nutrientes (TAIZ; ZEIGER, 2013). Dessa forma necessita-se de uma constante aplicação de insumos para garantir uma boa produtividade. Contudo, essa aplicação deve ser feita de forma eficiente, para evitar gastos desnecessários considerando os elevados preços dos insumos (CORRÊA et al., 2001). Uma adubação adequada, por exemplo, pode ser feita mediante a identificação de nutrientes limitantes de alta produtividade (SILVA; GUIMARÃES, 2009). Por meio de ensaios de fertilidade ou análises foliares é possível realizar diagnósticos e estudos dos fatores nutricionais que interferem negativamente na produtividade do café para que seja possível realizar um manejo correto, mitigando o problema (REIS JÚNIOR et al., 2002). As recomendações para essa questão nutricional podem ser baseadas nas normas do Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) (BEAUFILS, 1973).

Alguns nutrientes são de grande importância para o desenvolvimento da planta. Dentre eles, Mesquita et al. (2016) destacam como macronutrientes essenciais, ou seja, aqueles mais demandados pela planta, o nitrogênio, potássio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre e dentre os micronutrientes o boro, zinco, cobre, ferro, manganês, cloro e molibdênio.

2.2.2. Aplicação de Calcário em profundidade

O cálcio é de grande importância para as raízes do café e por isso seu uso é mais requerido na implantação da lavoura, por meio calagem, próxima ao sistema radicular (MESQUITA et al., 2016; RAIJ et al., 1997). Quanto mais profundo estiver o cálcio, melhor para o aprofundamento do sistema radicular, dando mais sustentabilidade e resistência a períodos de seca (MESQUITA et al., 2016; NORA; AMADO, 2013; RAIJ, 2008). Além disso o cálcio desempenha um papel significativo na retenção de folhas, maturação dos frutos, formação proteínas e desenvolvimento de gemas. A deficiência de cálcio pode resultar amarelecimento das folhas e até em morte dos exemplares jovens. Mesquita et al. (2016) ressaltam ainda que o magnésio, presente no calcário, também é significativo para o café, já que é componente da clorofila e, dessa maneira, se faz necessário na fotossíntese. A deficiência do magnésio infere numa baixa taxa de atividade fotossintética afetando negativamente no crescimento da planta.

O cálcio (Ca^{2+}) e o magnésio (Mg^{2+}) são disponibilizados por meio de calagem. Alcarde e Rodella (2003) afirmam que o calcário agrícola é o produto que mais se utiliza para fornecer esses nutrientes, sendo necessário água e incorporação para a aplicação ser mais efetiva. Além de fornecer nutrientes, o calcário é capaz de aumentar a Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e de reduzir o pH do solo, neutralizando dessa forma a sua acidez. A acidez elevada, por sua vez, é um problema que prevalece em grande parte dos solos brasileiros, muito intemperizados e com altos teores de alumínio (Al^{3+}) e com baixo teor de cátions trocáveis, seja na camada superficial ou nas mais profundas (SOUZA; LOBATTO, 2004). Porém, a ação do calcário da forma convencional como é aplicado se limita à camada superficial do solo, ou seja, de 0 a 20 cm. Dessa forma, o sistema radicular usufruirá dos benefícios da calagem apenas nessa faixa de profundidade (RHEINHEIMER et al., 2000; AMARAL; ANGHINONI, 2001).

As raízes desempenham importante papel, não só na sustentação e absorção de água pela planta, mas também na formação dos agregados do solo e, conseqüentemente, nos fenômenos físicos e químicos do sistema solo-planta (SALTON et al., 2008). Rena e Guimarães (2000) ressaltam a importância de raízes profundas e bem ramificadas para que a lavoura cafeeira tenha boa produtividade. Os autores ainda argumentam que raízes profundas são capazes de absorver mais água e sofrer menos com veranicos. Logo, é importante que o calcário alcance horizontes mais profundos no solo para proporcionar um maior e melhor desenvolvimento do sistema radicular, já que além dos nutrientes e da redução da acidez, o calcário é capaz de neutralizar o alumínio trocável (Al^{3+}) substância tóxica e que é considerada uma barreira química para as plantas.

A maneira que em geral se procede para que o cálcio chegue a regiões mais profundas do solo e se corrija as limitações químicas previamente mencionadas é por meio da aplicação de gesso. O calcário é uma substância pouco móvel no solo, ao contrário do gesso, que apresenta em sua composição sulfato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que é muito solúvel em água, e pode ser deslocado para o subsolo por meio de chuvas (ERNANI; RIBEIRO; BAYER, 2001; SOUZA et al., 2005; RAIJ, 2008).

Pesquisas envolvendo a aplicação de gesso na última década mostraram bons resultados na melhoria das propriedades físicas do solo, no crescimento das raízes em maiores profundidades e nos níveis de cálcio. Dentre elas pode-se destacar o trabalho de Carducci et al. (2013), que constataram um aumento na quantidade de macro e microporos de um solo após o manejo com gesso no Cerrado mineiro, na região de São Roque de Minas, Vargem Bonita e Piumhi, e que resultaram inclusive em maior disponibilidade de água para as raízes do cafeeiro.

Outros trabalhos importantes na avaliação dos benefícios do gesso foram o de Serafim et al. (2013), Ramos et al. (2013) e Serafim et al. (2011) que desenvolveram um sistema intensivo de cultivo no Cerrado mineiro, na região do alto São Francisco em Minas Gerais, (mesma região do trabalho de Carducci et al. (2013) supracitado. Esse sistema chamado de “Sistema AP Romero”, também foi implementado em algumas fazendas no estado de São Paulo. Nesse sistema ocorre adubação a 0,60 m de profundidade, aplicação de altas doses de gesso em cafeeiro semiadensado de implantação recente e manutenção com braquiária nas entrelinhas do plantio. Os autores obtiveram nesses trabalhos melhorias nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} em diferentes camadas do solo, além de raízes mais profundas. Entretanto, os valores de pH foram reduzidos nas profundidades 0,15-0,25; 0,35-0,45 e 0,75-0,85 m, semelhante aos trabalhos de Silveira et al. (2008) e Leite et al. (2012) que justificaram a ocorrência devido a condução do experimento em solos salinos e sódicos, onde a água da chuva infiltra mais facilmente e pode carrear ânions hidroxilas, carbonatos e bicarbonatos, ou seja, não houve interferência do insumo agrícola em questão.

O gesso não é corretivo de acidez no solo, e, portanto, não é responsável pela alteração do pH, pois é composto por um sal neutro (VITTI et al., 2008). Ademais, a presença do íon sulfato, que é muito móvel no solo, em grandes quantidades pode lixiviar nutrientes e as bases Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ para camadas mais profundas tornando-as inacessíveis para as raízes (SERAFIM, 2012; PEREIRA, 2007). O magnésio pode ser carreado ainda por competir com o cálcio (CRUSCIOL et al., 2014; MICHALOVICZ et al., 2014) e as altas doses de gesso podem aumentar muito os teores de Ca^{2+} e SO_4^{2-} causando problemas na nutrição do café.

Dessa forma, a aplicação de calcário em profundidade em camadas mais profundas do solo pode ser boa alternativa para corrigir o pH do solo, aumentar a CTC e, conseqüentemente, a disponibilidade de nutrientes e neutralizar o alumínio ao longo do sistema radicular do cafeeiro em maiores profundidades. O valor ótimo de pH para a disponibilidade de nutrientes no solo é de 6,5 (MALAVOLTA, 2006). Ainda, de acordo com Alcarde (1983), quanto mais próximo de 7 é o valor de pH (valor considerado neutro), maior a assimilação de macro nutrientes por parte das plantas, sendo que próximo a esse valor o percentual de assimilação é de quase 100%, comparado a menos de 30% para um pH de 4,5.

O calcário é pouco móvel no solo, portanto sua incorporação deve ser eficaz. Contudo essa aplicação deve ser feita no pré-plantio, para que as máquinas utilizadas no processo de incorporação não comprometam o sistema radicular das plantas.

Prado e Natale (2004) avaliaram diferentes métodos de incorporação de calcário em uma plantação de milho em Uberlândia, fazendo uso de diferentes implementos para alcançar as camadas mais profundas. Os autores conseguiram neutralizar a acidez até 0,30 m e obtiveram resposta positiva na produtividade da cultura com manejo em maiores profundidades. Alongo e Ferreira (1992), por sua vez, avaliaram a resposta da aplicação de calcário em profundidade ao estresse hídrico também em um cultivo de milho, obtendo melhora significativa. Nolla et al. (2010) realizaram estudos em Umuarama- PR com silicato de cálcio para corrigir pH em profundidade obtendo bons valores até 30 cm no solo, pois a substância é móvel. Garcia (2018) avaliou o preparo profundo do solo com calagem em plantios de cana-de-açúcar em Macatuba e Borebi, municípios localizados no interior do estado de São Paulo, onde constatou significativa melhora na distribuição do sistema radicular ao longo do perfil do solo, maiores teores de cálcio e solo com menor resistência a penetração. Bender, Weber e Vieira (2018) realizaram estudos em pomares de oliveira em Caçapava do Sul – RS, visando ajustar as recomendações de calagem e adubação, constatando a necessidade de incorporar calcário em profundidades a partir de 0,20 a 0,40 m no solo, devido ao elevado teor de alumínio e baixo pH.

Existem poucas pesquisas relacionadas à calagem em maiores profundidades, principalmente na cafeicultura, provavelmente devido ao custo operacional do processo e à baixa eficiência das máquinas e equipamentos em camadas de difícil aração, principalmente se for comparado à gessagem que é um método significativamente mais simples e que já é utilizado de maneira convencional para promover nutrição por cálcio, magnésio e sulfato em camadas mais profundas do solo. Além disso, o fato de o café ser uma cultura perene; de difícil correção de acidez em profundidade depois que a cultura é implantada, faz com que tradicionalmente se adote apenas a calagem em superfície. A prática, no entanto, precisa ser revista pois o calcário, de baixa mobilidade, dificilmente percorre outros níveis do solo e ofereça as melhores condições, como pH ideal e elevação da CTC, para as plantas desde o início de sua implantação. Portanto, pesquisas relacionadas a essa prática são necessárias de modo que venham comprovar a sua eficácia.

2.2.3. Diferentes recipientes na produção e plantio de mudas de cafeeiro

Outra prática que ainda possui lacunas na literatura é o plantio de mudas de café produzidas em diferentes recipientes, como os tubetes e os saquinhos multifuros, já que a forma convencional que é o plantio manual de mudas produzidas em saquinhos de polietileno, ainda é a que prevalece. Portanto, o plantio de mudas produzidas em tubetes e em saquinhos

multifuros podem ser fontes potenciais de benefícios a serem explorados e comparados ao método convencional.

O cafeeiro é uma cultura perene e, portanto, demanda de atenção para evitar equívocos desde a implantação da lavoura. O plantio nesse tipo de cultura, principalmente no *Coffea arabica* L., se dá por meio de mudas previamente produzidas em viveiros. Antigamente o café era propagado direto na cova, com uma baixa taxa de sucesso ou ainda que se utilizava mudas retiradas de frutos caídos de cafeeiros adultos que as originava (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002). Visando alcançar maior índice de sucesso e de ampliarem a área e a rapidez do plantio, as mudas passaram a ser produzidas em viveiros, método que se pratica até os dias de hoje. A localização do viveiro deve ser cuidadosamente escolhida, já que desempenha papel importante na predisposição ao ataque de pragas, doenças entre outros. O viveiro deve dispor de fácil acesso à água, ao transporte de substrato e dispor de barreiras contra ventos fortes e excesso de radiação solar lateral (SILVA et al. 2010).

A maneira usual de produção de mudas, é o acondicionamento em saquinhos de polietileno contendo substrato composto de 70% solo e 30% de esterco bovino (GONÇALVES et al., 2009). Guimarães et al. (1999) complementam que o substrato deve ter ainda, para cada metro cúbico a produzir, além da porção solo/esterco, 3 a 5 quilos de superfosfato simples e 0,5 a 1 quilo de cloreto de potássio. O plantio pode ser feito tanto por sementes ou por estacas a partir da retirada de ramos ortotrópicos, sendo esse último método mais comum em mudas de *Coffea Canephora* P., ou por enxertia para adquirir resistência a pragas como nematoides (SILVA, et al. 2010).

Por fim essas mudas passam pelo processo de aclimação, que é a diminuição da irrigação e maior exposição aos raios solares por cerca de 30 dias para prepará-las para o plantio no campo, que costuma ocorrer a partir dos meses de outubro e novembro (na maior região produtora de café do Brasil) para aproveitar o período chuvoso e garantir o “pegamento”.

Entretanto, ao avaliar o custo com transporte, mão de obra e com o grande volume de substrato, o baixo rendimento e a ocupação de um espaço considerável no viveiro, aliado a busca constante por melhoria da qualidade, surgiu-se a necessidade de se desenvolver formas alternativas ao saquinho de polietileno para a propagação e plantio manual de mudas. Dentre elas a utilização de tubetes cônicos de polietileno e saquinhos multifuros vêm se mostrando promissoras.

2.2.3.1. Plantio de mudas produzidas em tubetes

Os tubetes possuem forma cônica e são compostos de polietileno rígido. Os recipientes devem dotar de estrias na direção longitudinal para evitar enovelamento (GUIMARÃES et al. 1998), podendo ter volumes que variam entre 50 e 500 ml (KÄMPF, 2004).

Os tubetes apresentam algumas vantagens se comparados aos saquinhos plásticos. De acordo Nasser et al. (2011) e Guimarães et al. (1998), dentre alguns pontos positivos podem ser destacados: a menor demanda por substrato, a ausência de plantas daninhas, mudas com maior vigor, menor tempo na produção, diminuição de casos de enovelamento das raízes, melhor condução no viveiro, menor volume físico ocupado, facilidade no transporte e no plantio, que pode ser feito de forma mecanizada. Kämpf (2002) acrescenta ainda que a produção de mudas em tubetes elimina a ocorrência de nematoides devido à utilização de substrato comercial em substituição ao solo.

Com relação ao substrato, Guimarães et al. (1998), afirmam que o insumo representa 38% do custo na produção de mudas, reforçando dessa maneira que os tubetes são economicamente viáveis. Ademais, o uso de tubetes conserva a raiz pivotante das mudas sempre aparadas por oxidação à medida que ultrapassam o limite do recipiente, sendo que em mudas produzidas em saquinhos de polietileno há necessidade de se cortar o fundo do recipiente por ocasião da implantação na lavoura. Ainda como vantagem da utilização dos tubetes ressalta-se que é uma alternativa mais sustentável, pois produz menos resíduos já que os tubetes podem ser reutilizados.

Porém esta abordagem possui alguns pontos negativos: os recipientes possuem custos maiores que os saquinhos e o pegamento das mudas no plantio pode ser mais difícil, principalmente com veranicos no período de plantio devido a menor quantidade de substrato e menor capacidade de retenção de água para a planta. Ainda, o menor volume e as paredes dos tubetes podem provocar restrição radicular, influenciando a altura, área foliar e produção de biomassa (TOWNEND; DICKINSON, 1995; LELES; CARNEIRO; BARROSO, 1998) representando dessa forma uma condição de estresse para planta fazendo com que prevaleça um aumento de fotoassimilados nas raízes e diminuição na parte aérea (JOHNSON et al., 1996).

Haja vista a quantidade de questionamentos envolvendo o método de produção de mudas em tubetes, pesquisas foram desenvolvidas para se encontrar uma boa relação de substrato e o melhor volume do recipiente para o desenvolvimento das mudas no viveiro e em campo. Vallone et al. (2009) avaliou a diferença entre tubetes de 50 e 120 ml e saquinhos de 10 x 20 cm. O trabalho resultou em plantas de café mais desenvolvidas nos sacos plásticos e nos tubetes de 120 ml, após 20 meses de plantio.

Cunha et al. (2002), estudaram tubetes com volume de 50, 120 e 275 ml e quatro diferentes substratos, sendo um comercial (Plantmax) e os demais compostos de esterco bovino, composto orgânico, solo, vermiculita, casca de arroz e areia grossa em proporções variadas. Os autores constataram que o tubete com 120 ml utilizando o substrato comercial obteve os melhores resultados. O substrato, segundo Campos (2002), necessita de um cuidado especial na produção de mudas em tubetes, pois deverá oferecer em seu volume reduzido condições para o desenvolvimento da planta em todos os aspectos durante a sua formação, desde o sistema radicular até a parte aérea.

Vallone et al. (2004), estudaram a substituição do substrato comercial por casca de arroz carbonizada juntamente com a presença de polímero hidrorretentor, capaz de proporcionar maior retenção de água e nutrientes no substrato, para a produção de mudas em tubetes, obtendo resultados ruins com relação ao polímero, mas por outro lado, constatando que a casca de arroz resulta em maior desenvolvimento das mudas e em menor tempo. Vallone et al. (2010), ainda testaram outros substratos em diferentes recipientes para a produção de mudas, chegando à conclusão que saquinhos de polietileno e tubetes com 120 ml, ambos preenchidos com substratos constituídos por 65% de casca de arroz carbonizada e 35% de substrato comercial resultam na aceleração do crescimento.

Na literatura em geral, o plantio de mudas em saquinhos tem mostrado maior crescimento, como comprovam os trabalhos de Dardengo et al. (2013), que avaliaram diferentes recipientes no crescimento de mudas de café conilon, e de Oliveira (2007), que comparou mudas de saquinhos (27x32 cm e 16x25 cm) e tubetes com 120 ml, 360 dias após o plantio no campo com resultado melhor para o condicionamento em saco de polietileno em ambas as pesquisas.

Apesar disso, os resultados são similares; contrastam pouco, fazendo com que o uso de tubetes com volume e substrato adequados, isto é, recipientes com pelo menos 120 ml e ocupados em sua maioria com substrato comercial, sejam uma alternativa viável e com grandes vantagens. Para isso, no entanto, deve-se atentar também para detalhes como a adubação como comprova o trabalho Marana et al. (2008), ao usar adubação de liberação lenta para obter mudas de boa qualidade durante o período no viveiro e complementar a atividade do substrato nos tubetes.

Face ao exposto, ainda existem dúvidas com relação ao pegamento das mudas produzidas em tubetes, sendo um dos receios dos produtores em adotar a prática. Apesar de algumas pesquisas mencionadas acima obterem boa porcentagem de mudas que obtiveram sucesso ao ser implantadas no campo, ainda existem algumas que mostram que o número de

perdas é maior que o do plantio em saquinhos. Ainda faltam pesquisas avaliando culturas com os tubetes em cafeeiros implantados, haja vista que a maioria avalia as mudas em viveiro.

2.2.3.2. Plantio de mudas produzidas em saquinhos multifuros

Os bons resultados de mudas produzidas em saquinho de polietileno referentes ao crescimento e ao pegamento, em contraste com as desvantagens supramencionadas do recipiente, proporcionaram o advento de uma outra alternativa: os saquinhos multifuros. O recipiente é similar ao saquinho de polietileno convencional, entretanto, possui múltiplos furos em sua extensão cilíndrica, sendo comum encontrar saquinhos com 12 ou até mais de 90 furos, dependendo do seu volume. Essa alternativa mostra-se promissora pois a presença do elevado número de furos, além de favorecer a drenagem, torna possível o transplantio sem a retirada do recipiente, não havendo prejuízo para as mudas. A prática melhora a agilidade e a dinâmica do processo, evita o destorroamento e permite a mecanização do plantio (SERAFIM et al., 2011).

Logo, as mudas produzidas em saquinho multifuros são capazes de aliar os pontos positivos do saquinho convencional, como o baixo custo do recipiente, garantia de pegamento e boa taxa de crescimento, à mecanização do plantio, fazendo com que essa etapa seja menos onerosa, representando inclusive um menor custo com mão-de-obra. Entretanto, a alternativa também possui algumas das desvantagens da utilização do saquinho convencional, como a baixa eficiência na fase de viveiro e alta demanda por substrato. Ademais, a abordagem pode representar um impacto ambiental, já que as mudas de cafeeiro, no plantio mecanizado, são transplantadas sem a retirada e o descarte dos saquinhos.

Dentre os trabalhos realizados avaliando o desempenho de mudas de cafeeiro produzidas e transplantadas em saquinhos multifuros, Garcia, Reis e Matiello (2007) estudaram a influência da quantidade de furos no saquinho e do plantio com ou sem a remoção dos mesmos na altura de mudas de cafeeiro, utilizando cultivares Acaiá e Catuai Vermelho. Os autores não observaram diferença significativa para o fator “quantidade de furos” em ambas as cultivares. No entanto, relatam que os plantios em que se retirou o recipiente resultaram em plantas com valores ligeiramente maiores de altura. Nesse estudo o plantio das mudas foi realizado manualmente.

A literatura ainda carece de pesquisas relacionadas a cafeeiros produzidos em saquinhos multifuros e a sua implementação na lavoura, principalmente utilizando o plantio mecanizado. Faz-se necessário um comparativo de desempenho com diferentes recipientes, como os tubetes.

As lacunas evidenciadas na cafeicultura, tanto para avaliação do efeito da calagem em diferentes profundidades, quanto para o plantio de mudas em diferentes recipientes, podem ser

preenchidas por meio do sensoriamento remoto. Os valores de reflectância e os Índices de Vegetação (IVs) calculados por meio de imagens de alta resolução obtidas com o auxílio de câmeras multiespectrais acopladas a Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) podem indicar tendências, comparar comportamentos de forma temporal e espacial, como vigor ou estresse, identificar falhas e inferir se os manejos abordados são eficazes ou ajudam a mitigar limitações do campo.

2.3. Sensoriamento Remoto, índices de vegetação e aplicações na agricultura

Há algumas décadas o uso do sensoriamento remoto para avaliação e monitoramento de diferentes cenários e segmentos se tornou uma prática comum. Jensen (2009) e Mulla (2013) definem sensoriamento remoto como a ciência responsável por adquirir informações de objetos presentes na superfície terrestre sem que seja necessário o contato com os mesmos. A aplicação do sensoriamento remoto é extensa. Pela facilidade de identificação de cobertura vegetal, o sensoriamento se aplica a florestas, arborização urbana, biomas e agricultura (SHIRATSUCHI et al., 2014)

Gates et al. (1965) e Wooley (1971), foram uns dos precursores em pesquisa envolvendo sensoriamento remoto. Os autores explicam que a atmosfera interfere na radiação solar que incide na Terra, fazendo com que parte seja refletida e outra espalhada e que posteriormente interaja com objetos, podendo ser absorvida, transmitida ou refletida. A parte refletida é a que pode ser detectada e mensurada por um sensor, sendo possível assim avaliar isoladamente o comportamento de cada objeto, chamado de comportamento espectral.

A vegetação possui um comportamento espectral bem definido. A radiação eletromagnética (REM) interage principalmente com as folhas. Por meio das respostas espectrais dessas estruturas, torna-se possível fazer inferências baseadas na composição química, morfológica, fisiológica e até sobre a umidade. Existe um comportamento específico para cada faixa espectral da REM ao incidir sobre as diferentes estruturas foliares. Conforme Jorge e Inamasu (2014), de um modo geral, em plantas saudáveis a radiação é pouco refletida na região do visível, principalmente na região do azul e vermelho, onde há absorção por estruturas referentes ao pigmento foliar (clorofila e carotenoides) responsáveis pela realização de fotossíntese, muito refletida pelas estruturas celulares (parênquima lacunoso e esponjoso) na região do infravermelho próximo e novamente pouco refletida em regiões do infravermelho médio devido à absorção pela água.

Conforme mencionado, existem diferentes espectros para cada faixa de comprimento de onda. Os mais usuais no sensoriamento remoto são a faixa do visível, que abrange o vermelho, verde e o azul (RGB), o infravermelho próximo (NIR) e o infravermelho médio (SWIR). O espectro RGB proporciona a visualização de imagens entre 0,4 e 0,7 μm de comprimento de onda, a mesma que é possível enxergar a olho nu. Nessa faixa do espectro é possível visualizar processos erosivos, desmatamentos, falhas de plantio entre outras. Porém, algumas informações, difíceis de serem detectadas na faixa RGB podem ser identificadas no espectro infravermelho próximo (NIR) ou no infravermelho médio (SWIR). De acordo com Dos Santos, Padolfi e Ramaldes (2018) o NIR (faixa de 0,7 a 1,3 μm) identifica melhor estresse nutricional, indicadores fisiológicos e estrutura do dossel de culturas. Já o infravermelho médio é capaz de identificar a umidade e absorção de água pelas plantas.

Com os valores de reflectância dessas bandas é possível calcular grande parte dos Índices de Vegetação (IVs) conhecidos. Os índices são capazes de dar contrastes e realces, além de resultar em valores numéricos (medidas radiométricas adimensionais) que podem indicar e categorizar tendências na planta, como maior vigor vegetativo, maior biomassa, teor de clorofila, porcentagem de cobertura verde entre outros (JENSEN, 2009). Alguns dos IVs frequentemente utilizados pela agricultura: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), e o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI).

O NDVI é calculado baseado no contraste entre a presença de pigmentos fotossintéticos (reflectância na faixa vermelha) e o espalhamento da radiação na folha (NIR) (ROUSE JR et al., 1974). Logo variações no NDVI indicam mudança de capacidade fotossintética da planta o que, de acordo com Malingreau (1986), pode representar estresse ou vigor, alterações no desenvolvimento fenológico ou na estrutura do dossel. É o índice de vegetação mais antigo e ainda o mais utilizado em Sensoriamento Remoto (DAMATTA et al., 2016). O SAVI incorpora o fator L ao NDVI, o qual, de acordo com Huete (1988) varia entre 0 e 1 de acordo com a densidade da vegetação. O NDWI é sensível a alterações da quantidade de água no dossel vegetal expresso por meio da relação entre valores de reflectância na faixa do infravermelho médio (comprimento de onda relacionado a absorção de água) e na faixa do NIR (GAO, 1996). O EVI é utilizado para avaliar vigor da vegetação, levando em consideração as bandas do NIR, azul e vermelho e minimizando o efeito do solo, graças ao fator L, e da atmosfera, graças a fatores de correção C_1 e C_2 . A constante G expressa o fator ganho (JUSTICE et al., 1998).

Atualmente já existem índices que corrigem algumas limitações do NDVI e SAVI como espalhamento da energia por parte da atmosfera, interferência de aerossóis, brilho do solo ou

mesmo por se tratarem de algoritmos mais simples. Pode-se citar, por exemplo, o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado 2 - MSAVI2 (QI; KERR; CHEHBOUNI, 1994), o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Otimizado – OSAVI (RONDEAUX; STEVEN; BARET, 1996) e o Índice de Vegetação, o Índice de Vegetação Resistente à Atmosfera e aos Solos 2 – SARVI2 (HUETE; JUSTICE; VAN LEEUWEN, 1996).

Outros índices focam mais especificamente nos pigmentos fotossintéticos da planta, como a clorofila *a* e *b* e os carotenoides, abrangendo as bandas e as reflectâncias associadas a essas substâncias como é o caso do Índice de Absorção de Clorofila em Reflectância Modificado 1 – MCARI1 (HABOUDANE et al., 2004), do Índice de Clorofila verde - CIG (GITELSON; GRITZ; MERZLYAK, 2003), e do Índice por Diferença Normalizada da Borda do Vermelho – NDRE (BARNES et al., 2000), enquanto outros tem alta correlação com o percentual de Nitrogênio e com a produtividade, como o NVDI Verde – GNDVI (GITELSON; KAUFMAN; MERZLYAK, 1996).

Alguns desses novos cálculos já trabalham com sensores hiperspectrais, onde se considera valores de comprimentos de onda específicos, como é o caso do Novo Índice de Vegetação – NVI, idealizado por Gupta, Vijayan e Prasad (2001). As equações utilizadas para o cálculo desses índices estão esquematizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Índices de vegetação tradicionais obtidos por meio de reflectâncias das bandas multiespectrais em imagens de sensores remotos.

Índice de Vegetação	Equação	Autoria
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$	Rouse Jr. et al. (1974)
Soil-Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{nir} - \rho_{red})}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L}$	Huete (1988)
Normalized Difference Water Index	$NDWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}}$	Gao (1996)
Enhanced Vegetation Index	$EVI = G \times \frac{(\rho_{nir} - \rho_{red})}{(\rho_{nir} + C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue} + L)}$	Justice et al. (1998)
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	$OSAVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + 0,16}$	Rondeaux, Steven e Baret (1996)

Modified Secondary Soil-Adjusted Vegetation Index	$MSAVI2 = 0,5 \times [(2\rho_{nir} + 1) - \sqrt{(2\rho_{nir} + 1) \times 2 - 8 \times (\rho_{nir} - \rho_{red})}]$	Qi, Kerr e Chehbouni. (1994)
Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index 2	$SARVI2 = \frac{2,5 \times (\rho_{nir} - \rho_{red})}{(1 + \rho_{nir} + 6\rho_{red} - 7,5 \times \rho_{blue})}$	Huete, Justice e van Leeuwen (1996)
Green Chlorophyll Index	$CIg = \frac{\rho_{nir}}{\rho_{green}} - 1$	Gitelson, Gritz e Merzlyak (2003)
Normalized Difference Red-Edge Index	$NDRE = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red-edge}}{\rho_{nir} + \rho_{red-edge}}$	Barnes et al. (2000)
Green Normalized Difference Vegetation Index	$GNDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{green}}{\rho_{nir} + \rho_{green}}$	Gitelson, Kaufman e Merzlyak (1996).
New Vegetation Index	$NVI = \frac{\rho_{777} - \rho_{747}}{\rho_{673}}$	Gupta, Vijayan e Prasad (2001)
Modified Chlorophyll Absorption In Reflectance Index 1	$MCARI1 = 1,5 \times [2,5(2\rho_{nir} - \rho_{red}) - 1,3(2\rho_{nir} - \rho_{red})]$	Haboudane et al. (2004)

Legenda: ρ_{nir} =Reflectância no NIR; ρ_{red} =Reflectância no vermelho; ρ_{swir} =Reflectância no SWIR; ρ_{blue} =Reflectância no azul; ρ_{green} =Reflectância no verde; $\rho_{red-edge}$ =Reflectância na borda do vermelho; ρ_{777} ; ρ_{747} ; ρ_{737} =Reflectância nos comprimentos de onda 777nm; 747nm e 737nm respectivamente; Constantes: $L=1$; $C_1=6$; $C_2=7,5$; $G=2,5$.

Alguns sensores, principalmente aqueles de satélites orbitais, ou seja, posicionados em torno da órbita terrestre, tem boa resolução espectral, abrangendo maiores comprimentos de onda e mais bandas no espectro eletromagnético como é o caso do MODIS que capta a reflectância até a região do infravermelho termal (MODIS, 2005), o OLI e TIRS do Landsat 8 que além da faixa visível e infravermelho capta a região Pancromática e a termal (LOVELAND; IRONS, 2016) e o Sentinel 2 que abrange além do espectro visível e infra vermelho, 4 bandas Red Edge, a banda 9 de Vapor d'Água e a do infravermelho médio, compondo 12 bandas no total (EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA, 2015).

A abundância de informação que pode ser acessada por meio de imagens multiespectrais fez com que muitas pesquisas fossem desenvolvidas na agricultura. Sibanda, Mutanga e Rouget (2015) examinaram o potencial do sensor Sentinel-2 MSI comparado com o OLI do Landsat 8 em quantificar a biomassa acima da superfície do solo com diferentes tipos de tratamento com fertilizantes. O estudo comprovou que ambos os satélites são eficazes para uma quantificação regional, principalmente onde os recursos são escassos.

Moharana e Dutta (2016) demonstraram em seus estudos a existência de alta correlação entre a variabilidade espacial da clorofila com a concentração de nitrogênio, utilizando imagens de sensores hiperespectrais.

2.3.1. Sensoriamento remoto na cafeicultura

Na cafeicultura, há uma variedade de trabalhos envolvendo sensoriamento remoto com diferentes abordagens. Nogueira, Moreira e Volpato (2018) mostraram por meio de imagens do Landsat 8 que a direção de plantio, espaçamento da lavoura, época do ano, e idade das plantas tem influência nos valores de reflectância. Os autores ainda associaram produtividade com NDVI, obtendo correlação positiva. Chemura, Mutanga e Dube (2017b), avaliaram por meio de imagens Landsat 8 OLI anomalias e heterogeneidade em lavouras de café (*Coffea arabica* L.) de acordo com a idade da planta utilizando o NDVI e o Índice de Água da Superfície da Terra (LSWI – Land Surface Water Index), atestando que o método é significativo para monitoramento a longo prazo, ou seja, para avaliar plantios com anos de cultivo. Chemura, Mutanga e Dube (2017a) utilizaram o algoritmo *Random Forest* para prever estresse hídrico nas folhas da cultura de café, provando que a previsão é possível ao usar as bandas espectrais do visível e do infravermelho.

Rosa (2007) avaliou a dinâmica temporal de cafeeiros em formação, em produção e podados, por meio do NDVI de imagens do sensor MODIS (Figura 6), na proposição de um modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região sul e sudoeste de Minas Gerais, obtendo respostas mais elevadas para cafeeiros em produção em comparação com cafeeiros em formação e valores distintos ao longo do tempo, os quais foram separados e relacionados às etapas do ciclo fenológico do cafeeiro.

Souza et al. (2016) compararam os algoritmos de classificação *Support Vector Machine* (SVM), *Random Forest* e o *Naive Baynes* em imagens RapidEye, para mapeamento de áreas com plantio de café nas cidades de Araguari, Carmo de Minas e Três Pontas em Minas Gerais, obtendo bons resultados (acurácia de mais de 75% para todos), sendo o SVM o algoritmo que apresentou o melhor desempenho, com mais de 85% de acurácia global. Sartori, Galo e Imai (2009) utilizaram de um Sistema de Sensoriamento Remoto Aerotransportado (SRA), realizado por meio de um avião a uma altura de 600 metros, aliado à classificação por Redes Neurais Artificiais (RNA) onde foram capazes de detectar o grau de infestação por plantas daninha nas entrelinhas de um cafezal localizado na Universidade Federal de Lavras – Lavras, MG.

Para avaliar a incidência de ferrugem em plantios de café na Guatemala, Katsuhama et al. (2018) fizeram uso de imagens Landsat 7 e o NDVI proveniente das mesmas, entre os anos

de 2012 e 2014 onde constataram que é possível avaliar o alastramento da doença por meio do NDVI, o qual pode ser, portanto, utilizado como um indicador de infestação dessa doença. Já Martins, Galo e Vieira (2017), utilizaram parâmetros biofísicos e imagens multiespectrais do sensor RapidEye, referentes município de Monte Carmelo, MG, para gerar assinaturas espectrais e detectar presença de nematoides no cafeeiro. Os autores ainda classificaram a área de acordo com a severidade da infestação.

Ainda no tocante a doenças, Marin et al. (2019a), realizaram um monitoramento radiométrico multiespectral para avaliar danos em cafeeiro causados pela bactéria *Pseudomonas syringae* pv. *garcae* obtendo boa correlação de incidência e de severidade com índices gerados por imagens do sensor Landsat OLI/TIRS. Por fim, Marin et al. (2019b), correlacionou variados índices de vegetação derivados das bandas do Landsat-5 TM com parâmetros bióticos e abióticos (doenças, pragas, nutrientes ou estresse hídrico), obtendo correlações positivas e mostrando potencial do respectivo sensor para mapeamento de estresse e para possíveis correções em lavouras cafeeiras.

Entretanto, com o advento tecnológico o uso das imagens obtidas por sensores de satélite está decaindo, pois apesar da boa resolução espectral, as imagens obtidas possuem limitações na resolução espacial e temporal. Os satélites que possuem relativa qualidade nesses parâmetros geralmente cobram pelas imagens. Ademais, setores como a agricultura, cada vez mais competitivos e na busca constante pela precisão demandam sensores com alta resolução espacial e temporal. Nesse contexto as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) aparecem como alternativas capazes de aprimorar o sensoriamento remoto e a Agricultura de Precisão (AP) (TORRADO; JIMÉNEZ; DÍAS, 2016).

2.4. Aeronaves Remotamente Pilotadas: contexto atual e enfoque agrícola

Os primeiros indícios sobre os veículos aéreos não tripuladas (VANTs) se deram com aplicações militares. Um dos primeiros relatos foi no século XIX, quando em 22 de agosto de 1849, cerca de 200 balões austríacos levavam bombas em direção à Veneza na Itália (RPAV, 2003). Com sua inserção no meio civil a tecnologia adquiriu novas nomenclaturas, tais como Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), Aeronave Remotamente Operada (ARO) ou Drone. Embora o termo VANT apareça com bastante frequência na literatura, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2017) emprega o termo ARP que é definido como aeronave não tripulada para fins não recreativos, sejam eles comerciais, corporativos ou para experimentos. As ARPs podem ser classificadas de diferentes maneiras. Uma das mais comuns é quanto ao

tipo de plataforma: asa fixa, ou multirotor de asa rotatória. De acordo com Watts, Ambrosia e Hinkley (2012) as vantagens de cada uma delas depende da finalidade do uso. A ARP é composta pela aeronave, estação de controle remoto (GCS), mecanismo GNSS acoplado e sensores de medição de inércia (IMU).

A ARP passou a ser uma tecnologia valiosa a ser utilizada nos mais variados setores. Na agricultura, a frequência do uso vem aumentando consideravelmente na implementação da agricultura de precisão. No entanto, de acordo com Colomina e Molina (2014), o fácil acesso a essa tecnologia tem resultado na geração de mapas ou outros produtos com baixa qualidade e acurácia, trazendo incerteza, gerando desconfiança em alguns produtores mais conservadores e fazendo com que ainda haja uma aversão ao implemento das aeronaves. Existem requisitos para o seu uso, tais como determina a Resolução nº 419 de dezembro de 2017 da ANAC. Mas, a ampla difusão das ARPs tem dificultado a fiscalização e o acesso a essa informação. Ademais, ainda não existem normas estabelecidas sobre a operação desses veículos de acordo com a finalidade de uso. Portanto, o segmento possui um vasto campo para se desenvolver pesquisas.

Oliveira et al. (2018) afirmam que o uso de ARPs para obter imagens aéreas é capaz de ajudar na tomada de decisão, na gestão do cultivo e nas estratégias objetivando o aumento da eficiência, produtividade e elevar a competitividade. O Japão se destaca nesse segmento. Nicas (2014) explica que o país vem empregando a tecnologia desde 1991 e que desde de meados da última década ARPs da Yamaha sobrevoam 40% das plantações de arroz do país para aplicar fertilizantes em forma de spray.

Na Austrália vem crescendo o uso de VANTs para o controle de plantas daninhas, por meio da aplicação de herbicidas. Na Nova Zelândia o uso comercial das aeronaves tem pouca restrição e fazendeiros vêm usando a tecnologia no manejo de pastagens em fazenda de ovinos. No Brasil, Peru e Argentina, predominam áreas de plantio com grandes extensões, fazendo com que o uso de ARPs seja mais comum na gestão, por meio de mapeamento e monitoramento dos solos e culturas (FREEMAN; FREELAND, 2014).

O uso de ARP para imageamento de culturas seguem os princípios da fotogrametria, primeiramente introduzidos na literatura por Albret Meydenbauer em 1893. Lillesand, Kiefer e Chipman (2008), definem fotogrametria como ciência e tecnologia capaz de obter informações espaciais por meio de fotografias aéreas. Para que não haja lacunas entre as imagens obtidas, Redweik (2007) explica que a sobreposição frontal (overlap) deve ser de 60% e a lateral de no mínimo 30% (sidelap). A ANAC (2017), estabelece que a altura máxima de voo de um VANT deve ser de 120m de altura. Para alturas mais elevadas é necessário obter uma autorização específica da agência.

Para o sensoriamento remoto, são acopladas câmeras multiespectrais às ARPs. Por voarem em altitudes mais baixas, se comparados aos satélites e aviões, as imagens obtidas possuem resolução espacial elevada (NEBIKER et al.; 2008). Com as imagens de alta qualidade obtidas é possível avaliar falhas no plantio, diferenças de reflectância, utilizados na detecção de estresse nutricional e estresse hídrico. Além disso outros produtos que podem ser gerados são Modelo Digital de Elevação (MDE), Modelo Digital de Superfície (MDS), Ortomosaico, Ortofotos entre outros.

Nesse contexto, diferentes pesquisas vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos utilizando ARPs para sensoriamento remoto na agricultura. Huang et al. (2018) identificaram plantas daninhas no plantio de arroz na província de Guangdong e conseguiram desenvolver por meio de algoritmos aplicados às imagens, mapas de prevenção, para futura aplicação de herbicidas. Bah, Hafiane e Canals (2018) também fizeram o levantamento de plantas daninha em culturas de feijão e espinafre na França utilizando imagens RGB e classificando as imagens pelo método *machine learning*.

Vega et al. (2015) monitoraram por meio de imagens multiespectrais obtidas por ARPs, plantios de girassol na cidade de Córdoba na Espanha em quatro meses diferentes e foram capazes de correlacionar o NDVI com a variação da biomassa e quantidade de nitrogênio. Caturegli et al (2016) utilizaram imagens de drone para estimar o nível de nitrogênio em diferentes espécies de grama, na cidade de Pisa na Itália. De forma similar, Gonçalves et al. (2017) utilizaram fotografias de drone para, por meio do índice MPRI (Modified Photochemical Reflectance Index), estudar a variabilidade espacial e temporal do plantio de grama São Carlos no município de Bom Sucesso - MG, Brasil, obtendo alta correlação entre o índice e o crescimento da cultura.

Na cafeicultura, estudos de Herwitz et al. (2002), projeto em conjunto com a NASA utilizaram imagens de ARP de alta resolução para mapear a plantação de café Kauai, no Havaí, Estados Unidos, onde obteve correlação positiva com valores de brilho do dossel do cafeeiro e maturação dos frutos. Herwitz et al. (2004) utilizaram imagens multiespectrais obtidas por ARP para identificar falhas na cultura de café. Johnson et al. (2004) avaliaram a aplicabilidade de monitorar a maturação de frutos de café de acordo com a sua reflectância e comparou o tempo que se levava do dia do voo com ARP de asa fixa, realizado para obtenção de imagens, até o dia da colheita, constatando que os frutos mais maduros levantados na imagem levavam menos tempo.

Ainda abordando a maturação dos frutos de café, Furfaro et al. (2007) desenvolveram um algoritmo utilizando redes neurais para estimar o quão maduros se encontram os frutos de

café por meio de aprendizagem de máquina e obtiveram dados consistentes ao compará-los com àqueles resultantes da pós-colheita. Na busca pela melhor época para a colheita do café e pela estimativa da produtividade, Carrijo et al. (2017) avaliaram três algoritmos de aprendizagem de máquina para de detecção automática de frutos maduros por meio de imagens RGB obtidas com voos de ARP nas entrelinhas da lavoura, usando de técnicas de aprendizagem de máquina para segregar os frutos de acordo com sua coloração e tamanho e distingui-los de galhos e folhas

Oliveira et al. (2018) foram capazes de identificar falhas de plantio de café utilizando o algoritmo *Hough Line Transform* (HLT) por meio de imagens RGB, obtendo boa acurácia. Chemura, Mutanga e Dube (2017a) avaliaram teores de água na cultura de café, usando imagens multiespectrais, obtendo bons resultados e afirmando que é possível reduzir perdas relacionadas com a irrigação desnecessária. Dos Santos et al. (2020), obteve ótima correlação entre altura e diâmetro de copa medida em campo e por ARP (85% e 95%, respectivamente), constatando que essas medições podem ser realizadas de maneira indireta e favorecendo a proposição de um modelo capaz de estimar a porcentagem de cobertura de terreno, Índice de Área Foliar (IAF) e de ainda desenvolver mapa de coeficiente de cultura (Kc). Santos et al. (2019a) e Santos et al. (2019b) analisaram parâmetros de voo e de georreferenciamento em imagens obtidas por ARP comercial com diferentes pontos de controle num cafeeiro em Lavras – MG, Brasil a fim de aumentar a assertividade e otimizar a aplicabilidade dos ortomosaicos nas práticas agrícolas.

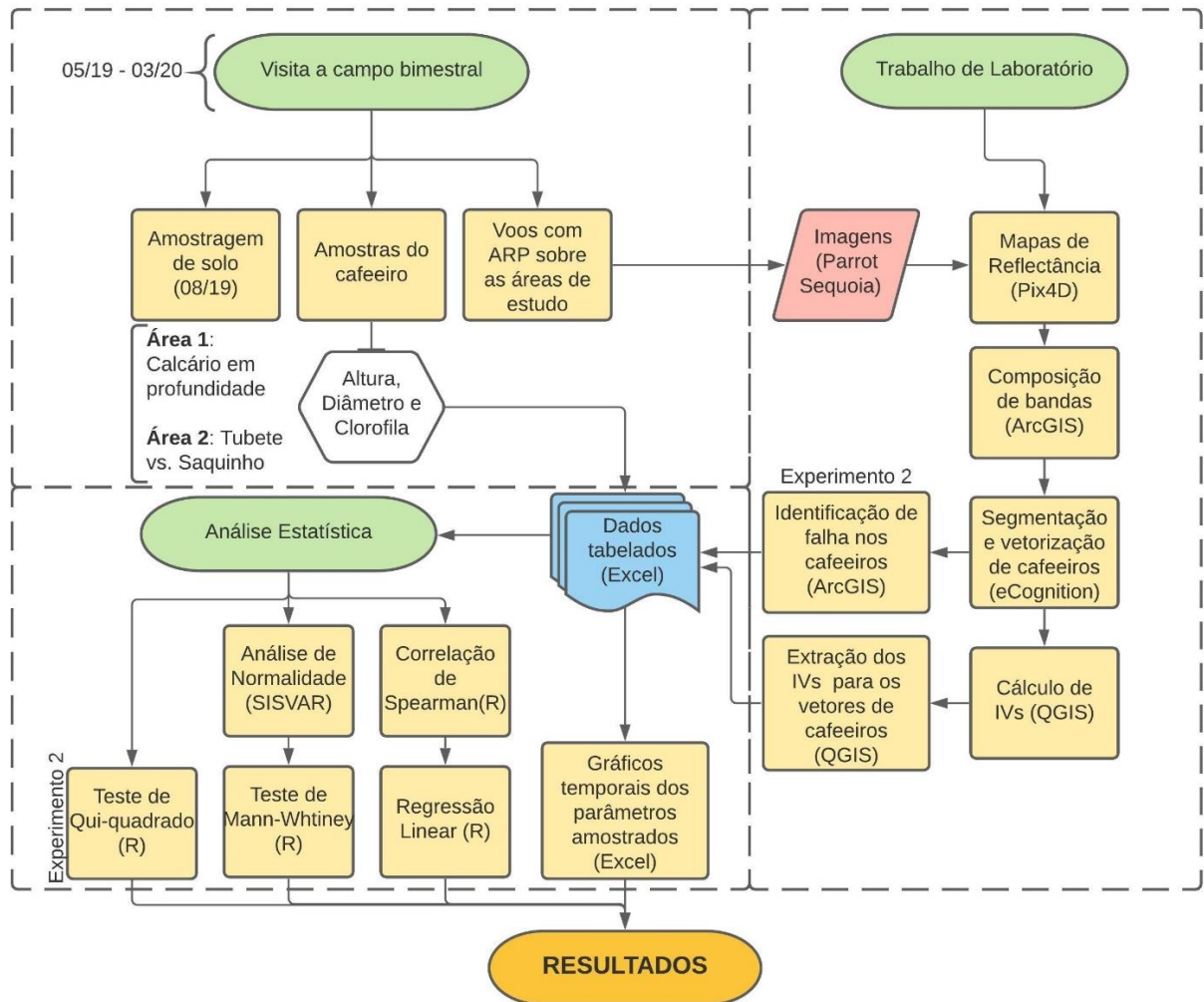
Porém, ainda faltam estudos na cafeicultura, utilizando imagens multiespectrais, principalmente avaliando diferentes manejos, como os que serão abordados nessa pesquisa, (calcário em profundidade e plantio de mudas produzidas em tubetes vs. saquinhos multifuros) com o comportamento espectral da planta ou do solo. As ARPs ainda possuem um campo vasto de pesquisa e na cafeicultura e sua aplicabilidade tem grande potencial para facilitar a gestão, tomada de decisão, monitoramento e aplicação mais racional de insumos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Visão geral

Um panorama geral da metodologia desenvolvida e da sequência das etapas para a realização desse estudo, encontra-se no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma com a sequência das etapas desenvolvidas para este estudo.



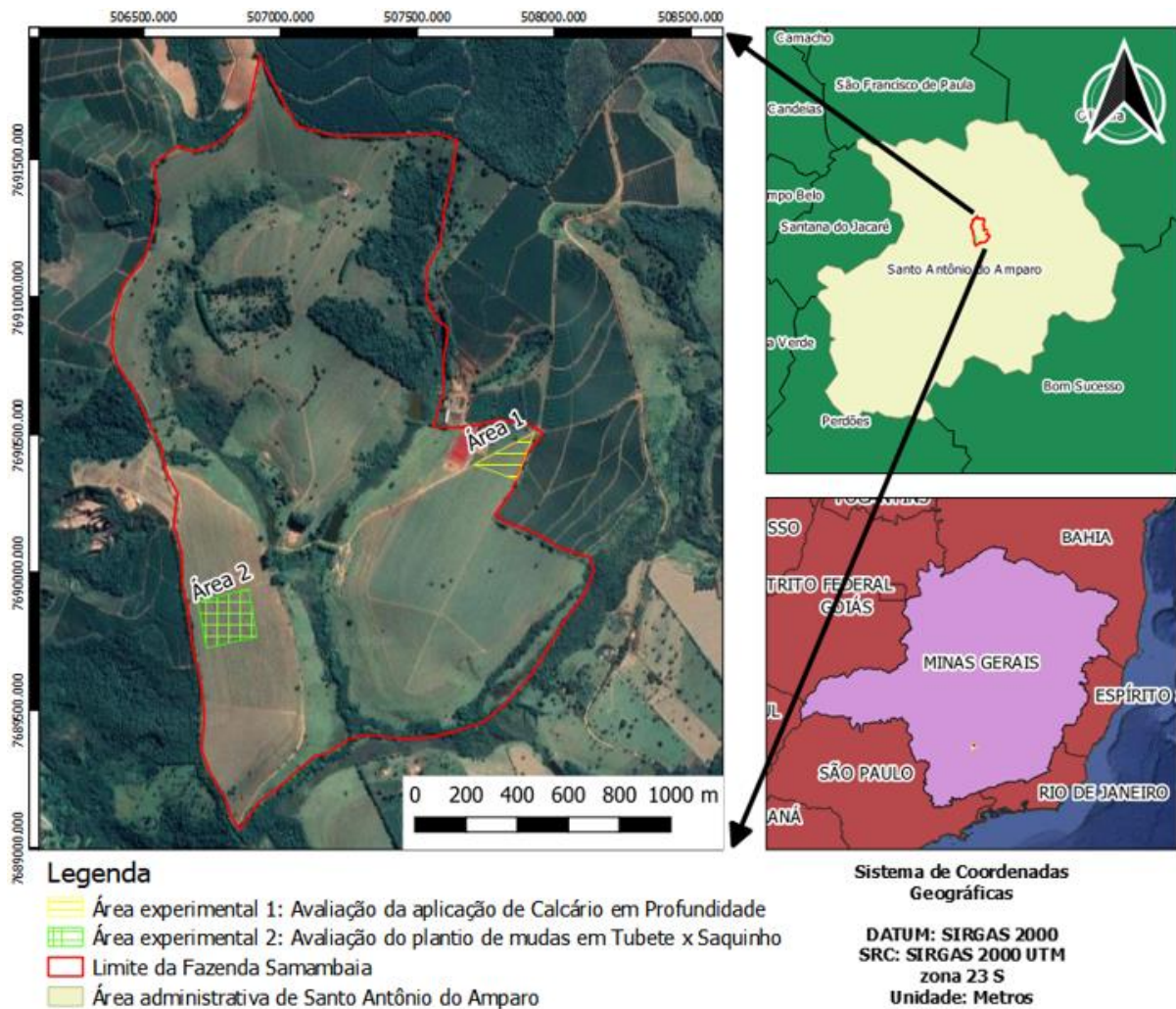
Fonte: Do autor (2020).

3.2. Área de estudo

O local do experimento é uma área cafeeira pertencente a Fazenda Samambaia, propriedade localizada no município de Santo Antônio do Amparo, região dos Campos das Vertentes, microrregião de Formiga, sudeste de Minas Gerais (BARUQUI et al., 2006). O clima desta região, de acordo com a classificação climática de Köppen modificada por Alvares et al. (2013) é Cwb, clima Subtropical Úmido, predominando seca no inverno e verão temperado temperatura média variando entre 18°C e 22°C. A área possui média de precipitação anual de 1650 mm, com ocorrência de chuvas ao longo de todo o ano. O período seco corresponde ao intervalo entre maio e setembro, quando começa o período chuvoso que pode perdurar até o fim de março ou início de abril.

A área possui um total de 275 hectares e a posição da coordenada central da propriedade está na Longitude 507.169,000 m e Latitude 7.690.0433,000 m no sistema de coordenadas SIRGAS 2000 projeção UTM 23 S e altitude de 970 metros. O solo predominante na região é o Latossolo Vermelho Amarelo (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2006). As áreas da fazenda e dos locais onde foram realizados os experimentos estão representadas na Figura 2.

Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo, Fazenda Samambaia.



Fonte: Do autor (2019).

O cultivo predominante na fazenda é da espécie *Coffea arabica* L. Neste experimento, as áreas 1 e 2 possuem cultivares diferentes, com mudas transplantadas entre os meses de novembro e dezembro de 2018, com espaçamento entre plantas de 0,50 m e entre linhas de 3,8 m. A Área 1, onde se avaliou o efeito do calcário aplicado em profundidade, está situada na coordenada 507.868,215; 7.690.442 (Longitude e Latitude em metros – SIRGAS 2000 23S), possui altitude média de 1026 m, área de 0,31 hectares e nela foi transplantada a cultivar Catucaí

2SL. Já a Área 2, referente ao estudo de mudas produzidas em tubetes em comparação com mudas produzidas em saquinhos de polietileno, situa-se na coordenada 506.793,842; 7.689.859,824 (Longitude e Latitude em metros – SIRGAS 2000 23S), possui altitude média de 1010 m, área de 0,28 hectares e o plantio foi realizado com a cultivar Catuaí IAC-62 - Códigos de cadastro de acordo com o Registro Nacional de Cultivares (RNC) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Entretanto, não foi avaliado o fator cultivar nesse experimento.

3.3. Tratos culturais

Para o pré-plantio do café, foram realizadas etapas para condicionar o solo previamente degradado por pastagens, com áreas compactadas devido ao pisoteio animal. Inicialmente, foi aplicado na superfície do solo de toda a área uma dose de 4 toneladas de calcário dolomítico por hectare que foi incorporado via gradeamento, primeiramente com grade pesada e posteriormente com grade leve, com intuito de quebrar os torrões. Em seguida, foi realizada subsolagem com subsolador Ikeda. Após o preparo do solo, foram abertos sulcos com espaçamento de 3,8 m entre linhas e com 35 cm de profundidade, que receberam doses de gesso, calcário e magnesita (150 g/m, 600 g/m e 100 g/m, respectivamente). Uma nova sulcagem foi feita com o objetivo de incorporar os insumos previamente citados, onde ainda foram aplicados fertilizante fosfatado (MAP – 200g/m) e esterco de galinha (2.000 g/m). Por fim houve o fechamento dos sulcos utilizando-se um subsolador de 3 hastes que ainda proporcionou quebra dos torrões restantes.

Em todas as áreas avaliadas houve ainda a aplicação de 400 g/m de calcário dolomítico em profundidade no solo, após o fechamento dos sulcos, entre 0,60 e 0,80 m com a utilização do implemento roça-carpe, sendo que na Área 1, onde viria a ser plantada a cultivar Catuaí 2SL, foram deixadas 3 linhas sem esse manejo para serem monitoradas nesse experimento.

Foram marcadas as linhas de plantio para que nos meses de novembro e dezembro de 2018 houvesse finalmente o transplântio de mudas, previamente cultivadas num viveiro dentro da mesma propriedade. Estas foram plantadas com 50 cm de distância entre si (na linha de plantio) em saquinhos multifuros com o auxílio da transplantadora da Mafes (gralha). Na Área 2, foram separadas três linhas para o plantio e avaliação de mudas produzidas em tubetes. Os tubetes são de polietileno rígido e possuem um volume de 180 ml (conforme a Figura 3), contendo substrato composto por solo e Tropstrato, uma mistura de vermiculita, fibra de coco e pinus.

Figura 3 – Fotografia do tubete utilizado na lavoura em estudo.



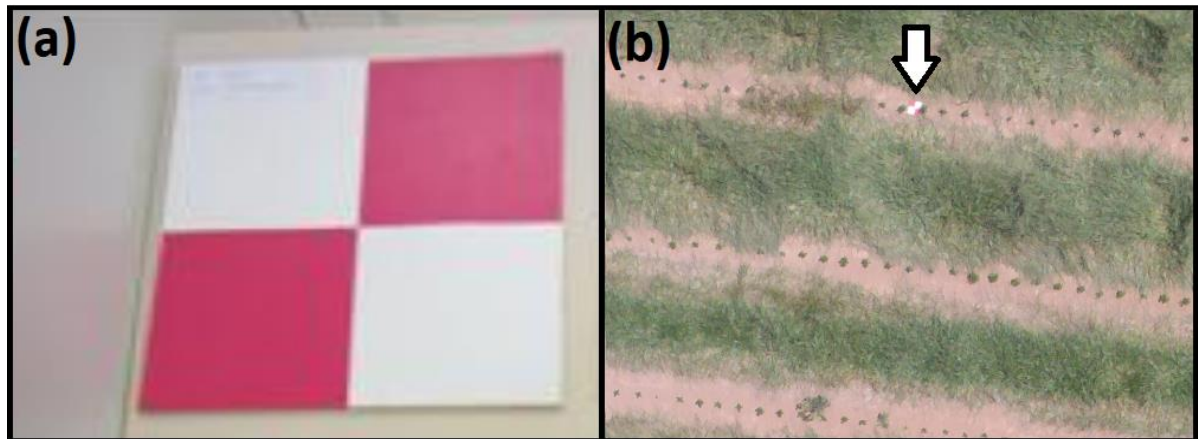
Fonte: Do autor (2020).

Para o manejo de plantas invasoras foi aplicado herbicida pré-emergente após 10 e 45 dias de plantio e pós emergente após 90 e 120 dias de plantio. Foi realizada ainda pulverização foliar de micronutrientes 20 dias após o plantio processo que se repetiu a cada 30 dias, totalizando 5 pulverizações.

Entre o 4º e 5º mês após o plantio, já com o pegamento efetivo das mudas, cobriu-se com terra parte do tronco das plantas de café, prática que objetiva proporcionar maior retenção de água, incorporar matéria orgânica e proteger das raízes superficiais do cafeeiro (SERAFIM, 2011).

As linhas e parcelas reservadas para o estudo dos manejos foram demarcadas por placas posicionadas em campo, os chamados pontos de controle (Ground Control Points – GCPs), com intuito de facilitar a identificação nas imagens obtidas pela ARP, conforme exemplificado na Figura 4.

Figura 4 – Pontos de controle (GCPs) posicionados no campo para auxiliar o georreferenciamento das imagens e destacar as áreas de estudo. (a) Imagem da placa, (b) Imagem aérea obtida por ARP da placa posicionada na parcela.



Fonte: Do autor (2020).

3.4. Aeronave utilizada para obtenção de imagens

A obtenção das imagens se deu por meio de voos com as Aeronaves Remotamente Pilotadas 3DR Solo (Figura 5) e DJI Matrice 100 (Figura 6) ARPs de asas rotativas, com quatro motores (quadricoptero), conexão Wi-Fi com a base, capazes de executar missões em piloto automático e controlado por meio da telemetria. Segundo a 3DR Robotics Inc. (2015), fabricante do 3DR Solo, a aeronave possui autonomia de até 25 minutos, alcance de até 8 km, velocidade de cruzeiro de 8 m/s e máxima de 15 m/s, enquanto o Matrice 100, de acordo com a DJI (2016), possui autonomia de 22 a 28 minutos, alcance de 5 km, velocidade de cruzeiro recomendada de 10 m/s e máxima de 17 m/s no modo GPS. É importante frisar que se deve planejar missões dentro desses parâmetros operacionais para evitar acidentes ou danificar o produto.

Figura 5 – Fotografia da ARP 3DR solo e seus componentes.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 6 – Fotografia da ARP DJI Matrice 100 e seus componentes.



Fonte: Do autor (2020).

3.5. Planos de voo

Para o planejamento do voo foram utilizados os softwares Mission Planner 1.3, criado por Michael Osborne (ARDUPILOT, 2019), aplicativo livre no qual é possível configurar

diversos parâmetros de voo em comparação com outros softwares de acesso restrito e com bloqueio na edição, e o Precision Flight (PRECISIONHAWK, 2017), também gratuito, com menos recursos que o primeiro, mas com a vantagem de poder ser executado via smartfone. Nos softwares são configuradas a direção do voo, sobreposição de imagens, velocidade, altura entre outros.

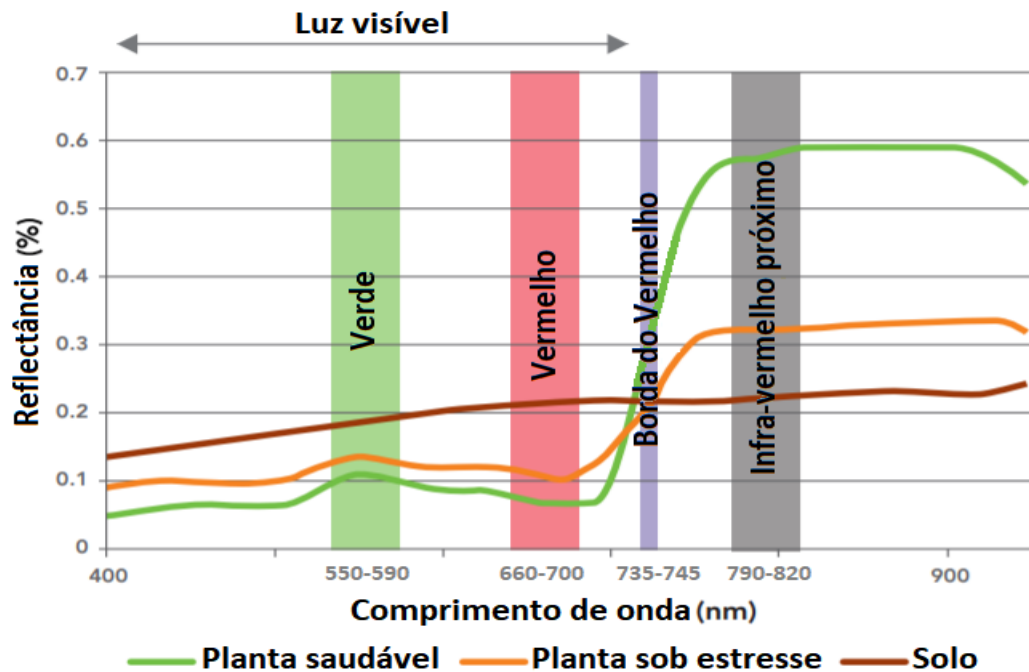
Os padrões preliminares para a missão são voos na direção transversal em relação as linhas de plantio, sobreposição acima de 80% (80% frontal x 75% lateral – acima do mínimo recomendado pela fotogrametria clássica: 60x30%), velocidade de 8 m/s e altura de 50m em relação ao solo, visando capturar imagens de alta resolução e sem distorções. Os voos foram realizados preferencialmente entre 12 e 13 horas para que não houvesse interferência de sombras, já que nesse horário o sol está posicionado perpendicularmente à superfície terrestre e, de acordo com Bater et al. (2011), imagens de câmeras, sofrem influência de mudanças de iluminação horárias ou sazonais. Antes de cada voo, foi feita uma verificação prévia das condições climáticas, do ambiente e da ARP para que as imagens fossem obtidas com qualidade e o equipamento não fosse danificado.

3.6. Sensor multiespectral

Para a obtenção das imagens, foi utilizada uma câmera multiespectral com capacidade de detectar a radiação no espectro visível (RGB) e no infravermelho, ou seja, que consigam gerar bandas multiespectrais. A câmera acoplada à ARP foi a Parrot Sequoia, que de acordo com Parrot Drones SAS (2018), possui 16 MP, definição de 4608 x 3456 pixels, abertura focal de até 63,9° HFOV e consegue imagens com 4 bandas multiespectrais separadas além do RGB: Vermelho, Verde, Red Edge e NIR (Near-Infrared).

A câmera possui ainda um sensor de irradiação solar que realiza correções nas imagens (calibração radiométrica automática) e acopla um GNSS. Além disso, foi utilizado também um painel de calibração radiométrica da mesma fabricante da câmera para que os valores de reflectância das imagens pudessem ser corrigidos e padronizados. As bandas espectrais e os respectivos comprimentos de onda que as imagens obtidas pela Câmera Parrot Sequoia conseguem captar, além de alguns exemplos de assinaturas espectrais relacionados a comportamento foliar e de solo, estão descritos na Figura 7.

Figura 7 – Limites dos comprimentos de onda das bandas nas quais opera o sensor multiespectral da Câmera Parrot Sequoia.



Fonte: Parrot Drones SAS (2016).

A resolução espacial dos mosaicos gerados e dos mapas de reflectância para as diferentes bandas está relacionada à altura de voo. Para esse estudo, à 50 m de altura, nas bandas verde, vermelho, borda do vermelho e infravermelho próximo, obteve-se aproximadamente 4,85 cm de resolução espacial, enquanto na RGB 1,5 cm, suficiente para individualizar as mudas do cafeeiro.

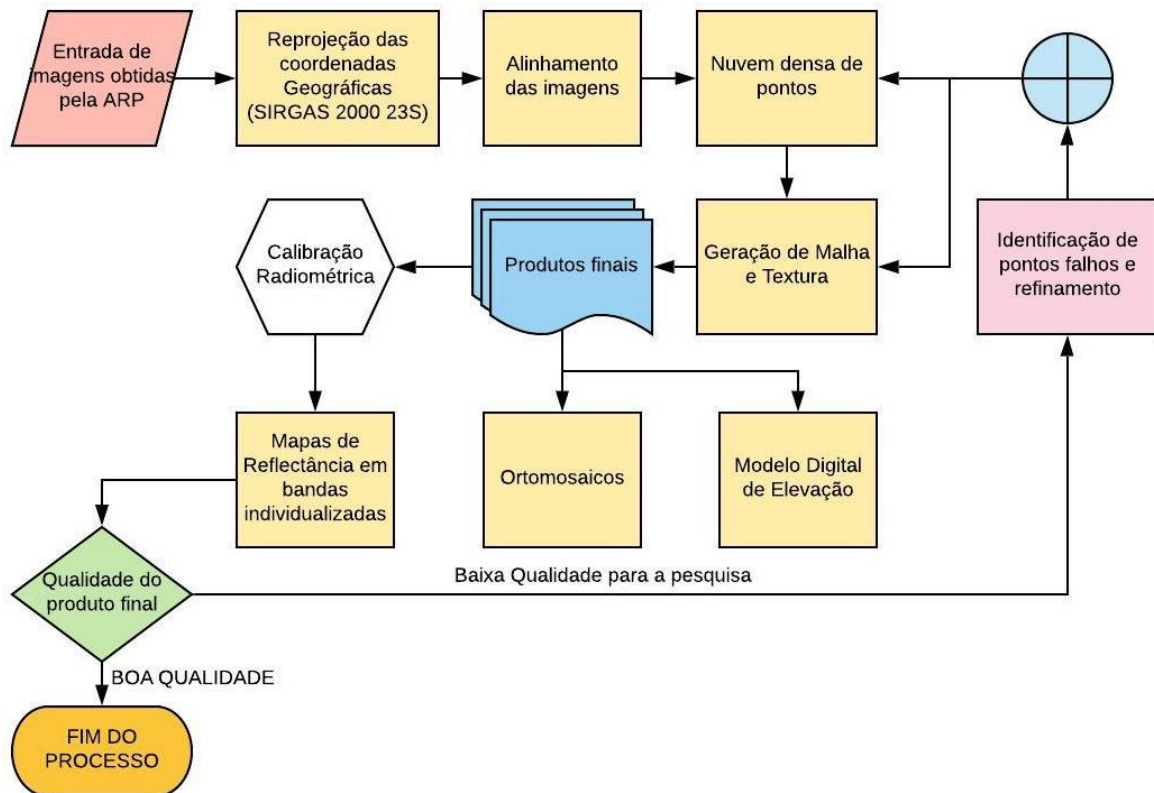
3.7. Processamento das imagens

Após os voos, as imagens foram processadas no software PIX4D Mapper, versão 4.4.10 (PIX4D SA, 2019) para que fossem alinhadas, gerada a nuvem de pontos e textura e finalmente gerados os ortomosaicos e os mapas de reflectância individualizados para cada banda. O Fluxo do processo é demonstrado na Figura 8. Com os produtos gerados, utilizou-se os softwares SIG ArcGIS 10.1 (ESRI, 2011), QGIS 3.4.14 Madeira (QGIS Development Team, 2019) e o eCognition Developer 9.0 (TRIMBLE, 2014) para a geração de índices de vegetação, segmentação das imagens e delineamento de vetores com informações geoespaciais (shapefiles) referentes às parcelas e a posterior extração dos valores dos IVs.

Ainda, esses softwares foram utilizados para adicionar às tabelas de atributos dos vetores, os parâmetros medidos em campo - altura, diâmetro de copa e clorofila - para que

posteriormente, os dados agrupados viessem a ser analisados em outros softwares como o Microsoft Excel (MICROSOFT, 2013), o SISVAR (FERREIRA, 2011) e o R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009).

Figura 8 – Fluxograma de processamento de imagens da ARP no software.



Fonte: Do autor (2020).

As especificações do computador onde foram processadas as imagens são:

- Sistema Operacional: Windows 10 Home Single Language, 64bits;
- Placa de vídeo: NVIDIA Geforce GTX 1050 Ti 4GB;
- Processador: Intel® Core™ i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz;
- Memória RAM: 16GB (utilizável: 15,90GB).

Com as configurações do referido computador, foi possível trabalhar com níveis de qualidade elevados no processamento das imagens pelo software Pix4D. Os parâmetros adotados para cada etapa de processamento são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no fluxo de processamento de imagens do software Pix4D.

Parâmetros	Configurações
Processamento inicial (alinhamento)	
Escala dos pontos-chave da imagem	Máxima
Pares de imagens correspondentes	Corredor ou grade aérea
Número de pontos-chave	Automático
Método de Calibração	Alternativo
Construção de Nuvem de Pontos e Textura	
Escala da Imagem	Tamanho original da imagem
Densidade dos Pontos	Alta
Número mínimo de correspondências	3
Malha de Textura 3D	Alta Resolução
Construção do MDE e Ortomosaico	
Resolução	Automática
Formato do Ortomosaico	GeoTIFF
Mapas de Reflectância e cálculo dos índices	
Calibração Radiométrica	Sensor de irradiação e Placa de calibração
Bandas	Green, Red, Red-Edge, NIR
Resolução	Automática
Formato do Mapa de Reflectância	GeoTIFF

3.8. Índices de Vegetação

Foram calculados Índices de Vegetação (IVs) para avaliar se a implementação de cada manejo resultou em alguma alteração no comportamento espectral em comparação com o controle. Os IVs podem obter correlação com outras medidas amostradas em campo nesse trabalho.

Os índices calculados foram o Índice de Diferença de Vegetação Normalizada (NDVI), NDVI Verde (GNDVI), Índice por Diferença Normalizada da Borda do Vermelho (NDRE), o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado 2 (MSAVI2), Índice de Absorção de Clorofila em reflectância Modificado 1 (MCARI1), Índice de Clorofila verde (CIg).

Os índices supracitados foram escolhidos pois têm sido utilizados na literatura para avaliar teor de clorofila, nitrogênio, vigor, estresse hídrico, estimar produtividade, entre outros parâmetros significantes para estudar o comportamento do cafeeiro. Índices como o GNDVI, NDRE, MCARI1 e o CIg têm a premissa de avaliar teor de Nitrogênio e pigmentos fotossintéticos e, no caso do NDRE, consegue abranger uma banda muito sensível no comportamento das plantas, que é a Borda do Vermelho (HABOUDANE et al., 2004; GITELSON; GRITZ; MERZLYAK, 2003; BARNES et al., 2000; GITELSON; KAUFMAN;

MERZLYAK, 1996). Já o NDVI, apesar de antigo, é dos mais difundidos e utilizados para avaliar vigor vegetativo, apesar da sua sensibilidade à cor do solo e iluminação (DAMATTA et al., 2016). Devido à possível interferência do fator solo, foi escolhido o MSAVI2. Para o cálculo desses IVs, foram utilizadas as Equações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 descritas abaixo, respectivamente para o NDVI, GNDVI, NDRE, MSAVI2, MCARI1 e CIg:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

$$GNDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{green}}{\rho_{nir} + \rho_{green}} \quad (2)$$

$$NDRE = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red-edge}}{\rho_{nir} + \rho_{red-edge}} \quad (3)$$

$$MSAVI2 = 0,5 \times \left[(2\rho_{nir} + 1) - \sqrt{(2\rho_{nir} + 1) \times 2 - 8 \times (\rho_{nir} - \rho_{red})} \right] \quad (4)$$

$$MCARI1 = 1,5 \times [2,5(2\rho_{nir} - \rho_{red}) - 1,3(2\rho_{nir} - \rho_{red})] \quad (5)$$

$$CIg = \frac{\rho_{nir}}{\rho_{green}} - 1 \quad (6)$$

Em que:

ρ_{green} – reflectância na região espectral do verde;

ρ_{red} – reflectância na região espectral do vermelho;

$\rho_{red-edge}$ – reflectância na região espectral da borda do vermelho;

ρ_{nir} – reflectância na região espectral do infravermelho próximo.

O cálculo dos índices e os arquivos “raster” foram gerados no software QGIS por meio da ferramenta “Calculadora Raster”, onde é possível fazer operações envolvendo valores de reflectância das bandas pixel por pixel. Os valores dos índices foram extraídos pela ferramenta “Estatísticas Zonais”, a qual anexa aos vetores referentes às plantas de café a média dos valores dos pixels contidos em cada vetor. Os vetores foram desenvolvidos no software eCognition Developer, software amplamente utilizado para classificação ou análises orientadas a objetos (OBIA – Object Based Image Analysis), capaz de avaliar imagens por meio de segmentação e posterior classificação das classes de interesse considerando atributos variados como informação espectral, forma, textura entre outros para diferenciação entre objetos, além de hierarquizar a relevância dos fatores no processo (BLASCHKE et al., 2014).

Para tal, foi criada uma árvore de processos, conforme Benz et al. (2004), com a seguinte sequência de tarefas:

1. Segmentação da imagem por meio do algoritmo “Multi-resolution segmentation” e “spectral difference segmentation”;

2. Amostragem de cafeeiros por meio da ferramenta “sample selection”;
3. Treinamento e classificação utilizando o classificador “Support Vector Machine”, com inserção dos parâmetros brilho, forma, compacidade, bandas espectrais, e índices de vegetação);
4. Por fim, a exportação dos vetores transformados para o formato shapefile com valores de área e sistema de referência geográfica para serem utilizados em outros softwares SIG e poderem ser comparados com as amostras de campo.

3.9. Levantamento de falhas

Para verificar se houve diferença no “pegamento” entre os plantios feitos com mudas produzidas em tubete versus mudas produzidas em saquinhos de polietileno multifuros, foi feito o levantamento de falhas na Área 2, referente a essa análise. Para isso foi utilizado o software eCogniton Developer que foi responsável pela vetorização das plantas de café e sua exportação em formato shapefile, seguindo a metodologia descrita no item 3.8. Esse processo foi feito para imagens dos meses de dezembro de 2018, época do transplântio e do mês de abril, anterior ao primeiro replântio (preenchimento das falhas) realizado na área.

Em seguida, foi utilizado o software QGIS para realizar qualquer correção geográfica que fosse necessária, eliminar os vetores da linha central (referente a bordadura entre tratamentos) e, com auxílio da tabela de atributos, realizar a razão entre a quantidade de mudas transplantadas em dezembro e mudas existentes em abril, para cada um dos tipos de plantio, conforme a Equação 7.

$$\% \text{ de falha} = \frac{\text{mudas transplantadas em dezembro}}{\text{mudas existentes em abril}} \quad (7)$$

3.10. Amostragem a campo

A cada dois meses foram coletadas medidas de altura, diâmetro de copa das plantas e teor de clorofila exatamente, no mesmo dia que foram realizados os voos. A altura de plantas e o diâmetro de copa foram medidos com uma trena (Figura 9).

Figura 9 – Medições de altura (a) e diâmetro de copa (b) dos cafeeiros em campo.



Fonte: Do autor (2020).

O conteúdo de clorofila foi obtido por um sensor clorofilômetro atLEAF+ (FT GREEN LLC, 2017) (Figura 10), que produz por meio da razão da absorbância de radiação nos comprimentos de onda do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho um valor adimensional que pode ser convertido em teor de clorofila a e b utilizando a Equação 8 e 9 respectivamente (PADILLA et al., 2018).

$$Chl_a = -5.774 + 0.430 \times atLEAF + 0.0045 \times atLEAF^2 \quad (8)$$

$$Chl_b = 0,040 \times atLEAF^{1,57} \quad (9)$$

Em que:

atLEAF – conteúdo de clorofila registrado pelo clorofilômetro (adimensional);

Chl_a – teor de clorofila a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$);

Chl_b – teor de clorofila b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$).

Figura 10 – Clorofilômetro utilizado para medir o teor de clorofila nas folhas do cafeeiro.



Fonte: Do autor (2020).

Foi também calculado o Índice de Área Foliar (IAF), parâmetro biofísico que, de acordo com a metodologia proposta por Favarin et al. (2002), relaciona área foliar com área ocupada pela cultura no terreno, utilizando a altura da planta e o diâmetro de copa, como consta na Equação 10, proposta no mesmo estudo, tornando capaz de avaliar a eficiência fotossintética nas folhas, sendo possível dessa forma ter um indicativo de produtividade.

$$IAF = 0,0134 + 0,7276 \times D^2 \times h \quad (10)$$

Em que:

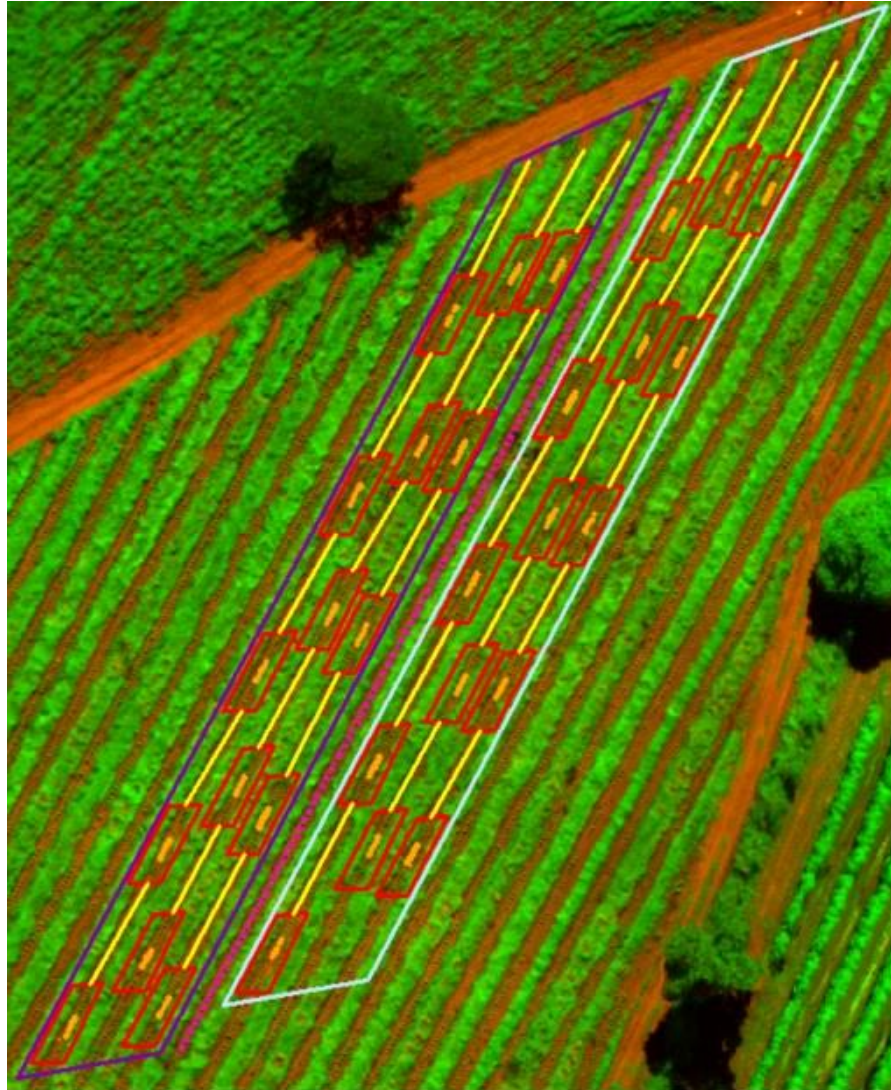
D – diâmetro das plantas (m);

h – altura das plantas (m).

Para avaliar o manejo “calcário em profundidade”, na área experimental onde a prática não foi adotada (3 linhas, demarcadas), cada linha foi dividida em 5 unidades amostrais, sendo cada uma delas composta pela média de 5 plantas centrais amostradas e espaçadas entre si em pelo menos 20 plantas, totalizando 15 amostras. Nas áreas com o manejo procedeu-se da mesma forma, espaçando-se uma linha de onde foi feita a amostragem anterior para não haver efeito de bordadura. No outro objeto de estudo, ou seja, “plantio com mudas produzidas em tubetes vs. com mudas produzidas em saquinho multifuros”, o procedimento foi o mesmo. O método

mostra-se promissor, pois averigua uma área representativa e conta com um bom número de repetições. Na Figura 11, pode-se observar como foi desenvolvida a amostragem mensal.

Figura 11 – Representação esquemática de como foi feita amostragem de plantas para a área com tratamento e área controle.



Legenda

● Plantas amostradas (5 para cada bloco)

□ Unidades amostrais (15 para cada tratamento)

Manejo

□ Área Testemunha

□ Área com o manejo em estudo

Linhas de espaçamento entre blocos

— Espaçamento de 20 plantas entre blocos

..... Linha entre tratamentos (bordadura)

Fonte: Do autor (2019).

Foram realizadas análises de fertilidade e matéria orgânica de solo pelo Laboratório de Análises de Solos da Universidade Federal de Lavras, situado no Departamento de Ciência dos Solos (DCS). A retirada das amostras foi realizada no mês de agosto de 2019 (período seco e bem posterior à adubação inicial) em 5 pontos de cada área estudada, na profundidade 0-20 cm, com o auxílio de Trado Holandês (Figura 12). As amostras foram homogêneas e condicionadas em recipientes para finalmente serem encaminhadas para análise.

Figura 12 – Amostragem de solo com Trado Holandês.



Fonte: Do autor (2020).

As análises supramencionadas tiveram o intuito de caracterizar as áreas de estudo e o resultados encontram-se descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado analítico das amostras de solo (camada de 0-20 cm) retiradas no mês de agosto de 2019 para as duas áreas contendo os objetos de estudo desse trabalho.

Identificação Amostra	pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al
		----- mg/dm ³ -----			----- cmolc/dm ³ -----			
Área 1 – Avaliação de plantio com calcário vs. sem calcário em profundidade	5,5	80,45	10,99	-	2,47	1,71	0,10	2,60
Área 2 – Avaliação de plantio com tubete vs. saquinho multifuros	6,3	51,20	3,34	-	3,76	2,27	0,10	2,30

Identificação Amostra	SB -----	t cmolc/dm ³	T -----	V ----- %	m -----	M.O. dag/kg	P-Rem mg/L
Área 1 – Avaliação de plantio com calcário x sem calcário em profundidade	4,39	4,49	6,99	62,75	2,23	2,11	31,70
Área 2 – Avaliação de plantio com tubete x saquinho	6,16	6,26	8,46	72,83	1,60	3,39	21,00

pH em água, KCl e CaCl₂ – Relação 1:2,5
Ca – Mg- Al- Extrator: KCl – 1 mol/L
SB= Soma de Bases Trocáveis
m= Índice de Saturação de Alumínio
P-rem: Fósforo Remanescente

P- Na – K- Fe – Zn- Mn- Cu- Extrator Mehlich 1
H + Al- Extrator: SMP
V= Índice de Saturação de Bases
Mat. Org. (MO) – Oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4N+ H₂SO₄ 10N

Por fim foram tabelados os dados amostrais de campo, os índices de vegetação e demais resultados dos processos supracitados buscando avaliar possíveis correlações, tendências, comportamento temporal ou constatar diferenças na implementação dos manejos em estudo.

3.11. Variáveis meteorológicas

Foram obtidos dados meteorológicos mensais para avaliar a influência de fatores climáticos no desenvolvimento do cafeeiro e conseqüentemente nos parâmetros medidos. As variáveis coletadas foram precipitação acumulada e temperatura média. Os dados foram obtidos junto à iniciativa POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) da NASA que fornece informações já interpoladas para localidades específicas baseando-se nas estações mais próximas (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA, 2020).

3.12. Organização dos dados e análises estatísticas

Os dados coletados em campo e extraídos pelas imagens foram agrupados e trabalhados no software Microsoft Excel, onde também foram elaborados gráficos para descrever o comportamento dos cafeeiros submetidos aos manejos em estudo ao longo do tempo.

No software SISVAR foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk (1965), onde foi constatado que os dados não possuem distribuição normal. Os dados foram submetidos ao teste de Mann-Whitney (1947) para variáveis independentes e não paramétricas. Os testes foram realizados no software R. Para ambos os testes foi adotado um nível de significância $\rho = 0,05$, considerando existência de diferença significativa para os tratamentos com valores inferiores a 0,05.

Foi ainda calculada a Correlação de Spearman (1904) – $\hat{\rho}_s$, também indicada para dados não paramétricos, a fim de evidenciar níveis de correlação entre as variáveis amostradas em campo e àquelas provenientes das imagens de ARP.

Foi realizado o teste de Qui-quadrado (χ^2) de independência de Pearson (1900), indicado para variáveis nominais e não paramétricas, para conferir se a frequência observada de falhas no pegamento de mudas transplantadas está associada ao recipiente, ou seja, ao tubete ou saquinho, para uma significância $\rho = 0,05$.

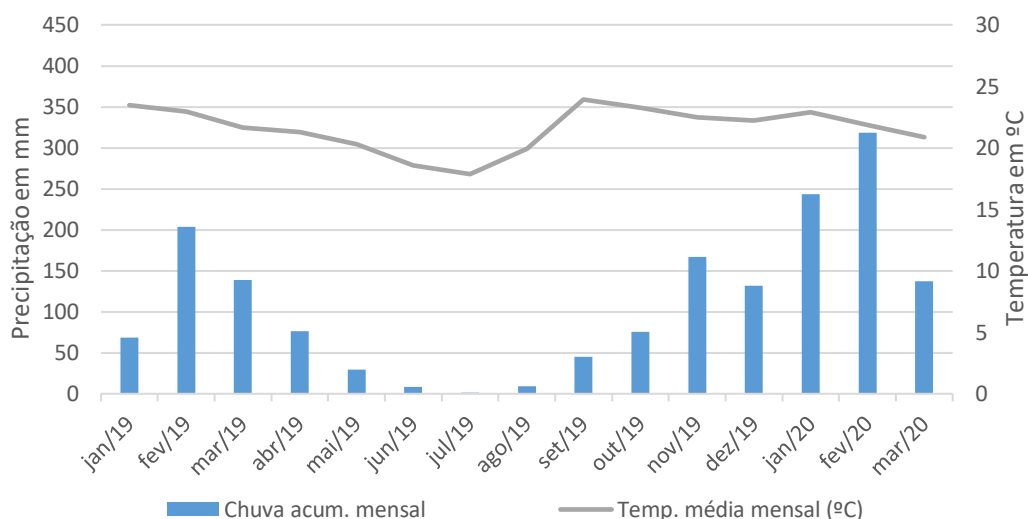
Por fim, foram desenvolvidos modelos lineares para prever variáveis físicas amostradas em campo baseados nos IVs e nas medições digitais provenientes de imagens ARP. Tais modelos foram obtidos por meio de regressão linear pareando variáveis com correlação forte entre si. As regressões lineares, a ANOVA para as respectivas regressões (significância $\rho = 0,05$) e os gráficos de dispersão foram desenvolvidos no software R.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Observações gerais dos cafeeiros

Para compreender a interferência climática da região nos cafeeiros avaliados, foi desenvolvido o gráfico mensal de precipitação acumulada e temperatura média para a área de estudo, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Gráficos mensais de Precipitação Acumulada (mm) e Temperatura Média (°C) referentes à localidade da Fazenda Samambaia em Santo Antônio do Amparo (MG).

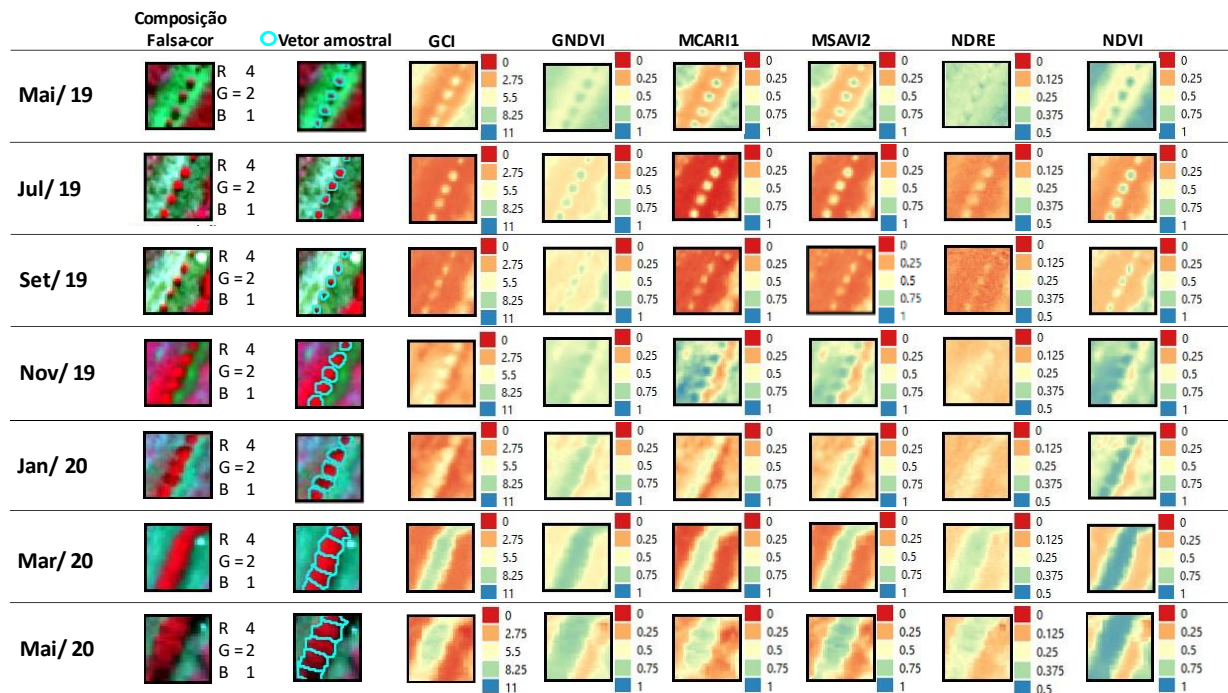


Fonte: NASA (2020).

Além disso, para compreender a dinâmica da variação temporal no cafeeiro foram capturadas imagens referentes aos índices de vegetação calculados nesse trabalho para uma

mesma parcela em cada um dos meses amostrados do cafeeiro, conforme consta na Figura 14. Foi feita uma composição de falsa cor RGB com as bandas do infravermelho próximo (banda 4), do vermelho (banda 2) e do verde (banda 1) respectivamente, bandas características no comportamento foliar e utilizada na maioria dos IVs avaliados.

Figura 14 – Representação visual relativa a uma parcela (área experimental 1) da evolução bimestral dos Índices de Vegetação GCI, GNDVI, MCARI1, MSAVI2, NDRE e NDVI, utilizando a composição falsa-cor R G B = 4 2 1.



Fonte: Do autor (2020).

A Figura 13 evidencia uma queda dos valores de precipitação a partir do mês de março, com a estiagem perdurando até os meses de setembro e outubro quando se retoma o regime de precipitação. O período de junho a agosto foi aquele com as menores médias de temperatura.

Com base na Figura 14, é possível perceber visualmente valores mais elevados de índice para o mês de maio, decrescendo em julho e setembro e tornando a aumentar a partir do mês de novembro. No mês de novembro as plantas aparentam estar mais vigorosas que janeiro, com o mês de março obtendo maiores valores e com as linhas de plantio mais definidas, ou seja, sem espaçamento aparente entre as plantas.

Para demonstrar numericamente, foram calculadas as médias bimestrais dos parâmetros amostrados nesse trabalho. Os dados médios referentes à avaliação do plantio com calcário em

profundidade encontram-se na Tabela 4, contendo tanto os valores amostrados em campo, quanto os índices extraídos dos mosaicos provenientes da ARP pelos softwares SIG.

Tabela 4 – Valores médios bimestrais de altura (cm), diâmetro de copa, Teor de clorofila (valor adimensional), IAF, Clorofila a, Clorofila b, Clorofila total (a+b), Área do dossel vetorizado em software SIG e dos Índices de Vegetação GCI, MSAVI2, MCARI1, GNDVI, NDRE e NDVI de plantas de café transplantadas em áreas “com aplicação de calcário em profundidade” versus áreas “sem aplicação de calcário em profundidade”.

Variáveis (médias mensais)	Meses amostrados					
	Maio	Julho	Setembro	Novembro	Janeiro	Março
Plantio em área com aplicação de calcário em profundidade						
Altura (cm)	31,01	35,72	39,87	50,35	55,07	70,45
Diâmetro de copa (cm)	29,49	30,45	31,65	49,24	58,69	81,01
Teor de Clorofila (IRC)	69,95	73,36	59,80	64,55	59,81	65,41
IAF	0,0356	0,0408	0,0460	0,1122	0,1639	0,3715
Clorofila a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	46,7594	50,1935	36,4486	40,8418	36,1390	41,7047
Clorofila b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	31,7791	34,0795	24,9167	27,8441	24,7043	28,4203
Clorofila a + b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	80,0600	86,0390	62,2095	69,7472	61,6010	71,2432
Área do dossel (cm^2)	631,56	777,16	721,66	1583,75	1729,22	3725,61
GCI	3,9045	2,9215	2,9382	4,3389	4,3003	6,7518
MSAVI2	0,5526	0,3604	0,2927	0,6516	0,4991	0,6086
MCARI1	0,5648	0,3193	0,2425	0,6830	0,4511	0,5375
GNDVI	0,6541	0,5824	0,5873	0,6787	0,6739	0,7660
NDRE	0,3158	0,1451	0,1143	0,1902	0,2230	0,3244
NDVI	0,7032	0,5132	0,5647	0,7865	0,7799	0,8462
Plantio em área sem aplicação de calcário em profundidade						
Altura (cm)	33,16	35,53	40,25	50,11	54,33	69,11
Diâmetro de copa (cm)	31,87	30,57	32,98	50,17	58,44	78,22
Teor de Clorofila (IRC)	60,20	72,20	59,20	62,97	56,98	67,28
IAF	0,0414	0,0414	0,0518	0,1215	0,1659	0,3500
Clorofila a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	36,6896	48,9462	35,8778	39,2296	33,3926	43,6815
Clorofila b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	25,0791	33,2493	24,5370	26,7668	22,8703	29,7396
Clorofila a + b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	62,6016	83,8670	61,2292	66,9435	56,8532	74,6893
Área do dossel (cm^2)	614,84	824,29	818,97	1647,60	1925,71	3825,22
GCI	3,9389	2,7637	2,5180	4,3164	4,3529	6,6507
MSAVI2	0,5491	0,3496	0,2579	0,6811	0,5188	0,5990
MCARI1	0,5561	0,3095	0,2097	0,7371	0,4721	0,5320
GNDVI	0,6551	0,5697	0,5510	0,6752	0,6749	0,7607
NDRE	0,3095	0,1398	0,1140	0,1957	0,2178	0,3244
NDVI	0,7047	0,5021	0,5106	0,8014	0,7916	0,8311

Na Tabela 5 constam os dados mensais referentes ao plantio com mudas produzidas em saquinhos multifuros e ao plantio de mudas produzidas em tubetes de polietileno rígido.

Tabela 5 – Valores médios bimestrais de altura (cm), diâmetro de copa, Teor de clorofila (valor adimensional do aparelho), IAF, Clorofila a, Clorofila b, Clorofila total (a+b), Área do dossel vetorizado em software SIG e dos Índices de Vegetação GCI, MSAVI2, MCARI1, GNDVI, NDRE e NDVI de plantas de café transplantadas em saquinho de polietileno versus mudas em tubetes de polietileno rígido.

Variáveis (médias mensais)	Meses amostrados					
	Maio	Julho	Setembro	Novembro	Janeiro	Março
Plantio de mudas produzidas em saquinhos multifuros						
Altura (cm)	27,17	32,55	33,79	43,23	47,67	62,66
Diâmetro de copa (cm)	31,29	31,38	29,20	46,31	54,76	79,52
Teor de Clorofila (IRC)	56,76	71,17	58,55	61,09	56,97	66,39
IAF	0,0362	0,0404	0,0376	0,0906	0,1292	0,3311
Clorofila a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	33,3175	47,8478	35,4263	37,4145	33,4785	42,8305
Clorofila b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	22,8253	32,5182	24,2354	25,5561	22,9313	29,1725
Clorofila a + b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	56,7625	81,9552	60,4265	63,8125	57,0288	73,2248
Área do dossel (cm^2)	521,22	798,19	592,99	1493,36	1778,78	3782,29
GCI	3,7850	2,8932	1,5368	4,8317	4,9588	8,5083
MSAVI2	0,4018	0,3419	0,1507	0,5792	0,5761	0,7419
MCARI1	0,3537	0,2927	0,0813	0,5500	0,5318	0,7404
GNDVI	0,6497	0,5848	0,4256	0,7029	0,7031	0,8022
NDRE	0,1112	0,1479	0,1324	0,1771	0,2186	0,2563
NDVI	0,6150	0,4938	0,2784	0,7785	0,8176	0,8603
Plantio de mudas produzidas em Tubetes						
Altura (cm)	29,73	33,66	34,47	45,17	48,88	62,25
Diâmetro de copa (cm)	31,35	30,91	28,43	46,35	54,25	80,63
Teor de Clorofila (IRC)	58,66	69,52	58,95	60,58	58,74	64,84
IAF	0,0370	0,0395	0,0359	0,0898	0,1244	0,3305
Clorofila a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	35,0851	46,0934	35,4470	36,8907	35,0921	41,1585
Clorofila b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	24,0021	31,3476	24,2460	25,2067	24,0050	28,0558
Clorofila a + b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	59,7950	78,8964	60,4412	62,9025	59,7898	70,3023
Área do dossel (cm^2)	520,14	720,87	542,92	1559,19	1763,37	4091,52
GCI	3,7787	2,7939	1,3882	4,9358	4,9225	8,7202
MSAVI2	0,4164	0,3346	0,1454	0,5947	0,5833	0,7561
MCARI1	0,3727	0,2845	0,0854	0,5678	0,5405	0,7562
GNDVI	0,6504	0,5782	0,4042	0,7088	0,7058	0,8098
NDRE	0,1016	0,1475	0,1232	0,1808	0,2192	0,2635
NDVI	0,6293	0,4802	0,2743	0,7878	0,8244	0,8712

Com base na Figura 14 e nos valores observados nas Tabelas 4 e 5, é possível perceber a variação temporal média dos índices de vegetação e da área do dossel, parâmetros esses

obtidos por meio de sensoriamento remoto passivo, e do Índice de Área Foliar e clorofila, parâmetros biofísicos originados de amostragem em campo.

Pra ambas as áreas, nota-se uma diminuição de valores de índices de vegetação após o mês de maio, perdurando até o mês de setembro. O fato pode estar relacionado à queda de temperatura (com o mês de julho registrando os valores mais baixos) e à estiagem. Na Figura 15, obtida no mês de julho na área experimental 1, nota-se um dano severo em algumas folhas, proporcionando desfolha e afetando, além dos índices, as medidas físicas de altura e principalmente de diâmetro.

Figura 15 – Fotografias registradas em campo (área experimental 1) no mês de julho ilustrando dano foliar causado pelo frio, resultando em desfolha, perda de vigor (A) e queima (B).



Fonte: Do autor (2019).

Levando em conta os dois fatores mencionados, chuva e temperatura, a oscilação dos valores pode ser explicada pelo gráfico de precipitação na Figura 13. Ao associar o comportamento espectral ao gráfico de precipitação, percebe-se que as chuvas do mês de março e abril ainda interferem no mês de maio (infiltração e acúmulo da água no solo). A estiagem que perdura de maio a agosto, afeta o mês de setembro, quando começa a chover novamente interferindo positivamente no mês de novembro em diante. De acordo com Braga et al. (2003) leva-se cerca de 30 a 60 dias para que a vegetação responda às oscilações decorrentes do regime de precipitações. Dessa forma, pode-se dividir a análise temporal do cafeeiro em dois períodos:

- Período seco, que compreende do fim de maio ao início de setembro;
- Período chuvoso, que corresponde ao fim de setembro até o início de maio.

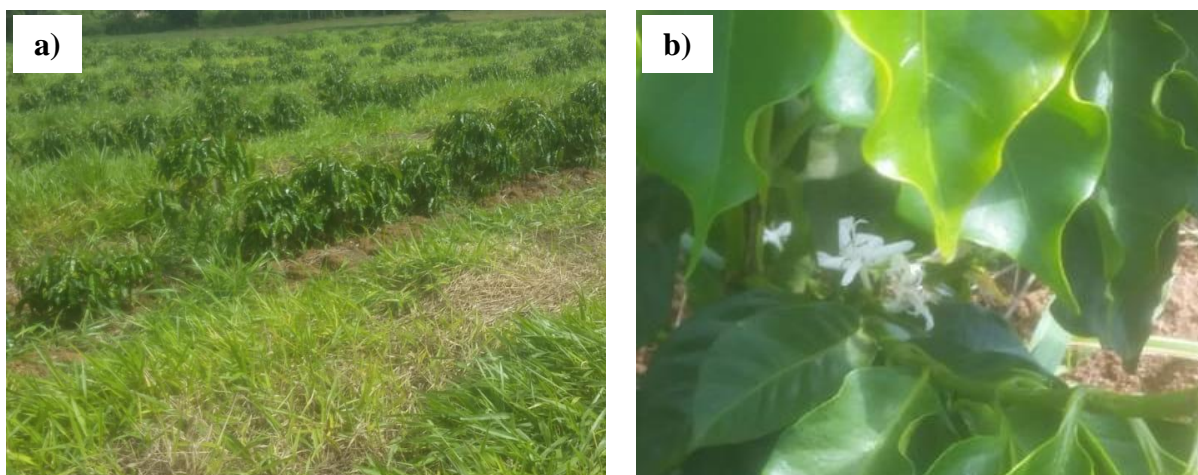
Como as amostragens foram bimestrais, dividiu-se o período seco entre maio e setembro e período chuvoso entre novembro e março. A divisão é relevante pelo fato de o cafeeiro avaliado estar em formação, período esse em que as fases fenológicas não são bem definidas e que a chuva e a seca interferem significativamente no comportamento da planta (FURLANI; VIÉGAS, 1993).

Considerando o mês de novembro, os valores dos Índices de Vegetação são ligeiramente superiores aos de janeiro, contrariando o que seria a tendência. O fato pode estar relacionado à aplicação de herbicida que foi feita em dezembro e à presença da braquiária no mês anterior, que pode ter proporcionado reflexão aditiva às plantas de café elevando os valores de reflectância captados pelo sensor e, conseqüentemente, os índices de vegetação.

Entretanto, o evento pode estar relacionado também ao fenômeno da florada, primeira fase do segundo ano fenológico do cafeeiro, que ocorre normalmente entre o fim de setembro e o meio de novembro, decorrente de choque hídrico, provocado por chuva ou até mesmo elevação da umidade do ar após longo período de estiagem (CAMARGO; FRANCO, 1981; RENA; MAESTRI, 1985). Tal fenômeno é marcante no ciclo fenológico do cafeeiro, tendo seu vigor vegetativo elevado, antes da fase de chumbinho e granação que ocorrem nos meses posteriores. Embora a florada se dê numa intensidade mínima para plantas novas (apenas 1 ano após o transplante) pode-se perceber que o fenômeno afeta no comportamento do cafeeiro. Estudos de Fang et al. (2016), também observaram um aumento significativo de diferentes índices de vegetação durante o fenômeno de florada na cultura de colza. Rosa (2007) relataram os maiores valores de NDVI e EVI para café arábica no mesmo período.

As ocorrências mencionadas podem ser testemunhadas na Figura 16, obtida no mês em questão.

Figura 16 – Fotografias registradas em campo (área experimental 2) no mês de novembro, ilustrando quantidade elevada de braquiária (A) e a ocorrência de florada em baixa intensidade (B).



Fonte: Do autor (2019).

Na Tabela 4 e 5, que avaliam os experimentos 1 (avaliação de plantio de mudas de cafeeiro em solo com aplicação de calcário em profundidade vs. com aplicação de calcário apenas em superfície) e 2 (avaliação do plantio de mudas de cafeeiro produzidas em tubetes de 180 ml em comparação com mudas produzidas em saquinhos multifuros) respectivamente, não foi possível constatar de um modo geral uma diferença evidente entre os manejos nos valores propriamente ditos. Portanto, fez-se necessário o desenvolvimento de análises gráficas e estatísticas.

4.2. Análise temporal bimestral

Visando ilustrar melhor os dados da Tabela 4 e 5, estudar a variabilidade temporal de mudas de cafeeiro recém transplantadas para ambos os experimentos e buscar uma associação com o ciclo fenológico de cafés já estabelecidos, foram desenvolvidos gráficos com as médias bimestrais referentes às variáveis amostradas nesse trabalho, que se encontram na Figura 17 e Figura 18, referentes ao experimento 1 e 2 respectivamente.

Figura 17 – Comportamento temporal (bimestral) dos plantios com e sem calcário em profundidade considerando os parâmetros avaliados nesse trabalho: IAF, Concentração de Clorofila total (a+b) ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$), Área do dossel vetorizado (cm^2), NDVI, GCI, MSAVI2, NDRE, GNDVI e MCARI1.

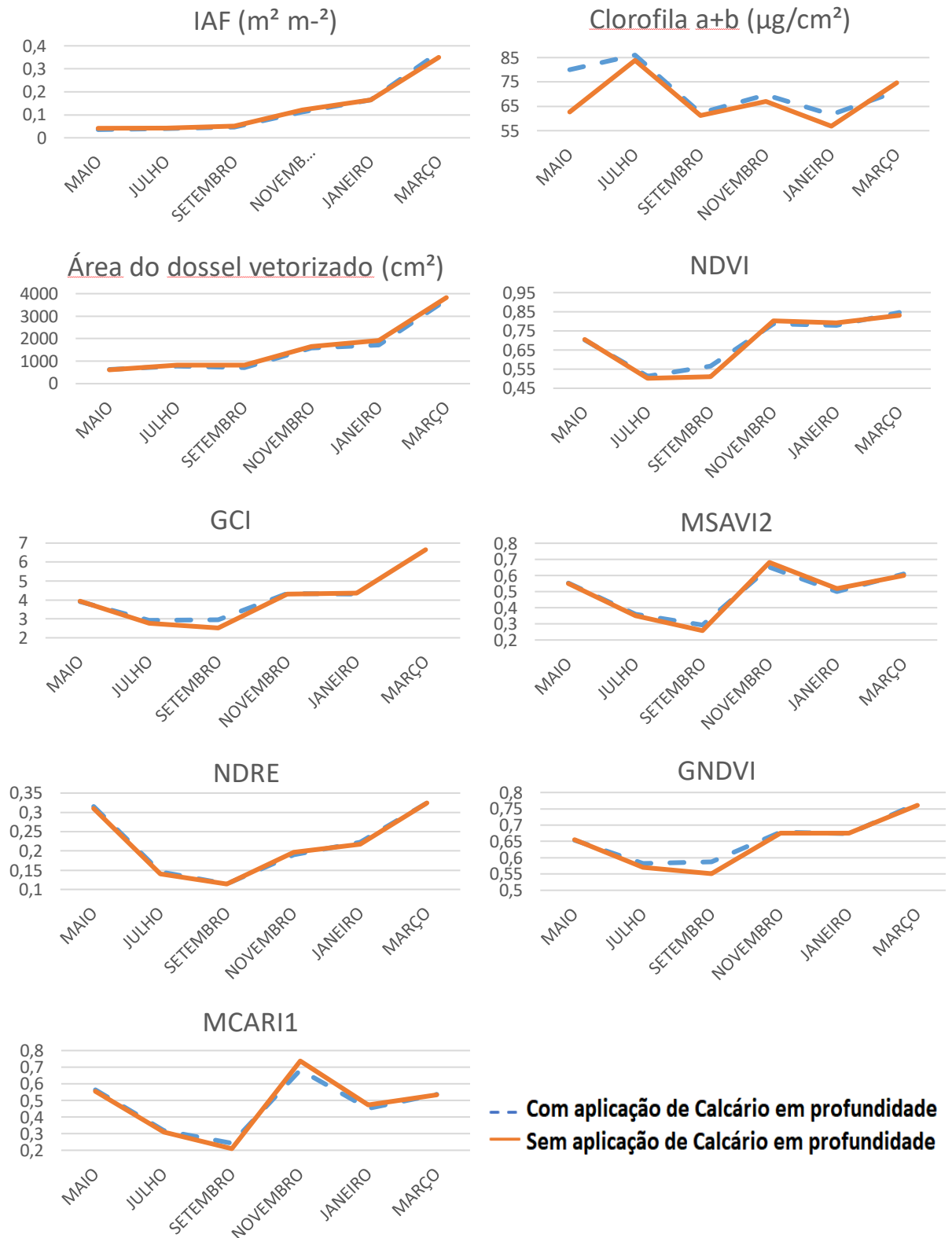
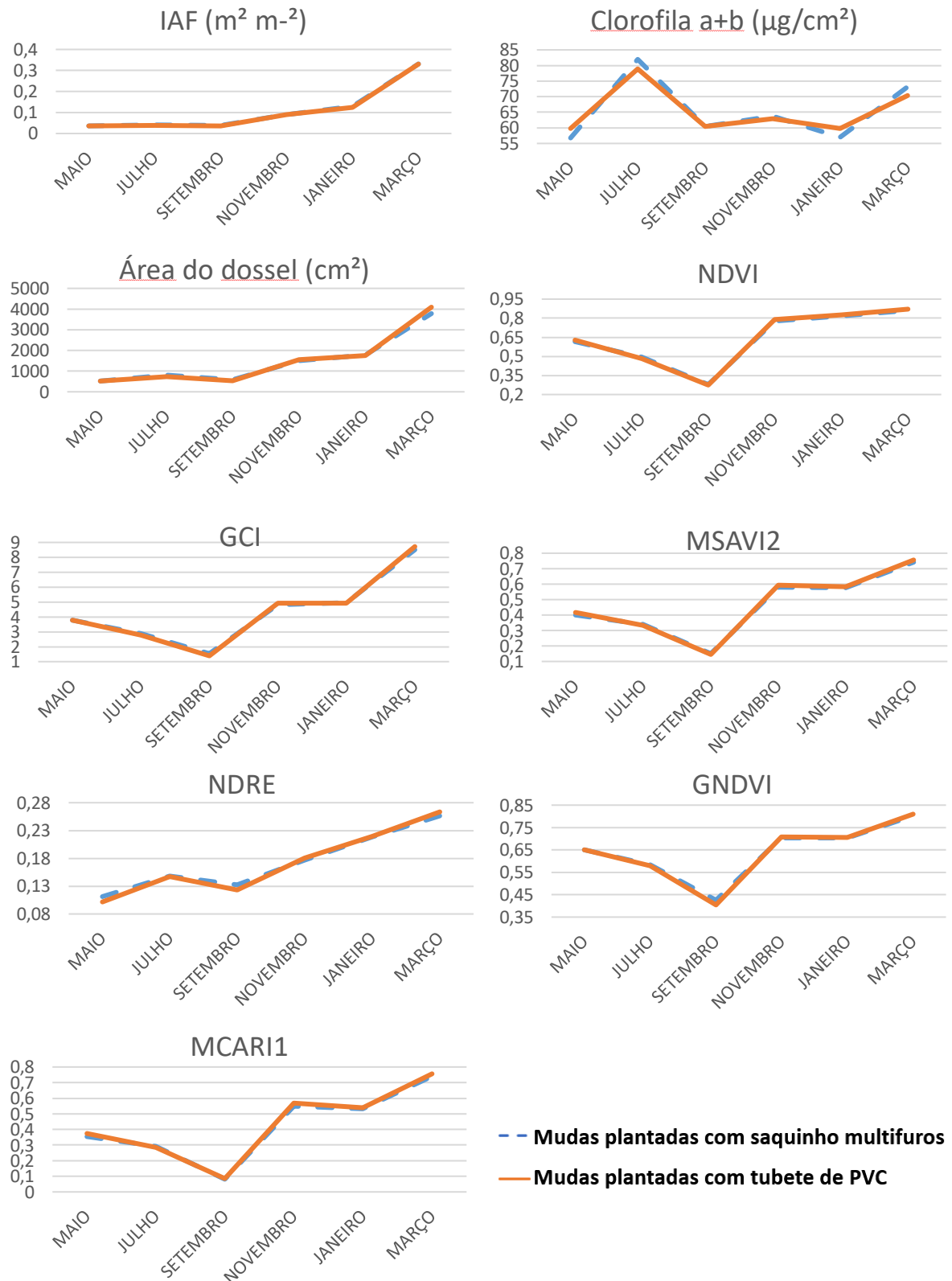


Figura 18 – Comportamento temporal (bimestral) de plantios de mudas em saquinhos multifuros e tubetes de polietileno rígido considerando os parâmetros avaliados nesse trabalho: IAF, Concentração de Clorofila total (a+b) ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$), Área do dossel vetorizado (cm^2), NDVI, GCI, MSAVI2, NDRE, GNDVI e MCARI1.



Os gráficos demonstram com mais clareza o comportamento fenológico das mudas de cafeeiros submetidos aos tratamentos em questão, onde constata-se uma crescente bimestral nas medições físicas, demonstradas pelo gráfico do IAF (derivado de altura e diâmetro) e pela área do dossel vetorizado, e uma oscilação nos teores de clorofila e nos índices de vegetação. Quanto aos índices físicos amostrados, o comportamento dos gráficos está de acordo com o esperado, pois os cafeeiros em questão, são cafeeiros em formação; em crescimento. É interessante, no entanto, se atentar para o mês de setembro, onde tanto o IAF, quanto a área do dossel vetorizado tiveram sua crescente interrompida, devido à desfolha ocorrida nesse período. Favarin et al. (2002) ao determinar equações para estimativa do IAF obteve um valor médio de 0,27 para cafeeiros com 15 meses de plantio, valores próximos aos encontrados nesse trabalho. Flumignan e Faria (2009) ao avaliar a evapotranspiração e coeficientes de cultivo em cafeeiros em formação, relataram uma variação temporal do IAF similar ao desse estudo. No entanto, para cafeeiros mais velhos, encontram-se valores diferentes, como os de Santos et al. (2020), que também acompanharam a variação temporal do cafeeiro por meio de imagens de ARP na determinação de índices biofísicos por meio de imagens ARP, onde os valores de IAF variaram entre 1,7 a 3,1.

Observando as Figuras 17 e 18, percebe-se que em meses críticos para o inverno e verão (seco e chuvoso), julho e janeiro respectivamente, os valores de clorofila foram os mais altos e mais baixos, respectivamente, para o período avaliado. A ocorrência vai ao encontro das observações feitas por Peloso et al. (2017), que explicam que em estresse hídrico, os cloroplastos podem atuar no aumento da assimilação do CO₂ para a manutenção das atividades fisiológicas da planta, refletindo na maior concentração dos pigmentos fotossintéticos frente ao menor teor de água foliar, o que implicaria numa maior leitura pelo sensor clorofilômetro nesses períodos.

Para os IVs, Novo et al. (2005) frisam que são parâmetros eficazes no monitoramento da variabilidade temporal da vegetação em relação ao clima local. Percebe-se uma queda no período seco (correspondente ao período de maio a setembro) e retomada no crescimento no período chuvoso. O período seco também é o período de menor crescimento do cafeeiro, já que boa parte está inserido no inverno, período de estresse em que os fotoassimilados são dedicados ao crescimento e manutenção do sistema radicular em detrimento do vegetativo, o que também explica a queda de valores nos IVs (SAMÔR et al., 2002; AMARAL, 1991; BARROS; MAESTRI, 1974). De acordo com Amaral (1991), a atividade do cafeeiro e do sistema radicular no inverno é importante para as fases posteriores, como a florada, pois as raízes acumulam

compostos nitrogenados e reguladores de crescimento e os translocam posteriormente para a parte aérea, auxiliando no crescimento das plantas no início da primavera.

Os resultados observados nesse trabalho corroboram com estudos de Coltri et al. (2011) que ao avaliar a variação temporal da biomassa do café arábica a pleno sol e arborizado por meio de imagens Landsat-5, obtiveram os menores valores de NDVI e SAVI, além do IAF (medido em campo) para os meses de agosto e setembro. Volpato et al. (2009) relatam os efeitos do déficit hídrico ao encontrar queda dos valores de NDVI com o sensor MODIS para cafeeiros cultivados a pleno sol. Sato et al. (2007) relataram os menores valores de K_c , indicador físico e biológico relacionado à área foliar, à cobertura vegetal e à transpiração da planta, para os meses de junho, julho e agosto, coincidindo com a fase de dormência do café, período de baixa atividade vegetativa.

Alguns índices como o MCARI1 e MSAVI2 tiveram o pico de seus valores no mês de novembro. A ocorrência pode sugerir que para esta área experimental esses índices foram mais sensíveis à floração ou mais afetados pela biomassa presente no local, corroborando com Rosa (2007), que observou que a elevação dos índices a partir de meados de outubro está relacionada ao acréscimo da biomassa proporcionado pela floração e posteriormente pela formação de chumbinho e desenvolvimento dos frutos. Os demais IVs comportaram-se de forma similar, com leve queda de valores de novembro para janeiro e novo crescimento até o mês de março.

A dinâmica temporal dos IVs calculados nesse trabalho segue um comportamento similar a estudos de Rosa (2007), que utilizou o NDVI do sensor MODIS para avaliar a dinâmica temporal de cafeeiros em produção, formação e podados, na proposição de um modelo agrometeorológico-espectral de monitoramento.

Outros estudos que utilizaram índices de vegetação para explicar a variação temporal do cafeeiro, com relação as fases fenológicas, à biomassa e à estiagem agrícola, entre outros aspectos, relataram comportamento semelhante (JÚNIOR ET AL., 2013; COLTRI ET AL., 2011; VOLPATO ET AL., 2009). Logo, nota-se que mesmo em formação e com poucos meses após o transplante, o cafeeiro segue um padrão de comportamento que pode ser associado as suas fases fenológicas descritas por Camargo e Camargo (2001) já nesse estágio, com a ressalva que cafeeiros em formação comportam-se diferentemente de cafeeiros adultos em geral, principalmente nos três anos iniciais, quando a maioria dos fotoassimilados são responsáveis pelo crescimento do cafeeiro, fazendo com que parâmetros como altura, diâmetro e IAF estejam em constante crescimento. Ainda, a presença menor de biomassa nas mudas e a interferência do solo nos valores de reflectância, fazem com que os valores de reflectância e

consequentemente de IVs para cafeeiros em formação sejam menores que de cafeeiros em produção (WU; WANG; BAUER, 2007; ROSA, 2007).

Considerando o experimento 1, referente à aplicação de calcário em profundidade vs. calcário apenas em superfície, ao avaliar a diferença entre os tratamentos, na Figura 17 não é possível perceber diferenças evidentes no comportamento temporal na maioria das variáveis. A ausência de diferenças relacionadas ao crescimento e enfolhamento (IAF) podem ser justificadas pelo fato de as raízes das mudas não terem atingido ainda a profundidade de 70 a 80 cm (horizonte onde foi aplicado o calcário) para o período avaliado e com isso não obtiveram os benefícios diferenciais advindos do insumo. Apenas no parâmetro clorofila é perceptível que nos meses de maio e janeiro, principalmente no primeiro, os valores são maiores para o plantio com aplicação calcário do que no plantio sem calcário em profundidade.

Ainda para o experimento 1, considerando os IVs, nota-se uma ligeira superioridade durante o período seco para o plantio com calcário em profundidade no GCI, NDVI e GNDVI, frequentemente associados ao vigor vegetativo e clorofila a. A manutenção do vigor da planta em período de estresse sugere uma provável ação do calcário. A capacidade de diminuir a acidez do solo favorece um aumento de nutrientes disponíveis que garantem nutrição do cafeeiro em um período crítico. Ainda, a utilização da roça carpe, implemento utilizado na aplicação, pode ter aumentado a porosidade no solo favorecendo uma maior infiltração e armazenamento de água (NOLLA, 2010; SERAFIM, 2011; 2012), garantindo longevidade e diminuindo perdas.

Na Figura 18, referente ao experimento 2 - plantio de mudas produzidas em saquinho multifuros vs. mudas produzidas em tubetes - novamente, os gráficos de linha simulando a série temporal dos plantios avaliados, foram capazes de descrever a dinâmica temporal do cafeeiro ao longo do período avaliado. Houve um aumento linear das medidas biofísicas como o IAF, oriundo das amostragens de altura e diâmetro feita em campo e da área do dossel vetorizado. Mais uma vez, apesar da linearidade, houve uma pequena depressão para o mês de setembro, principalmente na área do dossel, podendo ter provável relação com a queda de folhas ocorrente no período seco e com o período de menor crescimento da fenologia do cafeeiro.

Avaliando os IVs, na Figura 18 quase todos os índices tiveram comportamento similar, com queda a partir de maio e com menor valor para setembro, indo ao encontro dos trabalhos supracitados de Júnior et al. (2013), Volpato et al. (2009), Rosa (2007), e à fenologia do cafeeiro proposta por Camargo e Camargo (2001). No entanto, os picos observados para o MCARI1 e MSAVI2 para o experimento 1 não foram observados no experimento 2. O fato pode estar atrelado a cultivar, fator não considerado nesse trabalho. Nessa avaliação, o índice NDRE foi aquele que se diferenciou dos demais, tendo um comportamento mais linear, sem depressão em

setembro ou ligeira queda em janeiro, obtendo dessa forma uma dinâmica similar aos parâmetros biofísicos.

Considerando a diferença entre os tratamentos no experimento 2, diferente da primeira abordagem, não é possível perceber sequer um leve distanciamento entre as linhas dos gráficos para os meses avaliados, o que pode ser um indicativo de que ambos os recipientes, tubetes e saquinhos multifuros, são boas opções para a manutenção do vigor vegetativo e desenvolvimento na produção de mudas do cafeeiro. Apesar de ligeira superioridade de clorofila no plantio com saquinhos multifuros para no mês de maio e inferioridade para o mês de janeiro, essa diferença não é tão marcante quanto no primeiro estudo.

Para constatar estatisticamente em quais dessas variáveis apresentaram diferença significativa entre tratamentos para os experimentos 1 e 2, os dados foram submetidos ao teste de distribuições de Mann-Whitney.

4.3. Análise estatística

Após a constatação de não normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk, o teste de Mann-Whitney, foi realizado para constatar diferença entre os tratamentos para todas as variáveis amostradas em ambos os experimentos.

Tabela 6 – Teste não paramétrico de distribuições de Mann-Whitney para avaliar a existência de diferenças estatísticas significantes entre os plantios com calcário e sem calcário em profundidade.

Variável analisada	Hipótese de Nulidade (H0)	Posto médio	Valor U de soma dos postos	Valor de significância p	Decisão
Altura (cm)	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SC = 91,33 CC = 89,67	8219,50 8070,50	0,831	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
Diâmetro (cm)	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SC = 92,88 CC = 88,12	8359,00 7931,00	0,540	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
IAF	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SC = 93,98 CC = 87,02	8458,00 7832,00	0,371	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
Clorofila a+b (µg/cm ²)	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SC = 82,18 ^b CC = 98,82 ^a	7396,50 ^b 8893,50 ^a	0,032*	Rejeita-se a hipótese de nulidade (H0), há diferença entre os manejos

Área de copa estimada (cm ²)	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SC = 93,43 CC = 87,57	8409,00 7881,00	0,450	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
GCI	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SC = 88,91 CC = 92,09	8002,00 8288,00	0,682	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
MSAVI2	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SC = 90,03 CC = 90,97	8103,00 8187,00	0,904	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
MCARI1	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SC = 90,11 CC = 90,89	8110,00 8180,00	0,920	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
GNDVI	A distribuição da variável Altura é a mesma para os diferentes manejos	SC = 88,32 CC = 92,68	7949,00 8341,00	0,575	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
NDRE	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SC = 89,78 CC = 91,22	8080,00 8210,00	0,852	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
NDVI	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SC = 88,58 CC = 92,42	7972,00 8318,00	0,621	Aceita a hipótese de nulidade (H0)

*Diferença significativa para o nível de significância $p = 0,05$; SC= Sem calcário; CC= Com calcário.

Tabela 7 – Teste não paramétrico de distribuições de Mann-Whitney para avaliar a existência de diferenças estatísticas significantes entre os plantios com saquinho multifuros e tubete de PVC.

Variável analisada	Hipótese de Nulidade (H0)	Posto médio	Valor U de soma dos postos	Valor de significância p	Decisão
Altura (cm)	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SQ= 87,21 T = 93,79	7849,00 8441,00	0,397	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
Diâmetro (cm)	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SQ = 91,59 T= 89,41	8243,50 8046,50	0,778	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
IAF	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SQ = 90,70 T = 90,30	8163,00 8127,00	0,959	Aceita a hipótese de nulidade (H0)

Clorofila a+b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SQ = 89,63 T = 91,37	8067,00 8223,00	0,823	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
Área de copa estimada (cm^2)	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SQ = 90,82 T = 90,18	8174,00 8116,00	0,934	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
GCI	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SQ = 90,91 T = 90,09	8182,00 8108,00	0,916	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
MSAVI2	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SQ = 90,16 T = 90,84	8114,00 8176,00	0,929	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
MCARI1	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SQ = 89,79 T = 91,21	8081,00 8209,00	0,855	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
GNDVI	A distribuição da variável Altura é a mesma para os diferentes manejos	SQ = 90,89 T = 90,11	8180,00 8110,00	0,920	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
NDRE	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SQ = 91,24 T = 89,76	8212,00 8078,00	0,848	Aceita a hipótese de nulidade (H0)
NDVI	A distribuição da variável é a mesma para os diferentes manejos	SQ = 90,24 T = 90,76	8122,00 8168,00	0,948	Aceita a hipótese de nulidade (H0)

*Diferença significativa para o nível de significância $\rho = 0,05$; SQ= Saquinho; T= Tubete de PVC.

4.3.1. Plantio com calcário em profundidade vs. calagem em superfície

Conforme a Tabela 6, referente ao experimento 1, não houve diferença significativa entre os tratamentos avaliados, ou seja, aplicação de calcário em profundidade ou calagem superficial convencional, com exceção do parâmetro clorofila onde foi constatada diferença significativa entre o manejo avaliado e a testemunha. O plantio com calcário em profundidade obteve uma concentração de clorofila maior que o sem calcário em profundidade. Dessa forma, apesar de as demais variáveis não terem evidenciado qualquer diferença nítida entre os manejos, o uso do clorofilômetro pode ser uma ferramenta eficaz nesse tipo de avaliação, por conseguir captar esse contraste. O valor U de soma dos postos de Mann-Whitney para o plantio com aplicação de calcário foi de 8893,50 contra 7396,50 para o plantio sem calcário em

profundidade, com um valor médio de clorofila total (a+b) de 86,04 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ contra 83,87 $\mu\text{g}/\text{cm}$ respectivamente.

Poucos trabalhos são encontrados na literatura abordando calagem profunda em cafeeiros, principalmente a longo prazo ou relacionando com índices de vegetação, fazendo-se necessário a comparação com outras culturas. Bender, Weber e Vieira (2018) avaliaram calagem em profundidade com oliveiras, cultura perene, assim como o cafeeiro, e de origem europeia, onde o solo tem valores de pH naturalmente mais elevados, requisito para sucesso desse plantio. Os autores observaram melhoria nos atributos físico-químicos do solo, embora, o único parâmetro com correlação positiva e limitante para a produtividade tenha sido a concentração de Boro, ou seja, a aplicação do calcário também não obteve diferença significativa comparado ao plantio convencional. Caires et al. (2006), observaram um aumento de 66% no desenvolvimento no desenvolvimento de raízes até o horizonte de 60 cm com o incremento das doses de calcário nesse perfil e ainda um aumento de 140% na produção.

Para a cafeicultura, Rodrigues et al. (2001) avaliaram dosagem subsuperficial de diferentes doses de Calcário para as variedades Catuaí e Icatu (até 34 cm abaixo da superfície), em solos com elevado teor de alumínio, constatando aumento nos valores de comprimento total de raízes/matéria seca de raízes (cm/g) e de superfície total de raízes/matéria seca de raízes (cm^2/g) além da redução do teor de Alumínio onde houve o tratamento, principalmente para a cultivar Catuaí. No entanto, os parâmetros biofísicos como área foliar, comprimento de caules e produção de matéria seca da parte aérea não foram afetados pelo manejo.

Barbosa et al. (2020) avaliaram cafeeiros por um ano após o transplântio em cambissolo, submetido à sulcagem ou subsolagem e com dosagens profundas de calcário a 40, 60 e 80 cm e compararam com o plantio feito no solo sem estes preparos. Todos os tratamentos resultaram em melhoria física e hídrica até a camada de 20 cm. Os autores observaram melhor distribuição de água e de volume dos poros até 40 cm de profundidade. A calagem profunda a 80 cm destacou-se pela boa disponibilidade hídrica nesse horizonte, se mostrando uma alternativa para mitigar possíveis danos causados pelo déficit hídrico decorrente do inverno. Foram realizadas medições de altura e NDVI com o sensor Green Seeker resultando em boa correlação com os parâmetros físicos amostrados.

O estudo de Barbosa et al. (2020) mostrou efetividade na adoção dos tratamentos, embora não constatada diferença estatística entre os tratamentos para quantidade residual de cálcio e magnésio. O fato pode estar associado, portanto, ao fator solo, já que foi relatado um cambissolo natural com elevado teor de argila, principalmente abaixo dos 20 cm de profundidade, diferente do latossolo, onde foi desenvolvido o presente experimento. Dessa

forma, os manejos adotados em comparação com a testemunha representaram mais que uma melhoria química referente a dosagem do calcário, um incremento significativo nos atributos físicos do solo.

4.3.2. Mudanças produzidas em tubetes vs. mudas produzidas em saquinhos multifuros

De acordo com a Tabela 7, não foi observado diferença significativa para o nível de significância $p = 0,05$ para nenhuma das variáveis amostradas no experimento 2, que compara plantio de mudas produzidas em saquinhos multifuros versus mudas produzidas em tubetes. O resultado do teste ratificou as observações previamente constatadas na avaliação temporal. Diante disso, existe uma indicação que o plantio de mudas produzidas em tubetes pode ser uma alternativa ao de mudas produzidas em saquinhos multifuros, por possuir um desempenho semelhante ao longo do período avaliado.

Grande parte dos trabalhos envolvendo cafeeiros produzidos em diferentes recipientes está relacionado a mudas ainda na etapa de viveiro, sem avaliar o desempenho após o plantio. A grande maioria, além de mensurar a diferença entre o material dos recipientes, avaliou também a influência do volume e dos substratos utilizados (ESPINDULA, 2017; DIAS et al., 2009; MARANA et al., 2008; VALLONE, 2004; KÄMPF, 2002; MÜLLER; MIGLIORANZA; DE PÁDUA FONSECA, 1997). A Maioria identificou melhores resultados em saquinhos plásticos, ou em tubetes com maior volume e com substratos comerciais, em detrimento de solo mineral.

Ao estudar cafeeiros após o transplante no campo, Vallone et al. (2009) avaliaram mudas de cultivar Acaia Cerrado produzidas em saquinhos de polietileno, em tubetes de 50 ml e em tubetes de 120 ml, utilizando os diferentes substratos: padrão (esterco bovino e terra), comercial (Plantmax Hortaliça HT) e alternativo (comercial e casca de arroz). Os autores realizaram amostragens a cada 5 meses, até completar o período de 20 meses. Apesar de maiores valores médios de altura (cm), diâmetro de caule (cm) e número de nós no ramo ortotrópico, observados para mudas em o substrato padrão, não foi observado diferença significativa entre mudas de cafeeiro cultivadas em saquinho de polietileno e cultivadas em tubete de 120 ml, embora ambas tenham se mostrado significativamente melhores que as mudas produzidas em tubetes de 50 ml.

Os resultados dos autores supracitados corroboram, portanto, com o presente experimento, onde o recipiente utilizado foi de 180 ml, mostrando que o tubete no quesito vigor vegetativo e desenvolvimento da planta pode ser utilizado como alternativa ao saquinho multifuros, com a ressalva que o volume do recipiente é um fator limitante. O fato se estende

para outras espécies perenes, sejam elas florestais ou frutíferas, onde a maioria das pesquisas observam melhores médias em recipientes com volumes maiores. Poorter et al. (2012), relataram uma grande correlação entre o tamanho do recipiente e o acúmulo da biomassa.

4.4. Correlação de Spearman

Para avaliar a existência de correlação ao longo do experimento entre as variáveis físicas amostradas em campo e as derivadas das imagens de ARP, foi feita a análise de correlação de Spearman ($\hat{\rho}_s$), recomendada para dados com distribuição não normal. Os resultados dessa análise estão presentes na Tabela 8 e na Tabela 9, para os experimentos 1 e 2 respectivamente, e possibilitam elencar parâmetros que tem forte ou fraca correlação, direta ou inversa.

Tabela 8 – Valores de Correlação de Spearman ($\hat{\rho}_s$) entre as variáveis amostradas em campo e as oriundas de imagens ARP para o plantio de mudas com calcário e sem calcário em profundidade

Índices de Vegetação (ARP)	Parâmetros amostrados em campo						
	Altura (cm)	Diâmetro de copa (cm)	Teor de Clorofila (IRC)	IAF	Clorofila a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Clorofila b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Clorofila a + b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
Plantio em área com aplicação de calcário em profundidade							
GCI	0,8735	0,9281	-0,1337	0,9525	-0,1625	-0,1624	-0,1654
MSAVI	0,5117	0,5911	0,0440	0,5290	0,0139	0,0137	0,0106
MCARI1	0,3320	0,4088	0,0975	0,3351	0,0707	0,0705	0,0678
GNDVI	0,8393	0,9033	-0,1780	0,8943	-0,2076	-0,2077	-0,2107
NDRE	0,3858	0,5263	0,1873	0,5756	0,1705	0,1702	0,1685
NDVI	0,7627	0,8199	-0,3415	0,7462	-0,3701	-0,3703	-0,3732
Área do dossel (cm^2)	0,9583	0,9753	-0,2097	0,9953	-0,2385	-0,2384	-0,2413
Plantio em área sem aplicação de calcário em profundidade							
GCI	0,8688	0,9224	0,0850	0,9324	0,0619	0,0618	0,0594
MSAVI	0,5167	0,5953	-0,0640	0,5128	-0,0932	-0,0936	-0,0966
MCARI1	0,3630	0,4362	-0,0903	0,3419	-0,1187	-0,1190	-0,1220
GNDVI	0,8076	0,8787	-0,0238	0,8541	-0,0492	-0,0494	-0,0521
NDRE	0,4474	0,5621	-0,0499	0,5927	-0,0673	-0,0671	-0,0689
NDVI	0,7314	0,7993	-0,2605	0,7102	-0,2877	-0,2881	-0,2909
Área do dossel (cm^2)	0,9740	0,9776	0,1797	0,9974	0,1610	0,1607	0,1588

Tabela 9 – Valores de Correlação de Spearman ($\hat{\rho}_s$) entre as variáveis amostradas em campo e as oriundas de imagens ARP para o plantio de mudas produzidas em saquinhos multifuros e em tubete.

Parâmetros amostrados em campo

Índices de Vegetação (ARP)	Altura (cm)	Diâmetro de copa (cm)	Teor de Clorofila (IRC)	IAF	Clorofila a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Clorofila b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Clorofila a + b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
Plantio de mudas cultivadas em saquinho multifuros							
GCI	0,7660	0,8930	0,1684	0,8710	0,1535	0,1535	0,1530
MSAVI	0,7910	0,9040	0,1627	0,8870	0,1494	0,1494	0,1488
MCARI1	0,7860	0,8950	0,1659	0,8780	0,1534	0,1534	0,1529
GNDVI	0,7600	0,8890	0,1689	0,8660	0,1543	0,1543	0,1537
NDRE	0,8850	0,8600	0,2650	0,8780	0,2570	0,2570	0,2570
NDVI	0,7910	0,8970	0,1070	0,8820	0,0931	0,0931	0,0925
Área do dossel (cm^2)	0,9020	0,9390	0,2760	0,9480	0,2700	0,2700	0,2700
Plantio de mudas cultivadas em tubete de PVC							
GCI	0,8080	0,9100	0,1210	0,8790	0,1193	0,1178	0,1168
MSAVI	0,8110	0,9150	0,0937	0,8820	0,0907	0,0890	0,0878
MCARI1	0,8030	0,9070	0,0878	0,8730	0,0847	0,0831	0,0818
GNDVI	0,8070	0,9070	0,1267	0,8770	0,1249	0,1234	0,1225
NDRE	0,8840	0,8780	0,2051	0,8940	0,2011	0,1995	0,1978
NDVI	0,8190	0,9290	0,0749	0,8960	0,0722	0,0705	0,0690
Área do dossel (cm^2)	0,8880	0,9340	0,2550	0,9350	0,2530	0,2510	0,2500

Para o estudo de aplicação de calcário em profundidade, na Tabela 8 nota-se uma correlação positiva para todos os parâmetros com exceção da clorofila, que obteve valores baixos ou negativos com todas as variáveis. Alguns parâmetros merecem destaque, como é o caso dos IVs GCI, GNDVI e NDVI. O último obteve uma correlação de 0,7627, corroborando com Barbosa et al. (2020), que ao estudar a calagem profunda em cafeeiros obteve a melhor correlação do NDVI de Greenseeker com a altura no trato feito a 60 cm de profundidade. Os dois primeiros índices se destacam, obtendo valores de correlação próximos de 1 com parâmetros como altura, diâmetro e IAF, o qual também obteve uma correlação de 0,99 com a área do dossel (cm^2) estimada em software para ambos os manejos. Os resultados indicam que as variáveis citadas são bons parâmetros para estimativa de algumas variáveis físicas. Índices que se utilizam da banda verde, têm sido utilizados em trabalhos para estimar biomassa e outros parâmetros biofísicos em diferentes culturas (GUTIÉRREZ-RODRIGUES et al., 2004; SHANAHAN, 2001). Gitelson, Kaufman e Merzlyak, (1996), afirmam que o GNDVI, por exemplo, é mais sensível à concentração de clorofila que o NDVI.

Outros Índices de Vegetação, não obtiveram valores de correlação tão promissores, como é o caso do MSAVI2, com valores moderados (abaixo de 0,60) e o MCARI1 e NDRE, com correlação baixa ($\hat{\rho}_s$ entre 0,30 e 0,40), indicando não serem bons índices para acompanhamento do cafeeiro em período de formação.

Seguindo os testes não paramétricos realizados no item anterior, não foi constatada uma grande diferença nas correlações entre os tratamentos estudados, com exceção da clorofila. Apesar de baixa, houve mais correlação positiva da clorofila com parâmetros extra-campo no plantio com calcário em profundidade do que no sem aplicação de calcário em profundidade. O IV NDRE obteve o maior valor de correlação com esse parâmetro ($\hat{\rho}_s = 0,1705$). A baixa correlação da clorofila com os demais parâmetros explica o motivo de ser a única variável que difere significativamente entre os tratamentos. A baixa correlação, inclusive negativa com a maioria dos IVs calculados nesse trabalho, pode estar relacionado à amostragem de folhas, que foi feita de forma aleatória. Conforme Mesquita et al. (2016), mesmo se tratando de um mesmo cafeeiro, folhas mais expostas (parte mais externa dos ramos plagiotrópicos ou localizadas na copa) estão mais susceptíveis a ação da queima e clorose nos períodos de temperaturas mais baixas ou podem sofrer mais com verões intensos. Por outro lado, folhas mais internas estão mais protegidas desses fatores ou podem receber menos radiação solar, afetando o comportamento dos pigmentos fotossintéticos.

Hassan et al. (2018), observaram valores de correlação de Pearson entre IV e clorofila que variaram entre 0,55 e 0,78 para a cultura do trigo. Para o cafeeiro, Chemura, Mutanga e Odindi (2017) desenvolveram modelagens para prever valores de clorofila, utilizando imagens de Sentinel-2. O modelo dos autores conseguiu explicar 77% da variação de clorofila, utilizando as bandas de 10 m do sensor, diferindo deste trabalho. Os autores relataram que cafeeiros maduros, com mais de 4 anos, melhoraram muito o modelo em comparação aos mais jovens, pois a banda do NIR para esses cafeeiros é mais refletiva e a área do dossel mais representativa nas imagens. Os cafeeiros jovens, como são os amostrados nesse trabalho, reduziram o desempenho de todo o conjunto de dados na modelagem de clorofila total. Ainda, os autores utilizaram além do clorofilômetro SPAD, amostras foliares de clorofila em laboratório, o que aumentou a acurácia das leituras.

Para o experimento 2, referente à avaliação de plantio de mudas de cafeeiro produzidas em saquinhos multifuros e em tubetes, não houve correlação negativa entre parâmetros, conforme observado na Tabela 9. No entanto, novamente a clorofila teve correlação baixa com as demais variáveis, ratificando que a abordagem utilizada requer alguns ajustes quanto a amostragem, principalmente por se tratarem de cafeeiros em formação (CHEMURA; MUTANGA; ODINDI, 2017). Para essa correlação, as variáveis com valores de correlação mais elevados foram a área do dossel vetorizado e o NDRE (0,2760 e 0,2650 respectivamente para mudas em saquinhos multifuros e 0,2550 e 0,2051 para mudas em tubetes).

Diferente do primeiro experimento deste trabalho, todos os IVs obtiveram correlação acima de 0,70 com as medidas biofísicas, ou seja, correlação forte e direta. Logo, todos os índices podem ser uma boa opção para estimar algum dos parâmetros biofísicos para essa abordagem. Contudo, aqueles que obtiveram maior valor tanto para o plantio com mudas de saquinhos multifuros quanto para o plantio de mudas em tubetes foram a Área do dossel vetorizado (cm²), o NDVI e o NDRE respectivamente.

Uma particularidade é que o NDVI obteve correlação maior que o NDRE para diâmetro, enquanto o oposto aconteceu para a altura. A área do dossel foi a variável que mais uma vez teve maior correlação com os demais parâmetros, principalmente com o diâmetro e o IAF (ambos com $\hat{\rho}_s$ acima de 0,90), comprovando que os vetores foram gerados com acurácia e que a variável em questão pode servir para estima-los.

4.5. Modelos lineares

A existência de correlação forte entre alguns parâmetros amostrados em campo e índices de vegetação ou medições resultantes de imagens de ARP, proporcionou o desenvolvimento de equações de estimação por meio de regressão linear para cafeeiros em formação. Foram escolhidos os parâmetros com correlações mais fortes entre si e que fossem pertinentes à estimação em ambos os manejos avaliados: GCI e o IAF. Ademais, por ter uma correlação muito forte (acima de 0,90) com o diâmetro medido em campo (cm) e o IAF em ambos os experimentos, para a variável “Área do dossel vetorizado (cm²)” foi feito um modelo linear agrupando os 2 manejos estudados, visando dobrar o número de repetições. Na Tabela 10 estão descritos os valores do Erro Médio Quadrado (MSE), Raiz quadrada do Erro Médio Quadrado (RMSE), Erro Médio Absoluto (MAE), Coeficiente de Determinação (R²) e Coeficiente de Correlação de Spearman ($\hat{\rho}_s$) para os parâmetros escolhidos em ambos os experimentos.

Tabela 10 – Relação de Erros e Métricas de Regressão para a dispersão GCI x IAF e respectivos modelos lineares referentes aos manejos avaliados – Plantio com calcário em profundidade vs. Plantio sem calcário em profundidade; Plantio de mudas cultivadas em saquinho multifuros vs. plantio de mudas cultivadas em tubete – e da totalidade dos cafeeiros amostrados para as dispersões Área do dossel vetorizado (cm²) x IAF; Área do dossel vetorizado (cm²) x Diâmetro medido em campo (cm) e respectivos modelos lineares.

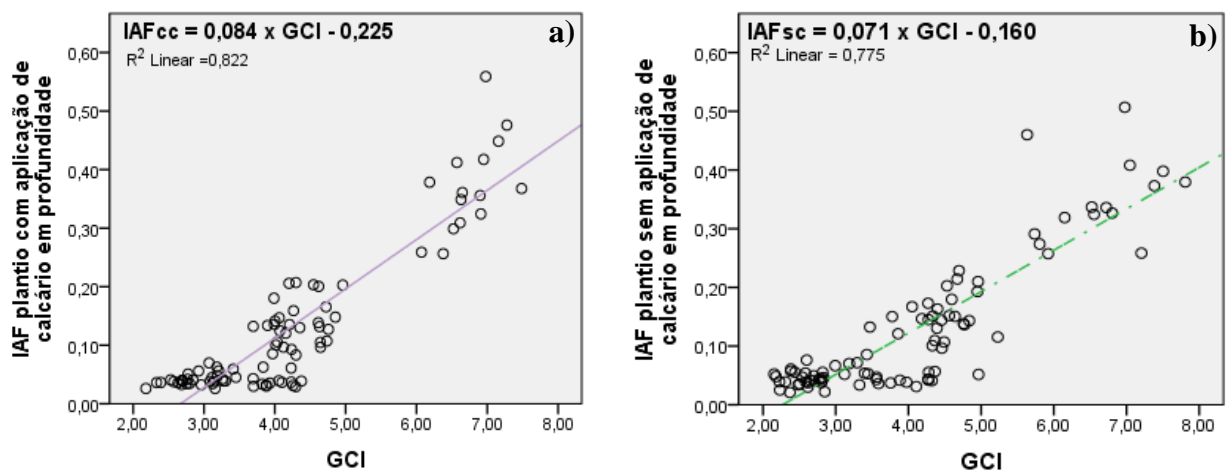
Parâmetros do modelo	Erros e Métricas de Regressão			
	MSE	RMSE	MAE	R ²

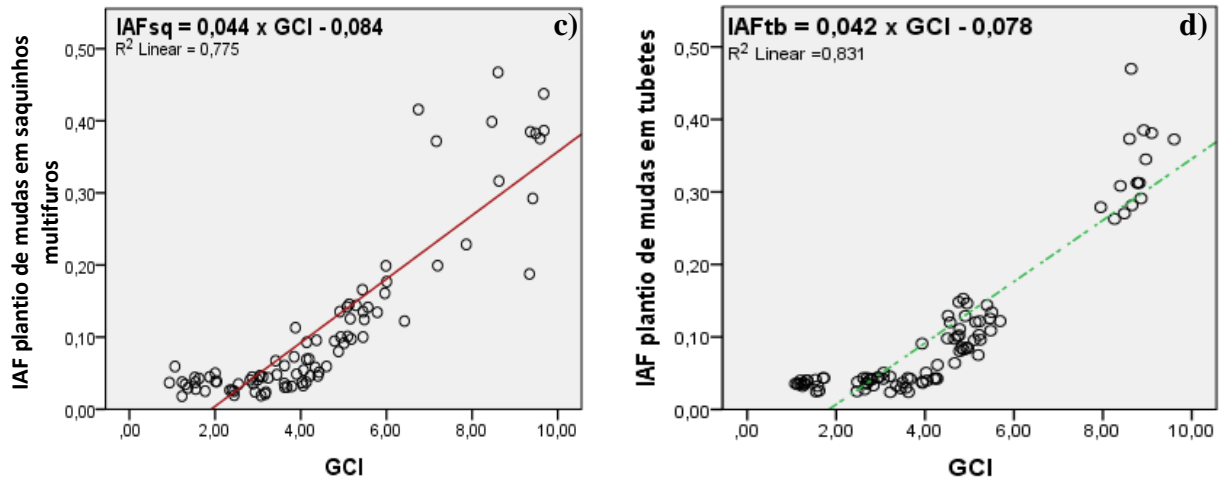
Plantio em área com aplicação de calcário em profundidade					
GCI x IAF	0,003	0,054	0,042	0,822	0,953
Plantio em área sem aplicação de calcário em profundidade					
GCI x IAF	0,003	0,056	0,04	0,775	0,932
Plantio de mudas cultivadas em saquinho multifuros					
GCI x IAF	0,003	0,056	0,041	0,775	0,871
Plantio de mudas cultivadas em tubete					
GCI x IAF	0,002	0,045	0,035	0,831	0,879
Total de amostras dos cafeeiros avaliados em ambos os experimentos					
Área do dossel vetorizado (cm ²) x IAF	0,001	0,036	0,023	0,905	0,944
Área do dossel vetorizado (cm ²) x Diâmetro (cm)	35,187	5,932	4,525	0,903	0,939

*Regressão significativa para o nível de significância $\rho = 0,05$.

Os gráficos de dispersão de IAF em função do GCI, os modelos lineares e as equações da reta referentes à avaliação de plantio de mudas com aplicação de calcário em profundidade e sem aplicação de calcário em profundidade (apenas em superfície) encontram-se na Figura 19.

Figura 19 – Gráfico de dispersão, modelo linear simples e equação do modelo de estimção do IAF em função do GCI para os plantios de mudas de café em solo com aplicação de calcário em profundidade (a), plantio de mudas de café em solo com aplicação de calcário apenas em superfície (b), plantios de mudas de café produzidas em saquinho multifuros (a) e plantio de mudas de café produzidas em tubete de polietileno rígido (d).





Os valores de R^2 nos gráficos da Figura 19, sugerem que os modelos lineares, apesar de simples, são satisfatórios para prever, em função do Índice de Vegetação GCI, o Índice de Área Foliar do cafeeiro, o qual normalmente necessita de medições feitas em campo.

Na avaliação de aplicação de calcário em profundidade, em ambas as áreas (com e sem o respectivo manejo) os valores de R^2 ultrapassaram 0,75, o que constata que o modelo linear, explica mais de 75% dos valores do IAF por meio do GCI. A área com aplicação de calcário em profundidade (a) obteve valores maiores de R^2 e menores erros ($R^2= 0,822$; $MSE= 0,003$; $RMSE = 0,054$; $MAE = 0,042$) comparada à área sem a aplicação de calcário em profundidade (b) ($R^2= 0,075$; $MSE= 0,003$; $RMSE = 0,056$; $MAE = 0,040$).

Para o experimento 2 possibilita-se uma avaliação análoga à anterior. Tanto o plantio de mudas produzidas em saquinhos multifuros (c) quanto as produzidas em tubetes (d) obtiveram um valor de R^2 elevado para o modelo em função do IV GCI na estimação do IAF, com valores acima de 0,75. Portanto, a regressão linear simples resultou num modelo capaz de fazer previsões satisfatórias de IAF do cafeeiro para o manejo em questão, pois explica mais de 75% dos valores de IAF em função do GCI. A área onde foi realizada plantio de mudas em tubetes obteve maior R^2 e menores erros ($R^2= 0,831$; $MSE= 0,002$; $RMSE = 0,045$; $MAE = 0,035$) em comparação à área com o plantio de mudas em saquinhos multifuros ($R^2= 0,775$; $MSE= 0,003$; $RMSE = 0,056$; $MAE = 0,041$).

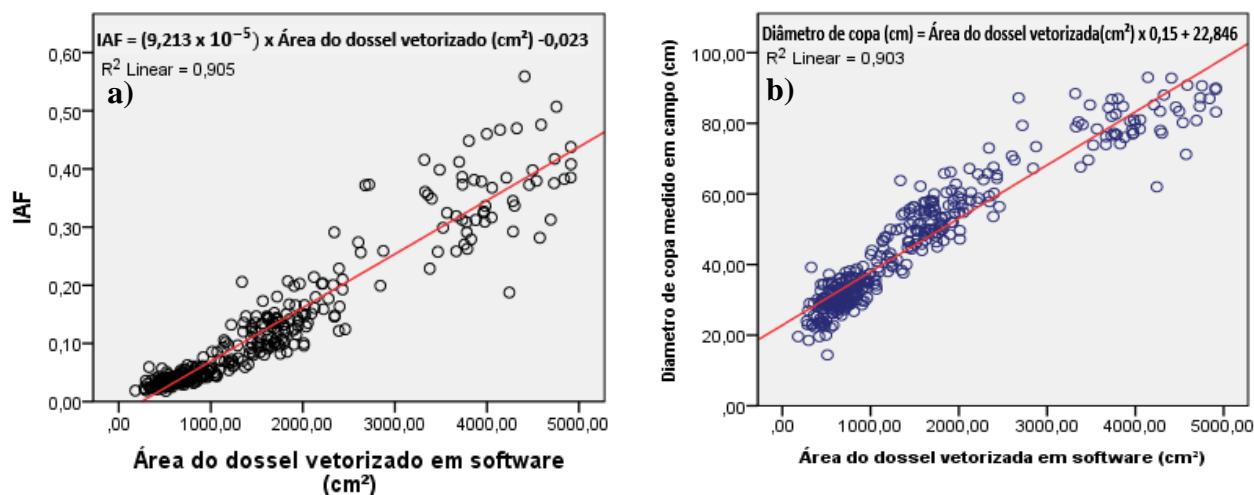
Na literatura, alguns estudos desenvolveram modelos lineares para a estimação de parâmetros biofísicos como altura, diâmetro e o IAF, que associa essas duas medidas, e obtiveram resultados similares a este trabalho. Wu, Wang e Bauer (2007), obtiveram valores de R^2 em seus modelos próximos a 0,8 e 0,9, para milho e batata respectivamente, ao estimar o IAF pelo SAVI, MSAVI, TSAVI e PVI, oriundos de imagens do satélite Quikbird. Já para o sorgo, Potgieter et al. (2017), ao avaliar a dinâmica da cultura, observaram valores de R^2 na

estimação do IAF de 0,85 e 0,81, na fase de pré-antese, para modelos utilizando o NDVI e EVI respectivamente, por meio de imagens multiespectrais obtidas por ARP.

Para culturas perenes existem trabalhos com bons valores de correlação e de R^2 entre variáveis físicas medidas em campo e mensuradas por ARP, principalmente envolvendo espécies florestais (DANDOIS; OLANO; ELLIS, 2015; PANAGIOTIDIS et al., 2017). Na cafeicultura, abordagem similar com ARP foi desenvolvida por Santos et al. (2020) com valores elevados de R^2 para altura e diâmetro (0,87 e 0,95, respectivamente), variáveis utilizadas no cálculo do IAF. No entanto, ainda há uma escassez de pesquisas utilizando índices de vegetação para estimar essa variável em cafeeiros. O motivo pode estar relacionado à saturação de índices como NDVI quando o IAF alcança valores mais altos, como relatam Delalieux et al. (2018). Ramirez e Zullo Júnior (2010), por exemplo, relataram resultados não significativos ao utilizar NDVI, SAVI, GVI e RVI para estimar o IAF, embora tenham relatado boa correlação entre as bandas do azul e do verde com o parâmetro. Já Taugourdeau et al. (2014) conseguiu um R^2 de 0,78 para IAF por meio do NDVI do sensor MODIS, mediante várias calibrações e ajustes. Contudo, a variedade de IVs calculados nesse trabalho e o fato de os cafeeiros amostrados estarem em formação, ou seja, com valores inferiores de IAF, resultaram em ótimos valores de R^2 nos modelos propostos.

Para o total de amostras, desconsiderando a variável manejo, ou seja, englobando as plantas dos 2 experimentos, foram desenvolvidos modelos lineares em função da “Área do dossel vetorizado (cm^2) para estimar o IAF e o diâmetro de copa (cm) de cafeeiros em formação. Os Gráficos de dispersão, os modelos lineares e suas respectivas equações estão dispostos na Figura 20.

Figura 20 – Gráficos de dispersão, modelos lineares simples e equações dos modelos de estimação de IAF (a) e do diâmetro de copa (cm) (b) em função da Área do dossel vetorizada em software para os plantios de mudas de cafeeiro em formação englobando ambos os manejos do estudo.



A linearidade constatada na Figura 20, sugere que a ARP pode ser uma alternativa válida às medições de campo, como também observaram Santos et al. (2020). As previsões do modelo linear se mostram significativas já que o R^2 para ambos os modelos foi acima de 0,90, ou seja, os modelos em função da Área do dossel vetorizado em software (cm²) explicam mais de 90% dos valores, tanto do IAF quanto do diâmetro de copa (cm). Contudo, apesar dos valores de $\hat{\rho}_s$ e R^2 elevados, a área do dossel vetorizado (cm²) na estimação do Diâmetro (cm) resultou em erros absolutos (MAE) acima dos 4,5 cm e RMSE de 5,932. Nota-se a presença de alguns outliers na dispersão, o que pode ter elevado o valor do MAE e do RMSE.

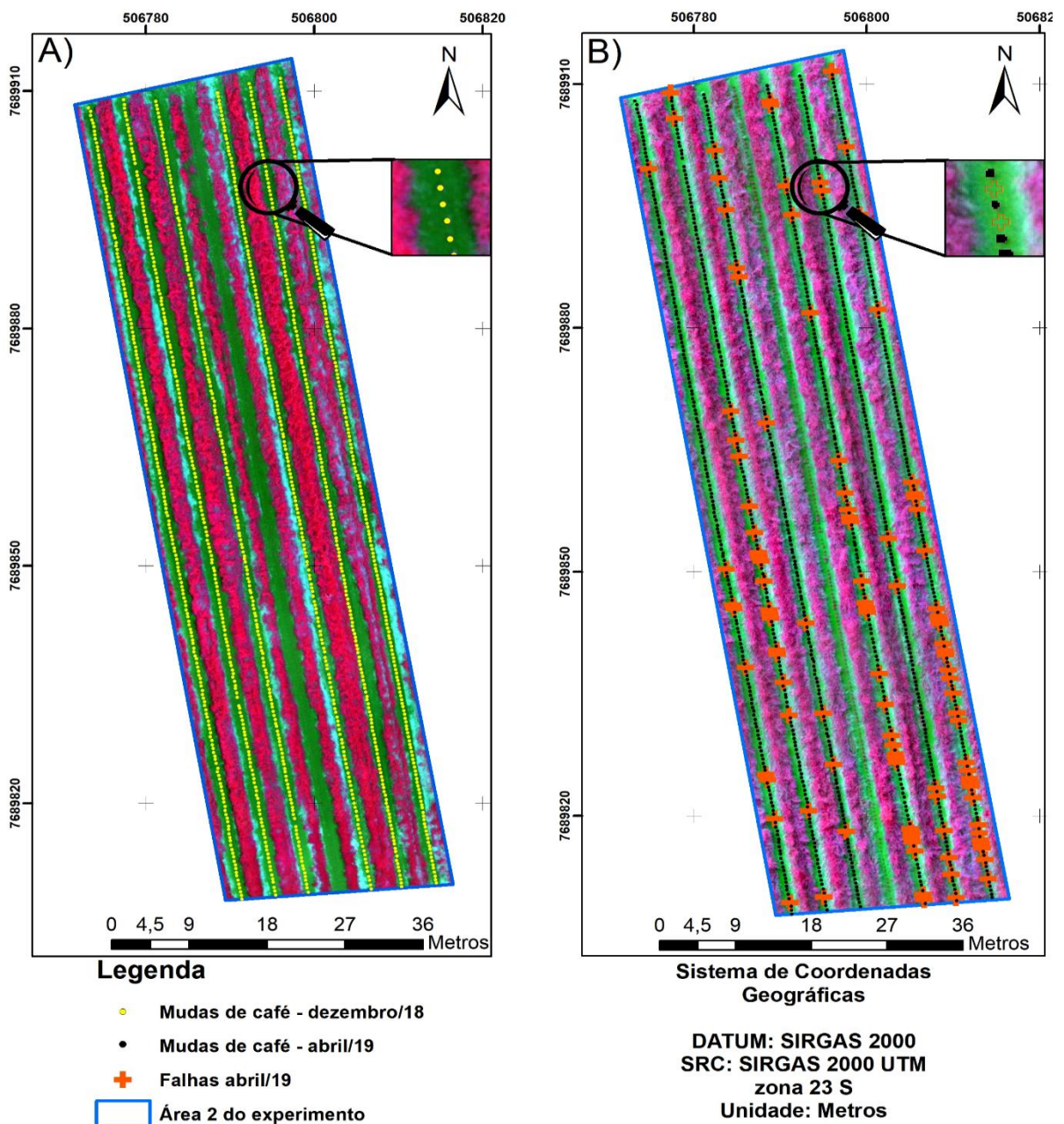
Contudo, por se tratar de uma regressão simples, procedimento relativamente rápido, o modelo linear pode proporcionar estimativas de área foliar e volume para fins de planejamento e auxiliar em tomadas de decisão. Em ambos os experimentos os resultados gerados por imagens de ARP mostraram-se satisfatórios com proximidade dos valores de campo. Faz-se conveniente o estudo com modelos mais complexos e com a retirada de outliers para modelos ainda mais acurados.

4.6. Levantamento de falhas

Para avaliar o quantitativo de falhas, na área do experimento 2, foram gerados vetores das plantas de café em imagens de ARP obtidas logo após o transplante (dezembro de 2018) e antes do replante nas respectivas falhas (abril de 2019) para as áreas referentes aos 2 plantios

avaliados – mudas de cafeeiros produzidas em saquinhos multifuros e em tubetes. O esquema é demonstrado na Figura 21, onde à esquerda está a imagem referente ao mês de dezembro de 2018 e à direita a de abril de 2019, na qual também foram identificadas as falhas referentes à cada cafeeiro.

Figura 21 – Levantamento de falhas entre os plantios feitos com mudas de saquinhos de polietileno multifuros e tubetes utilizando imagens ARP de 12/2018 (a) e 04/2019 (b). Nas 3 linhas à esquerda em ambas as imagens foi feito o plantio com mudas em saquinho e nas 3 à direita o plantio com mudas em tubete. A linha central foi considerada bordadura.



Fonte: Do autor (2020).

Na Tabela 11 consta a quantidade levantada de cafeeiros plantados em ambos os meses e o percentual de falhas para ambos os plantios avaliados.

Tabela 11 – Quantidade de mudas em dezembro de 2018 e remanescentes em abril de 2019, antes do replantio, e o levantamento quantitativo e percentual das falhas para mudas de café transplantadas em saquinhos de polietileno e em tubetes.

Recipiente das mudas	Mudas de café – dez/2018	Mudas de café - abr/2019	Quantidade de falhas	Percentual de falhas
Saquinho multifuros	611	572	39	6,4%
Tubete	613	541	72	11,7%

O resultado da Tabela 11 mostra que o transplântio de mudas produzidas em tubetes garantiu menor pegamento, ou seja, mais falhas, que o plantio de mudas produzidas em saquinhos multifuros (11,7% contra 6,3%). Para avaliar se a frequência de falhas está significativamente associada aos recipientes avaliados, ou seja, saquinhos e tubetes, foi realizado o teste Qui-quadrado (χ^2), cujo o resultado é descrito na Tabela 12.

Tabela 12 – Teste de independência de Qui-Quadrado (χ^2) considerando as falhas de plantio e os recipientes saquinhos de polietileno e tubetes para a produção de mudas de cafeeiro.

Teste realizado	Hipótese de Nulidade (H0)	Valor do teste	Graus de Liberdade	Valor de Significância p	Decisão
Qui-quadrado de Pearson (χ^2)	Não há associação entre as variáveis	10,671 ^a	1	0,0011*	Rejeita-se a hipótese de nulidade (H0), há associação entre as variáveis

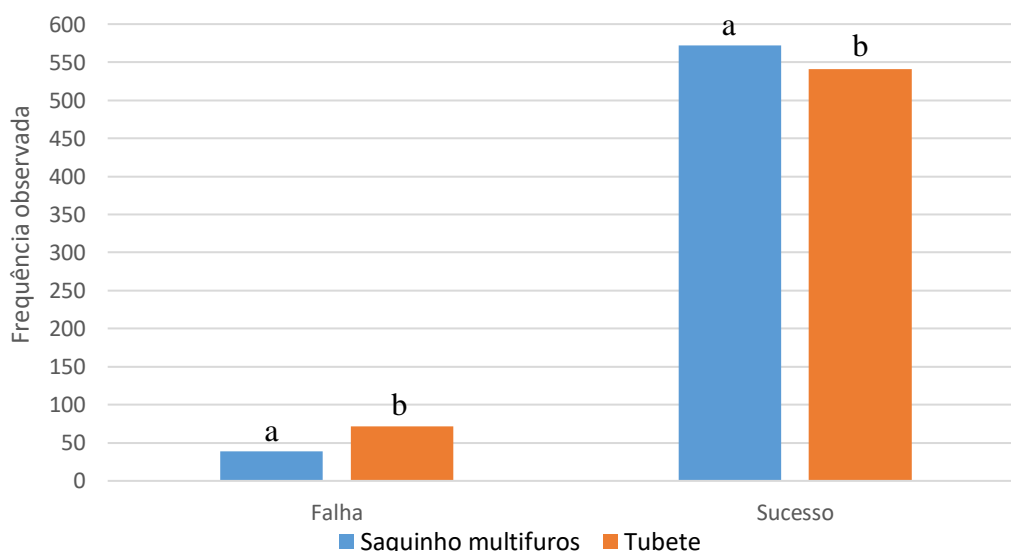
a. 0 células (0,0%) obtiveram frequência esperada menor que 5; *Diferença significativa para o nível de significância $\rho = 0,05$.

Logo, o teste de Qui-quadrado rejeitou a hipótese nula (H0) e constatou associação entre o recipiente onde foram condicionadas as mudas e a quantidade de falhas observadas no mês de abril de 2019. Estão elencados na Tabela 13, os resultados e a diferença entre os transplântios desse objeto de estudo, obtidos por meio de referência cruzada entre os tratamentos avaliados e o pegamento das mudas. Em sequência, consta na Figura 22 uma análise gráfica para evidenciar visualmente essa diferença.

Tabela 13 – Referência cruzada entre o status do pegamento das mudas e o tipo de recipiente avaliado, para mudas de cafeeiro transplantadas – oriundas da produção em saquinhos de polietileno multifuros e mudas de cafeeiro oriundas da produção em tubetes, com base no resultado do teste de Qui-quadrado (χ^2).

Status do pegamento da muda	Frequências	Manejo		Total
		Saquinho multifuros	Tubete	
Sucesso	Frequência observada	572 ^a	541 ^b	1113
	Frequência esperada	555,6	557,4	1113,0
	% dentro de pegamento	51,4%	48,6%	100,0%
	% dentro de recipiente	93,6%	88,3%	90,9%
	% do Total	46,7%	44,2%	90,9%
	Resíduo ajustado	3,3	-3,3	
Falha	Frequência observada	39 ^a	72 ^b	111
	Frequência esperada	55,4	55,6	111,0
	% dentro de pegamento	35,1%	64,9%	100,0%
	% dentro de recipiente	6,4%	11,7%	9,1%
	% do Total	3,2%	5,9%	9,1%
	Resíduo ajustado	-3,3	3,3	
Total	Frequência observada	611	613	1224
	Frequência esperada	611,0	613,0	1224,0
	% dentro de pegamento	49,9%	50,1%	100,0%
	% dentro de recipiente	100,0%	100,0%	100,0%
	% do Total	49,9%	50,1%	100,0%

Figura 22 – Representação gráfica das diferenças entre as falhas e o sucesso no pegamento das mudas de cafeeiro transplantadas – produzidas em saquinho de polietileno multifuros e em tubetes de 180 ml.



Apesar de não haver diferença significativa envolvendo os outros parâmetros avaliados, como os índices de vegetação e os atributos físicos medidos em campo, nota-se que no quesito pegamento houve diferença. Nesse quesito, o transplântio de mudas de cafeeiro produzidas em saquinho de polietileno multifuros foi melhor que aquele feito com mudas produzidas em tubete pois teve um menor número de falhas em campo. Para o transplântio com mudas em saquinhos multifuros, em 611 plantas houve um pegamento de 572 e falha de 39. Já para o transplântio feito com mudas em tubetes, para 613 plantas, houve pegamento de 541 e falha de 72. O fato pode estar relacionado principalmente ao volume de substrato que é consideravelmente inferior no tubete avaliado nesse estudo, interferindo não só na nutrição, mas também na capacidade de reter água, em períodos de veranico.

Na literatura há uma escassez de trabalhos utilizando índices de vegetação e ARPs para essa abordagem. A prevalência é de trabalhos agrônômicos, com medições de campo, *in situ*. Marchi et al. (2015a) avaliaram pegamento de mudas de cafeeiro (cultivar Topázio) produzidas em sacos plásticos e em tubetes de 120 ml e 50 ml após o transplântio com sistema convencional vs. plantio direto (manejo da braquiária seca sobre o solo, previamente plantada nas entrelinhas) para Latossolo Vermelho Distroférico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Os autores observaram que o pegamento de mudas cultivadas em saco plástico em geral foi melhor que os tubetes, 138 dias após o plantio (DAP), embora a diferença para o tubete de maior volume (120 ml) tenha sido significativamente menor no plantio convencional em Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Por outro lado, no plantio direto, a diferença de pegamento nesse solo ficou evidente logo após 30 dias de plantio, com uma diferença de pegamento de 100%, 91,62% e 40,62% para saco plástico, tubete de 120 ml e 50 ml respectivamente, que chegaram a valores de pegamento de 100%, 33,25% e 9,37% passados os 138 dias.

Marchi et al. (2015b) estudaram ainda o pegamento em diferentes épocas de plantio para a cultivar Acaiá Cerrado cultivadas saco plástico e tubetes de 120 ml em diferentes tipos de solo. Os autores avaliaram intervalos de 15 dias após plantio (DAP) até completar 100 dias, para 4 diferentes datas, entre janeiro e março. Em todas as datas o pegamento de mudas produzidas em saquinho se mostrou melhor. No entanto, em épocas com condições climáticas desfavoráveis o percentual de pegamento das mudas produzidas em tubete teve seus menores valores, chegando a 12,50% contra 90% para o plantio em sacolas plásticas em Latossolo Vermelho Distroférico. Em Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, a diferença de pegamento ficou menos evidente (97,50% para saco plástico contra 67,50%), evidenciando também a influência do fator solo. Portanto, percebe-se que o volume de substrato pode representar um fator importante para o pegamento em períodos de estresse do cafeeiro.

Embora o maior pegamento de mudas produzidas em saquinho em relação às produzidas em tubetes relatado pelos autores supracitados corrobore com o presente experimento, há de se ressaltar que a diferença percentual de falha foi menor (6,4% para o saquinho contra 11,7% para os tubetes). Logo, o volume dos tubetes utilizados nesse trabalho (180 ml) aparenta ter um melhor desempenho para esse quesito.

Levando-se em conta a otimização da área do viveiro proporcionada pela produção de mudas em tubetes, essas perdas podem ser contornadas pelo ganho em mudas produzidas. Embora o investimento inicial para a implantação seja mais elevado, a longo prazo diminui o custo da produção de mudas (MÜLLER; MIGLIORANZA; DE PÁDUA FONSECA, 1997). No entanto, apesar de ambos os recipientes avaliados nesse estudo possibilitarem o plantio mecanizado, o replantio representa um maior gasto com mão-de-obra, pois é realizado manualmente. Para a propriedade onde foi desenvolvida essa pesquisa, o custo aproximado do replantio foi de R\$ 1050,00 por hectare.

No caso das mudas produzidas em tubetes, apesar de representar mais perdas e possuir um custo inicial maior, podem ser vantajosas em vários aspectos. As mudas produzidas em saquinhos multifuros é mais susceptível a ocorrência de pragas como nematoides, enquanto o tubete possui um enchimento mais rápido e são preparados com substratos comerciais como fibra de coco ou casca de pinus e adubo completo, sem o risco de contaminação. Ainda, o tubete, por ser suspenso no viveiro, eliminando o risco de pião torto, favorecendo a otimização da área e facilidade no manuseio e transporte.

Por outro lado, os as mudas produzidas em saquinhos multifuros possuem um menor percentual de falha e, assim como as mudas produzidas em tubetes, possibilitam o plantio mecanizado, pois não há a necessidade da retirada do recipiente. Dessa forma, os saquinhos multifuros representam um menor gasto com mão de obra e baixo risco de destorroamento, dois problemas comuns no plantio de mudas de cafeeiro produzidas em saquinho convencional.

Logo, recomenda-se mais estudos com diferentes substratos, índices de vegetação, volumes de recipientes, diferentes épocas e maiores períodos avaliados após o transplante, para que se determine os parâmetros ótimos para esses manejos promissores no cafeeiro.

5. CONCLUSÃO

Analisando o plantio em solo com e sem calcário em profundidade, foi encontrada diferença significativa para apenas para a variável Clorofila ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$). Já no segundo experimento, não se observou diferença significativa entre o plantio de mudas produzidas em tubetes e mudas produzidas em saquinhos multifuros.

Mediante os bons valores de correlação de Spearman obtidos, foi possível desenvolver modelos lineares para prever o Índice de Área Foliar (IAF) em função do GCI em ambos os experimentos abordados nesse trabalho, com valores de R^2 acima de 0,75. Ao agrupar a totalidade dos dados amostrais de cafeeiros dos experimentos 1 e 2, foi possível estabelecer modelos lineares para estimação do IAF e do diâmetro de copa (cm^2) em função da área do dossel vetorizada (cm^2) no software eCognition, com valores de R^2 acima de 0,90.

Avaliando o aspecto pegamento no experimento 2, as mudas cultivadas em tubetes apresentaram maior número de falhas em comparação com as mudas produzidas em saquinhos multifuros (11,7% de falhas contra 6,4% respectivamente). O teste de Qui-quadrado constatou que existe associação entre a mortalidade de plantas no pós-plantio e o recipiente utilizado na produção das mudas.

Portanto, a ARP e o sensor multiespectral acoplado foram eficientes em monitorar o cafeeiro, seja para avaliar os efeitos da aplicação de calcário em profundidade, seja para avaliar os efeitos do plantio de mudas produzidas em diferentes recipientes.

REFERÊNCIAS

- 3DR ROBOTICS INC. **Solo User Manual V8**. Berkeley, CA, 2015. Disponível em: <https://3dr.com/wp-content/uploads/2016/01/v8_01_05_16.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ - ABIC. **Indicadores da indústria do café no Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?tpl=home>>. Acesso em: 15 dez. 2018.
- ALONÇO, A.S.; FERREIRA, O.O. Incorporação profunda de fertilizantes e calcário: sua influência na produção de milho (*Zea mays* L.) sob estresse hídrico e sobre algumas propriedades físicas e químicas de um solo de cerrado. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA*, 20., 1991, Londrina. **Anais[...]**. Londrina: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, p. 57, 1992.
- ALCARDE, J. C. Características de qualidade dos corretivos da acidez do solo. *In: SIMPÓSIO SOBRE ACIDEZ E CALAGEM. XV REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO*, Campinas, SP, 1983. **Anais[...]**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 10-31, 1983.
- ALCARDE, J.A.; RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. *In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M. de; LOPES, A. S.; ALVARES V., V.H., (Eds.). Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: **Sociedade brasileira de Ciência do Solo**, p. 291-334, 2003.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.695-702, 2001.
- AMARAL, J. A. T. **Crescimento vegetativo estacional do cafeeiro e suas interações com fontes de nitrogênio, fotoperíodo, fotossíntese e assimilação do nitrogênio**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 139 p. Tese (Doutorado), 1991.
- AGENCIA NACIONAL DE AVIACAO CIVIL - ANAC. **Requisitos Gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil**. Regulamento Brasileiro de Aviação Civil. n. 94, 2017. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-00/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf> Acesso em: 23 nov. 2018.
- ARDUPILOT. **History of Ardupilot, 2019**. Disponível em: <<http://ardupilot.org/ardupilot/docs/common-history-of-ardupilot.html>>. Acesso em: 02 abr. 2019.
- BAH, M.; HAFIANE, A.; CANALS, R. Deep Learning with Unsupervised Data Labeling for Weed Detection in Line Crops in UAV Images. **Remote Sensing**, v.10, n.11, p. 1690, 2018.
- BARBOSA, S. M. et al. Deep furrow and additional liming for coffee cultivation under first year in a naturally dense inceptisol. **Geoderma**, v. 357, p. 113934, 2020.

BARNES, E. M. et al. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE*, 5, 2000. **Proceedings** [...]. Bloomington, MN, USA. 2000.

BARROS, R.S. et al. Physiology of growth and production of the coffee tree - a review. **Journal of Coffee Research**, v.27, p.1-54,1999.

BARROS, R. S.; MAESTRI, M. Influência dos fatores climáticos sobre a periodicidade de crescimento vegetativo do café (*Coffea arabica* L.). **Revista Ceres**, v. 21 n. 116 p. 268-279, 1974.

BARUQUI, A. M. et al. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da Zona Campos das Vertentes-MG. **Embrapa Solos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2006.

BATER, C. W. et al. Using digital time-lapse cameras to monitor species-specific understorey and overstorey phenology in support of wildlife habitat assessment. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 180, n. 1-4, p. 1-13, 2011.

BEAUFILS, E. R. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS): a general scheme for experimentation and calibration based on principles develop from research in plant nutrition. **Soil Science Bulletin**, v. 1, n. 1, p. 132, 1973.

BENDER, D. D. B. B.; Weber, M. A.; Vieira, F. C. B. Necessidade de ajustes no sistema de recomendação de calagem e adubação de oliveiras (*Olea europaea* L.) no sul do Brasil. **Revista Ecologia e Nutrição Florestal**, v. 6, n. 1, p. 17-32, 2018.

BENZ, U. C. et al. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 58, n. 3-4, p. 239-258, 2004.

BLASCHKE, T. et al. Geographic object-based image analysis—towards a new paradigm. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 87, p. 180-191, 2014.

BRAGA, C.C. et al. Tempo de resposta da vegetação às variabilidades sazonais da precipitação no Nordeste do Brasil. Santa Maria. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, n.1, p. 149-157, 2003.

CAMARGO, A. P. de; FRANCO, C. M. Clima e fenologia do cafeeiro. *In: Cultura de café no Brasil: manual de recomendações*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, 1981. p. 1-62, 1981.

CAMARGO, A. P; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.

CAMPOS, K. P. **Desenvolvimento de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) produzidas em diferentes substratos, fertilizações e tamanhos de tubetes**. 2002. 90 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 5, p. 502-509, 2006.

CARDUCCI, C. E. et al. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 2, p. 291-302, 2013.

CARRIJO, G. L. A et al. Automatic detection of fruits in coffee crops from aerial images. *In: LATIN AMERICAN ROBOTICS SYMPOSIUM (LARS); BRAZILIAN SYMPOSIUM ON ROBOTICS (SBR)*, 2017, Curitiba, Brazil. **Proceedings [...]**. IEEE, 2017. p. 1-6. DOI:10.1109/sbr-lars-r.2017.8215283

CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; DUBE, T. Remote sensing leaf water stress in coffee (*Coffea arabica*) using secondary effects of water absorption and random forests. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 100, p. 317–324, 2017a.

CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; DUBE, T. Integrating age in the detection and mapping of incongruous patches in coffee (*Coffea arabica*) plantations using multi-temporal Landsat 8 NDVI anomalies. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 57, p. 1–13, 2017b. DOI:10.1016/j.jag.2016.12.0

CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; ODINDI, J. Empirical modeling of leaf chlorophyll content in coffee (*coffea arabica*) plantations with sentinel-2 msi data: Effects of spectral settings, spatial resolution, and crop canopy cover. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 5541-5550, 2017.

COLTRI, P. P. et al. Variação temporal da biomassa do café arábica arborizado e a pleno sol, através de índices de vegetação. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 15, 2011, Curitiba. **Anais[...]**. São José dos Campos: INPE, 2011.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 92, p. 79–97, 2014.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de café**, Brasília, v. 5, n. 4, p. 1-44, dezembro, 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

CORRÊA, J. B. et al. Avaliação da fertilidade do solo e do estado nutricional de cafeeiros do Sul de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 25, n. 6, p. 1279–1286, 2001.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Effects of surface application of calcium magnesium Silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1843-1854, 2014.

CUNHA, R.L. et al. Avaliação de substratos e tamanhos de recipientes na formação de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L) em tubetes. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.26, n.1, p.7-12, 2002.

DAMATTA, F. M. et al. Sustained enhancement of photosynthesis in coffee trees grown under free-air CO₂ enrichment conditions: Disentangling the contributions of stomatal, mesophyll, and biochemical limitations. **Journal of Experimental Botany**, Viçosa, v. 67, n. 1, p. 341–352, 2016.

DANDOIS, J. P.; OLANO, M.; ELLIS, E. C. Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. **Remote Sensing**, v. 7, n. 10, p. 13895-

13920, 2015.

DARDENGO, M. C. et al. Crescimento e qualidade de mudas de café conilon produzidas em diferentes recipientes e níveis de sombreamento. **Coffee Science**, Lavras-MG, v. 8, n. 4, p. 500-509, 2013.

DELALIEUX, S. et al. A near-infrared narrow-waveband ratio to determine Leaf Area Index in orchards. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3762-3772, 2008.

DIAS, R. et al. Fontes e proporção de material orgânico para a produção de mudas de café em tubetes. **Ciência e agrotecnologia**, v. 33, n. 3, p. 758-764, 2009.

DJI. **DJI MATRICE 100 - User Manual**. 2016. Disponível em: <https://dl.djicdn.com/downloads/m100/M100_User_Manual_EN.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2020.

DOS SANTOS, O. L.; PADOLFI, A. S.; RAMALDES, G. P. Análise de índice de vegetação através de imagens obtidas por VANT. **Revista Científica FAESA**, v. 14, n. 1, p. 145-165, 2018.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. S.; BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 4, p. 825-831. 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, 412p. 2006.

EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. **Sentinel Online: Sentinel-2 Missions**, 2015. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

ESPINDULA, M. C. et al. Different volumes of tubes for clonal propagation of *Coffea canephora* from seedlings. **Coffee Science**, v. 13, n. 1, p. 33-40, 2018.

ESRI. **Desktop ArcGIS Release 10**. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, v. 437, p. 438, 2011.

FANG, S. et al. Remote Estimation of Vegetation Fraction and Flower Fraction in Oilseed Rape with Unmanned Aerial Vehicle Data. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, p. 416, 2016.

FAVARIN, J. L. et al. Equations for estimating the coffee leaf area index Equações para a estimativa do índice de área foliar do café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37 n. 6 p. 769-773. Brazil, 2002.

FERRAZ, G. A. S. et al. Precision agriculture to study soil chemical properties and the yield of a coffee field. **Coffee Science**, v. 7, n. 1, p. 59-67, 2012.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FLUMIGNAN, D. L.; DE FARIA, R. T. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo de cafés em fase de formação. **Bragantia**, v. 68, n. 1, p. 269-278, 2009.

FREEMAN, P. K.; FREELAND, R. S. Politics & technology: U.S. policies restricting unmanned aerial systems in agriculture. **Food Policy**, v. 49, p. 302–311, 2014. doi:10.1016/j.foodpol.2014.09.008

FT GREEN LLC. **Papers and Technical Documents about atLEAF Chlorophyll meter**. 2017. Disponível em: <<https://www.atleaf.com/Docs>>. Acesso em: 29 abr. 2019.

FURFARO, R. Neural network algorithm for coffee ripeness evaluation using airborne images. **Applied Engineering in Agriculture**, 23(3), 379–387, 2007.

FURLANI, A. M. C.; VIÉGAS, G. P. **O melhoramento de plantas no Instituto Agrônomo**. Instituto Agrônomo, 1993.

GAO, B. C. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote sensing of environment**, v. 58, n. 3, p. 257–266, 1996.

GARCIA, A. L. A.; REIS, R. P.; MATIELLO, J. B. Plantio de mudas de café sem a retirada da sacola com diferentes números de furos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 33, 2007, Lavras. **Anais[...]**. Brasília, DF: Embrapa Café, 2007.

GARCIA, C. P. **Efeitos do preparo profundo do solo e da calagem na compactação do solo e na produtividade da cana-de-açúcar**. 2018. 96 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Botucatu, 2018.

GATES, D. M. et al. Spectral Properties of Plants. **Applied Optics**, v. 4, n. 1, p. 11, 1965.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289-298, 1996.

GITELSON, A. A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of plant physiology**, v. 160, n. 3, p. 271-282, 2003.

GONÇALVES, L. M. et al. Variabilidade espacial e temporal do índice vegetação MPRI aplicado às imagens de grama são carlos obtidas por aeronave remotamente pilotada. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 11, n. 4, p. 340-349, 2017.

GONÇALVES, S. M. et al. Critical ranges of macronutrient content in leaves of coffee seedlings (*Coffea arabica* L.) grown in plastic pots. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 3, p. 743-752, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542009000300012>.

GUIMARÃES, P. T. G. et al. Produção de mudas de cafeeiros em tubetes. Informe Agropecuário. Belo Horizonte, v. 19, n. 193, p. 98-108, 1998.

GUIMARÃES, P. T. G. et al. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, Viçosa, MG: CFSEMG, p.289-302, 1999.

GUPTA, R. K.; VIJAYAN, D.; PRASAD, T. S. New Hyperspectral Vegetation Characterization Parameters. **Advances in space Research**, v. 28, n. 1, p. 201-206, 2001.

GUTIÉRREZ-RODRÍGUEZ, M. et al. Association between canopy reflectance indices and yield and physiological traits in bread wheat under drought and well-irrigated conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 55, n. 11, p. 1139-1147, 2004.

HABOUDANE, D. et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote sensing of environment**, v. 90, n. 3, p. 337-352, 2004.

HASSAN, M. A. et al. Time-series multispectral indices from unmanned aerial vehicle imagery reveal senescence rate in bread wheat. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 809, 2018.

HERWITZ, S. R. et al. Imaging from an unmanned aerial vehicle: Agricultural surveillance and decision support. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, p. 49–61, 2004.

HERWITZ, S. R. et al. Precision Agriculture as a Commercial Application for Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicles. **1st UAV Conference**, 2002. Acesso em: 22 abr. 2019. DOI:10.2514/6.2002-3404

HUANG, H. et al. Accurate Weed Mapping and Prescription Map Generation Based on Fully Convolutional Networks Using UAV Imagery. **Sensors**, v. 18, n.10, p. 3299, 2018.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**, v. 25, n. 3, p. 295–309, 1988.

HUETE, A. R.; JUSTICE, C.; VAN LEEUWEN, W. MODIS Vegetation index (MOD 13), EOS MODIS algorithm–theoretical basis document. **Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center**, 1996.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2ª edição por (pesquisadores do INPE): José Carlos N. Epiphanyo (coordenador); Antonio R. Formaggio; Athos R. Santos; Bernardo F. T. Rudorff; Cláudia M. Almeida; Lênio S. Galvão. São José dos Campos: Parêntese, p. 672, 2009.

JORGE, L. A.; INAMASU, R. Y. de C. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. Separata de: Agricultura de Precisão: Resultados de um Novo Olhar, São Carlos, SP. **Embrapa Instrumentações**, p.109-134, 2014. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1003485/uso-de-veiculos-aereos-nao-tripulados-vant-em-agricultura-de-precisao>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

JÚNIOR, A. F. C. et al. Phenological characterization of coffee crop (*Coffea arabica* L.) from Modis time series. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 31, n. 4, p. 569-578, 2013.

JUSTICE, C. O. et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228–1249, 1998.

KÄMPF, A. N. O uso de substrato em cultivo protegido no agronegócio brasileiro. In: FURLANI, A. M. C. et al. **Caracterização, manejo e qualidade de substratos para produção de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 1-6, 2002.

KÄMPF, A. N. Evolução e perspectivas do crescimento do uso de substratos no Brasil. In: BARBOSA, J. G.; MARTINEZ, H. E. P.; PEDROSA, M. W.; SEDIYAMA, M. A. N. (Ed.).

Nutrição e adubação de plantas cultivadas em substrato. Viçosa, MG: UFV, p. 3-10, 2004.

KATSUHAMA, N. et al. Discrimination of areas infected with coffee leaf rust using a vegetation index. **Remote Sensing Letters**, v. 9, n. 12, p. 1186-1194, 2018. Acesso em: 28 abr. 2019. DOI: 10.1080/2150704X.2018.1519269.

JOHNSON, J. M. et al. Growth, water relations and solute accumulation in osmotically stressed seedlings of the Colophospermum mopane. **Tree Physiology**, v.16, p. 713-718, 1996.

JOHNSON, L. F. et al. Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 6, p. 845, 2004.

LEITE, M. J. et al. Aplicação de corretivos e crescimento de oleaginosas em solos salinizados do semiárido. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 1, p. 87-95, 2012.

LELES, P.S.S.; CARNEIRO, J. G. A.; BARROSO, D. G. Comportamento de mudas de *Hymanea courbaril* L. var *stilbocarpa*(Hayne) Lee et Langenh. E *Apuleia leiocarpa* (Vog.) Macbr, produzidas sob três regimes de irrigação. **Revista Árvore**, Viçosa, v.22, n.1, p.11-19. 1998.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. Digital image interpretation and analysis. **Remote sensing and image interpretation**, v. 6, p. 545-81, 2008.

LIVRAMENTO, D. E. **Morfologia e fisiologia do cafeeiro. Café arábica: do plantio à colheita.** Lavras: EPAMIG, p. 87-161, 2010.

LOVELAND, T. R.; IRONS, J. R. Landsat 8: The plans, the reality, and the legacy. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 1–6, 2016.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas.** Agronômica Ceres, 2006.

MALINGREAU, J. P. Global vegetation dynamics: Satellite observations over asia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 9, p. 1121–1146, 1986.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **The annals of mathematical statistics**, p. 50-60, 1947.

MARANA, J. P. et al. Índices de qualidade e crescimento de mudas de café produzidas em tubetes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 1, p. 39-45, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000100007.

MARCHI, E. C. S. et al. Sobrevivência de mudas de cafeeiro produzidas em sacos plásticos e tubetes no sistema convencional e plantio direto, em duas classes de solo. **Ceres**, v. 50, n. 290, 2015a.

MARCHI, E. C. S. et al. Épocas de plantio de mudas de cafeeiro produzidas em sacos plásticos e tubetes e plantadas em duas classes de solo. **Ceres**, v. 50, n. 290, 2015b.

MARIN, D. B. et al. Multispectral radiometric monitoring of bacterial blight of coffee. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 5, p. 959-982, 2019a.

MARIN, D. B. et al. Sensoriamento remoto multiespectral na identificação e mapeamento das variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. **Revista Ceres**, v. 66, n. 2, p. 142-153, 2019b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737x201966020009>.

MARTINS, G. D.; GALO, M. DE L. B. T.; VIEIRA, B. S. Detecting and Mapping Root-Knot Nematode Infection in Coffee Crop Using Remote Sensing Measurements. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 5395–5403, 2017. DOI:10.1109/jstars.2017.2737618.

MESQUITA, C. M. et al. **Manual do café: Manejo de Cafezais Em Produção**. Belo Horizonte, 2016.

MICHALOVICZ, L. et al. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1496-1505, set./out. 2014.

MICROSOFT. **Microsoft Excel - Computer Software**. Washington, DC: Microsoft Corporation, 2013.

MODIS. **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - Specifications**. 2018. Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

MOHARANA, S.; DUTTA, S. Spatial variability of chlorophyll and nitrogen content of rice from hyperspectral imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 122, p. 17–29, 2016.

MOLIN, J. P. et al. Test procedure for variable rate fertilizer on coffee. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 1992, p. 569–575, 2010.

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

MÜLLER, M. M. L.; MIGLIORANZA, E.; DE PÁDUA FONSECA, E. Produção de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cv. Mundo Novo em tubetes. **Revista Unimar**, v. 19, n. 3, p. 777-786, 1997.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **POWER Data Access Viewer**, 2020, Acesso em: 20 ago. 2020. Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>>.

NASSER, M. D. et al. Desenvolvimento pós-plantio de *Coffea arabica* L. em sacola plástica convencional, tubete e TNT. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 7, 2011, Araxá, MG. **Anais[...]**. Brasília: Embrapa Café, 2011.

NEBIKER, S. et al. A light-weight multispectral sensor for micro UAV - Opportunities for very high resolution airborne remote sensing. **The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences**. v. 37, n. B1, p.1193-1199, 2008.

NOGUEIRA, S.; MOREIRA, M. A.; VOLPATO, M. M. L. Relationship between coffee crop productivity and vegetation indexes derived from oli/landsat-8 sensor data with and without topographic correction. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 3, p. 387–394, 2018.

NOLLA, A. et al. Correção da acidez do solo em profundidade através do uso de carbonatos, silicatos e casca de arroz em lisímetros. **Cultivando Saber**, v. 3, p. 1-8. 2010.

NOVO, E. M. L. M. et al. Técnicas avançadas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo de mudanças climáticas e ao funcionamento dos ecossistemas amazônicos. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 259-272, 2005.

NORA, D. D.; AMADO, T. J. C. Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 5, p. 1393–1403, 2013.

OLIVEIRA, A. DE A. S. et al. Estrutura e dinâmica da cafeicultura em Minas Gerais. **Revista de Economia**, v. 34, n. 1, 2008.

OLIVEIRA, A. L. **Utilização de diferentes tipos de mudas visando a antecipação da primeira colheira do cafeeiro (C. arábica L.)**. 2007. 77p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

OLIVEIRA, H. C. et al. Failure Detection in Row Crops From UAV Images Using Morphological Operators. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 2018.

PADILLA, F. M. et al. Different responses of various chlorophyll meters to increasing nitrogen supply in sweet pepper. **Frontiers in plant science**, v. 9, 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.01752.

PANAGIOTIDIS, D. et al. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. **International journal of remote sensing**, v. 38, n. 8-10, p. 2392-2410, 2017.

PARROT DRONES SAS. **Parrot Sequoia - Technical Specifications**. 2018. Disponível em: <<https://www.parrot.com/business-solutions-us/parrot-professional/parrot-sequoia#technical>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

PARROT DRONES SAS. **Sequoia oficial documentation and specifications**. 2016. Disponível em: <https://www.sensefly.com/app/uploads/2018/05/Parrot_Sequoia_senseFly_Specifications_EN.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2019.

PEARSON, K. X. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 50, n. 302, p. 157-175, 1900.

PRECISIONHAWK. **Precision Flight Free - turn your drone into an advanced remote sensing tool - Features**. 2017. Disponível em: <<https://www.precisionhawk.com/precisionflight>>. Acesso em: 20 mai. 2019.

PEREIRA, F. S. **Gesso de minério associado a fontes de fósforo na cultura do milho em sistema plantio direto no estado de alagoas**. 2007. 67 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2007.

PETEK, M. R.; PATRÍCIO, F. R. A. Cultivares ou tolerantes a fatores bióticos e abióticos desfavoráveis: ponto-chave para a cafeicultura sustentável. **O Agrônomo**, Campinas, SP, v.59, n. 1, p. 39-40, jul. 2007.

PIX4D SA. **Pix4D Mapper 4.4.10**, 2019. Disponível em <<https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

PRADO, R. M.; NATALE, W. Uso da grade aradora superpesada, pesada e arado de discos na incorporação de calcário em profundidade e na produção de milho. **Engenharia Agrícola**, p. 167-176, 2004.

POORTER, H. et al. Pot size matters: a meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. **Functional Plant Biology**, v. 39, n. 11, p. 839-850, 2012.

POTGIETER, A. B. et al. Multi-spectral imaging from an unmanned aerial vehicle enables the assessment of seasonal leaf area dynamics of sorghum breeding lines. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1532, 2017.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project, 2019

QI, J.; KERR, Y.; CHEHBOUNI, A. External factor consideration in vegetation index development. **Proc. of Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing**, ISPRS, v. 723, p. 723- 730, 1994.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2009.

RAIJ, B. **Gesso na agricultura**. Campinas, Instituto Agronômico, 233 p. 2008.

RAIJ, B. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. [s.l.] Instituto Agronômico/Fundação IAC Campinas, 1997.

RAMOS, B. Z. et al. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e ph na solução de um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1018-1026, 2013.

RAMIREZ, G. M.; ZULLO JÚNIOR, J. Estimativa de parâmetros biofísicos de plantios de café a partir de imagens orbitais de alta resolução espacial. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 468-479, 2010.

REDWEIK, P. **Fotogrametria aérea**. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa. Pág, 3, 2007.

REIS JÚNIOR, R. DOS A. et al. Diagnose nutricional de cafeeiros da região sul de Minas Gerais: normas DRIS e teores foliares adequados. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 26, n. 3, 2002.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam**. Belo Horizonte: Epamig, 2000.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. **Informe Agropecuário**, v. 11, n. 126, p. 26-40, 1985.

RHEINHEIMER, D.S. et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e

incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.795-805, 2000.

RODRIGUES, L. A. et al. Growth response of coffee tree shoots and roots to subsurface liming. **Plant and Soil**, v. 234, n. 2, p. 207-214, 2001.

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote sensing of environment**, v. 55, n. 2, p. 95-107, 1996.

ROSA, V.G.C. da. **Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região Sul/Sudoeste do estado de Minas Gerais**. 2007. 142 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007

ROUSE JR, J. et al. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. 1974.

RPAV. Remote Piloted Aerial Vehicles : An Anthology. **Monash University**, 2003.

SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.11-21. 2008.

SAMÔR, O. J. M. et al. Qualidade de mudas de angico e sesbânia, produzidas em diferentes recipientes e substratos. **Revista Árvore**, v. 26, n. 2, p. 209-215, 2002.

SARTORI, L. R.; GALO, M. L. B. T.; IMAI, N. N. Mapeamento de plantas daninhas em culturas de café, a partir de imagens multiespectrais de escalas grandes usando redes Neurais Artificiais. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 61, n. 2, p.164 - 176, 2009.

SANTOS, L. M. et al. Analysis of flight parameters and georeferencing of images with different control points obtained by RPA. **Agronomy Research**, v. 17, p. 2054-2063, 2019a

SANTOS, L. M. et al. Análise de parâmetros de voos de aeronaves remotamente pilotadas na geração de ortomosaico para cafeicultura. *In*: Jorge González Aguilera; Alan Mario Zuffo. (Org.). **A Dinâmica Produtiva da Agricultura Sustentável**. 1ed. Ponta Grossa: Atena Editora, v. 1, p. 22-29, 2019b.

SANTOS, L. M. et al. Biophysical parameters of coffee crop estimated by UAV RGB images. **Precision Agriculture**, p. 1-15, 2020.

SATO, F. A. et al. Coeficiente de cultura (kc) do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no período de outono-inverno na região de Lavras-MG. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 383-391, 2007.

SCHUELLER, J. K. A review and integrating analysis of Spatially Variable Control of crop production. **Fertilizer Research**, v. 33, p. 1–34, 1992.

SERAFIM, M. E. et al. Alterações físico-químicas e movimentação de íons em Latossolo gibbsítico sob doses de gesso. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 1, p. 75-81, mar. 2012.

SERAFIM, M. E. et al. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.362-370, 2013.

SERAFIM, M. E. et al. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de

cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: estudo de caso. **Bioscience Journal**, v. 27 n. 6, 2011.

SHANAHAN, J. F. et al. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 3, p. 583-589, 2001.

SHAPIRO, S.S; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SHIRATSUCHI, L. S. et al. **Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão. Embrapa Monitoramento por Satélite-Capítulo em livro científico (ALICE)**. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

SIBANDA, M.; MUTANGA, O.; ROUGET, M. Examining the potential of Sentinel-2 MSI spectral resolution in quantifying above ground biomass across different fertilizer treatments. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 110, p. 55–65, 2015.

SILVA, E. DE B.; GUIMARÃES, P. T. G. Diagnose nutricional de cafeeiros da região do Alto Jequitinhonha (MG): normas DRIS e faixas críticas de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2009.

SILVA, R. A. et al. Sintomas de Injúrias Causadas pelo Ataque de Pragas em Cafeeiro. *In*: GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; BALIZA, D. P. **Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas**. p.107-142. UFLA, Lavras, 2010.

SILVEIRA, K. R. et al. Gypsum-saturated water to reclaim alluvial saline sodic and sodic soils. **Scientia Agrícola**, v. 65, n. 1, p. 69-76, 2008.

SIMÕES, J. C.; PELEGRINI, D. F. Diagnóstico da cafeicultura mineira – regiões tradicionais: Sul/Sudoeste de Minas, Zona da Mata, Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. n. 46, p. 56, 2010.

SPEARMAN, C. (1904). The Proof and Measurement of Association between Two Things. **The American Journal of Psychology**. v. 15, n. 1, p. 72–101. DOI: 10.2307/1412159

SOUZA, C. G. et al. Algoritmos de aprendizagem de máquina e variáveis de sensoriamento remoto para o mapeamento da cafeicultura. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 4, p. 751-773, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702016000400043>.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 416 p. 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TAUGOURDEAU, S. et al. Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: An application for coffee agroforestry. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 192, p. 19-37, 2014.

TORRADO, J. O. E.; JIMÉNEZ, J. J. C.; DÍAZ, H. P. Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. **Tecnura**, v. 20, n. 50, p. 119–140, 2016.

TOWNEND, J.; DICKINSON, A.L. A comparison of rooting environments in containers of different sizes. **Plant and Soil**, Champaign, v.175, p.179-146, 1995.

TRIMBLE. **Ecognition Developer 9.0 User Guide**. Trimble Germany GmbH: Munich, Germany, 2014.

VALLONE, H.S. et al. Diferentes recipientes e substrato na produção de mudas de cafeeiros. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, n.1, p.55-60, 2010.

VALLONE, H. S. et al. Recipientes e substratos na produção de mudas e no desenvolvimento inicial de cafeeiros após o plantio. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v. 33, n. 5, p. 1327-1335, out. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542009000500019>.

VALLONE, H. S. et al. Substituição do substrato comercial por casca de arroz carbonizada para produção de mudas de cafeeiro em tubetes na presença de polímero hidrorretentor. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 593-599, 2004.

VEGA, F. A. et al. Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. **Biosystems Engineering**, v. 132, p. 19-27, 2015.

VITTI, G. C. et al. **Uso do gesso em sistemas de produção agrícola**. Piracicaba: GAPE, 104 p. 2008.

VOLPATO, M. M. L. et al. Imagens MODIS para determinação de estiagem agrícola em área cafeeira no município de Patrocínio, MG. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 14, 2009, Natal. **Anais[...]**. São José dos Campos: INPE, 2009.

WATTS, A. C.; AMBROSIA, V. G.; HINKLEY, E. A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. **Remote Sensing**. v.4, n.6, p. 1671-92, 2012

WOOLEY, J. T. Reflectance and Transmittance of Light by Leaves. **Plant Physiology**, v. 47, n. 5, p. 656–662, 1971.

WU, J.; WANG, D.; BAUER, M. E. Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies. **Field crops research**, v. 102, n. 1, p. 33-42, 2007.