



JÉSSICA ELAINE SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE MESA PARA MEDIÇÃO DO
PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DE PULVERIZAÇÃO COM
DRONES E CALIBRAÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DA
APLICAÇÃO NA CAFEICULTURA**

**LAVRAS – MG
2024**

JÉSSICA ELAINE SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE MESA PARA MEDIÇÃO DO PERFIL DE
DISTRIBUIÇÃO DE PULVERIZAÇÃO COM DRONES E CALIBRAÇÃO PARA
OTIMIZAÇÃO DA APLICAÇÃO NA CAFEICULTURA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Prof.º Dr. Adão Felipe dos Santos
Orientador

Prof.ª Dra. Christiane Augusta Diniz Melo
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2024**

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

Silva, Jéssica Elaine.

Desenvolvimento de mesa para medição do perfil de
distribuição de pulverização com drones e calibração para
otimização da aplicação na cafeicultura / Jéssica Elaine Silva.
- 2024.

62 p.: il.

Orientador(a): Adão Felipe dos Santos.

Coorientador(a): Christiane Augusta Diniz Melo.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal
de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. *Coffea arabica*. 3.
Tecnologia de aplicação. I. Santos, Adão Felipe dos. II. Melo,
Christiane Augusta Diniz. III. Título.

JÉSSICA ELAINE SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE MESA PARA MEDIÇÃO DO PERFIL DE
DISTRIBUIÇÃO DE PULVERIZAÇÃO COM DRONES E CALIBRAÇÃO PARA
OTIMIZAÇÃO DA APLICAÇÃO NA CAFEICULTURA**

**DEVELOPMENT OF A TABLE FOR MEASURING THE SPRAY DISTRIBUTION
PROFILE WITH A DRONES AND CALIBRATION FOR APPLICATION
OPTIMIZATION IN COFFEE CULTIVATION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 16 de agosto de 2024.

Dr. Rubens José Guimarães

UFLA

Dr. Tiago de Oliveira Tavares

C3 Consultoria e Pesquisa

Prof.º Dr. Adão Felipe dos Santos
Orientador

Prof.ª Dra. Christiane Augusta Diniz Melo
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2024**

Aos meus pais, Jorge Silva e Edna Marta dos Santos Silva e ao meu irmão Jean dos Santos Silva, que são a base e a razão de tudo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida por me abençoar em todos os dias dessa caminhada, permitindo que eu tenha saúde para concluir mais essa etapa da minha vida.

Aos meus pais Jorge Silva e Edna Marta dos Santos Silva, meu irmão Jean dos Santos Silva e ao meu namorado Lucas Emidio Maia, por serem minha base e a razão de todo meu esforço. Essa conquista é dedicada a vocês, pois se meus sonhos se tornam realidade é tudo graças a vocês.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), minha casa durante os últimos seis anos, onde realizei o sonho de me tornar Agrônoma e cursar mestrado. Aos servidores do Departamento de Agricultura (DAG) que me auxiliaram durante toda essa jornada, em especial ao corpo docente do Programa de Fitotecnia, que transmitiram seus conhecimentos e agregaram muito a minha formação profissional.

Ao meu orientador Prof^o Dr. Adão Felipe dos Santos, pela oportunidade de ingressar na sua equipe, pela confiança e por todos os ensinamentos na área de Agricultura de Precisão.

À minha coorientadora Prof^a Dra. Christiane Augusta Diniz Melo, pelos ensinamentos, conselhos e por sempre me acalmar.

Ao Grupo de Extensão e Pesquisa em Agricultura Digital (GEPAD), por me acolherem e ajudarem durante todo o processo do mestrado. A amizade de vocês foi essencial!

Ao pesquisador Gladyston Carvalho pela cessão de uso da Fazenda Ouro Verde para execução da pesquisa. Ao Eduardo Menezes representante da Satis LTDA, pelo apoio à pesquisa.

Ao INCT Café por financiar os equipamentos para realização da pesquisa, à CAPES pela concessão da bolsa e às instituições FAPEMIG, CNPq, EPAMIG pelo apoio e financiamento de nossas pesquisas.

A todos que de alguma forma contribuíram com o trabalho, muito obrigada!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis” (José de Alencar)

RESUMO

Para atender a demanda mundial por cafés de qualidade e sustentáveis, novas tecnologias como drones pulverizadores estão sendo adotadas pelos cafeicultores no auxílio ao cultivo de lavouras com acesso restrito e com pouca mão de obra. Como a eficiência de aplicação depende de uma boa calibração, objetivou-se com esse trabalho identificar o padrão de distribuição de diferentes volumes de calda e alturas de voo e avaliar a eficiência de aplicação de pulverizações com volumes de calda e velocidades de voo distintas, em cafeeiros de duas idades nos terços superior, médio e inferior. No primeiro artigo, desenvolveu-se uma mesa para avaliação da distribuição volumétrica, com materiais de fácil acesso e manuseio. Os tratamentos incluíram quatro volumes de calda (8, 12, 16 e 20 L ha⁻¹) e três alturas de voo (2, 3 e 4 m), com três repetições. Avaliou-se a uniformidade da aplicação por gráficos e pelo coeficiente de variação e quantificou-se a largura de faixa. Voos a 2 metros apresentaram maior variação no centro da faixa de aplicação, enquanto voos com 3 e 4 metros mostraram distribuição mais uniforme e próxima a normalidade. Observou-se relação diretamente proporcional entre volume de calda e largura da faixa aplicada. A maior uniformidade na aplicação foi obtida com 8 L ha⁻¹, independente da altura utilizada. O sistema de baixo custo desenvolvido mostrou-se eficiente, indicando que a altura de voo e volume de calda têm influência significativa no padrão de distribuição da pulverização por drones. A melhor uniformidade de aplicação foi observada com 3 metros e 8 L ha⁻¹. O segundo estudo foi conduzido em lavouras de café de 2,5 e 6,5 anos. Os tratamentos consistiram em quatro volumes de calda (8, 12, 16 e 20 L ha⁻¹) e duas velocidades de voo (12 e 15 km h⁻¹), com três repetições. Foram distribuídos papeis hidrossensíveis nos diferentes terços das plantas. A leitura foi realizada pelo DropScope, fornecendo dados de DMV, DMN, amplitude relativa, Dv 0,9 e Dv 0,1. Na análise foram considerados como fatores o volume de calda, velocidade de voo e posição dos papeis. Houve diferença na eficiência de aplicação nos cafeeiros de diferentes idades. Enquanto no cafeeiro mais novo a posição do papel na planta apresentou pouca diferença, no mais velho observou-se maior tamanho de gota no terço superior. No geral, para a lavoura de 2,5 anos as pulverizações com 15 km h⁻¹ apresentaram tamanho de gotas que indicam boa penetração da pulverização, demonstrando o potencial de utilizar velocidades de voo maiores em lavouras mais novas. Já na lavoura de 6,5 anos, as pulverizações com 12 km h⁻¹ resultaram em gotas mais finas, indicando melhor cobertura de aplicação em velocidades de voo menores. Portanto, é importante calibrar o drone pulverizador de acordo com a idade da planta, considerando que diferentes volumes de calda e velocidade de voo influenciam na distribuição e penetração da aplicação.

Palavras-chave: agricultura de precisão; *Coffea arabica*; tecnologia de aplicação.

ABSTRACT

To meet the global demand for high-quality and sustainable coffee, new technologies such as spraying drones are being adopted by coffee growers to assist in cultivation of crop with restricted access with limited labor. Since application efficiency depends on proper calibration, this work aimed to identify the distribution pattern of different spray volumes and flight heights and to evaluate the application efficiency of sprays with different volumes and flight speeds in coffee trees of two different ages in the upper, middle, and lower thirds. In the first study, a table was developed for evaluating volumetric distribution, using materials that are easily accessible and manageable. The treatments included four spray volumes (8, 12, 16, and 20 L ha⁻¹) and three flight heights (2, 3, and 4 m), with three repetitions. The application uniformity was evaluated through graphs and the coefficient of variation, and the swath width was quantified. Flights at 2 meters showed greater variation in the center of the application swath, while flights at 3 and 4 meters showed a more uniform distribution closer to normality. A direct relationship was observed between the spray volume and the applied swath width. The highest application uniformity was obtained with 8 L ha⁻¹, regardless of the height used. The low-cost system developed proved efficient, indicating that flight height and spray volume significantly influence the spray distribution pattern by drones. The best application uniformity was observed with a 3-meter height and 8 L ha⁻¹. The second study was conducted in 2.5- and 6.5-year-old coffee plantations. The treatments consisted of four spray volumes (8, 12, 16, and 20 L ha⁻¹) and two flight speeds (12 and 15 km h⁻¹), with three repetitions. Hydrosensitive papers were distributed in different thirds of the plants. The reading was performed by DropScope, providing data on DMV, DMN, relative amplitude, Dv 0.9, and Dv 0.1. In the analysis, spray volume, flight speed, and paper position were considered factors. There was a difference in application efficiency in coffee trees of different ages. While in the younger coffee plantation the paper position on the plant showed little difference, in the older one, a larger droplet size was observed in the upper third. Overall, in the 2.5-year-old plantation, spraying at 15 km h⁻¹ produced droplet sizes indicative of good spray penetration, demonstrating the potential for using higher flight speeds in younger plantations. In contrast, in the 6.5-year-old plantation, spraying at 12 km h⁻¹ resulted in finer droplets, indicating better coverage at lower flight speeds. Therefore, it is important to calibrate the spraying drone according to the plant age, considering that different spray volumes and flight speeds influence the application distribution and penetration.

Keywords: precision agriculture; *Coffea arabica*; application technology.

INDICADORES DE IMPACTO

O estudo visou aprimorar as técnicas de pulverização por drones na cafeicultura e trazer embasamento técnico-científico para escolha de parâmetros operacionais como altura de voo, volume de calda e velocidade de voo nessas operações. A difusão da tecnologia foi feita por meio de produção de artigos científicos, participação em dias de campo e demais eventos voltados para cultura do café com participação de empresas, profissionais da área e produtores. Dentre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), o estudo integra os objetivos 2 “Fome zero e agricultura sustentável”, 8 “Trabalho decente e crescimento econômico” e o 12 “Consumo e produção responsáveis”, visto que o bom uso dessa inovação tecnológica auxilia no aumento da produtividade de cultivos importantes para países em desenvolvimento, de alto valor agregado, que tem uso intensivo de mão de obra. Com isso, possibilita o fortalecimento da capacidade científica-tecnológica de países em desenvolvimento, permitindo atingir padrões de produção e consumo mais sustentáveis. Entre as áreas temáticas da Política Nacional de Extensão, o trabalho impacta na comunicação (1) da universidade com os produtores rurais e prestadores de serviços na área de novas tecnologias para produção agrícola (7) e é base para outros estudos que possam aperfeiçoar o uso dessa tecnologia na cafeicultura, permitindo sua utilização em um âmbito maior e de forma mais eficiente.

IMPACT INDICATORS

The study aimed to enhance drone spraying techniques in coffee farming and provide technical-scientific basis for selecting operational parameters such as flight height, spray volume, and speed. The technology's dissemination occurred through scientific article production, participation in field days, and other coffee-focused events involving companies, industry professionals, and farmers. The study aligns with three of the 17 United Nations (UN) Sustainable Development Goals (SDGs): Goal 2 "Zero Hunger and Sustainable Agriculture," Goal 8 "Decent Work and Economic Growth," and Goal 12 "Responsible Consumption and Production." This is because the effective use of this technological innovation helps to increase the productivity of important crops for developing countries, which have high added value and intensive labor use. Consequently, it strengthens the scientific and technological capacity of developing countries, enabling them to achieve more sustainable production and consumption patterns. Within the thematic areas of the National Extension Policy, the work impacts university communication (1) with rural producers and service providers in the field of new agricultural production technologies (7). It also serves as a foundation for further studies aiming

to enhance the use of this technology in coffee farming, enabling its broader and more efficient implementation.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

- Figura 1 – Ilustração do sistema de avaliação da distribuição volumétrica de pulverizações por drone, visto superior (A) e vista lateral com os respectivos espaçamentos, alturas e angulação de cada uma das estruturas (B).....29
- Figura 2 – Sistema de avaliação da distribuição volumétrica de pulverizações feitas por drones, constituído por 31 canaletas de fibra de vidro.....30
- Figura 3 – Perfis de distribuição de pulverizações por drone com diferentes volumes de calda (8, 12, 16 e 20 L ha⁻¹), realizadas a 2 m (A), 3 m (B) e 4 m (C) de altura do sistema de avaliação de baixo custo33
- Figura 4 – Coeficiente de variação (CV%) do volume distribuído por pulverizações com drones com diferentes alturas de voo e volumes de calda no sistema de baixo custo.....37

ARTIGO 2

- Figura 1 – Disposição dos papéis hidrossensíveis na planta de café sendo a primeira letra representante do terço (S – superior, M – médio e I – inferior), a segunda o face da planta voltada para entrelinha (E – esquerdo e D – direito) e a terceira a posição (E – externo e I – interno).....48
- Figura 2 – Disposição dos tratamentos e pontos de amostragem na lavoura de café.....49
- Figura 3 – Diâmetro da mediana volumétrica (DMV) (μm) (A), diâmetro da mediana numérica (DMN) (μm) (B), Amplitude Relativa (C) e Dv 0,9 (μm) (D) de pulverizações com drone com diferentes volumes de calda (L ha⁻¹) e velocidades de voo (km h⁻¹) em cafeeiros de 6,5 anos....55
- Figura 4 – Papéis hidrossensíveis no terço superior, médio e inferior lidos do tratamento com 20 L ha⁻¹ e 12 km h⁻¹ no café de 6,5 anos.....56

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

- Tabela 1 – Vazão (L min⁻¹) e número de bicos utilizados em cada tratamento.....31
- Tabela 2 – Largura de faixa de pulverizações por drones com diferentes volumes de calda e alturas de voo.....35
- Tabela 3 – Custo de produção do sistema de baixo custo para avaliação da distribuição volumétrica de pulverizações com drones.....38
- Tabela 4 – Pontos relevantes que devem ser considerados na construção da mesa de calibração volumétrica para drones de baixo custo.....39

ARTIGO 2

Tabela 1 – Características do drone pulverizador modelo DJI AGRAS T10.....	46
Tabela 2 – Parâmetros operacionais dos tratamentos.....	47
Tabela 3 – Distribuição dos tratamentos experimentais na lavoura.....	49
Tabela 4 – Efeitos do volume de calda ($L ha^{-1}$) sobre as variáveis DMV, DMN, amplitude relativa, Dv 0,9 e Dv 0,1 em cafeeiros de 2,5 anos.....	51
Tabela 5 – Efeitos da velocidade de voo ($km h^{-1}$) sobre as variáveis DMV, DMN, amplitude relativa, Dv 0,9 e Dv 0,1 em cafeeiros de 2,5 anos.....	52
Tabela 6 – Efeitos da posição dos papéis hidrossensíveis na planta sobre as variáveis DMV, DMN, amplitude relativa, Dv 0,9 e Dv 0,1 em cafeeiros de 2,5 anos e 6,5 anos.....	53
Tabela 7 – Efeitos da relação do volume de calda ($L ha^{-1}$), velocidade de voo ($km h^{-1}$) e posição dos papéis hidrossensíveis na planta sobre a variável Dv 0,1 (μm) em cafeeiros de 6,5 anos.....	57

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	16
1	INTRODUÇÃO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Panorama da Cafeicultura	17
2.2	Tecnologia de Aplicação	19
2.3	Agricultura de Precisão	20
	REFERÊNCIAS	22
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	26
	ARTIGO 1 – DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO VOLUMÉTRICA DE PULVERIZAÇÃO COM DRONES	26
1	INTRODUÇÃO	28
2	MATERIAL E MÉTODOS	29
2.1	Desenvolvimento da mesa de avaliação da distribuição volumétrica	29
2.2	Especificações do equipamento de teste	30
2.3	Avaliação da distribuição volumétrica	30
2.4	Monitoramento ambiental	31
2.5	Análise dos dados	32
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
3.1	Custo aproximado para construção da mesa de distribuição volumétrica	37
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
5	CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS	40
	ARTIGO 2 – IMPACTO DO VOLUME DE CALDA E VELOCIDADE DE VOO NA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DE PULVERIZAÇÕES POR DRONES EM LAVOURAS DE CAFÉ DE DIFERENTES IDADES	42
1	INTRODUÇÃO	44
2	MATERIAL E MÉTODOS	45
2.1	Equipamento	46
2.2	Parâmetros operacionais	46
2.3	Disposição dos pontos de amostragem	47
2.4	Monitoramento ambiental	50
2.5	Análise dos papéis hidrossensíveis	50
2.6	Análises estatística	50
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS	58

TERCEIRA PARTE.....	61
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo, sendo que sua representatividade com relação a essa *commodity* se dá pela supremacia do estado de Minas Gerais na produção da cultura (CONAB, 2024). Dentre as principais regiões de produção cafeeira do estado está o Sul de Minas, uma região de relevo heterogêneo, onde o cultivo prevalece em áreas montanhosas (Alves; Lidner, 2020). Embora essas condições geográficas favoreçam a produção de cafés de qualidade, a declividade dificulta a execução de muitas etapas do manejo de forma mecanizada.

A mecanização da agricultura viabilizou a produção em larga escala, com isso teve-se ganhos em produtividade e rendimento dos cultivos. No entanto, as máquinas/equipamentos agrícolas não se adaptam a todas as condições de relevo, o que trouxe dificuldades para algumas regiões brasileiras, especialmente para a cafeicultura de montanha. Com a falta de mão de obra cada vez mais evidente, algumas fases do manejo são prejudicadas, o que tem motivado os cafeicultores a buscarem novas tecnologias adaptadas a condições mais declivosas (Moreira *et al.*, 2019), a exemplo do uso de drones pulverizadores (Soela *et al.*, 2020).

Embora esses equipamentos estejam em alta na agricultura, para algumas culturas como o café, até o momento existem poucos estudos comprovando sua eficiência na aplicação dos produtos foliares (Vitória *et al.*, 2023; Crause *et al.*, 2023). Visto que a qualidade de uma pulverização está diretamente relacionada com a cobertura de aplicação, torna-se importante para a cafeicultura a adequação das técnicas e componentes da tecnologia de aplicação para garantir uma produção mais eficiente e sustentável (Soela *et al.*, 2021).

Assim como em outros cultivos, nota-se um movimento da cadeia produtiva do café em adotar boas práticas de manejo para tornar a produção mais sustentável (Zampiroli *et al.*, 2021). Com isso, as etapas do manejo estão sendo melhoradas para evitar contaminação ambiental, ser socialmente justa e aumentar a rentabilidade do produtor. Nesse propósito, as técnicas e ferramentas da agricultura de precisão podem auxiliar os produtores (Lindblom *et al.*, 2017).

A agricultura de precisão visa o manejo da variabilidade espacial e temporal dos fatores que determinam o rendimento das culturas. Para isso, são aprimoradas as técnicas de manejo com o objetivo de alcançar a maior eficiência produtiva e retorno econômico (Lindblom *et al.*, 2017). A cafeicultura de precisão é uma tendência do mercado, no entanto, suas técnicas devem

ser mais exploradas e posicionadas nas diferentes regiões produtoras, e dentre as tecnologias disponíveis, os drones estão em destaque na busca pelos cafeicultores (Santana *et al.*, 2022).

Os drones, popularmente conhecidos, são aeronaves remotamente pilotadas (ARP's) que, acoplados com diferentes sensores, exercem diversas funções na agricultura como monitoramento, detecção de pragas, doenças e plantas daninhas, estimativa de produção e aplicações de produtos (Rahman *et al.*, 2021). Para a cafeicultura os drones pulverizadores são usados para auxiliar na aplicação de inseticidas, fungicidas e produtos nutricionais, principalmente em áreas montanhosas, onde as opções de manejo ficam restritas ao terraceamento, prática onerosa ou ao uso de equipamentos portáteis.

Estudos recentes buscam determinar alguns parâmetros operacionais da pulverização por drones no café, como a melhor altura de voo e posição do alvo em cafés de montanha (Souza *et al.*, 2022); a eficiência de deposição de gotas e eficácia de controle das principais doenças (Vitória *et al.*, 2023) e a qualidade da deposição de gotas nas folhas e perdas no solo, em diferentes alturas de voo e genótipos de *Coffea canephora* (Vitória *et al.*, 2022). No entanto, a pulverização por drones envolve muitas variáveis, o que demanda e justifica a realização de muitos outros trabalhos.

Com isso, torna-se essencial o estudo de outros parâmetros de aplicação dos drones pulverizadores, como volume de calda, velocidade de voo, altura e idade das plantas, visando sempre a eficiência na aplicação, no operacional e na eficácia do tratamento. Diante disso, objetivou-se avaliar a distribuição da aplicação de pulverizações com drone com diferentes volumes de calda, altura e velocidade de voo e idade de plantas e propor recomendações para otimizar a utilização de drones na cafeicultura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Panorama da Cafeicultura

A cafeicultura tem um papel fundamental na história e economia brasileira. Por anos essa cultura dominou a agricultura nacional, fazendo com que o Brasil se tornasse referência na produção e exportação dessa *commodity* (Barbosa; Aguilar; Maciel, 2021). Atualmente, cerca de 2,25 milhões de hectares do território brasileiro destinam-se à produção de café, sendo que 79,8% dessa área é cultivada com a espécie *Coffea arabica* e o restante com *Coffea canephora* (CONAB, 2024).

Com produtividade média total de 30,9 sacas ha⁻¹, estima-se para a safra 2023/2024, considerada de bienalidade alta, uma produção total de 58,81 milhões de sacas de café beneficiadas. Tais valores propiciam ao Brasil o título de maior produtor e exportador de café do mundo. Dentre os estados produtores, destaca-se Minas Gerais, com 58% da área cultivada sendo responsável por mais de 51,3% da produção nacional (CONAB, 2024). As principais regiões de produção do estado são Sul de Minas, Cerrado Mineiro, Matas de Minas, Chapada de Minas e Mantiqueira de Minas, diferenciadas por suas características geográficas (BSCA, 2024).

Considerada a principal região de produção de café arábica do país, o Sul de Minas Gerais apresenta um relevo heterogêneo, no qual lavouras de café são implantadas em áreas montanhosas (Alves; Lidner, 2020). A cafeicultura de montanha é reconhecida pela produção de cafés com qualidade superior de bebida, devido às altitudes elevadas e temperaturas amenas (Zaidan *et al.*, 2017). No entanto, suas características geográficas dificultam a mecanização de diversas etapas do manejo da cultura, pois limitam a utilização de algumas tecnologias que podem favorecer o aumento da produtividade e sustentabilidade do cultivo, além de reduzirem os custos de produção (Guaraldo; Oliveira; Coleti, 2018).

Até o momento, a dependência por mão de obra é um gargalo da cafeicultura, ou seja, a escassez desse recurso somada ao alto custo do serviço, motiva os produtores a buscarem tecnologias adaptadas a regiões declivosas, que permitam explorar o máximo potencial produtivo da lavoura e eficiência operacional (Moreira *et al.*, 2019). Na colheita, etapa mais onerosa da produção, rapidamente foram difundidos equipamentos que permitem a derriça do café e adaptações no deslocamento das colhedoras para contemplar áreas com diferentes declividades de forma mais econômica (Junior *et al.*, 2016; Santinato *et al.*, 2016). Nas demais etapas do manejo, como a aplicação de produtos foliares para o controle de pragas, doenças e nutrição, os cafeicultores carecem de novas tecnologias para a execução das tarefas e informações sobre como posicioná-las (Neto *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2022).

A pulverização na cafeicultura é realizada tradicionalmente com pulverizadores hidropneumáticos, contudo sua utilização pode ser limitada pelas condições do relevo (Neto *et al.*, 2016). Com os avanços tecnológicos, a agricultura ganhou uma nova opção para essa operação, a exemplo do uso de drones pulverizadores (Soela *et al.*, 2020). Esse equipamento permite aplicações localizadas (Khan *et al.*, 2021) com redução de problemas com deriva (Wang *et al.*, 2020), o que torna possível aplicações com menores danos ao ambiente e a saúde do trabalhador (Rahman *et al.*, 2021).

Em razão da arquitetura, tamanho e densidade da copa do cafeeiro, as pulverizações na cultura têm grandes desafios com relação à penetração da calda na planta (Sasaki *et al.*, 2015). Como a eficácia dos produtos está diretamente relacionada com a cobertura de aplicação, torna-se importante para a cafeicultura a adequação das técnicas e componentes da tecnologia de aplicação (Soela *et al.*, 2021).

2.2 Tecnologia de Aplicação

A tecnologia de aplicação relaciona uma diversidade de fatores que interferem na deposição de um produto biologicamente ativo no alvo de interesse, com o mínimo de contaminação de outras áreas, visando uma aplicação eficiente e econômica (Melo *et al.*, 2019). Dentre os fatores, é importante atentar-se às condições ambientais, pois são primordiais para o sucesso da aplicação. De modo geral, para pulverizadores terrestres, recomenda-se temperaturas menores que 30 °C, ventos com no máximo 10 km h⁻¹ e umidade em torno de 50%, porém podem existir variações de acordo com o produto utilizado (Rodrigues; Almeida; Duarte, 2019).

Além de condições ambientais favoráveis, para se atingir os objetivos de uma pulverização de qualidade, existem alguns parâmetros que podem ser regulados e calibrados para garantir o propósito do manejo. De acordo com o pulverizador utilizado, podem ser feitos ajustes na velocidade de deslocamento, vazão, pressão e tipo de ponta, com isso consegue-se alterar outros parâmetros como volume de calda, faixa de aplicação e tamanho de gotas, a fim de atingir uma boa cobertura do dossel, minimizando a ocorrência de derivas (Appah *et al.*, 2019).

Tradicionalmente na cafeicultura são feitas pulverizações com grande volume de calda, no entanto, nota-se um movimento da cadeia produtiva em adotar boas práticas de manejo para tornar a produção mais sustentável (Zampiroli *et al.*, 2021). Nesse sentido, muitos estudos estão sendo realizados com intuito de reduzir o volume de calda, mantendo a eficiência de aplicação e eficácia de controle, com melhor capacidade operacional, menores custos e riscos ao ambiente (Junior *et al.*, 2015; Santinato *et al.*, 2017; Zampiroli *et al.*, 2020).

Para pulverizações com baixo volume de calda, preferencialmente são utilizados produtos com formulações em óleo e adjuvantes para diminuir a evaporação das gotas, visto que para essa situação busca-se gotas muito finas (Lasmar *et al.*, 2014). Por meio da seleção do tipo de ponta e pressão de trabalho, consegue-se alterar o tamanho das gotas e a cobertura de

aplicação (Palma *et al.*, 2021). Em geral, gotas muito finas resultam em uma melhor cobertura, porém tem maior potencial de ocasionar deriva (Bueno; Cunha; Santana, 2017).

No manejo do cafeeiro é comum a utilização de pontas do tipo cone vazio com produção de gotas finas para aplicação de fungicidas, inseticidas e nutrição foliar (Alvarenga *et al.*, 2022). Essas pontas tendem a fornecer uma boa cobertura, alta densidade de gotas e alto grau de penetração da calda de pulverização (Tripathi; D'souza; Tripathi, 2020). Para conhecer essas informações sobre a aplicação, são posicionados papeis hidrossensíveis na lavoura, que permitem quantificar os aspectos da pulverização por meio de softwares (Witton *et al.*, 2018).

Com a leitura dos papeis hidrossensíveis, são fornecidos alguns parâmetros para avaliar a qualidade da pulverização, como diâmetro da mediana volumétrica (DMV), diâmetro da mediana numérica (DMN), densidade de gotas, coeficiente de variação (CV) (Massola *et al.*, 2018), $dv_{0,9}$, $dv_{0,1}$ e amplitude relativa que caracterizam a uniformidade das gotas (Baesso *et al.*, 2014). Conhecendo esses parâmetros, consegue-se aprimorar a aplicação de produtos foliares em busca de qualidade e segurança no manejo da lavoura (Massola *et al.*, 2018).

Nesse sentido, o mercado de pulverização tem sido ampliado com o uso de novos equipamentos, como drones pulverizadores (Vitória *et al.*, 2023). Portanto, conhecer o posicionamento dos parâmetros operacionais dessa tecnologia é importante para validar seu uso na agricultura, de forma que motive o produtor a empregar rotineiramente a agricultura de precisão (Sirvastava; Pandey; Sharma, 2020).

2.3 Agricultura de Precisão

Preocupada com a crescente população mundial, a Organização das Nações Unidas (ONU) criou a Agenda 2030, na qual são estabelecidos 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável. Dentre esses objetivos, o de número 2 visa erradicar a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável (United Nations, 2024). Para que essas metas sejam cumpridas, os agricultores contam com técnicas e ferramentas da agricultura de precisão, que contribuem para maior eficiência agrícola (Lindblom *et al.*, 2017).

Na cafeicultura, as técnicas da agricultura de precisão ainda precisam ser aprimoradas e implantadas nas diferentes regiões produtoras, portanto existe um esforço de pesquisadores em desenvolver a chamada cafeicultura de precisão (Santana *et al.*, 2022). Baseada no uso de técnicas e tecnologias que possibilitam trabalhar a variabilidade espacial e temporal da lavoura, a cafeicultura de precisão visa maximizar a rentabilidade da propriedade e melhorar a eficiência das etapas de colheita, adubações e pulverizações. Dessa forma, estima-se um rendimento

elevado da produção e melhor qualidade de bebida, sem causar grandes impactos ambientais (Ferraz *et al.*, 2012).

Uma das ferramentas utilizadas para atingir os objetivos da agricultura de precisão na cultura do café são os drones (Santana *et al.*, 2022). Dentre suas funcionalidades, os drones equipados com sensores otimizam o monitoramento das culturas, detecção de plantas daninhas, estimativa de produção e permitem a aplicação de produtos foliares (Rahman *et al.*, 2021). Para a cafeicultura brasileira, que é produzida majoritariamente em montanhas, os drones pulverizadores são uma alternativa viável para garantir o manejo de pragas e doenças em áreas de difícil acesso para máquinas/equipamentos agrícolas (Vitória *et al.*, 2023).

No Brasil, atualmente, encontram-se registrados mais de 157 mil drones, dessa frota cerca de 5,4 mil são usados para atividades agrícolas, como pulverização (ANAC, 2024). Com a tendência de multiplicar a quantidade desses equipamentos nos próximos anos, muitos estudos vêm testando os parâmetros operacionais dos drones pulverizadores quanto a tecnologia de aplicação e sua eficácia no manejo de diferentes culturas como cana-de-açúcar (Zhang *et al.*, 2020), arroz (Chen *et al.*, 2020), citros (Meng *et al.*, 2022), maçã (Wang *et al.*, 2022) e café (Vitória *et al.*, 2023).

A qualidade de uma aplicação aérea realizada por drones depende de alguns fatores como altura e velocidade de voo, faixa de aplicação, volume de calda, tipo de ponta e propriedades da calda (Martin; Woldt; Latheef, 2019; Cunha *et al.*, 2021). Além disso, o movimento das hélices pode influenciar na dispersão, deposição e evaporação das gotas pulverizadas (Souza *et al.*, 2022). O deslocamento do ar movimentando as folhas do dossel, beneficiando a penetração das gotas. Esse processo está associado à altura de voo, ou seja, quanto mais próximo da planta, maior a chance de escoamento de produto no solo. Já no caso de voos com alturas elevadas, perde-se a força de movimentação das plantas e reduz a penetração da calda pulverizada, podendo aumentar os riscos de evaporação das gotas e ocorrência de deriva (Vitória *et al.*, 2022).

Pesquisas recentes na cafeicultura buscam compreender a relação da altura de voo com a cobertura de aplicação, associada a variáveis como a arquitetura da planta e diferentes genótipos (Soela *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2022; Vitória *et al.*, 2022; Crause *et al.*, 2023). Semelhante aos outros cultivos, deve-se explorar as demais características de uma aplicação com drones, como baixo volume (Arakawa; Kamio, 2023), vazão (Meng *et al.*, 2020), velocidade, direção de voo (Qi *et al.*, 2023) e faixa de aplicação. E assim levar a agricultura de precisão para a cafeicultura, permitindo aplicações localizadas (Khan *et al.*, 2021) e em taxa variada (Sun; Qiu, 2022), com garantias de eficiência e eficácia de tratamento.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, C.B. de *et al.* Effect of air blast sprayer application speed on the dye retention of coffee leaves. **Revista Ceres**, v. 69, n. 6, p. 633-638, 2022.
- ALVES, F.D.; LIDNER, M. Agronegócio do Café no Sul de Minas Gerais: territorialização, mundialização e contradições. **Okara: Geografia em debate**, v. 14, n. 2, p. 433-451, 2020.
- ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Drones**. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/aceso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/aeronaves/drones-cadastrados/painel-de-drones-cadastrados>. Acesso em: 31 de julho, 2024.
- APPAH, S. *et al.* Review of electrostatic system parameters, charged droplets characteristics and substrate impact behavior from pesticides spraying. **International Journal Agricultural & Biological Engineering**, v. 12, n. 2, p. 1–9, 2019.
- ARAKAWA, T.; KAMIO, S. Efficacy of UAV-Based Ultra-Low-Volume Application of Pesticide in Chestnut Orchards. **Plants**, v. 12, n. 14, p. 2597, 2023.
- BAESSO, M.M. *et al.* Tecnologias de aplicação de agrotóxicos. **Revista Ceres**, v. 61, p.780-785, 2014.
- BARBOSA, L.O.S.; AGUILAR, C.; MACIEL, L. A participação de Minas Gerais e do Brasil na cadeia produtiva global do café. **Economia & Região**, v. 9, n. 1, p.147-166, 2021.
- BSCA - BRAZILIAN SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION. **Regiões**. Disponível em: <https://brazilcoffeenation.com.br/region/list>. Acesso em: 19 de fevereiro, 2024.
- BUENO, M.R; CUNHA, J.P.A.R.; SANTANA, D.G. Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops. **Biosystems Engineering**, v. 154, n. 1, p. 35-45, 2017.
- CHEN, P. *et al.* Droplet deposition and control of planthoppers of different nozzles in two-stage rice with a quadrotor unmanned aerial vehicle. **Agronomy**, v. 10, n. 2, p. 303, 2020.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café**, Brasília, v. 11, n. 2, Safra 2024.
- CRAUSE, D.H. *et al.* Droplet Deposition of Leaf Fertilizers Applied by an Unmanned Aerial Vehicle in *Coffea Canephora* Plants. **Agronomy**, v. 13, n. 6, p. 1506, 2023.
- CUNHA, J.P.C. *et al.* Use of remotely piloted aircrafts for the application of plant protection products. **Engenharia Agrícola**, v. 41, n. 2, p. 245-254, 2021.
- FERRAZ, G.A.E.S. *et al.* Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 140-150, 2012.

- GUARALDO, M.M.S.; OLIVEIRA, A.L.R.; COLETI, J.C. Entraves e potencialidades do café de montanha: alternativas de agregação de valor. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 1, p. 270- 278, 2018.
- JUNIOR, L.G.F. *et al.* Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastas derriçadoras. **Ciência Rural**, v. 46, n. 2, p. 273, 2016.
- JUNIOR, S.T.D. *et al.* Reducing spray volume for the control of *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae) in coffee plants. **Coffee Science**, v. 10, n. 4, p. 491-498, 2015.
- KHAN, S. *et al.* Real-time recognition of spraying area for UAV sprayers using a deep learning approach. **PLOS ONE**, v. 16, p. 1-17, 2021.
- LASMAR, O. *et al.* Droplet size of pneumatic spraying nozzles used for the control of coffee pests. **Aspects of Applied Biology**, v. 122, p. 441-444, 2014.
- LINDBLOM, J. *et al.* Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. **Precision Agric**, v. 18, p. 309–331, 2017.
- MARTIN, D.E.; WOLDT, W.E.; LATHEEF, M.A. Effect of Application Height and Ground Speed on Spray Pattern and Droplet Spectra from Remotely Piloted Aerial Application Systems. **Drones**, v. 3, n. 4, p. 83, 2019.
- MASSOLA, M.P. *et al.* Spray volume distribution pattern and droplet size spectrum from ceramic nozzles. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 11, p. 804-809, 2018.
- MELO, T.L. *et al.* Management of coffee leaf miner: spray volume, efficacy of Cartap Hydrochloride and impact on parasitismo. **Coffee Science**, v. 14, n. 2, p. 250-260, 2019.
- MENG, Y. *et al.* Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: Effects of operational parameters on droplet distribution. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, p. 105282, 2020.
- MENG, Y. *et al.* UAV spraying on citrus crop: Impact of tank-mix adjuvant on the contact angle and droplet distribution. **PeerJ**, v. 10, p. e13064, 2022.
- MOREIRA, P.C. *et al.* Produtividade e economia de fatores de produção na cafeicultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 6-21, 2019.
- NETO, J.G. *et al.* Deposição de calda promovida por pulverizadores empregados na cafeicultura de montanha. **Coffee Science**, v. 11, n. 2, p. 267 - 275, 2016.
- PALMA, R.P. *et al.* Multivariate analysis applied to spray deposition in ground application of phytosanitary products in coffee plants. **Engenharia Agrícola**, v. 41, n. 4, p. 458- 467, 2021.

- QI, P. *et al.* Effect of Operational Parameters of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on Droplet Deposition in Trellised Pear Orchard. **Drones**, v. 7, n. 1, p. 57, 2023.
- RAHMAN, M.F.F. *et al.* A comparative study on application of unmaanned aerial vehicle systems in agriculture. **Agriculture**, v. 11, p. 1-26, 2021.
- RODRIGUES, A.A.F; ALMEIDA, G.R.R.; DUARTE, T.R. Tecnologias de aplicação de defensivos agrícolas na cultura do cafeeiro. **Revista Agroveterinária do Sul de Minas**, v. 1, n. 1, p. 77-90, 2019.
- SANTANA, L.S. *et al.* Precision coffee growing: A review. **Coffee Science**, v. 17, p. e172007, 2022.
- SANTINATO, F. *et al.* Influence of spray volumes, nozzle types and adjuvants on the control of Phoma coffee rust. **Coffee Science**, v. 12, n. 4, p. 444 - 450, 2017.
- SANTINATO, F. *et al.* Mechanical harvesting of coffee in high slope. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 3, p. 685-691, 2016.
- SASAKI, R.S. *et al.* Adjuvantes nas propriedades físicas da calda, espectro e eficiência de eletrificação das gotas utilizando a pulverização eletrostática. **Ciência Rural**, v. 45, n. 2, p. 274-279, 2015.
- SIRVASTAVA, K.; PANDEY, J.K.; SHARMA, J.K. An Approach for Route Optimization in Applications of Precision Agriculture Using UAVs. **Drones**, v. 4, n. 3, p. 58, 2020.
- SOELA, D.M. *et al.* Controle estatístico de processo em pulverização usando veículo aéreo não tripulado na cultura do café conilon. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 6, n. 4, p. 52-63, 2020.
- SOELA, D.M. *et al.* Efeito de diferentes pontas e pressões de pulverização na aplicação de carbonato de cálcio em mudas de café conilon. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 7, n. 5, p. 93-102, 2021.
- SOUZA, F.G. *et al.* Impact of sprayer drone flight height on droplet spectrum in mountainous coffee plantation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 12, p. 901-906, 2022.
- SUN, C.; QIU, W. Feedback regulation system for spraying parameters based on online droplet mass deposit measurements. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 15, n. 2, p. 25-29, 2022.
- TRIPATHI, H.; D'SOUZA, P.M.; TRIPATHI, A. Spray droplet characteristics of agricultural hollow cone nozzles. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 9, n. 2, p. 1801-1805, 2020.

UNITED NATIONS. **Department of Economic and Social Affairs – Sustainable Development**. Disponível em: <https://sdgs.un.org/>. Acesso em: 20 de fevereiro, 2024.

VITÓRIA, E.L. da *et al.* Effect of flight operative height and genotypes on conilon coffee spraying using an unmanned aerial vehicle. **Coffee Science**, v. 17, p. e172003, 2022.

VITÓRIA, E.L. da *et al.* Efficiency of Fungicide Application an Using an Unmanned Aerial Vehicle and Pneumatic Sprayer for Control of *Hemileia vastatrix* and *Cercospora coffeicola* in Mountain Coffee Crops. **Agronomy**, v. 13, n. 2, p. 340, 2023.

WANG, C. *et al.* Spray drift characteristics test of unmanned aerial vehicle spray unit under wind tunel conditions. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 13, p. 13-21, 2020.

WANG, C. *et al.* Spray performance evaluation of a six-rotor unmanned aerial vehicle sprayer for pesticide application using an orchard operation mode in apple orchards. **Pest Management Science**, v. 78, n. 6, p. 2449–2466, 2022.

WITTON, J.T. *et al.* Quantifying pesticide deposits and spray patterns at micro-scales on apple (*Malus domestica*) leaves with a view to arthropod exposure. **Pest Management Science**, v. 74, n. 12, p. 2884-2893, 2018.

ZAIDAN, U. R. *et al.* Ambiente e variedades influenciam na qualidade de cafés das Matas de Minas. **Coffee Science**, v. 12, n. 2, p. 240-247, 2017.

ZAMPIROLI, R. *et al.* Effectiveness of coffee leaf miner control associated with spray deposition in coffee leaves. **Revista Ceres**, v. 67, n. 5, p. 395-401, 2020.

ZAMPIROLI, R. *et al.* Spray technology for deposition of droplets on coffee leaves and fruits. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, p. e66806, 2021.

ZHANG, X.Q. *et al.* Effects of Spray Parameters of Drone on the Droplet Deposition in Sugarcane Canopy. **Sugar Tech**, v. 22, p. 583–588, 2020.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1 – DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO VOLUMÉTRICA DE PULVERIZAÇÃO COM DRONES

RESUMO

Os drones pulverizadores tem ganhado destaque na agricultura como uma tecnologia promissora para a proteção de cultivos. Para garantir a eficácia de controle utilizando esse equipamento é importante conhecer a relação de seus parâmetros operacionais com a uniformidade de aplicação. Portanto, objetivou-se com este estudo desenvolver e validar um sistema de baixo custo para avaliar o padrão de distribuição de pulverizações com drone, considerando diferentes volumes de calda e alturas de voo. O trabalho foi realizado na Universidade Federal de Lavras (UFLA), onde foi desenvolvida uma mesa para avaliação da distribuição volumétrica, utilizando materiais de fácil acesso e manuseio. O sistema possuía dimensões de 5,30 x 4,05 metros, constituído por 31 canaletas de fibra de vidro sobre uma base inclinada feita com madeira. Em cada canaleta foram colocados copos de vidros para coleta da calda pulverizada, que posteriormente foi medida por provetas graduadas. Para isso, foram realizadas pulverizações estacionárias por 3 minutos, tendo como referência o centro da mesa. Os tratamentos foram dispostos em um delineamento em blocos casualizados, com 12 tratamentos, sendo quatro volumes de calda (8, 12, 16 e 20 L ha⁻¹) e três alturas de voo (2, 3 e 4 metros), com três repetições. A uniformidade da aplicação foi avaliada por meio de gráficos com o padrão de distribuição de cada tratamento, plotados no Excel e por meio do cálculo do coeficiente de variação (CV%). A largura de faixa foi calculada multiplicando a quantidade de canaletas em que houve a coleta da calda pela largura da canaleta (0,17 metros). Os dados obtidos foram comparados pelo teste de Scott-Knott no software R Studio. A variabilidade no perfil de distribuição de pulverizações estacionárias com drones é significativamente influenciada pela altura de voo. Voos a 2 metros, proporcionam maior variação no centro da faixa de aplicação, já em voos em alturas maiores, como 3 e 4 metros, a distribuição apresenta um perfil mais uniforme e próximo a normalidade. Quanto ao volume de calda aplicado por drones, há uma relação diretamente proporcional com a largura da faixa aplicada. O CV das pulverizações variou de acordo com o volume de calda e altura de voo. No geral, adotando-se o parâmetro operacional de 8 L ha⁻¹ obteve-se maior uniformidade na aplicação comparando-o aos demais volumes de calda avaliados, independente da altura utilizada. O sistema de baixo custo desenvolvido para avaliar o padrão de distribuição volumétrica de pulverizações com drones mostrou-se eficiente. Foi evidenciado que os parâmetros operacionais, como altura e volume de calda, têm influência significativa no padrão de distribuição da pulverização por drones, com melhor uniformidade de aplicação para a altura de voo de 3 metros e volume de calda de 8 L ha⁻¹. O presente trabalho possibilitou desenvolver e validar um “sistema de baixo custo para avaliar o padrão de distribuição de pulverizações com drone”, considerando diferentes volumes de calda e alturas de voo.

Palavras-chave: volume de calda; altura de voo; faixa de aplicação.

ABSTRACT

Spraying drones have gained prominence in agriculture as a promising technology for crop protection. To ensure effective control using this equipment, it is important to understand the relationship between its operational parameters and the uniformity of application. Therefore, this study aimed to develop and validate a low-cost system to evaluate the distribution pattern of spray applications using drones, considering different spray volumes and flight heights. The work was conducted at the Federal University of Lavras (UFLA), where a table was developed to assess volumetric distribution, using easily accessible and manageable materials. The system had dimensions of 5.30 x 4.05 meters, consisting of 31 fiberglass channels on an inclined wooden base. In each channel, glass cups were placed to collect the sprayed liquid, which was subsequently measured with graduated cylinders. Stationary sprays were performed for 3 minutes, with the table's center as the reference point. The treatments were arranged in a randomized block design, with 12 treatments, being four spray volumes (8, 12, 16, and 20 L ha⁻¹) and three flight heights (2, 3, and 4 meters), with three replications. The application uniformity was evaluated through distribution pattern graphs for each treatment, plotted in Excel, and by calculating the coefficient of variation (CV%). The swath width was calculated by multiplying the number of channels where the spray liquid was collected by the channel width (0.17 meters). The obtained data were compared using the Scott-Knott test in R Studio software. The variability in the distribution profile of stationary drone sprays is significantly influenced by flight height. Flights at 2 meters result in greater variation in the center of the application swath, while flights at higher, such as at 3 and 4 meters, showed a more uniform distribution profile closer to normality. As for the spray volume applied by drones, there is a directly proportional relationship with the width of the applied swath. The CV of the sprays varied according to the spray volume and flight height. Overall, using the operational parameter of 8 L ha⁻¹ resulted in greater uniformity in application compared to the other evaluated spray volumes, regardless of the flight height used. The low-cost system developed to evaluate the volumetric distribution pattern of drone sprays proved to be efficient. It was evidenced that operational parameters, such as height and spray volume, have a significantly influence on the spray distribution pattern by drones, with better application uniformity for the flight height of 3 meters and spray volume of 8 L ha⁻¹. This work enabled the development and validation of a "low-cost system to evaluate the spray distribution pattern of drone applications," considering different spray volumes and flight heights.

Keywords: spray volume; flight height; application swath.

1 INTRODUÇÃO

A pulverização agrícola desempenha um papel fundamental na proteção das culturas contra pragas, doenças, plantas daninhas e na nutrição foliar, contribuindo assim para a produção e qualidade dos cultivos. Com os avanços tecnológicos, os drones têm-se destacado como uma tecnologia promissora para aplicação de defensivos agrícolas, oferecendo vantagens significativas em precisão, acessibilidade a terrenos de difícil acesso, eficiência e redução do impacto ambiental (Lan *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2021).

No entanto, para garantir a eficácia um controle eficaz e a uniformidade das pulverizações realizadas por drones, é essencial compreender e otimizar os parâmetros operacionais, como a altura de voo e o volume de calda aplicado, o que ainda são pouco pesquisados para a maioria das culturas. Esses dois parâmetros podem possuir forte influência no padrão de distribuição volumétrica nas aplicações por drones, e, portanto, compreender a dinâmica desses fatores na aplicação é fundamental para auxiliar no posicionamento correto da tecnologia, garantindo uma deposição satisfatória em todo o alvo de aplicação (Subr *et al.*, 2017). Uma alternativa para entender como esses dois parâmetros interagem é por meio da calibração por meio da mesa de calibração volumétrica.

Enquanto a avaliação da distribuição volumétrica da pulverização por equipamentos terrestres é amplamente estabelecida através de normativas como a ISO 5682-1:2017 (ISO, 2017), para drones, esse sistema de avaliação da distribuição volumétrica da faixa de aplicação ainda carece de regulamentações específicas. Portanto, são necessárias adaptações no sistema existente e, para isso, é importante a realização de novas pesquisas em desenvolvimento e validação do sistema, o que dará subsídio para embasar as normativas.

Estudos recentes têm testado essas adaptações para caracterizar a distribuição volumétrica da pulverização com drones (Dengeru *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2022). Embora tenham constatado a eficiência do sistema para esse tipo de avaliação, esses sistemas utilizam materiais com maior valor agregado, que necessitam de ferramentas mais complexas para serem manuseados, tornando-os mais onerosos para serem replicados. Além disso, são utilizados para pesquisas em ambientes *indoors*.

Nesse contexto, este estudo visa desenvolver e validar um sistema de baixo custo para avaliar o padrão de distribuição de pulverizações com drone, considerando diferentes volumes de calda e alturas de voo. Essa abordagem busca tornar a tecnologia mais acessível e adaptável às necessidades dos agricultores, contribuindo assim para a eficácia de controle e sustentabilidade da agricultura moderna.

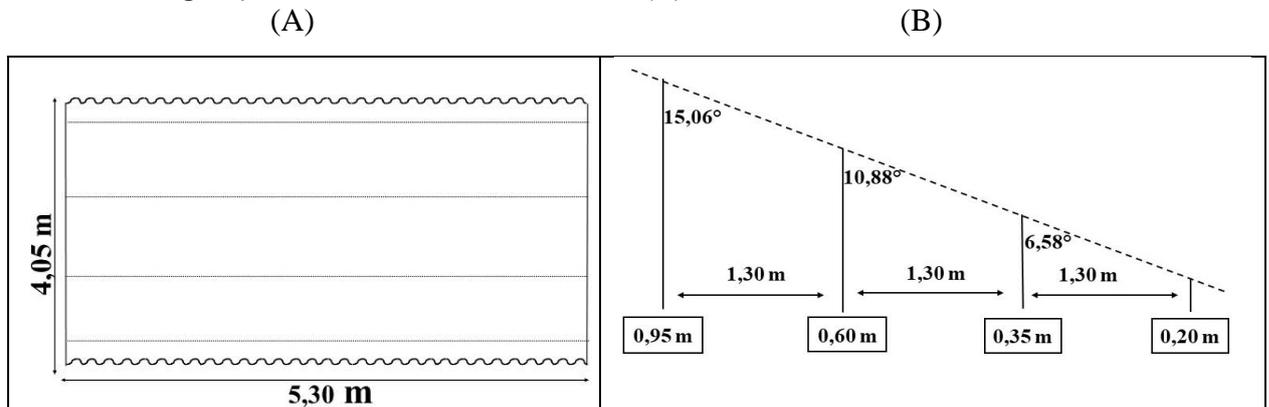
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Desenvolvimento da mesa de avaliação da distribuição volumétrica

Para a avaliação da distribuição volumétrica da pulverização por drones, foi confeccionado um sistema de baixo custo utilizando material de fácil acesso, para que este possa ser construído em qualquer lugar, sem emprego de tecnologia ou máquinas/equipamentos para moldar estruturas.

O sistema de avaliação da distribuição volumétrica foi projetado nas dimensões de 5,30 x 4,05 metros, utilizando madeiras retangulares e telha de fibra de vidro (Figura 1), para ser montado e utilizado em ambiente aberto. A estrutura de suporte das telhas foi feita com ripas de madeira, sendo cada ripa espaçada em 1,30 metros e instalada em alturas diferentes, em ordem decrescente 0,95, 0,60, 0,35 e 0,20 metros (Figura 1B), para criar uma inclinação. Isso foi projetado para que o líquido pulverizado sobre a telha de fibra de vidro possa escoar com melhor fluidez até os copos coletores posicionados na parte inferior de cada uma das calhas.

Figura 1 – Ilustração do sistema de avaliação da distribuição volumétrica de pulverizações por drone, vista superior (A) e vista lateral com os respectivos espaçamentos, alturas e angulação de cada uma das estruturas (B).



Fonte: Autor, 2024.

Ao todo foram utilizadas seis telhas de fibra de vidro (2,44 x 1,10 metros cada) para a construção do sistema de avaliação da distribuição volumétrica. Para evitar perda de líquido entre as canaletas, as telhas foram sobrepostas e fixadas com o auxílio de barbantes. O sistema de avaliação possuía 31 canaletas, cada uma com 0,17 metros de largura. Na extremidade inferior da mesa, foram colocados copos de vidro para coleta dos volumes aplicados em cada canaleta, que posteriormente foram medidos em provetas (Figura 2).

Figura 2 – Sistema de avaliação da distribuição volumétrica de pulverizações feitas por drones, constituído por 31 canaletas de fibra de vidro.



Fonte: Autor, 2023.

2.2 Especificações do equipamento de teste

Para a validação do sistema de avaliação da distribuição volumétrica de pulverizações por drones, foi utilizado o drone pulverizador DJI AGRAS T10. Esse equipamento possui tanque com carga total de 8 L e 4 bicos constituídos por capa, junta e ponta do tipo hidráulica, sendo utilizada nesse estudo a ponta do tipo leque XR 11001 VS, considerada padrão. Alguns parâmetros da pulverização podem ser definidos pelo controle do equipamento, e com o DJI AGRAS T10, é possível ajustar o volume de calda ($L ha^{-1}$), velocidade ($km h^{-1}$), altura (m), vazão ($L min^{-1}$) e espaçamento entre rotas (m).

No entanto, não é possível fazer alterações na pressão de trabalho nesse modelo de drone, porém esta é regulada pelo próprio equipamento, que opera em uma faixa de 2 a 4,5 $kg cm^{-2}$. Visto que se trata de um voo estacionário, o parâmetro espaçamento de rota não foi utilizado nesse estudo.

2.3 Avaliação da distribuição volumétrica

Com intuito de validar o sistema de baixo custo para avaliação da distribuição volumétrica de pulverizações feitas por drones, realizou-se um estudo em delineamento em blocos casualizados (DBC), com 12 tratamentos, compreendendo 4 volumes de calda (8, 12, 16 e 20 $L ha^{-1}$) e 3 alturas de voo (2, 3 e 4 metros), com 3 repetições. A altura de voo foi considerada a partir do centro do sistema construído e cada voo estacionário foi padronizado com o tempo de 3 minutos.

A vazão não foi uma variável considerada neste trabalho, por tratar-se de volumes diferentes de calda, não sendo possível padronizá-la (vazões de cada tratamento são apresentadas na Tabela 1). Ressalta-se que a vazão e o número de bicos a serem utilizados são ajustados pelo próprio equipamento quando se altera o volume de calda e velocidade de voo.

Tabela 1 – Vazão ($L \text{ min}^{-1}$) e número de bicos utilizados em cada tratamento.

Tratamentos	Vazão ($L \text{ min}^{-1}$)	Número de bicos
T1 (8 L ha ⁻¹ / 2 m)	0,71	2
T2 (12 L ha ⁻¹ / 2 m)	1,20	4
T3 (16 L ha ⁻¹ / 2 m)	1,42	4
T4 (20 L ha ⁻¹ / 2 m)	1,79	4
T5 (8 L ha ⁻¹ / 3 m)	0,71	2
T6 (12 L ha ⁻¹ / 3 m)	1,20	4
T7 (16 L ha ⁻¹ / 3 m)	1,42	4
T8 (20 L ha ⁻¹ / 3 m)	1,79	4
T9 (8 L ha ⁻¹ / 4 m)	0,71	2
T10 (12 L ha ⁻¹ / 4 m)	1,20	4
T11 (16 L ha ⁻¹ / 4 m)	1,42	4
T12 (20 L ha ⁻¹ / 4 m)	1,79	4

A calda de pulverização foi preparada com a mistura de 7, 8 L de água e 20 mL do adjuvante redutor de deriva e umectante Vitaphix Power (Satis Industria e Comercio LTDA), a fim de auxiliar na deposição das gotas e no escoamento da calda nas calhas.

Após os 3 minutos da pulverização de cada tratamento, foram aguardados aproximadamente 10 minutos para garantir o escoamento da calda e iniciar a medição do volume contido em cada copo com uma proveta graduada.

A largura da faixa de aplicação foi calculada considerando o número de canaletas em que houve coleta da calda pulverizada no copo, multiplicado pela largura de cada canaleta (0,17 metros).

2.4 Monitoramento ambiental

As condições meteorológicas foram aferidas antes, durante e ao final das aplicações de cada tratamento por meio do termo-higrômetro digital, que fornece dados de temperatura (°C)

e umidade relativa do ar (%), já a velocidade do vento (km h^{-1}) foi medida por meio do anemômetro digital. Os equipamentos foram colocados a uma distância de 5 metros da área experimental. Nos momentos em que as condições eram desiguais ou desfavoráveis, aguardou-se a estabilização das condições ambientais para a aplicação.

Durante a execução do experimento foram aferidas condições de temperatura entre 21,2 e 29,69 °C, umidade do ar entre 49,89 e 78,33% e a ausência de vento até ventos de 1,03 km h^{-1} .

2.5 Análise dos dados

A uniformidade e o padrão de distribuição das pulverizações foram avaliados por meio de perfis de distribuição plotados pelo Excel com a média de volume de cada posição da canaleta e a partir do cálculo do coeficiente de variação (CV%).

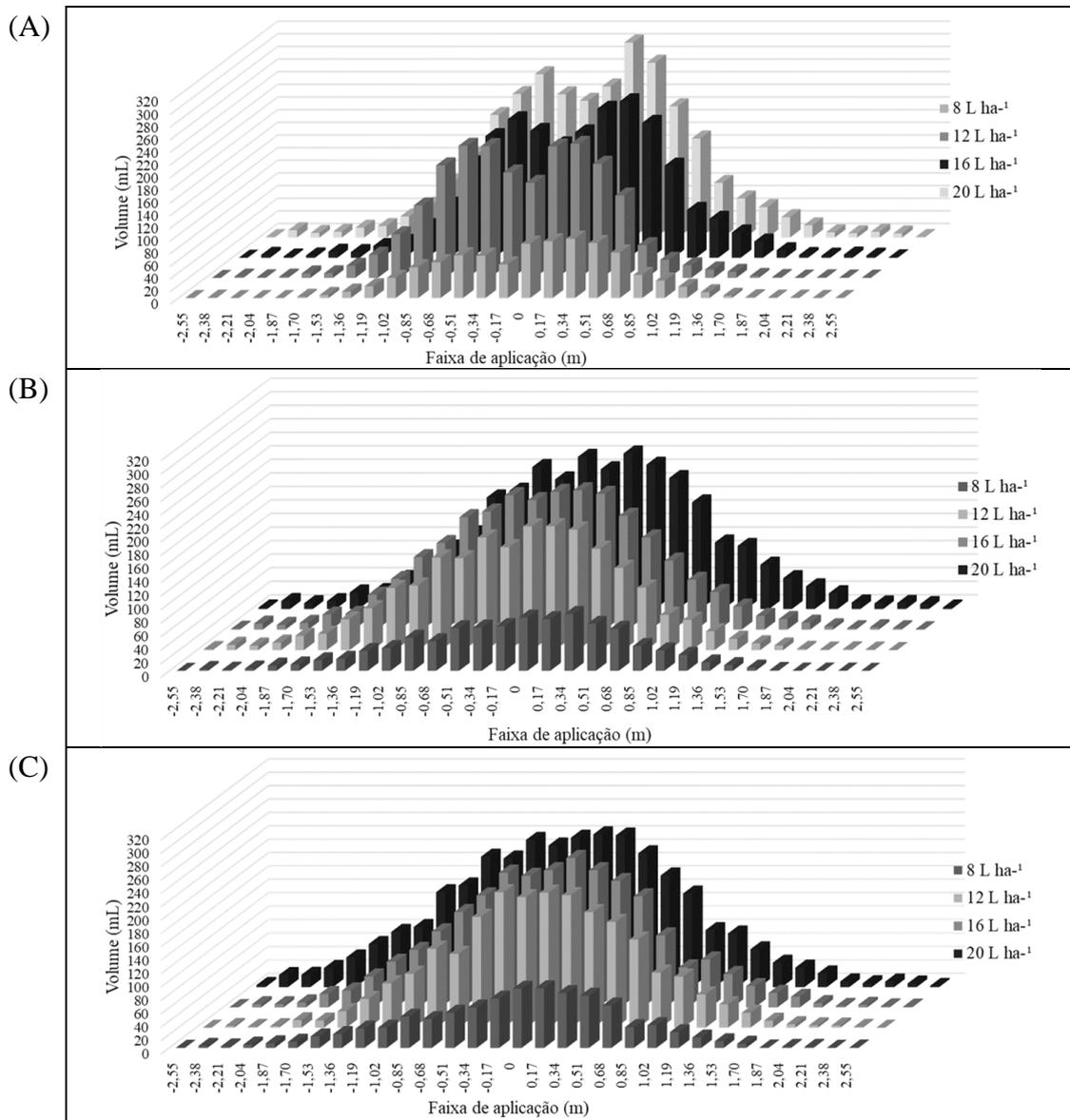
$$CV (\%) = \text{desvio padrão} / \text{média} * 100 \quad (1)$$

Os dados de largura de faixa e CV foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA), a 5% de significância, pelo software de análise estatística R Studio (R Core Team, 2024). Como houve diferença significativa entre os tratamentos, foi aplicado o teste Scott-Knott para comparação das médias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variabilidade no perfil de distribuição de pulverizações estacionárias com drones é significativamente influenciada pela altura de voo. Em voos a 2 metros, observou-se maior variação no centro da faixa de aplicação (Figura 3A). Por outro lado, em voos com altura mais elevadas, como 3 (Figura 3B) e 4 metros (Figura 3C), a distribuição apresenta um perfil mais uniforme e próximo a normalidade. Essa maior homogeneidade no centro da faixa de aplicação é visível quando comparada aos voos realizados a 2 metros de altura. Esses resultados destacam a importância de selecionar a altura de voo adequada para otimizar a uniformidade da aplicação durante operações com drones.

Figura 3 – Perfis de distribuição de pulverizações por drone com diferentes volumes de calda (8, 12, 16 e 20 L ha⁻¹), realizadas a 2 m (A), 3 m (B) e 4 m (C) de altura do sistema de avaliação de baixo custo.



A maior variação no centro da faixa de aplicação em voos a 2 metros de altura, em comparação com voos a alturas maiores de 3 e 4 metros, pode ser explicada por diversos fatores relacionados à dinâmica de voo dos drones de pulverização e à interação entre o fluxo de ar gerado pelo drone e a distribuição do produto aplicado. Quando os voos foram realizados a 2 metros, as gotas pulverizadas ficaram mais suscetíveis à turbulência do ar devido à proximidade com o alvo. Essa turbulência pode causar uma dispersão menos uniforme do produto aplicado, resultando em maior variação no centro da faixa de aplicação. Esse efeito é conhecido como *downwash*, que é um campo de fluxo de ar descendente gerado pela rotação das hélices do

drone, considerado o fator mais importante a influenciar a distribuição e deposição das gotículas (Lan *et al.*, 2021).

Além disso, a difusão do produto aplicado tende a ser mais ampla em alturas menores, devido à maior turbulência e a à menor estabilidade do fluxo de ar próximo ao solo. Isso contribui para uma distribuição menos homogênea do produto, especialmente no centro da faixa de aplicação. Ao se aproximar do alvo, o próprio equipamento pode causar a dispersão do líquido aplicado no centro da faixa, devido a intensidade do campo de fluxo de ar, que tende a diminuir com o aumento da distância do drone pulverizador (Wang *et al.*, 2023).

É importante considerar também que cada drone pode apresentar padrões de dispersão específicos, sendo que voos com alturas maiores podem ser otimizados para uma distribuição mais uniforme devido ao ajuste do sistema de pulverização para essas alturas. Entretanto, mesmo que a oscilação na distribuição volumétrica no centro da faixa de aplicação seja reduzida gradativamente com o aumento da altura de voo (Dengeru *et al.*, 2023), é importante destacar que existe uma interação entre o fluxo de ar e o alvo. Isso é, voos distantes do alvo de aplicação perdem a força do fluxo de ar que movimenta as plantas, podendo afetar a distribuição no interior da vegetação e favorecer a ação dos fatores ambientais que impactam diretamente na deriva e evaporação, uma vez que as gotículas, dependendo do seu tamanho, demorarão mais para alcançar o alvo (Yilong *et al.*, 2022; Bueno; Cunha; Santanna, 2017).

Assim, a altura de voo ideal pode variar de acordo com o tipo de drone de pulverização utilizado, do alvo a ser alcançado e as condições ambientais. Voos a 3 e 4 metros de altura, como observado nos resultados, podem estar dentro de uma faixa ideal que minimiza o efeito *downwash* e maximiza a uniformidade da aplicação, resultando em menor variação no centro da faixa de aplicação e uma distribuição mais homogênea e próxima da normalidade. Cabe destacar que com a exibição de um padrão de distribuição semelhante a uma distribuição normal, as aplicações realizadas com o drone, independente do volume de calda estudado e das alturas de 3 ou 4 metros, são mais apropriadas para aplicações em faixas, exigindo para aplicações em área total a sobreposição da calda.

Quanto ao volume de calda aplicado por drones, há uma relação diretamente proporcional com a largura da faixa aplicada, como evidenciado pelos perfis de distribuição das pulverizações em diferentes alturas de voo (Figura 3). Ao analisar uma mesma altura de voo, é perceptível que as pulverizações com 8 L ha⁻¹ resultaram em faixas de aplicação menores que os demais tratamentos, nas alturas de voo de 2 e 3 metros (Tabela 2). Esses resultados destacam a influência do volume de calda na cobertura da área tratada, indicando a importância de considerar essa variável na otimização da eficiência da aplicação por drones.

Tabela 2 – Largura de faixa de pulverizações por drones com diferentes volumes de calda e alturas de voo.

Volume de calda (L ha⁻¹)	Altura (m)	Faixa (m)
8	2	3,4927 b
12		4,5067 a
16		4,7883 a
20		5,0700 a
8	3	3,7180 b
12		4,7320 a
16		4,8447 a
20		4,9573 a
8	4	4,4503 a
12		4,7320 a
16		4,6756 a
20		5,1827 a

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de agrupamento Scott-Knott ($p < 0,05$).

A influência do volume de calda na cobertura da área tratada está diretamente relacionada a fatores físicos e operacionais da pulverização. Observou-se que quando se aumentava o volume de calda, a densidade de gotas também era aumentada por unidade de área. Isso resulta em uma distribuição mais uniforme do produto sobre o alvo, melhorando a cobertura e reduzindo lacunas na aplicação. Em outras palavras, o aumento do volume de calda pode melhorar de forma significativa a cobertura e penetração da aplicação (Wang *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2021).

A uniformidade da aplicação também é favorecida por volumes de calda adequados, pois contribuem para uma distribuição mais uniforme do produto ao longo da faixa de aplicação. Isso é particularmente importante em operações com drones, onde a altura de voo e a velocidade podem afetar a uniformidade da aplicação. E que o aumento da largura da faixa efetiva da pulverização com drones proporciona uma melhor uniformidade de aplicação com o aumento da altura de voo (Zhao *et al.*, 2024; Dengeru *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2018).

Esses efeitos combinados resultam em uma cobertura mais homogênea da área tratada quando volumes de calda adequados são utilizados. Portanto, é esperado que volumes maiores, proporcionem faixas de aplicação mais largas (Tabela 2) e uma cobertura mais uniforme, como observado nos perfis de distribuição volumétrica (Figura 3).

Esses resultados destacam a complexidade da interação entre altura de voo, volume de calda e largura de faixa de aplicação. Enquanto em alguns casos específicos observou-se diferenças significativas, em outros, as variações não foram tão pronunciadas. Essa variabilidade ressalta a importância de considerar múltiplos fatores ao otimizar a eficiência da aplicação por drones e sua relação com a cobertura da área tratada, bem como serve de indicativo que essa interação deve ser mais bem estudada para maximizar a eficiência operacional com drones pulverizadores.

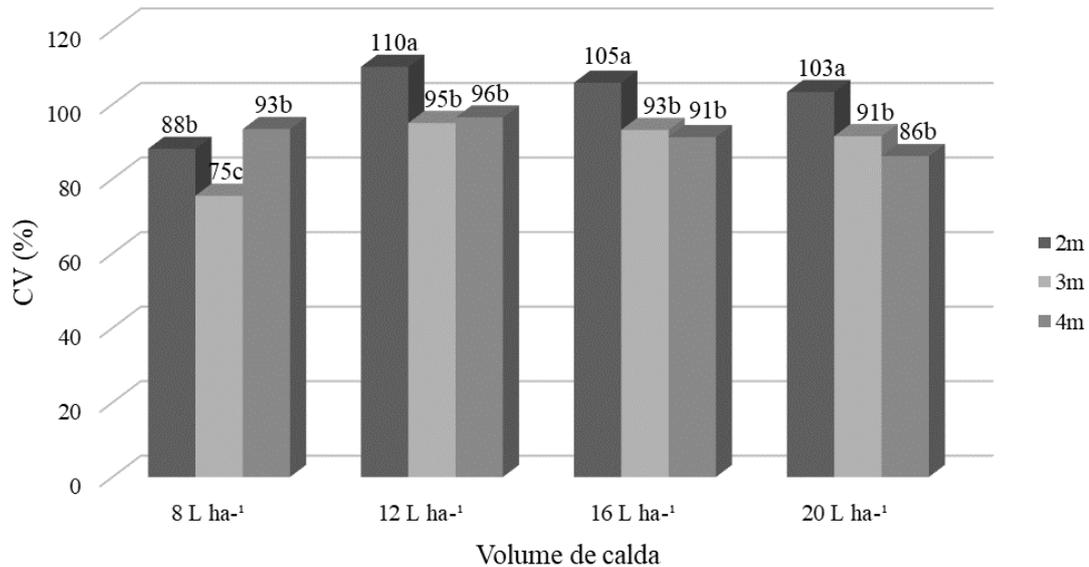
A avaliação do coeficiente de variação (CV%) das pulverizações, realizadas pelo sistema de baixo custo, variou de acordo com o volume de calda e altura de voo, conforme (Figura 4). As pulverizações realizadas a 2 metros de altura, com 12, 16 e 20 L ha⁻¹ apresentaram menor uniformidade na aplicação em comparação com as outras alturas e volumes. Esse padrão pode ser atribuído à interação complexa entre a altura de voo, o volume de calda e a dinâmica dos drones pulverizadores (Chen *et al.*, 2021).

A altura de voo adequada pode contribuir para a redução dos valores CV, caracterizando uma aplicação mais uniforme. Isso se alinha com a ideia de que alturas de voo maiores geralmente resultam em uma distribuição mais uniforme do produto aplicado, especialmente quando combinadas com volumes de calda adequados e tecnologias de pulverização eficientes. Embora o aumento da altura de voo beneficie a uniformidade de aplicação, ainda é um parâmetro operacional complexo, que pode se correlacionar negativamente com o aumento do risco de deriva (Dengeru *et al.*, 2022).

No geral, adotando-se o parâmetro operacional de 8 L ha⁻¹ observou-se maior uniformidade na aplicação comparando-o aos demais volumes de calda avaliados (Figura 4), independente da altura utilizada, isso porque a relação do CV é inversamente proporcional ao valor encontrado nas medições, portanto, quanto menor o valor, mais uniforme a aplicação (Yao *et al.*, 2017).

Os altos valores de CV são frequentemente observados em estudos que envolvem pulverizações com drones utilizando baixo volume de calda, especialmente sob influência das condições ambientais (Xue *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2022). Isso representa um desafio significativo para a pesquisa, pois dificulta a determinação precisa da porcentagem de sobreposição em pulverizações em área total. Essa observação destaca importância de técnicas aprimoradas de calibração e controle durante a aplicação de pulverizações com drones, além da consideração cuidadosa das condições ambientais para garantir resultados cada vez melhores.

Figura 4 – Coeficiente de variação (CV%) do volume distribuído por pulverizações com drones com diferentes alturas de voo e volumes de calda no sistema de baixo custo.



3.1 Custo aproximado para construção da mesa de distribuição volumétrica

A calibração regular dos drones em uma mesa específica ajuda a otimizar o uso dos produtos, reduzindo desperdícios e custos operacionais. Isso é crucial para a sustentabilidade econômica das atividades agrícolas. A precisão aprimorada resultante da calibração adequada também minimiza o risco de sub ou superaplicação de produtos, o que é essencial para garantir resultados eficazes nas culturas e evitar danos ambientais desnecessários. Dessa forma, a importância de uma mesa de calibração volumétrica para drones de baixo custo está diretamente relacionada à eficiência, qualidade, conformidade e economia nas operações de pulverização agrícola, especialmente em contextos onde recursos financeiros limitados exigem soluções acessíveis e eficazes.

Nesse sentido, este trabalho permite constatação da viabilidade e facilidade de construção e verificação da distribuição volumétrica da pulverização realizada por drones, por meio da mesa construída, tendo como referência as mesas comumente utilizadas para avaliação de pulverizadores terrestres, descrita pela norma ISO 5682-1:2017 (ISO, 2017). O custo de construção total da mesa ficou em R\$ 841,17, construída nas dimensões de 5,30 x 4,05 metros (Tabela 3).

Tabela 3 – Custo de construção do sistema de baixo custo para avaliação da distribuição volumétrica de pulverizações com drones.

Material	Quantidade	Custo por unidade (R\$)	Total (R\$)	Função
Telha de fibra de vidro (2,44 x 1,10 metros)	06 un.	81,90	491,40	Canaletas para escoamento da calda pulverizada
Ripas de madeira	10 metros	35,00	70,00	Base da estrutura do sistema
Serra manual	02 un.	10,90	21,80	Corte das madeiras
Prego (17 x 21 cm)	01 kg	22,79	22,79	Unir as madeiras
Martelo	01 un.	24,90	24,90	Colocar os pregos
Furadeira	01 un.	189,00	189,00	Furar as telhas para amarrá-las
Barbante N° 8	01 kg	26,67	26,67	Amarrar as telhas
Tesoura	01 un.	17,40	17,40	Cortar barbantes
TOTAL	-	-	841,17	-

Apesar da construção proposta ser de baixo custo e ter apresentado eficiência nas medições em diferentes alturas e volumes de aplicação (Figura 3), a mesa desenvolvida apresenta algumas limitações e que devem ser destacadas. Para tanto, elaborou-se uma tabela comparativa das limitações e vantagens que a mesa de calibração volumétrica para drones de baixo custo possui, juntamente com possíveis formas de superação dessas limitações (Tabela 4).

Tabela 4 – Pontos relevantes que devem ser considerados na construção da mesa de calibração volumétrica de baixo custo para drones.

Aspecto	Limitações	Vantagens	Superando Limitações
Precisão de Medição	Materiais simples podem não oferecer alta precisão de medição	Econômica e acessível. Maior economia inicial	Calibração regular para ajustar e compensar a falta de precisão
Consistência dos Resultados	Variações nos materiais podem levar a variações nos resultados	Baixo custo de construção	Padrões de qualidade e calibração regular para garantir consistência nos resultados
Calibração	Pode exigir calibração frequente para manter a precisão ao longo do tempo	Facilidade de replicabilidade em diferentes locais	Implementar protocolos de calibração e manutenção regular para manter a precisão ao longo do tempo
Capacidade de Análise	Materiais simples podem limitar a capacidade de análise avançada	Facilidade de transporte e armazenamento devido ao baixo custo e simplicidade	Considerar upgrades graduais para sistemas mais avançados conforme as necessidades de análise se expandam
Durabilidade	Materiais mais simples podem ter vida útil mais curta	Facilidade de construção e manutenção	Escolher materiais mais duráveis dentro das opções de baixo custo e realizar manutenção preventiva regularmente

Essa tabela permite destacar como a mesa de calibração volumétrica para drones de baixo custo oferece vantagens econômicas e práticas, enquanto as limitações associadas podem ser mitigadas por meio de práticas como calibração regular, implementação de padrões de qualidade e consideração de upgrades graduais conforme necessário. Em resumo, o equipamento desenvolvido permite uma avaliação precisa da distribuição volumétrica de pulverização dos drones, garantindo uma aplicação uniforme dos produtos. Isso não apenas assegura a eficiência na utilização desses insumos, mas também contribui para o controle de qualidade, assegurando que as operações estejam alinhadas com as regulamentações ambientais e técnicas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de baixo custo desenvolvido para avaliar o padrão de distribuição volumétrica de pulverizações com drones mostrou-se eficiente. Foi evidenciado que os parâmetros

operacionais, como altura e volume de calda, têm uma influência significativa no padrão de distribuição da pulverização por drones. Especificamente, a altura de voo de 2 metros resultou em aplicações mais desuniformes. Além disso, o volume de calda de 8 L ha⁻¹ demonstrou proporcionar um padrão de distribuição mais uniforme em relação aos demais volumes avaliados.

Os padrões de distribuição de pulverizações por drones apresentados neste estudo destacam a potencialidade de se realizar novas pesquisas explorando diferentes combinações de parâmetros operacionais para otimizar a eficiência da aplicação. A análise detalhada dos resultados sugere a importância de ajustar cuidadosamente os parâmetros operacionais, como altura de voo e volume de calda, para garantir uma distribuição uniforme e eficiente do produto aplicado. Essas considerações são essenciais para maximizar a eficácia dos tratamentos realizados e para o desenvolvimento de práticas mais precisas e sustentáveis na aplicação de pulverizações por drones.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho possibilitou desenvolver e validar um “sistema de baixo custo para avaliar o padrão de distribuição de pulverizações com drone”, considerando diferentes volumes de calda e alturas de voo.

REFERÊNCIAS

- BUENO, M.R.; CUNHA, J.P.A.R da; SANTANNA, D.G. de. Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops. **Biosystems Engineering**, v. 154, p. 35-45, 2017.
- CHEN, P. *et al.* Droplet distributions in cotton harvest aid applications vary with the interactions among the unmanned aerial vehicle spraying parameters. **Industrial Crops and Products**, v. 163, e 113324, 2021.
- CHEN, P. *et al.* Preliminary Evaluation of Spraying Quality of Multi-Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Close Formation Spraying. **Agriculture**, v. 12, n.8, e1149, 2022.
- DANGERU, Y. *et al.* Influence of the downwash airflow in Hexacopter Drone on the spray distribution pattern of boom sprayer. **Journal of Applied and Natural Science**, v. 15, n. 1, p. 391 – 400, 2023.
- DANGERU, Y. *et al.* Study on Spray Deposition and Drift Characteristics of UAV Agricultural Sprayer for Application of Insecticide in Redgram Crop (*Cajanus cajan* L. Millsp.). **Agronomy**, v. 12, n. 12, p. 3196, 2022.

ISO 5682-1:2017. Equipamento para proteção de culturas – Equipamento de Pulverização – Parte 1: Métodos de teste para bicos pulverizadores, Genebra: ISO, 2017.

LAN, Y. *et al.* Influence of the downwash wind field of plant protection UAV on droplet deposition distribution characteristics at different flight heights. **Agronomy**, v. 11, n. 12, p. 2399, 2021.

R CORE TEAM. **The R Project for Statistical Computing**. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 23 de fevereiro, 2024.

SUBR, A. *et al.* Testing the uniformity of spray distribution under different application parameters. **IX International Scientific Symposium “Farm Machinery and Process Management in Sustainable Agriculture**, p. 359-364, 2017.

WANG, G.B. *et al.* Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat. **Pest Management Science**, v. 73, n. 6, p. 1546-1555, 2019.

WANG, S. *et al.* Airflow characteristics of a spray UAV and its effect on spray droplet transportation. **Engenharia Agrícola**, v. 43, n. 6, e20230041, 2023.

XUE, X. *et al.* Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 128, p. 58-66, 2016.

YANG, Z. *et al.* Influence of UAV rotor down-wash airflow on spray width. **Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery**, v. 49, n. 1, p. 116-122, 2018.

YAO, W. *et al.* Droplet drift characteristics of aerial spraying of AS350B3e helicopter. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 33, n. 22, p. 75–83, 2017.

YILONG, Z. *et al.* Influence of the downwash airflow distribution characteristics of a plant protection UAV on spray deposit distribution. **Biosystems Engineering**, v. 216, p. 32-45, 2022.

ZHAO, D. *et al.* Development and Characterization of a Contact-Charging Electrostatic Spray UAV System. **Agriculture**, v. 14, n. 3, p. 467, 2024.

ARTIGO 2 – IMPACTO DO VOLUME DE CALDA E VELOCIDADE DE VOO NA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DE PULVERIZAÇÕES POR DRONES EM LAVOURAS DE CAFÉ DE DIFERENTES IDADES

RESUMO

A pulverização com drones na cafeicultura surgiu para otimizar o manejo fitossanitário e nutricional, principalmente em áreas de difícil acesso. Entretanto, por ser uma planta que tem a copa densa, ajustes do drone de pulverização são necessários para acompanhar seu desenvolvimento e manter a eficiência de aplicação e eficácia do tratamento. Portanto, objetivou-se com esse estudo avaliar a eficiência de aplicação de pulverizações com diferentes volumes de calda e velocidades de voo em lavouras de café com 2,5 e 6,5 anos nos terços superior, médio e inferior do dossel foliar. Os tratamentos foram constituídos por quatro volumes de calda (8, 12, 16 e 20 L ha⁻¹) e duas velocidades de voo (12 e 15 km h⁻¹), sendo utilizado o drone pulverizador DJI AGRAS T10. As parcelas experimentais foram dispostas ao longo da trajetória do drone pulverizador, sendo alocados três pontos (plantas) de amostragem como réplicas, os quais representam as repetições. As plantas foram divididas em terços e em cada um deles foram inseridos papéis hidrossensíveis que após a pulverização foram lidos pelo DropScope. Os fatores considerados foram volume de calda, velocidade de voo e posição dos papéis hidrossensíveis na planta. Os dados foram analisados por meio de uma ANOVA a 5% de significância para avaliar os efeitos principais e a interação entre os fatores. Quando significativo prosseguiu-se com teste de Tukey para comparação das médias. Na lavoura de café mais nova, os valores de DMV, DMN, amplitude relativa, Dv 0,9 e Dv 0,1 não tiveram interação entre os volumes de calda aplicados, velocidade de voo e posição do papel hidrossensível na planta. No café mais velho, encontrou-se diferenças na posição em que o papel hidrossensível foi inserido na planta, bem como interação entre volume de calda e velocidade de voo para todas as variáveis, exceto Dv 0,1, que teve interação tripla. Nas plantas de café mais novas a posição do papel hidrossensível não teve diferença expressiva, enquanto no cafeeiro mais velho observou-se que no terço superior as gotas foram maiores. O volume de calda influencia no espectro de gotas. No geral, para a lavoura de 2,5 anos as pulverizações com 15 km h⁻¹ apresentaram tamanho de gotas que indicam boa penetração da pulverização, demonstrando o potencial de utilizar velocidades de voo maiores em lavouras mais novas. Já na lavoura de 6,5 anos, as pulverizações com 12 km h⁻¹ resultaram em gotas mais finas, indicando melhor cobertura de aplicação em velocidades de voo menores. Portanto, é importante calibrar o drone pulverizador de acordo com a idade da planta, tipo de produto (sistêmico ou contato) e localização do alvo na planta, visto que diferentes volumes de calda e velocidade de voo influenciam na distribuição e penetração da aplicação do produto.

Palavras-chave: tecnologia de aplicação; cafeicultura de precisão; papel hidrossensível.

ABSTRACT

Spraying with drones in coffee cultivation has emerged to optimize phytosanitary and nutritional management, especially in areas that are difficult to access. However, since coffee plants have dense canopies, adjustments to the spray drone are necessary to keep up with their development and maintain application efficiency and treatment effectiveness. Therefore, this study aimed to evaluate the application efficiency of sprays with different spray volumes and flight speeds in coffee crops aged 2.5 and 6.5 years, targeting the upper, middle, and lower thirds of the foliage canopy. The treatments consisted of four spray volumes (8, 12, 16, and 20 L ha⁻¹) and two flight speeds (12 and 15 km h⁻¹), using the DJI AGRAS T10 spraying drone. The experimental plots were arranged along the trajectory of the spraying drone, with three sampling points (plants) allocated as replicas, representing the repetitions. The plants were divided into thirds, and water sensitive papers were inserted into each of these thirds, which were read by DropScope after spraying. The factors considered were spray volume, flight speed, and the position of the water sensitive papers on the plant. Data were analyzed using ANOVA at a 5% significance level to evaluate the main effects and the interaction between factors. When significant, Tukey's test was performed to compare the means. In the younger coffee crop, the values of DMV, DMN, relative span, Dv 0.9, and Dv 0.1 showed no interaction between the applied spray volumes, flight speed, and the position of the water sensitive paper on the plant. In the older coffee crop, differences were found in the position where the water sensitive paper was inserted in the plant, as well as the interaction between spray volume and flight speed for all variables except Dv 0.1, which had a triple interaction. In younger coffee plants, the position of the water sensitive paper did not show a significant difference, whereas in older coffee plants, larger droplets were observed in the upper third. Spray volume influences the droplet spectrum. Overall, in the 2.5-year-old plantation, spraying at 15 km h⁻¹ produced droplets indicative of good spray penetration, demonstrating the potential to use higher flight speeds in younger plantations. In contrast, in the 6.5-year-old plantation, spraying at 12 km h⁻¹ resulted in finer droplets, indicating better coverage at lower flight speeds. Therefore, it is important to calibrate the spraying drone according to the plant's age, type of product (systemic or contact), and target location on the plant, as different spray volumes and flight speeds influence the distribution and penetration of the product application.

Keywords: application technology; precision coffee farming; water sensitive paper.

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura de Minas Gerais, é responsável por mais de 50% da produção nacional de café arábica (CONAB, 2024). Entre as regiões mais proeminentes na produção de cafés de qualidade está o Sul de Minas, caracterizado por suas áreas de cultivo em relevo ondulado. Nessas localidades, os cafeicultores enfrentam dificuldades no manejo da cultura devido à crescente escassez de mão de obra no campo e à mecanização limitada pelas condições geográficas.

Em áreas com acesso restrito, os drones pulverizadores têm sido essenciais para otimizar o manejo das lavouras cafeeiras. Esses equipamentos são projetados para pulverizar líquidos e dispersar sólidos, permitindo a realização do manejo fitossanitário e nutricional em lavouras com diferentes declividades e espaçamentos, além de possibilitar a entrada em áreas com solos encharcados (Crause *et al.*, 2023). O uso de drones evita danos ao dossel das plantas e compactação no solo, oferecendo uma solução eficiente para os desafios enfrentados pelos cafeicultores.

A adoção de drones nas atividades agrícolas tem aumentado significativamente nos últimos anos. No Brasil já estão registrados mais de 5,3 mil drones para pulverizações (ANAC, 2024). Esses equipamentos variam em porte, capacidade de carga, tipos de bicos, sensores, entre outras características que influenciam sua capacidade operacional e na eficiência de aplicação dos produtos. Por isso, é importante ter conhecimento do potencial de cada drone para otimizar sua utilização e maximizar os benefícios nas lavouras.

A pulverização com drones pode ser ajustada pelo controle do equipamento, trabalhando-se altura de voo (m), velocidade de voo (km h^{-1}), volume de calda (L ha^{-1}) e vazão (L min^{-1}). A interação desses parâmetros operacionais influencia diretamente a qualidade da aplicação. Portanto, diversas pesquisas têm sido realizadas para aprimorar a tecnologia de aplicação de drones pulverizadores em diferentes culturas como a uva (Biglia *et al.*, 2022), pêssego (Meng *et al.*, 2020), maçã (Wang *et al.*, 2022), *Coffea canephora* (Vitória *et al.*, 2022) e *Coffea arabica* (Souza *et al.*, 2022; Vitória *et al.*, 2023).

Visto que o café arábica possui uma copa densa, com expressivo crescimento e variação morfológica ao longo do seu desenvolvimento, os ajustes do equipamento de pulverização devem acompanhar seu desenvolvimento. A adaptação dos parâmetros operacionais da pulverização de acordo com as fases do cultivo do café, contribui para a eficiência de aplicação e eficácia de controle. Assim, é possível que os produtos sejam utilizados de forma adequada, otimizando o manejo da lavoura cafeeira, além de garantir o uso da máxima capacidade

operacional do equipamento. Dessa forma, estudos são necessários para compreender a dinâmica dos drones na pulverização de cafeeiros em diferentes idades, alturas e arquiteturas.

Tendo isso em vista e considerando que a eficiência de aplicação de pulverizações com o drone DJI AGRAS T10 varia significativamente em função dos volumes de calda e velocidades de voo e que dependendo da combinação desses fatores, os parâmetros para aplicação em lavouras de café com 2,5 e 6,5 anos de idade devem ser alterados, objetivou-se avaliar neste estudo a eficiência de aplicação de pulverizações com o drone DJI AGRAS T10 com diferentes volumes de calda e velocidade de voo em lavouras de café com 2,5 e 6,5 anos nos terços superior, médio e inferior do dossel foliar.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em uma área comercial de cultivo de café no mês de março de 2024, na Fazenda Ouro Verde no município de Lavras – Minas Gerais, Brasil, localizada a 21°17 '24.48"S de latitude e 45° 5' 56.46"O de longitude. As lavouras foram implantadas com a cultivar MGS Paraíso 2 (*Coffea arabica* L.), as quais apresentavam, no momento da execução do experimento, 2,5 anos e 6,5 anos após o transplântio em campo. Ambos os talhões apresentam um relevo plano com transplântio georreferenciado, no espaçamento de 3,5 metros entre linhas e 0,6 metros entre plantas. A lavoura mais nova era formada por um dossel de plantas com altura média de 0,98 metros e a lavoura mais velha com altura média de 2,03 metros.

Os tratamentos foram constituídos por quatro volumes de calda (8, 12, 16 e 20 L ha⁻¹) e duas velocidades de voo (12 e 15 km h⁻¹) sendo que foram analisadas características nos três terços da planta (superior, médio e inferior). As parcelas experimentais foram dispostas em faixas e, ao longo da trajetória do drone pulverizador (faixa), foram alocados três pontos de amostragem (plantas) como réplicas, espaçados a cada 18 metros (30 plantas), os quais representaram as repetições. Essa metodologia de amostragem é amplamente adotada pelos autores nessa área, sendo uma estratégia para minimizar as variações das condições ambientais entre os pontos de amostragem, tornando-os comparáveis (Biglia *et al.*, 2022; Gil; Escolá, 2009; Miranda-Fuentes *et al.*, 2016).

2.1 Equipamento

As pulverizações dos tratamentos foram realizadas com drone pulverizador modelo DJI AGRAS T10, suas especificações encontram-se na tabela a seguir:

Tabela 1 – Características do drone pulverizador modelo DJI AGRAS T10.

Características	Parâmetros
Volume do tanque de operação	8 L com carga total
Número de bicos	4
Fluxo máximo de pulverização	1,8 L min ⁻¹ (XR110 01VS padrão)
Peso nominal de decolagem	24,8 kg
Duração do voo estacionário	9 min (a 9500 mAh e peso de decolagem de 24, 8 kg)
Ângulo máximo de inclinação	15°
Velocidade máxima de voo operacional	7 m s ⁻¹
Velocidade máxima de vento suportado	8 m s ⁻¹
Força máxima de tração	11,2 kg/ rotor

Fonte: Autor, 2024 (Adaptado DJI, 2024).

Alguns parâmetros da pulverização por drones pulverizadores podem ser definidos pelo controle do equipamento. Com relação ao modelo DJI AGRAS T10 pode-se alterar o volume de calda (L ha⁻¹), velocidade (km h⁻¹), altura (m), vazão (L min⁻¹) e espaçamento entre rotas (m).

2.2 Parâmetros operacionais

As variáveis estudadas nesse trabalho foram volume de calda (L ha⁻¹) e velocidade de voo (km h⁻¹), os quais influenciam diretamente na vazão, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros operacionais dos tratamentos.

Volume de calda (L ha⁻¹)	Velocidade (km h⁻¹)	Vazão (L min⁻¹)
8	12	0,60
12	12	0,83
16	12	1,20
20	12	1,39
8	15	0,71
12	15	1,20
16	15	1,42
20	15	1,77

Para a cultura do café, pulverizações realizadas com altura de voo de 3 metros acima do topo da planta apresentam uma boa cobertura de aplicação e densidade de gotas (Vitória *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2022), visto isso, adotou-se essa altura de voo para todos os tratamentos.

No modelo de drone pulverizador utilizado neste estudo, a pressão de trabalho não pode ser regulada pelo controle, porém é um parâmetro regulado pelo próprio equipamento, que trabalha em uma faixa de 2 a 4,5 kg cm⁻². As pontas utilizadas no trabalho foram do tipo padrão do equipamento DJI AGRAS T10, sendo elas XR11001VS tipo leque. A calda de pulverização aplicada tinha como composição 7,8 litros de água e 0,02 litros do adjuvante redutor de deriva e umectante Vitaphix Power (Satis Industria e Comercio LTDA), considerando a aplicação para 1,00 ha.

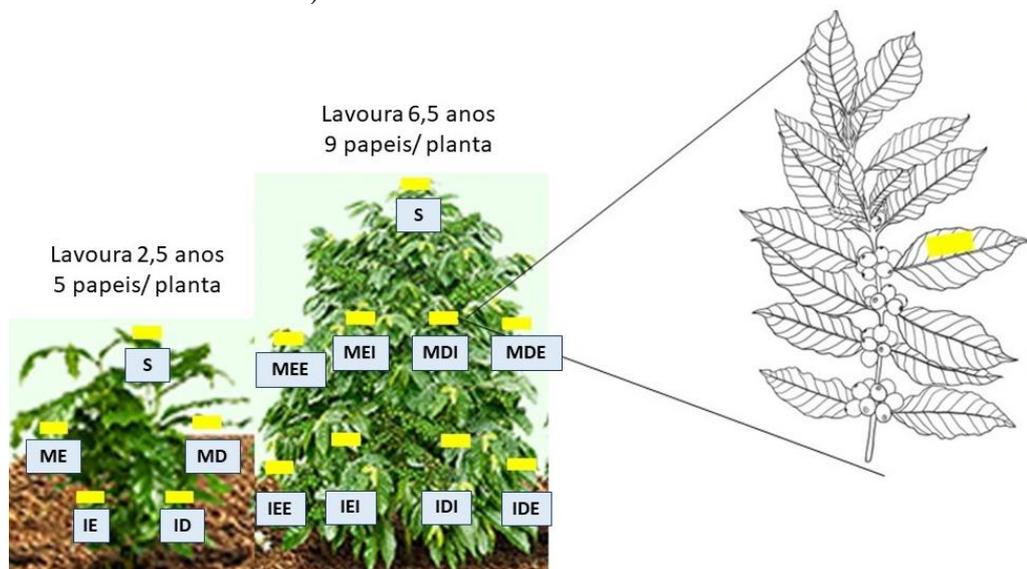
O plano de voo foi realizado pelo software DJI Terra, tendo como referência o ortomosaico da área, a fim de garantir maior precisão no voo. Todos os polígonos utilizados nos tratamentos possuem área de 0,10 ha contendo 3 linhas de café, sendo configuradas 3 linhas de voo, com espaçamento de rota de 3 metros, sendo executado na modalidade automática.

2.3 Disposição dos pontos de amostragem

Para avaliar a eficiência de aplicação e a capacidade de cobertura e penetração da pulverização no dossel, foram colocados papeis hidrossensíveis (26 x 76 mm) em três plantas ao longo da faixa. Na lavoura de 2,5 anos foram colocados 5 papeis, distribuídos da seguinte forma: um no topo da planta, dois no terço médio e dois no terço inferior (um de cada face da planta voltada para a entrelinha). O posicionamento foi padronizado na face superior de uma

das folhas do 4º nó do ramo plagiotrófico, contando a partir do nó mais exterior do ramo (Figura 1). Já na lavoura de 6,5 anos, além dos 5 papéis hidrossensíveis foram adicionados 4 papéis por planta no interior de cada face (voltada para entrelinha) do terço médio e inferior, para uma melhor caracterização da cobertura e penetração da aplicação. No total foram utilizados para avaliação 120 papéis hidrossensíveis na lavoura de 2,5 anos e 216 papéis na lavoura de 6,5 anos.

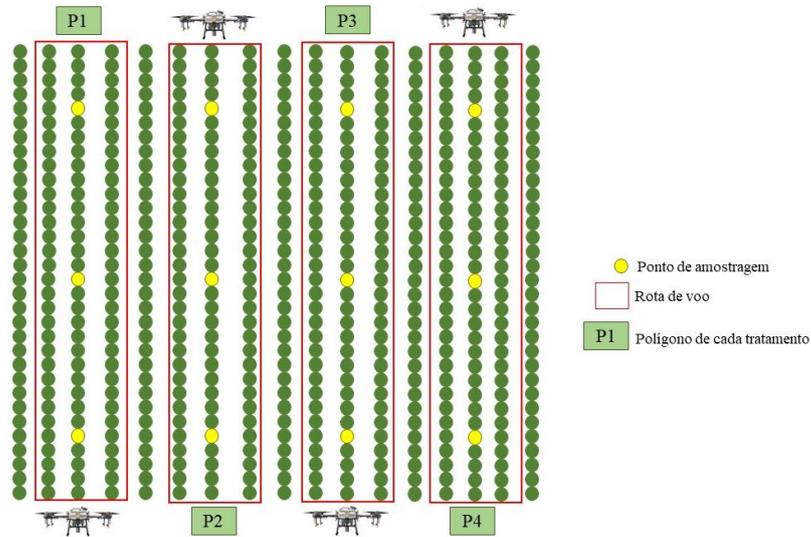
Figura 1 – Disposição dos papéis hidrossensíveis na planta de café, sendo a primeira letra representante do terço (S – superior, M – médio e I – inferior), a segunda o face da planta voltada para entrelinha (E – esquerdo e D – direito) e a terceira a posição (E – externo e I – interno).



Fonte: Autor, 2024.

A disposição de cada tratamento foi aleatorizada ao longo da lavoura e os pontos de amostragem seguiram um padrão para todos os tratamentos: início, meio e final da linha. (Figura 2).

Figura 2 – Disposição dos tratamentos e pontos de amostragem na lavoura de café.



Fonte: Autor, 2024.

Para cada tratamento foi criado um polígono de mesma área sobre três linhas de café para execução do voo automático e garantir as condições trabalhadas na prática em campo. Imediatamente após cada aplicação realizou-se a coleta e análise dos papéis hidrossensíveis. Inicialmente foram feitos todos os voos correspondentes à velocidade 12 km h^{-1} , após a pulverização de todos os tratamentos com essa velocidade, os mesmos polígonos foram utilizados para a avaliação dos tratamentos com a velocidade de 15 km h^{-1} . Os tratamentos foram arranjados conforme a tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição dos tratamentos experimentais na lavoura.

Tratamento	Posição na lavoura (Figura 2)
T1 ($8 \text{ L ha}^{-1} / 12 \text{ km h}^{-1}$)	P1
T2 ($12 \text{ L ha}^{-1} / 12 \text{ km h}^{-1}$)	P4
T3 ($16 \text{ L ha}^{-1} / 12 \text{ km h}^{-1}$)	P2
T4 ($20 \text{ L ha}^{-1} / 12 \text{ km h}^{-1}$)	P3
T5 ($8 \text{ L ha}^{-1} / 15 \text{ km h}^{-1}$)	P1
T6 ($12 \text{ L ha}^{-1} / 15 \text{ km h}^{-1}$)	P4
T7 ($16 \text{ L ha}^{-1} / 15 \text{ km h}^{-1}$)	P2
T8 ($20 \text{ L ha}^{-1} / 15 \text{ km h}^{-1}$)	P3

2.4 Monitoramento ambiental

As condições meteorológicas foram aferidas antes, durante e no final das aplicações por meio do termo-higrômetro digital, que fornece dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (%) e pelo anemômetro digital, que fornece dados de velocidade do vento (km h^{-1}). Os equipamentos foram colocados a uma distância de 5 m da área onde estavam sendo realizadas as pulverizações. Em momentos que foram encontradas condições muito desiguais a dos demais tratamentos, foi aguardada a estabilização de condições ambientais semelhantes. Durante a execução do experimento foram aferidas condições de temperatura em torno de $27,1^{\circ}\text{C}$, umidade do ar 56% e a ausência de vento até ventos de 2 km h^{-1} .

2.5 Análise dos papeis hidrossensíveis

Para evitar possíveis contaminações pela umidade do ambiente, imediatamente após as pulverizações dos tratamentos foi feita a leitura dos papeis hidrossensíveis. Para isso foi utilizado o DropScope, um equipamento portátil que digitaliza e analisa o papel hidrossensível, fornecendo, por meio de um celular, gráficos e relatórios com resultados de diâmetro da mediana volumétrica (DMV), que refere-se ao diâmetro de gota que divide o volume aplicado ao meio, diâmetro da mediana numérica (DMN), que divide o número de gotas em duas partes iguais, amplitude relativa (AR) que parametriza a homogeneidade do diâmetro do espectro de gotas, $Dv 0,9$ e $Dv 0,1$ que consiste no diâmetro das gotas abaixo do qual 90% e 10%, do volume total de gotas aplicado está contido, respectivamente.

2.6 Análises estatística

Os dados obtidos nas lavouras de 2,5 e 6,5 anos foram analisados separadamente, sendo as variáveis DMV, DMN, amplitude relativa, $Dv 0,9$ e $Dv 0,1$ analisadas utilizando o delineamento fatorial triplo com blocos casualizados. Os fatores considerados foram volume de calda (8, 12, 16 e 20 L ha^{-1}), velocidade de voo (12 e 15 km h^{-1}) e posição dos papeis hidrossensíveis na planta (superior, médio e inferior). Antes de proceder a análise de variância foram realizados testes dos pressupostos de normalidade (Teste de Shapiro-Wilk), homogeneidade (Teste de Bartlett) e independência (Teste de Durbin-Watson). Sendo atendidos, realizou-se a análise de variância (ANOVA) a 5% de significância para avaliar os

efeitos principais e a interação entre fatores. Quando identificada diferença significativa, prosseguiu-se com teste de Tukey para comparação das médias. Para conduzir as análises, utilizou-se o pacote Agro R no software R Studio (R CORE TEAM, 2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na lavoura de café mais nova, com 2,5 anos de formação, os valores de diâmetro da mediana volumétrica (DMV), diâmetro da mediana numérica (DMN), amplitude relativa, Dv 0,9 e Dv 0,1 não apresentaram interação entre os volumes de calda aplicados, velocidade de voo e posição do papel hidrossensível na planta. No entanto, foi observada diferença significativa para os fatores isolados em algumas variáveis resposta.

Considerando o fator volume de calda (Tabela 4), observou-se que com 8 e 16 L ha⁻¹ obteve-se as maiores médias para todas as variáveis, demonstrando uma tendência desses tratamentos de produzirem gotas mais grossas. Já o tratamento com 12 L ha⁻¹, apresentou um espectro de gotas menores de acordo com os parâmetros DMV, DMN, Dv 0,9 e Dv 0,1. Como o volume de calda aplicado por drones pulverizadores tem efeito significativo na distribuição das gotas, tratando-se de um equipamento com limitações na carga total do tanque e duração das baterias, o uso de baixos volumes de calda podem contribuir para maior eficiência operacional.

Em geral, o espectro de gotas gerado pelos diferentes volumes de calda adequou-se ao que se considera desejável, entre 50 e 300 µm (Wang *et al.*, 2020), com maior proporção de gotas médias (236-340 µm) (ASABE S572.1, 2009). Com isso, as chances de ter deriva (gotas < 50 µm) e a não penetração da calda no dossel (gotas > 300 µm) são reduzidas.

Tabela 4 – Efeitos do volume de calda (L ha⁻¹) sobre as variáveis DMV (µm), DMN (µm), amplitude relativa, Dv 0,9 (µm) e Dv 0,1 (µm) em cafeeiros de 2,5 anos.

Volume de calda (L ha⁻¹)	DMV	DMN	Amplitude Relativa	Dv 0,9	Dv 0,1
8	248,18 a	151,41 a	0,7508 a	340,51 a	155,53 ab
12	214,36 c	132,41 b	0,7030 a	286,74 c	135,80 c
16	240,79 ab	151,83 a	0,6361 a	317,56 ab	164,37 a
20	223,46 bc	137,09 ab	0,7250 a	303,87 bc	142,03 bc
CV (%)	8,79	14,23	20,45	11,09	12,24

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Com relação a velocidade de voo no café de 2,5 anos (Tabela 5), os menores valores de DMV e Dv 0,9 foram observados nas aplicações com 15 km h⁻¹, caracterizando um espectro de gotas finas (106 – 235 µm) (ASABE S572.1, 2009), enquanto os valores de DMV das pulverizações feitas a 12 km h⁻¹ encontram-se na classe de gotas médias. Os valores de DMV podem ser relacionados com a penetração da pulverização, quanto menor o DMV, maior a chance de a pulverização atingir os terços inferiores da planta (Marubayashi *et al.*, 2021). Esta característica é desejável para controle de pragas e doenças que afetam o interior da planta, porém gotas muito pequenas são mais susceptíveis à deriva e evaporação (Pourreza *et al.*, 2020).

Em um estudo com drone pulverizador de quatro rotores, observaram que a velocidade e altura de voo causam um campo de ar com fluxo descendente que ocasiona o arrastamento das gotículas (Wen *et al.*, 2019). Com a utilização de bicos convencionais, em que as pontas possuem orifício pequeno, como é o caso do equipamento usado nesse experimento, esse fenômeno pode ser acentuado. Na medida em que são produzidas gotas finas, sua trajetória tende a ser desviada seguindo o campo de fluxo de ar, aumentando as chances de a pulverização envolver toda a planta, até mesmo seu terço inferior (Biglia *et al.*, 2022).

Tabela 5 – Efeitos da velocidade de voo (km h⁻¹) sobre as variáveis DMV (µm), DMN (µm), amplitude relativa, Dv 0,9 (µm) e Dv 0,1 (µm) em cafeeiros de 2,5 anos.

Velocidade de voo (km h⁻¹)	DMV	DMN	Amplitude Relativa	Dv 0,9	Dv 0,1
12	239,87 a	144,66 a	0,7266 a	326,25 a	153,01 a
15	223,52 b	141,72 a	0,6808 a	298,09 b	145,85 a
CV (%)	8,79	14,23	20,45	11,09	12,24

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Visto que se trata de uma planta de café ainda com baixa estatura (0,98 metros), a posição do papel hidrossensível teve pouca interferência na lavoura de café mais nova, no entanto, constatou-se que os resultados de DMN e Dv 0,1 (Tabela 6) permitiram a inferência de que o terço inferior recebe gotas mais finas. Já na lavoura de café mais velha, com 6,5 anos de formação, os valores de DMV, DMN, amplitude relativa e Dv 0,9 apresentaram diferença significativa para o fator posição de forma isolada (Tabela 6). Outro estudo que também avaliou a influência da altura da copa da planta e do volume de calda na distribuição das gotas, mostrou que a altura da planta pode influenciar no efeito dos parâmetros operacionais do drone na

dispersão e deposição de gotículas, sendo observado em plantas menores, uma deposição maior e mais uniforme nos terços médios e inferiores (Chen *et al.*, 2020).

Tabela 6 – Efeitos da posição dos papéis hidrossensíveis na planta sobre as variáveis DMV (μm), DMN (μm), amplitude relativa, Dv 0,9 (μm) e Dv 0,1 (μm) em cafeeiros de 2,5 anos e 6,5 anos.

Posição	Café de 2,5 anos					Café de 6,5 anos			
	DMV	DMN	AR	Dv 0,9	Dv 0,1	DMV	DMN	AR	Dv 0,9
Superior	235,84a	148,97a	0,7166a	321,06a	152,49ab	229,70a	153,93a	0,7308a	319,72a
Médio	234,58a	148,65a	0,6685a	310,45a	154,50a	219,14ab	137,71b	0,5534b	275,74b
Inferior	224,68a	131,93b	0,7260a	305,00a	141,31b	198,63b	127,86b	0,5155b	253,08b
CV (%)	8,79	14,23	20,45	11,09	12,24	14,92	16,04	20,93	16,08

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em pulverizações com drones, o terço superior tende a receber mais produto do que os demais terços, com isso as gotas com maior diâmetro tendem a não penetrar na planta, especialmente em plantas com maior quantidade de folhas. Dessa forma, chega no terço médio e inferior gotas mais finas e em menor quantidade (Dengeru *et al.*, 2022). Esse comportamento foi observado no presente estudo, em que quando as plantas de café são mais velhas e conseqüentemente mais altas, têm-se um DMV maior no terço superior (229,70 μm) quando comparado com terço inferior (198,63 μm). Além disso, vale ressaltar que dependendo da altura de voo que se realiza a pulverização com drones na cafeicultura, a cobertura dos três terços pode ser afetada. Apesar disso, é normal o terço superior receber a maior quantidade de espectro de gotas com maior DMV (Souza *et al.*, 2022).

A influência da arquitetura de plantas na eficiência de aplicação da pulverização realizada por drones também já foi relatada em outras espécies arbóreas. Em citros observa-se que plantas com maior volume de copa tendem a receber menor quantidade de gotas no meio da planta quando comparado com a extremidade (Meng *et al.*, 2022). Na cultura do pêssego dependendo do tipo de poda que é realizada nas plantas, a cobertura da aplicação é alterada (Meng *et al.*, 2020). Ao passo que em macieiras o formato da planta e o padrão de plantio (planta isolada ou plantio em linhas) são fatores que podem afetar o desempenho da pulverização (Wang *et al.*, 2022).

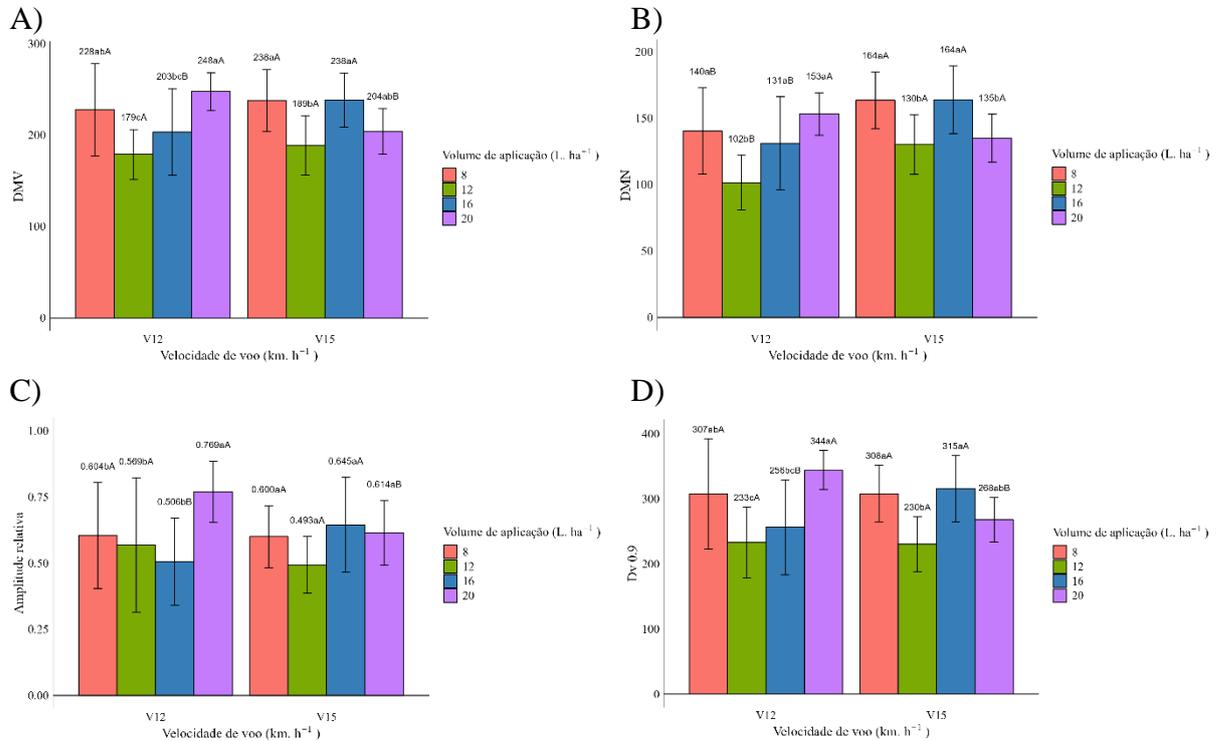
Contudo, apesar de apresentar problemas relacionados a eficiência de aplicação em terços inferiores, ressalta-se que a calda utilizada para pulverização com drones é mais concentrada. Isso pode favorecer a eficácia de controle, principalmente com o uso de produtos

sistêmicos, que translocam garantindo proteção das plantas como um todo. Pensando nas variáveis que influenciam na qualidade da aplicação e controle, novos estudos são necessários para analisar se equipamentos maiores e com bicos rotativos podem suprir essa necessidade ou se volumes de calda maiores que 20 L ha^{-1} são suficientes para cobrir toda a planta de café adulta (> 6 anos), favorecendo o uso de produtos de contato e com foco em alvos mais difíceis de serem alcançados.

Com relação aos fatores volume de calda e velocidade de voo, na lavoura de 6,5 anos foi observada interação significativa para os dados de DMV, DMN, amplitude relativa e Dv 0,9 (Figura 3). Os valores de DMN permitem avaliar a qualidade da aplicação, visto que esse parâmetro representa o tamanho de gota que divide a quantidade de gotas aplicada pela metade. Portanto, quanto maior for o DMN, maior o diâmetro de gotas aplicadas (Souza *et al.*, 2022). Na lavoura de 6,5 anos os valores de DMN apresentaram diferença significativa entre as diferentes velocidades de voo (Figura 3B). As aplicações feitas a 15 km h^{-1} apresentaram maior tamanho de gota para os volumes de calda de 8, 12 e 16 L ha^{-1} e não apresentando diferença significativa para 20 L ha^{-1} , comparada a velocidade de 12 km h^{-1} . Esses resultados sugerem que a velocidade de voo pode ser ajustada para ajudar no controle do tamanho de gotas, potencialmente reduzindo a deriva e aumentando a deposição do produto nas plantas. No entanto, a ausência de diferença significativa no volume de 20 L ha^{-1} indica que, em volumes de calda maiores, a velocidade de voo tem um impacto menor no tamanho de gotas.

Além disso, os resultados deste trabalho reforçam a importância da calibração dos parâmetros de voo do drone pulverizador, pois indicam que a velocidade de voo deve ser ajustada não apenas com base na idade da planta, mas também no volume de calda aplicado, uma vez que a velocidade pode interferir na deposição das gotas (Qin *et al.*, 2016). Assim, a otimização desses parâmetros é essencial para maximizar a eficiência da pulverização, garantindo uma melhor cobertura do alvo e minimizando a deriva, especialmente em culturas densas como o café.

Figura 3 – Diâmetro da mediana volumétrica (DMV) (μm) (A), diâmetro da mediana numérica (DMN) (μm) (B), Amplitude Relativa (C) e Dv 0,9 (μm) (D) de pulverizações com drone com diferentes volumes de calda (L ha^{-1}) e velocidades de voo (km h^{-1}) em cafeeiros de 6,5 anos.

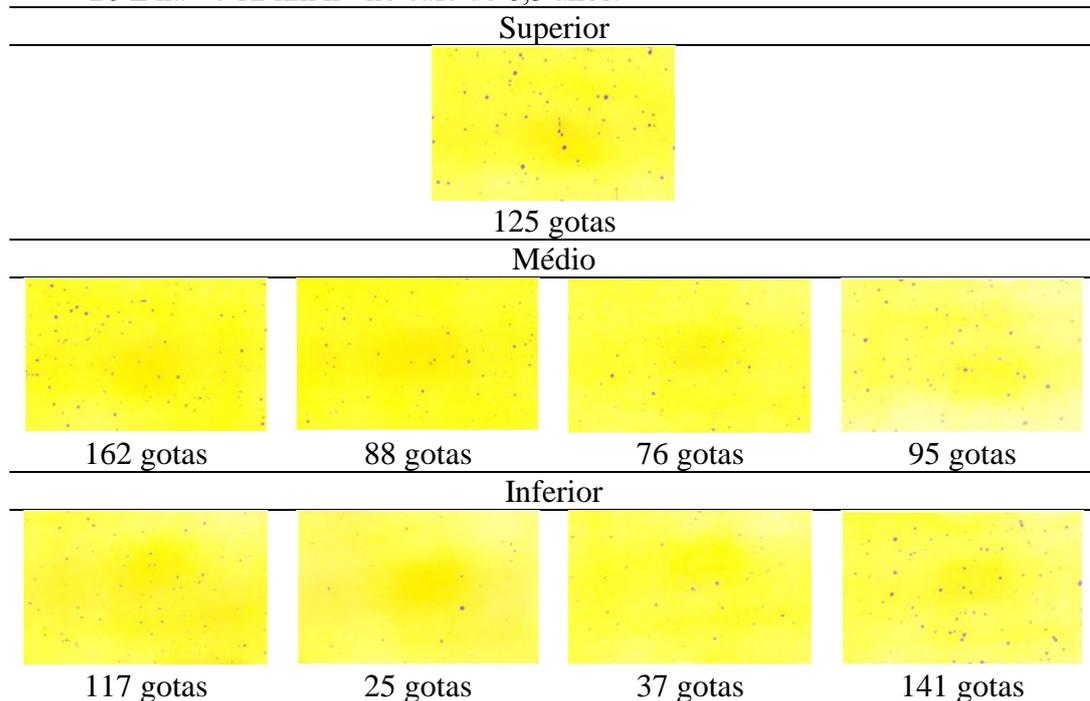


Letras minúsculas comparam as médias entre os diferentes volumes de calda (L ha^{-1}) e letras maiúsculas comparam as médias entre as velocidades de voo (km h^{-1}).

Analisando as interações entre os fatores no cafeeiro mais velho, notou-se que com 20 L ha^{-1} e a 12 km h^{-1} resultou em maior DMV (Figura 3A), amplitude relativa (Figura 3C) e Dv 0,9 (Figura 3D), o que confere um espectro de gotas mais grossas e desuniformes, uma vez que valores de amplitude relativa mais próximo de zero caracterizam espectro de gotas mais homogêneo. Esse resultado pode ser explicado pelo fato que o aumento do volume de calda é diretamente relacionado ao aumento da vazão (Tabela 2) e deposição de gotas, e com isso, algumas gotas podem se sobrepor no papel, tornando-as maiores (Figura 4).

Isto é consistente com as descobertas de Chen *et al.* (2021), que também notaram variações na deposição de gotas em diferentes camadas do dossel das plantas com volumes de pulverização aumentados. Apesar da variabilidade observada, pesquisas anteriores, como a de Wang *et al.* (2019), verificaram que volumes de pulverização mais altos podem melhorar significativamente a cobertura da aplicação e a penetração das gotas no dossel, potencialmente melhorando o controle de pragas e doenças.

Figura 4 – Papeis hidrossensíveis no terço superior, médio e inferior lidos do tratamento com 20 L ha^{-1} e 12 km h^{-1} no café de 6,5 anos.



Os menores valores de DMV no cafeeiro de 6,5 anos foram observados nos tratamentos com o volume de calda de 12 L ha^{-1} , em ambas as velocidades de voo. O DMV é um parâmetro com relação inversamente proporcional a densidade de gotas e área de cobertura da aplicação, portanto, quando menor o DMV, maior a densidade de gotas e maior a cobertura da planta (Cunha; Silva, 2010; Ferguson *et al.*, 2016).

Já o parâmetro Dv 0,1 apresentou uma interação tripla entre os fatores (Tabela 7). Quanto a posição do papel hidrossensível na planta, notou-se que os menores valores foram encontrados no terço inferior com pulverizações feitas com 8 e 16 L ha^{-1} a 12 km h^{-1} (Tabela 7). Comparando os diferentes volumes de calda no terço superior e médio, é possível observar que a 15 km h^{-1} , não houve interferência do volume de calda no Dv 0,1. Por outro lado, a interferência da velocidade de voo no Dv 0,1 já foi reportada em diversos trabalhos, sendo que operações com 5 km h^{-1} retornaram em gotas de espectro médio ($335 \mu\text{m}$), enquanto a $3,6 \text{ km h}^{-1}$, produziu um espectro de gotas de pulverização mais finas (Martin; Woldt; Latheef, 2019). A deposição de gotas na copa da cultura é influenciada pelo tamanho das gotas (Yao *et al.*, 2017).

A velocidade de voo é um parâmetro operacional com influência significativa no efeito *downwash*, o campo de fluxo de ar criado pela passagem do drone pulverizador que auxilia na movimentação do dossel e na penetração das gotas, porém se estiver associado a baixas altitudes de voo, pode ocasionar o escoamento do líquido aplicado (Vitória *et al.*, 2022). O aumento

excessivo da velocidade de voo, contribui com a diminuição da penetração das gotas, cobertura e uniformidade da aplicação, além de aumentar a deriva (Wen *et al.*, 2019; Sinha *et al.*, 2022). Operações a partir de 16,2 km h⁻¹ reduz o efeito *downwash* na queda das gotas, que permite atingir os terços inferiores, começando a comprometer a qualidade da pulverização (Tian *et al.*, 2020).

A interação da velocidade de voo com o *downwash* pode ainda provocar um aumento gradual na inclinação da faixa aplicada, reduzindo o comprimento e largura de faixa em uma mesma altura de voo, favorecendo a deriva e desuniformidade da aplicação (Wang *et al.*, 2021). Portanto, para não perder a capacidade operacional do equipamento e nem os benefícios do efeito *downwash*, o ideal seria voar no máximo de velocidade que permite uma boa penetração da calda. Isso poderá minimizar os efeitos de não cobrimento das gotículas em camadas inferiores da copa (Chen *et al.*, 2021). Nesse estudo, observou-se que para lavouras de café mais novas, podem ser feitas pulverizações a 15 km h⁻¹, sem comprometer a distribuição na planta. Já em lavouras mais velhas, a velocidade de voo de 12 km h⁻¹ apresentou gotas mais finas, demonstrando maior potencial de cobrir toda a planta, quando comparada a 15 km h⁻¹. Essas descobertas ressaltam a importância de ajustar os parâmetros operacionais às condições específicas da cultura e aos objetivos de manejo de pragas para alcançar aplicações de pulverização eficazes.

Tabela 7 – Efeitos da relação do volume de calda (L ha⁻¹), velocidade de voo (km h⁻¹) e posição dos papéis hidrossensíveis na planta sobre a variável Dv 0.1 (µm) em cafeeiros de 6,5 anos.

Posição	Velocidade de voo (km h ⁻¹)							
	12				15			
	8 L ha ⁻¹	12 L ha ⁻¹	16 L ha ⁻¹	20 L ha ⁻¹	8 L ha ⁻¹	12 L ha ⁻¹	16 L ha ⁻¹	20 L ha ⁻¹
Superior	176,24 Aa	120,48 Ba	147,15 ABa	160,73 ABa	160,64 Aa	142,24 Aa	161,97 Aa	144,85 Aa
Médio	138,00 ABab	106,48 Ba	155,94 Aa	156,06 Aa	171,64 Aa	137,40 Aa	150,84 Aa	129,15 Aa
Inferior	129,79 ABb	105,22 Ba	104,14 Bb	154,97 Aa	148,50 ABa	111,80 Ba	172,42 Aa	130,07 ABa

Letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

4 CONCLUSÕES

A eficiência de aplicação foi influenciada pela idade dos cafeeiros. Enquanto no cafeeiro mais novo a posição do papel hidrossensível na planta apresentou pouca diferença na distribuição da aplicação das gotas na planta, no cafeeiro mais velho foi observado maior tamanho de gota no terço superior. O volume de calda influencia no espectro de gotas, no café de 2,5 anos com 8 e 16 L ha⁻¹ apresentando gotas mais grossas, e no de 6,5 anos 20 L ha⁻¹ a 12 km h⁻¹ que obteve tamanhos de gotas superior. Sendo observado também no café de 2,5 anos gotas mais grossas a 12 km h⁻¹.

No geral, para a lavoura de 2,5 anos as pulverizações com 15 km h⁻¹ apresentaram tamanho de gotas que indicam boa penetração da pulverização, demonstrando o potencial de utilizar velocidades de voo maiores em lavouras mais novas. Já na lavoura de 6,5 anos, as pulverizações com 12 km h⁻¹ resultaram em gotas mais finas, indicando melhor cobertura de aplicação em velocidades de voo menores.

Portanto, é importante calibrar o drone pulverizador de acordo com a idade da planta, tipo de produto (sistêmico ou contato) e localização do alvo na planta, visto que diferentes volumes de calda e velocidade de voo influenciam na distribuição e penetração da aplicação do produto.

REFERÊNCIAS

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Drones**. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/aceso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/aeronaves/drones-cadastrados/painel-de-drones-cadastrados>. Acesso em: 15 de julho, 2024.

ASABE S572.1. **Droplet Size Classification**. ASABE: St. Joseph, MI, USA, 2009.

BIGLIA, A. *et al.* UAV-spray application in vineyards: Flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposition, coverage, and off-target losses. **Science of The Total Environment**, v. 845, p. 157292, 2022.

CHEN, P. *et al.* Droplet distributions in cotton harvest aid applications vary with the interactions among the unmanned aerial vehicle spraying parameters. **Industrial Crops and Products**, v. 163, p. e113324, 2021.

CHEN, P. *et al.* Droplet distribution of Unmanned Aerial Vehicle under several spray volumes and canopy heights in the cotton canopy. **International Journal of Precision Agricultural Aviation**, v. 3, n. 4, p. 74-79, 2020.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café**, Brasília, v. 11, n. 2, Safra 2024.

CRAUSE, D.H. *et al.* Droplet Deposition of Leaf Fertilizers Applied by an Unmanned Aerial Vehicle in *Coffea canephora* Plants. **Agronomy**, v. 13, n. 6, p. 1506, 2023.

CUNHA, J.P.A.; SILVA, R.A.M. Uniformidade de distribuição volumétrica de pontas de pulverização em função da pressão de trabalho e altura da barra. **Bioscience Journal**, v. 26, n.1, p. 52 – 58, 2010.

DENGERU, Y. *et al.* Study on Spray Deposition and Drift Characteristics of UAV Agricultural Sprayer for Application of Insecticide in Redgram Crop (*Cajanus cajan L. Millsp.*). **Agronomy**, v. 12, n. 12, p. 3196, 2022.

DJI – Dà-Jiāng Innovations Science and Technology. **DJI AGRAS T10**. Disponível em: https://www.dji.com/br/t10?site=brandsite&from=insite_search. Acesso em: 27 de fevereiro, 2024.

FERGUSON, J.C. *et al.* Assessing the deposition and canopy penetration of nozzles with different spray qualities in an oat (*Avena sativa L.*) canopy. **Crop Protection**, v. 81, p. 14–19, 2016.

GIL, E.; ESCOLÁ, A. Design of a decision support method to determine volume rate for vineyard spraying. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 25, n. 2, p. 145 -151, 2009.

MARTIN, D. E.; WOLDT, W. E.; LATHEEF, M. A. Effect of Application Height and Ground Speed on Spray Pattern and Droplet Spectra from Remotely Piloted Aerial Application Systems. **Drones**, v. 3, n. 4, p. 83, 2019.

MARUBAYASHI, R.Y.P. *et al.* Insecticide spray drift reduction with different adjuvants and spray nozzles. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 4, p. 282-287, 2021.

MENG, Y. *et al.* Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: Effects of operational parameters on droplet distribution. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, e105282, 2020.

MENG, Y. *et al.* UAV spraying on citrus crop: impact of tank-mix adjuvant on the contact angle and droplet distribution. **PeerJ**, v. 10, p. 1-20, 2022.

MIRANDA-FUENTES, A. *et al.* Assessing the optimal liquid volume to be sprayed on isolated olive trees according to their canopy volumes. **Science of the Total Environment**, v. 568, p. 296–305, 2016.

POURREZA, A. *et al.* Spray Backstop: A Method to Reduce Orchard Spray Drift Potential without Limiting the Spray and Air Delivery. **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 8862, 2020.

QIN, W. C. *et al.* Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers. **Crop Protection**, v. 85, p. 79–88, 2016.

R CORE TEAM. **The R Project for Statistical Computing**. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 27 de fevereiro, 2024.

SINHA, R. *et al.* Understanding Spray Attributes of Commercial UAAS as Impacted by Operational and Design Parameters. **Drones**, v. 6, n. 10, p. 281, 2022.

SOUZA, F.G. *et al.* Impact of sprayer drone flight height on droplet spectrum in mountainous coffee plantation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 12, p. 901-906, 2022.

TIAN, Z. *et al.* Droplet deposition characteristics of plant protection UAV spraying at night. **International Journal of Precision Agricultural Aviation**, v. 3, n. 4, p. 18-23, 2020.

VITÓRIA, E.L. da *et al.* Effect of flight operative height and genotypes on conilon coffee spraying using an unmanned aerial vehicle. **Coffee Science**, v. 17, p. e172003, 2022.

VITÓRIA, E.L. da *et al.* Efficiency of Fungicide Application an Using an Unmanned Aerial Vehicle and Pneumatic Sprayer for Control of *Hemileia vastatrix* and *Cercospora coffeicola* in Mountain Coffee Crops. **Agronomy**, v. 13, n. 2, p. 340, 2023.

WANG, C. *et al.* Spray performance evaluation of a six-rotor unmanned aerial vehicle sprayer for pesticide application using an orchard operation mode in apple orchards. **Pest Management Science**, v. 78, n. 6, p. 2449-2466, 2022.

WANG, G. *et al.* Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat. **Pest Management Science**, v. 75, n. 6, p. 1546-1555, 2019.

WANG, J. *et al.* Meteorological and flight altitude effects on deposition, penetration, and drift in pineapple aerial spraying. **Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering**, v. 15, n. 1, p. e2382, 2020.

WANG, L. *et al.* Numerical verification on influence of multi-feature parameters to the downwash airflow field and operation effect of a six-rotor agricultural UAV in flight. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 190, p. e106425, 2021.

WEN, S. *et al.* Numerical analysis and validation of spray distributions disturbed by quad- T rotor drone wake at different flight speeds. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 166, p. e105036, 2019.

YAO, W. X. *et al.* Droplet drift characteristics of aerial spraying of AS350B3e helicopter. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 33, n. 22, p. 75–83, 2017.

TERCEIRA PARTE

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho é uma base para novos estudos na área de drones de pulverização. Os resultados obtidos demonstram a potencialidade de se pesquisar a relação entre os parâmetros operacionais e a eficiência de aplicação. A criação da mesa de avaliação da distribuição volumétrica traz uma ideia inicial do que pode ser replicado na prática por pesquisadores e produtores para avaliar a faixa de aplicação, abrindo caminhos para estudos de sobreposição de faixa em pulverizações com drones. A constatação de que a idade do cafeeiro influencia na distribuição e penetração da aplicação, abre discussão para otimização do uso de drones de pulverização no café, podendo aumentar a eficiência operacional do equipamento em lavouras mais novas, usando volumes de calda menores e velocidades maiores. Já nas lavouras mais velhas, surge a necessidade de comparar drones mais robustos e volumes de calda maiores para melhorar a distribuição nos terços médios e inferior, garantindo a chegada do produto na quantidade correta em toda planta e a eficácia do tratamento.