USO DE DRONES NA APLICAÇÃO DE PRODUTOS FITOSSANITÁRIOS: FATORES QUE AFETAM A DEPOSIÇÃO, A COBERTURA E A DERIVA

Ingo Hoffmann Curti, Leonardo Peres Moreira, Isabele Andrade Garcia, João Victor Gomes, Samuel de Assis Silva.

Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de Ciências Agrárias e Engenharias/Departamento de Agronomia, Alto Universitario, s/n, Guararema, Alegre-ES. CEP 29500-000 Alegre-ES, Brasil.
ingo.curti@edu.ufes.br, leo.peres.moreira@hotmail.com, isabeleandradegarcia@gmail.com, ramosjoaogomesr12@gmail.com, samuel.silva@ufes.br

Resumo

A aplicação de produtos fitossanitários por drones amplia as possibilidades de manejo, especialmente em áreas de difícil acesso, mas sua qualidade depende da interação entre equipamento, ambiente e características do alvo. Este trabalho teve como objetivo analisar os fatores que afetam a deposição, a cobertura e a deriva em pulverizações realizadas com aeronaves remotamente pilotadas. Foi conduzida uma revisão de 12 artigos científicos e dois documentos oficiais publicados entre 2020 e 2025. Os estudos indicaram que volume de calda, velocidade e altura de voo, espectro de gotas, sistema de atomização, fluxo dos rotores, condições meteorológicas e arquitetura do dossel atuam de forma interdependente. Maiores volumes favoreceram a cobertura e a densidade de gotas, enquanto gotas muito finas, vento transversal e maior tempo de queda elevaram o risco de perdas. Em cafeeiros, a posição no dossel e as características das plantas modificaram a resposta aos parâmetros operacionais. Conclui-se que não existe regulagem universal, sendo necessária uma calibração que considere simultaneamente a eficiência no alvo e a redução da deriva.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Aeronaves remotamente pilotadas. Espectro de gotas. Eficiência operacional. Tecnologia aeroagrícola.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias - Agronomia.

Introdução

Na safra de 2025, a produção brasileira de café foi estimada em 55,2 milhões de sacas beneficiadas, das quais 35,2 milhões de arábica e 20,1 milhões de Conilon. O Espírito Santo respondeu por 69% da produção nacional de Conilon (Conab, 2025). No âmbito da tecnologia de aplicação, o emprego de aeronaves remotamente pilotadas para distribuir agrotóxicos e afins, adjuvantes, fertilizantes, inoculantes, corretivos e sementes foi regulamentado no país pela Portaria MAPA nº 298/2021 (Brasil, 2021). Esse contexto produtivo e normativo reforça a relevância de avaliar tecnicamente a pulverização por drones nas condições brasileiras, especialmente em culturas perenes e áreas de relevo acidentado (Conab, 2025).

Os produtos fitossanitários são empregados para proteger as culturas, mas sua eficiência depende do ingrediente ativo para, corretamente, alcançar o alvo biológico em quantidade e distribuição adequadas (Chen *et al.*, 2022; Alvarenga *et al.*, 2024). A deposição corresponde à quantidade de calda ou traçador alcançada no alvo, enquanto a cobertura representa a proporção da superfície atingida e a densidade expressa o número de impactos por unidade de área, por isso, elevada cobertura não significa, necessariamente, maior massa depositada (Cunha *et al.*, 2024; Baio *et al.*, 2025). A deriva consiste no deslocamento das gotas para fora da área pretendida e reduz o aproveitamento do produto no alvo, além de ampliar a exposição de áreas adjacentes (Wang *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022).

Na aplicação de fitossanitários, os drones operam geralmente com baixos volumes de calda, não trafegam sobre a lavoura e produzem um fluxo de ar descendente e contínuo gerado pelos rotores. Esse fluxo favorece a condução das gotas ao dossel, mas também modifica a faixa de deposição conforme a altura, a velocidade e o vento transversal (Chen *et al.*, 2022; Byers *et al.*, 2024). Em pesquisas brasileiras com cafeeiros, a resposta da pulverização por drones variou com espécie, genótipo, idade da planta, manejo de poda e configuração do sistema de atomização (Vitória *et al.*, 2022; Crause *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2024; Alvarenga *et al.*, 2024).

Entre os fatores que condicionam a qualidade da aplicação por drones estão o volume de calda, a velocidade e a altura de voo, o tipo de ponta ou a rotação do atomizador, o espectro de gotas e as

condições meteorológicas (Chen *et al.*, 2022; Byers *et al.*, 2024; Baio *et al.*, 2025). Em culturas perenes, a arquitetura e a posição do alvo no dossel acrescentam limitações à penetração e à uniformidade, porque parte das gotas é interceptada pelos estratos externos e superiores da copa (Vitória *et al.*, 2023; Marques Filho *et al.*, 2025). A deposição, a cobertura e a deriva devem, portanto, ser interpretadas como respostas interdependentes da regulagem, do ambiente e da estrutura da cultura (Wang *et al.*, 2020; Marques Filho *et al.*, 2025).

Diante disso, o objetivo dessa pesquisa foi analisar, com base na literatura científica, os fatores operacionais, meteorológicos e relacionados à cultura que afetam a deposição, a cobertura e a deriva na aplicação de produtos fitossanitários por drones.

Metodologia

Este trabalho foi elaborado por meio de uma revisão de literatura sobre a aplicação de produtos fitossanitários com drones agrícolas. A pesquisa foi realizada nas plataformas SciELO, Portal de Periódicos CAPES e Google Scholar, considerando artigos publicados entre 2020 e 2025. A seleção dos trabalhos considerou inicialmente seus títulos e resumos e, posteriormente, os métodos e resultados apresentados. Foram incluídas pesquisas que avaliaram a distribuição das gotas, o sistema de atomização, as condições meteorológicas e a influência da arquitetura das plantas sobre a pulverização. Estudos com fertilizantes foliares ou traçadores também foram considerados quando contribuíram para a análise da deposição e da cobertura obtidas com drones. Ao todo, foram selecionados 12 artigos científicos e dois documentos oficiais, com preferência por pesquisas brasileiras e estudos em cafeeiros.

As informações foram organizadas de acordo com cinco fatores: volume de calda, velocidade e altura de voo, espectro de gotas e sistema de atomização, condições meteorológicas e arquitetura do dossel. Quando um mesmo estudo apresentou aplicações com drones e outros equipamentos, foram utilizados apenas os resultados referentes aos drones. A análise comparou os resultados encontrados para identificar semelhanças, diferenças, limitações e fatores capazes de interferir na deposição, na cobertura e na deriva.

Resultados e Discussão

Os estudos não atribuíram ao volume de calda o mesmo efeito para todos os indicadores: a cobertura e a densidade de impactos responderam de modo mais regular do que a quantidade total retida nas folhas (Cunha *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2024; Marques Filho *et al.*, 2025). No cafeeiro arábica avaliado por Cunha *et al.* (2024), a mudança de 10 para 20 L ha^{-1} aumentou a cobertura e a densidade nos papéis hidrossensíveis. Nos cafeeiros de idades diferentes, o efeito do volume dependeu da velocidade adotada, o que evidencia a participação conjunta, durante o planejamento da operação, da regulagem e do volume vegetativo (Silva *et al.*, 2024). Já na lavoura adulta, a comparação entre 25 e 50 L ha^{-1} mostrou que a posição na copa foi mais determinante do que o volume e que nenhuma das duas taxas uniformizou todos os pontos avaliados (Marques Filho *et al.*, 2025). Assim, aumentar o volume pode gerar mais impactos, mas não supera, por si só, a interceptação em copas densas nem garante homogeneidade (Cunha *et al.*, 2024; Marques Filho *et al.*, 2025).

Os efeitos de velocidade e altura precisam ser interpretados em conjunto, porque essas variáveis alteram a forma de atuação do jato, o fluxo descendente e o percurso das gotas até o alvo (Vitória *et al.*, 2022; Crause *et al.*, 2023). Entre as alturas de 2, 3 e 4 m testadas em café Conilon não podado, 3 m apresentou o melhor resultado nos genótipos de arquiteturas distintas (Vitória *et al.*, 2022). Em duas plataformas comerciais, o aumento da velocidade reduziu a cobertura, enquanto a resposta à altura variou entre os modelos e também alterou a uniformidade transversal da faixa (Byers *et al.*, 2024). Portanto, diferenças entre alturas de melhor desempenho decorrem das combinações específicas de aeronave, rotores, massa foliar e sistema de atomização, e não de uma recomendação contraditória (Vitória *et al.*, 2022; Crause *et al.*, 2023; Byers *et al.*, 2024). Desse modo, ponta, rotação e adjuvante devem ser selecionados para limitar a fração sujeita à deriva sem comprometer o número de impactos exigido pelo produto (Wang *et al.*, 2021; Baio *et al.*, 2025).

Após a atomização, o movimento do ar e o percurso até o alvo passam a determinar a trajetória das gotas (Wang *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022). No ensaio de campo de Wang *et al.* (2020), a ação do vento aumentou a parcela coletada fora da área tratada, e o perfil de deriva mudou conforme a distância de amostragem, a altura de aplicação e o espectro de gotas. A revisão de Chen *et al.* (2022) mostra

que o risco resulta da combinação entre gotas finas, maior distância até o alvo, parâmetros de voo e vento lateral. O fluxo descendente dos rotores não neutraliza esse vento, por isso, dados meteorológicos e regulagem precisam ser analisados conjuntamente, pois um ajuste obtido em determinado horário ou local pode não produzir a mesma resposta em outra condição (Wang *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022).

Nos estudos com cafeeiros, a posição do alvo dentro da copa ajudou a explicar diferenças importantes de deposição e cobertura (Vitória *et al.*, 2023; Marques Filho *et al.*, 2025). No café de montanha, 15 L ha^{-1} foi o volume que gerou a maior deposição entre os tratamentos com drone, embora a parte inferior da copa tenha recebido menos calda, nessas condições, as aplicações com a aeronave também controlaram ferrugem e cercosporiose (Vitória *et al.*, 2023). Em uma lavoura adulta, a localização dos papéis hidrossensíveis explicou mais a variação dos depósitos que a mudança de 25 para 50 L ha^{-1}, confirmando a dificuldade de distribuir a pulverização de maneira uniforme em copas desenvolvidas (Marques Filho *et al.*, 2025). Considerados somente os tratamentos realizados com drones, esses resultados indicam que a posição do alvo e a resposta biológica devem acompanhar a interpretação de deposição e cobertura (Vitória *et al.*, 2023; Marques Filho *et al.*, 2025).

Em conjunto, os trabalhos brasileiros recentes demonstram que a calibração deve ser específica para cultura, idade, manejo de poda e posição do alvo, pois alterações isoladas de volume, velocidade ou altura não corrigem todas as limitações do dossel (Alvarenga *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2024; Marques Filho *et al.*, 2025). A avaliação deve combinar coletores na copa e fora do alvo, papéis hidrossensíveis, traçadores e registro meteorológico, já que um único indicador pode superestimar a qualidade quando há muitos impactos com pouca massa depositada ou quando existe depósito acompanhado de baixa uniformidade (Cunha *et al.*, 2024; Marques Filho *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2020).

Conclusão

A deposição, a cobertura e a deriva na pulverização com drones resultam da interação entre volume de calda, velocidade, altura, sistema de atomização, espectro de gotas, fluxo dos rotores, meteorologia e estrutura do dossel. Maiores volumes tendem a elevar cobertura e densidade, mas não garantem penetração em copas densas, gotas muito finas, maior tempo de queda e vento transversal aumentam a possibilidade de perdas fora do alvo.

Não existe uma regulagem universal para cafeeiros ou outras culturas. A configuração tecnicamente adequada deve combinar equipamento, condições meteorológicas, arquitetura da planta e alvo biológico, utilizando deposição, cobertura, uniformidade, deriva e eficiência de controle como critérios complementares.

Referências

ALVARENGA, Cleyton Batista de *et al*. Application rate and hydraulic tips used in remotely piloted aircraft affect the phytosanitary products in coffee plant canopies. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 46, p. e62969, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.4025/actasciagron.v46i1.62969. Acesso em: 10 ago. 2026.

BAIO, Fábio Henrique Rojo *et al*. Characterization of the droplet population generated by centrifugal atomization nozzles of UAV sprayers. **AgriEngineering**, v. 7, n. 1, p. 15, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agriengineering7010015. Acesso em: 10 ago. 2026.

BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Portaria MAPA nº 298, de 22 de setembro de 2021. Estabelece regras para operação de aeronaves remotamente pilotadas destinadas à aplicação de agrotóxicos e afins, adjuvantes, fertilizantes, inoculantes, corretivos e sementes. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 182, p. 14, 24 set. 2021.

BYERS, Coleman *et al*. Spray deposition and uniformity assessment of unmanned aerial application systems (UAAS) at varying operational parameters. **Frontiers in Agronomy**, v. 6, p. 1418623, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1418623. Acesso em: 11 ago. 2026.

CHEN, Pengchao *et al*. Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: A review. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 870956, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.870956. Acesso em: 12 ago. 2026.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café: safra 2025, terceiro levantamento. Brasília, DF: Conab, v. 12, n. 3, set. 2025.

CRAUSE, Déborah Hoffmam *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. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy13061506. Acesso em: 12 ago. 2026.

CUNHA, João PAR da *et al*. Spray deposition from an unmanned aerial vehicle on a coffee crop. **Engenharia Agrícola**, v. 44, p. e20240021, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v44e20240021/2024. Acesso em: 14 ago. 2026.

MARQUES FILHO, A. C. *et al.* Remotely piloted aircraft spraying in coffee cultivation: effects of two spraying systems on drop deposition. **AgriEngineering**, v. 7, n. 11, e379, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agriengineering7110379. Acesso em: 17 ago. 2026.

SILVA, J. E. *et al.* Impact of spray volume and flight speed on the efficiency of drone applications in coffee plants of different ages. **Smart Agricultural Technology**, v. 9, e100694, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100694. Acesso em: 17 ago. 2026.

DA VITÓRIA, Edney Leandro *et al*. Effect of flight operative height and genotypes on conilon coffee spraying using an unmanned aerial vehicle. **Coffee Science-ISSN 1984-3909**, v. 17, p. e172003-e172003, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.25186/.v17i.2003. Acesso em: 20 ago. 2026.

VITÓRIA, E. L. *et al.* Efficiency of fungicide application 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, e340, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy13020340. Acesso em: 21 ago. 2026.

WANG, G. *et al.* Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle sprayer. **Science of the Total Environment**, v. 737, e139793, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139793. Acesso em: 25 ago. 2026.

WANG, C. *et al.* Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard. **Science of the Total Environment**, v. 777, e146181, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146181. Acesso em: 25 ago. 2026.