EFICIÊNCIA DA PULVERIZAÇÃO POR DRONES NO CONTROLE DE DOENÇAS EM CAFEEIROS

Júlia Aparecida Botelho Paulucio, Isabele Andrade Garcia, João Victor Gomes Ramos, Leonardo Peres Moreira, Ingo Hoffmann Curti, Samuel de Assis Silva.

Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Alto Universitários/n, Guararema, 29500-000 – Alegre – ES, Brasil, pauluciojulia@gmail.com, isabeleandradegarcia@gmail.com, Joaogomesr12@gmail.com, leo.peres.moreira@hotmail.com, ingo.curti@edu.ufes.br, samuel.silva@ufes.br.

Resumo

A cafeicultura é de grande relevância econômica e social no Brasil, mas enfrenta sérios problemas fitossanitários que comprometem a produtividade e a qualidade dos grãos. Nesse contexto, a pulverização por Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) surge como alternativa dentro da agricultura de precisão. Estudos revisados apontam ganhos como redução no consumo de água e no tempo de aplicação, além de maior viabilidade em áreas com restrição ao tráfego de máquinas.
A eficiência, contudo, depende da posição de voo, do estrato da planta, da deposição das gotas e das condições ambientais. Em cafeeiros, verificaram-se diferenças na distribuição das gotas entre estratos e limitações de cobertura em aplicações de baixo volume.
Conclui-se que os drones são ferramentas auxiliares no manejo fitossanitário, exigindo planejamento técnico, monitoramento constante e protocolos específicos para garantir eficiência e sustentabilidade na cafeicultura.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Cafeicultura. Drones agrícolas. Tecnologia de aplicação. Fitossanidade.

Área do Conhecimento: Engenharia agronômica – Agronomia

Introdução

O Brasil ocupa posição de destaque na cafeicultura mundial, com estimativa de produção de 55,67 milhões de sacas de 60 kg para o ano-cafeeiro de 2025, considerando *Coffea arabica* e *Coffea canephora* (Conab, 2025). Apesar de sua relevância econômica e produtiva, a cafeicultura apresenta desafios fitossanitários, como a ferrugem-do-cafeeiro (*Hemileia vastatrix*), a cercosporiose (*Cercospora coffeicola*) e doenças associadas a *Phoma*, que podem comprometer folhas, ramos e frutos. O manejo dessas doenças requer monitoramento e uso racional de produtos fitossanitários, considerando as condições ambientais e o sistema de produção.

A aplicação de defensivos é etapa essencial, mas limitada em terrenos íngremes ou áreas de difícil acesso. Nesse cenário, a Agricultura de Precisão tem ampliado o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP), ou drones. Na cafeicultura, cresce o interesse científico, com publicações sobre monitoramento e manejo da cultura (Bento et al., 2023). Estudos recentes apontam ganhos operacionais, como redução de custos, consumo de água e tempo de aplicação (Silva et al., 2025).

A aplicação de produtos fitossanitários é uma importante etapa do manejo e pode apresentar limitações quando realizada por sistemas terrestres em terrenos íngremes ou em áreas com dificuldades de tráfego. Nesse contexto, a Agricultura de Precisão tem ampliado o emprego de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP), conhecidas como drones, nas operações agrícolas. Na cafeicultura, o interesse científico por essa tecnologia tem aumentado, sendo identificadas publicações relacionadas ao uso de sistemas remotamente pilotados no monitoramento e manejo da cultura (Bento et al., 2023). Estudos recentes também demonstram ganhos operacionais com o uso de UAV, incluindo redução de custos, consumo de água e tempo de aplicação (Silva et al., 2025). Entretanto, a eficiência fitossanitária depende da deposição adequada das gotas sobre o alvo, sendo influenciada pela posição de voo, pelo estrato da planta, pela arquitetura do dossel e pelas condições ambientais. Em cafeeiros,

foram observadas diferenças na distribuição das gotas entre os estratos e limitações de cobertura em aplicações com baixo volume (Martins et al., 2025).

Diante disso, torna-se necessário analisar a pulverização por drones não apenas pelos seus ganhos operacionais, mas também quanto à qualidade da aplicação e às suas limitações técnicas. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão integrativa da literatura sobre a eficiência da pulverização por drones no controle de doenças em cafeeiros, abordando tecnologia de aplicação, deposição de gotas, ganhos operacionais, limitações técnicas, aspectos ambientais e perspectivas para sua utilização na cafeicultura.

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido como uma revisão integrativa da literatura sobre a eficiência da pulverização por drones no manejo de doenças em cafeeiros. A seleção das referências foi realizada por meio de busca bibliográfica em bases científicas e fontes institucionais relacionadas à cafeicultura, Agricultura de Precisão, tecnologia de aplicação e uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP). Foram considerados estudos publicados entre 2015 e 2026, incluindo referências anteriores quando utilizadas como fundamentação conceitual da tecnologia de aplicação. Foram priorizados artigos científicos, trabalhos acadêmicos, anais de eventos e documentos institucionais pertinentes ao tema. As buscas foram orientadas pelos descritores, em português e inglês: “pulverização por drones”, “drones agrícolas”, “agricultura de precisão”, “cafeicultura”, “controle de doenças do cafeeiro”, *“coffee diseases”, “UAV spraying”, “precision agriculture”, “spray deposition”, “fungicide application”, “Hemileia vastatrix”, “Cercospora coffeicola”* e *“Phoma spp.”.* As fontes consultadas compreenderam Portal de Periódicos da CAPES, *Google Scholar, Web of Science, Scopus, MDPI, Elsevier* e *SpringerLink*, além de documentos da Embrapa e do Ministério da Agricultura e Pecuária.

A seleção e organização das informações compreenderam definição dos descritores, identificação das publicações pertinentes, leitura, sistematização e síntese qualitativa dos conteúdos. Foram considerados documentos com relação direta à aplicação de insumos por UAV/ARP, tecnologia de aplicação, cafeicultura ou fundamentos necessários à interpretação da pulverização, sendo excluídos materiais sem relação com o tema central ou que não contribuíssem para a análise dos aspectos técnicos, agronômicos, econômicos e ambientais. A análise final foi organizada a partir de 10 referências bibliográficas selecionadas, acrescidas das fontes institucionais utilizadas para atualização e verificação. A análise crítica foi estruturada nos eixos eficiência operacional, deposição e cobertura, manejo fitossanitário, sustentabilidade, limitações e perspectivas, buscando comparar os resultados encontrados, identificar limitações técnicas e lacunas na literatura e apontar perspectivas para o aprimoramento da utilização de drones na pulverização de cafeeiros.

Resultados

A literatura evidencia que o uso de drones na cafeicultura ultrapassou a função de monitoramento e passou a incluir operações de aplicação de insumos. (Bento et al. 2023) identificaram crescimento das pesquisas sobre sistemas remotamente pilotados na cultura do café, enquanto estudos brasileiros recentes demonstram aplicações práticas em propriedades comerciais. (Silva et al. 2025), em estudo realizado em uma área de 5 ha em Caconde, São Paulo, compararam a aplicação com UAV e pulverizador costal manual. Os autores observaram redução de 21,8% no custo operacional, de 96% no consumo de água e de 75% no tempo de aplicação. Esses resultados indicam vantagem operacional do UAV nas condições avaliadas, mas não permitem generalização para todos os cafezais, pois fatores como área, logística de abastecimento e sistema de aplicação podem modificar o desempenho.

A eficiência fitossanitária está relacionada à qualidade da deposição das gotas. (Martins et al. 2025), utilizando um drone DJI AGRAS T40, avaliaram diferentes estratos de plantas de café e verificaram que a posição da aeronave e o estrato da planta interferiram na distribuição das gotas. A maior deposição ocorreu no terço médio e na posição de voo sobre as entrelinhas. Entretanto, a densidade de gotas foi inferior aos valores de referência recomendados para cobertura efetiva de culturas perenes (Matthews; Bateman; Miller, 2014). Esse resultado demonstra que menor volume de calda não constitui, isoladamente, indicador de eficiência.

O fluxo de ar produzido pelos rotores pode modificar a trajetória das gotas e favorecer sua movimentação no dossel (Cavalcanti et al., 2025), mas o efeito depende da interação entre altura de

voo, velocidade, vazão, bicos, tamanho das gotas, arquitetura da planta e condições meteorológicas. Dessa forma, a calibração do equipamento é necessária para reduzir perdas por deriva e evaporação e evitar deposição insuficiente (Matthews; Bateman; Miller, 2014). A literatura analisada indica, portanto, que a avaliação da pulverização deve considerar simultaneamente eficiência operacional e qualidade da cobertura.

Quanto ao manejo de doenças, os estudos analisados sustentam o potencial dos drones como ferramenta de aplicação, especialmente quando a rapidez de intervenção e o acesso à lavoura são fatores limitantes. Entretanto, a literatura disponível é mais consistente quanto à tecnologia de aplicação e à eficiência operacional do que quanto à comprovação da eficácia de controle de doenças específicas do cafeeiro. Assim, a equivalência entre aplicações aéreas remotamente pilotadas e métodos terrestres não pode ser afirmada sem considerar produto, dose, alvo, cobertura e condições experimentais.

Os ganhos ambientais e operacionais também apresentam limitações. A aplicação com UAV pode reduzir o consumo de água e o tráfego de equipamentos sobre a lavoura, enquanto aplicações localizadas podem contribuir para diminuir desperdícios. Em contrapartida, autonomia das baterias, capacidade dos reservatórios, necessidade de treinamento e condições meteorológicas condicionam a operação. A Portaria MAPA nº 298/2021 estabelece regras para a operação de aeronaves remotamente pilotadas destinadas à aplicação de agrotóxicos e outros insumos, incluindo requisitos de segurança e formação dos aplicadores (Brasil, 2021).

Tabela 1 – Comparação qualitativa entre métodos de pulverização em cafeeiros

CARACTERÍSTICA	PULVERIZADOR TERRESTRE	DRONE AGRÍCOLA	FONTE
Consumo de água	Maior	Menor	Silva et al. (2025)
Custo operacional	Maior	Menor	Silva et al. (2025)
Tempo de aplicação	Maior	Menor	Silva et al. (2025)
Compactação e tráfego no solo	Maior	Menor	Soares;Schröder (2025)
Amassamento da lavoura	Maior	Menor	Soares; Schröder (2025)
Exposição do operador	Maior	Menor	Soares; Schröder (2025)
Operação em relevo acidentado	Mais limitada	Mais favorável	Soares; Schröder (2025)
Aplicação localizada	Menos flexível	Mais flexível	Soares; Schröder (2025)
Qualidade da deposição	Dependente da calibração	Dependente da calibração	Martins et al. (2025)

Fonte: elaborado pelos próprios autores.com base nas referências indicadas em cada linha.

Discussão

Os resultados indicam que a principal contribuição dos drones para a cafeicultura está na possibilidade de adequar a aplicação às condições específicas da propriedade. O estudo de (Silva et al. 2025) evidencia ganhos simultâneos de tempo, consumo de água e custo operacional, mas a magnitude desses ganhos deve ser interpretada em função da condição experimental. A diferença entre propriedades pode decorrer de fatores logísticos e operacionais, o que reforça a necessidade de avaliações econômicas contextualizadas.

A comparação com (Martins et al. 2025) evidencia que eficiência operacional e eficiência fitossanitária não são equivalentes. Enquanto (Silva et al. 2025) demonstraram redução expressiva do tempo e do consumo de água, (Martins et al. 2025) identificaram variação na deposição entre estratos e densidade de gotas inferior à recomendada para cobertura efetiva de culturas perenes. Em conjunto, os estudos sugerem que a adoção da tecnologia não deve ser orientada apenas pela redução do volume de calda, mas pela manutenção da qualidade da deposição necessária ao alvo.

Outra questão é a especificidade do cafeeiro. Resultados obtidos em outras culturas perenes podem contribuir para compreender princípios de deposição e funcionamento dos equipamentos, mas não substituem ensaios específicos em café. A arquitetura da copa, o espaçamento, a altura das plantas, a

densidade foliar e o relevo podem alterar o comportamento das gotas. A literatura analisada, portanto, apresenta lacuna na definição de parâmetros específicos para diferentes cultivares, sistemas de condução e condições de relevo.

Do ponto de vista ambiental, a redução do consumo de água observada por (Silva et al. 2025) é promissora, mas não deve ser interpretada como justificativa para reduzir indiscriminadamente o volume de aplicação. A quantidade de calda precisa ser compatível com o produto, o alvo e a cobertura necessária. A redução de volume deve estar associada à manutenção da eficiência biológica e ao controle de perdas.

A regulamentação constitui outro componente da viabilidade da tecnologia. A Portaria MAPA (nº 298/2021) estabelece requisitos para a operação de aeronaves remotamente pilotadas destinadas à aplicação de agrotóxicos e outros insumos (Brasil, 2021). Assim, a expansão do uso de drones depende não apenas do desempenho dos equipamentos, mas também de capacitação e cumprimento das exigências de segurança.

Como perspectiva, a integração entre drones, sensores, imagens e sistemas de informação podem ampliar a capacidade de orientar o monitoramento e a aplicação por dados. Contudo, para comprovar benefícios dessa integração, são necessários estudos que relacionem detecção de sintomas, decisão de aplicação, quantidade de produto utilizada, eficiência de controle, custo e impacto ambiental. Essa lacuna indica a necessidade de experimentos específicos em cafezais, com protocolos padronizados de deposição, cobertura e eficácia fitossanitária.

Conclusão

A revisão evidencia que a pulverização por drones apresenta potencial para aumentar a eficiência operacional da aplicação de insumos em cafeeiros, sobretudo em condições nas quais o tráfego de máquinas terrestres é limitado. (Silva et al. 2025) demonstraram redução de custo operacional, consumo de água e tempo de aplicação em uma condição específica de produção, enquanto (Martins et al. 2025) evidenciaram que a qualidade da deposição permanece como fator determinante para a eficiência da tecnologia. Esses resultados indicam que os benefícios dos drones devem ser avaliados conjuntamente com a qualidade da aplicação.

A tecnologia não deve, portanto, ser considerada substituta universal dos métodos convencionais. Seu desempenho depende da calibração do equipamento, da posição e altura de voo, das características das gotas, da arquitetura do cafeeiro, das condições meteorológicas e da adequação do volume de aplicação ao alvo. Dessa forma, a redução do consumo de água ou do tempo de operação, isoladamente, não é suficiente para caracterizar maior eficiência fitossanitária.

Persistem lacunas quanto à padronização de protocolos para diferentes cultivares, arquiteturas de copa, doenças e condições de relevo. Estudos futuros devem comparar diretamente drones e métodos terrestres em condições de campo, relacionando qualidade da deposição, eficiência de controle, custo, consumo de água, risco de deriva e impacto ambiental. A consolidação da tecnologia na cafeicultura dependerá, portanto, da produção de evidências experimentais específicas, da capacitação dos operadores, do planejamento agronômico e do cumprimento da legislação vigente.

Referências

BENTO, N. L.; FERRAZ, G. A. e S.; SANTANA, L. S.; SILVA, M. L. O. Coffee growing with remotely piloted aircraft system: bibliometric review. AgriEngineering, v. 5, n. 4, p. 2458-2477, 2023. DOI: 10.3390/agriengineering5040151. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2624-7402/5/4/151>. Acesso em: 15 ago. 2026.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. 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. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/aviacao-agricola/legislacao/portaria-mapa-298-de-22-09-2021.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2026.

CASTALDO, J. H. Revolucionando a agricultura pelos céus: explorando o potencial dos drones de pulverização na agricultura de precisão. Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, v. 40, e27284,

2023. DOI: 10.35977/0104-1096.cct2023.v40.27284. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br/cct/article/view/27284>. Acesso em: 15 ago. 2026.

CAVALCANTI, F. R.; MÜLLER, L. E.; BOTTON, M.; FIORAVANÇO, J. C.; BREDEMEIER, C. Caracterização da pulverização por drone classe II com duplo rotor coaxial e atomizador duplo de disco centrífugo em vinhedos. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, set. 2025. (Embrapa Uva e Vinho. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 38). ISSN 3085-9131. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1178794>. Acesso em: 15 ago. 2026.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café, v. 12, safra 2025, n. 2, segundo levantamento. Brasília, DF: Conab, maio 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/2o-levantamento-de-cafe-safra-2025/boletim-cafe-maio-2025>. Acesso em: 25 ago. 2026.

MARTINS, L. A.; CANEVESI, N. L. B.; NAKAZAWA, Y. K. G. Avaliação da deposição de gotas em diferentes estratos do cafeeiro na pulverização com drone. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Mecanização em Agricultura de Precisão) – Faculdade de Tecnologia Shunji Nishimura, Pompéia, 2025. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/41181>. Acesso em: 15 ago. 2026.

MATTHEWS, G. A.; BATEMAN, R.; MILLER, P. Pesticide application methods. 4. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. 517 p. DOI: 10.1002/9781118351284. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118351284>. Acesso em: 15 ago. 2026.

SILVA, T. L. da; ROMANI, L. A. S.; MARTHA JUNIOR, G. B.; GREGO, C. R.; LUCHIARI JUNIOR, A.; MASSRUHÁ, S. M. F. S. UAV-based automation: a case study of coffee crop input application in Caconde, Brazil. In: WORKSHOP CIENTÍFICO DO CENTRO DE CIÊNCIA PARA O DESENVOLVIMENTO EM AGRICULTURA DIGITAL – SEMEAR DIGITAL, 2., 2025, Campinas. Anais [...]. Piracicaba: ESALQ/USP, 2025. p. 390-396. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1185938/uav-based-automation-a-case-study-of-coffee-crop-input-application-in-caconde-brazil>. Acesso em: 15 ago. 2026.

SOARES, R. M.; SCHRÖDER, E. P. Uso de drones agrícolas no Brasil: da pesquisa à prática. Londrina: Embrapa Soja, 2025. 83 p. (Embrapa Soja. Documentos, 474). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1175882>. Acesso em: 15 ago. 2026.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. Precision Agriculture, v. 13, n. 6, p. 693-712, 2012. DOI: 10.1007/s11119-012-9274-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>. Acesso em: 15 ago. 2026

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro. Além disso, agradecem ao Laboratório de Mecanização e Agricultura de Precisão e Digital (LABMAP) e a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).