ADJUVANTES DE CALDA EM PULVERIZAÇÕES COM DRONES: EFEITOS NA DEPOSIÇÃO, COBERTURA E DERIVA

Ingo Hoffmann Curti, Leonardo Peres Moreira, Gabriel Vieira Cordeiro, Júlia Aparecida Botelho Paulucio, 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, gabriel.v.cordeiro@edu.ufes.br, pauluciojulia@gmail.com, samuel.silva@ufes.br.

Resumo

A pulverização com drones agrícolas geralmente utiliza baixo volume de calda, tornando o uso de adjuvantes relevante para a qualidade da aplicação. Para o uso do adjuvante ser necessário, fatores internos e externos precisam ser previstos para que tenha o bom uso do produto. Essa pesquisa tem como objetivo analisar os efeitos desses produtos sobre propriedades físico-químicas, espectro de gotas, deposição, cobertura e deriva. Realizou-se revisão de 19 artigos científicos publicados entre 2018 e 2026 e quatro documentos oficiais brasileiros. Foram identificados surfactantes, óleos vegetais e minerais, organossilicones, lecitina, polímeros e misturas multifuncionais. Os adjuvantes modificaram tensão superficial, viscosidade, molhamento e atomização, com respostas dependentes da formulação, concentração, volume, sistema de atomização, dossel e meteorologia. Polímeros, óleos e lecitina favoreceram a deposição, o aumento do tamanho das gotas ou a redução da deriva, enquanto surfactantes e organossilicones ampliaram o espalhamento sem garantir maior retenção ou eficácia. Conclui-se que não existe adjuvante universal, devendo a calibração considerar drone, calda, alvo e ambiente.

Palavras-chave: Aeronave remotamente pilotada. Espectro de gotas. Propriedades físico-químicas. Tecnologia de aplicação.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias – Agronomia.

Introdução

A agricultura brasileira reúne cultivos anuais, cafeicultura, fruticultura e sistemas produtivos com arquiteturas de alvo e condições operacionais distintas (Soares; Schröder, 2025). Em 2024, mesmo com redução de 3,9% em relação ao ano anterior, o valor da produção das principais culturas agrícolas alcançou R$ 783,2 bilhões (IBGE, 2025). Essa dimensão econômica reforça a necessidade de operações fitossanitárias tecnicamente ajustadas às culturas e às regiões produtoras (Maciel *et al.*, 2025).

Os produtos fitossanitários integram o manejo de plantas daninhas, pragas e doenças, mas a dose por hectare não determina isoladamente o desempenho do tratamento (Maciel *et al.*, 2025). A tecnologia de aplicação deve conduzir o ingrediente ativo ao alvo em quantidade e distribuição adequadas; regulagem incompatível com a cultura pode reduzir deposição e cobertura e ampliar perdas por evaporação, escorrimento ou deriva (Maciel *et al.*, 2025).

Os drones agrícolas possibilitam aplicação em áreas úmidas, inclinadas ou de difícil acesso, sem tráfego sobre a cultura, mas normalmente operam com baixos volumes e exigem calibração própria (Soares; Schröder, 2025). Bicos hidráulicos ou atomizadores centrífugos, altura e velocidade de voo, vazão e fluxo descendente dos rotores interferem na penetração do dossel, no espectro de gotas e na uniformidade da faixa (Soares; Schröder, 2025). No Brasil, a aplicação de agrotóxicos, adjuvantes, fertilizantes e outros produtos por aeronaves remotamente pilotadas é disciplinada pela Portaria MAPA nº 298/2021 (Brasil, 2021).

Os adjuvantes de calda são adicionados para modificar propriedades físicas, químicas ou funcionais, e suas classes não são equivalentes (Maciel *et al.*, 2025). Surfactantes e espalhantes tendem a alterar tensão superficial e ângulo de contato; óleos, polímeros, adesivos, umectantes, antievaporantes e redutores de deriva podem atuar sobre molhamento, retenção, evaporação ou atomização, conforme composição, dose, produto associado e sistema de aplicação (S. Wang *et al.*, 2022; Zeeshan *et al.*, 2024). Em baixo volume, a mesma dose por hectare pode gerar concentração maior no tanque, razão pela qual recomendações de alto volume não devem ser transferidas automaticamente para drones (Zhao *et al.*, 2022a; Soares; Schröder, 2025).

Deposição corresponde à quantidade de calda, traçador ou ingrediente recuperado no alvo; cobertura é a proporção da superfície atingida; densidade de gotas expressa os impactos por área; penetração descreve a distribuição entre estratos; e deriva representa a fração transportada para fora do alvo durante a aplicação (Maciel *et al.*, 2025; Soares; Schröder, 2025). Esses desfechos dependem da interação entre adjuvante, concentração, volume, atomização, fluxo dos rotores, meteorologia e arquitetura do dossel (S. Wang *et al.*, 2022; Meng *et al.*, 2022). Diante da expansão das aplicações por drones e da resposta variável das caldas, objetivou-se analisar criticamente os efeitos dos adjuvantes sobre propriedades físico-químicas, espectro de gotas, deposição, cobertura e deriva em pulverizações realizadas com drones agrícolas.

Metodologia

Foi feita a revisão com consultas no SciELO e executada busca por assunto no Portal de Periódicos CAPES.

Incluíram-se artigos revisados que aplicaram caldas com adjuvante pelo próprio drone e avaliaram deposição, cobertura, deriva ou variável diretamente relacionada. Após leitura de métodos e resultados, extraíram-se cultura, modelo e sistema de atomização, adjuvante, concentração, volume, propriedades da calda, meteorologia e desfechos, mantendo separadas dose por área, dose por volume e concentração.

Resultados e Discussão

Os 19 artigos experimentais abrangeram arroz, olmo, trigo, milho, algodão, citros, lichia, pimenta, amendoim, café e dossel arbóreo, com óleos vegetais e minerais, surfactantes, organossilicones, lecitina, polímeros e misturas multifuncionais (Meng *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2022a; Hu *et al.*, 2024; Baek *et al.*, 2025). A Tabela 1 sintetiza exclusivamente tratamentos realizados com drones de pulverização.

Tabela 1 – Efeitos de adjuvantes em pulverizações realizadas por drones.

Estudo/cultura	Adjuvante ou classe	Síntese dos efeitos observados
Meng *et al.* (2018) – trigo	Adjuvante de pulverização aérea	Aumentou deposição e controle de pulgões e permitiu reduzir a dose na combinação avaliada.
Zang *et al.* (2021) – milho	Polímero hiper-ramificado e óleo vegetal	O polímero melhorou molhamento, cobertura e deposição com WG; o óleo não alterou a formulação ULV.
Zhao *et al.* (2022a) – arroz	Polímero éter	Reduziu tensão dinâmica e ressalto e aumentou molhamento, espalhamento e deposição.
Zhao *et al.* (2022b) – trigo	Adjuvante 8860	Elevou molhamento e deposição; com redução de um terço da dose, manteve o controle.
Liu *et al.* (2022) – pimenta	Quatro adjuvantes comerciais	Puliwang reuniu maior deposição e desfolha; os demais apresentaram respostas distintas em tamanho, densidade e cobertura.
Meng *et al.* (2022) – citros	Organossilicone NJF	Reduziu o ângulo de contato e elevou cobertura e diâmetro mediano, com respostas dependentes do estrato do dossel e do drone.
S. Wang *et al.* (2022) –	Óleos, silicones,	Alteraram o espectro; a previsão de menor

trigo	ésteres e polímeros	deriva em túnel não gerou diferença de deposição no campo.
Dou *et al.* (2023) – olmo	Seis adjuvantes comerciais	O Jiexiaofeng apresentou maior uniformidade, penetração e deposição, em interação com o modo de voo do DJI T30.
X. Wang *et al.* (2023) – arroz	Kao A-200	Aumentou deposição, cobertura e controle; com 70% da dose manteve bom desempenho.
Hu *et al.* (2024) – algodão	Óleo vegetal, óleo mineral e álcool–éster	O óleo mineral WCH apresentou os maiores ganhos de molhamento, penetração, tamanho de gotas, deposição e controle de pulgões.
Sun *et al.* (2024) – amendoim	MO501, Silwet 408 e XL-70	Tipo e concentração alteraram gotas finas, ressalto e espalhamento; escolhas inadequadas ampliaram riscos.
L. Wang *et al.* (2024) – arroz	Wonderful Rosin e Tiandun	A 0,5%, reduziram deriva, elevaram uniformidade e penetração e melhoraram o controle.
Zeeshan *et al.* (2024) – algodão	Seis adjuvantes × formulações	Houve interação entre formulação e adjuvante; acetamiprido ME 5% + Nongjianfei elevou cobertura/deposição e reduziu deriva.
X. Wang *et al.* (2024) – lichia	Quatro comerciais	Todos reduziram a tensão; três elevaram a deposição, mas a menor tensão não produziu a maior deposição.
Kannan *et al.* (2024) – área aberta	Alginato e polímero de feno-grego	Produziram gotas maiores e reduziram a fração de gotas finas; o segundo elevou a cobertura.
Cunha *et al.* (2024) – café	Óleo mineral e espalhante	O óleo aumentou a deposição, embora o espalhante reduzisse mais a tensão superficial.
Baek *et al.* (2025) – arroz	Lecitina a 1%	Com 75% da dose, reduziu a deriva fora do alvo em 2,62–3,16 vezes, elevou a deposição e manteve o controle.
B. Wang *et al.* (2025) – lichia	Óleo vegetal a 1%	Reduziu a deriva acumulada em 48,10% e a distância de 20 para 12 m; aumentou cobertura no dossel.
Rodrigues, Pelegrini e Ferreira (2026) – café	Óleos e surfactantes	Óleo vegetal elevou a deposição em 15–20%; maior depósito foliar não significou maior controle.

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos estudos selecionados.

Os efeitos físico-químicos foram específicos à combinação entre formulação e adjuvante (Liu *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2024; Zeeshan *et al.*, 2024). Em pimenta, quatro produtos reduziram a tensão superficial, mas Puliwang e AS-910N aumentaram mais a viscosidade; em algodão, formulações de acetamiprido e seis adjuvantes alteraram densidade, viscosidade, tensão, ângulo de contato e espalhamento de modos distintos (Liu *et al.*, 2022; Zeeshan *et al.*, 2024). Em milho, o polímero hiper-ramificado melhorou o molhamento e a deposição da formulação WG, enquanto o óleo vegetal não produziu ganho significativo com a formulação ULV (Zang *et al.*, 2021). Portanto, surfactante, óleo ou polímero não deve ser tratado como efeito uniforme independente da formulação (Zang *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2024).

A tensão superficial isolada foi insuficiente para prever a deposição no campo (X. Wang *et al.*, 2024; Cunha *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2024). Em lichia, o adjuvante com menor tensão não gerou a maior deposição; em café, o espalhante reduziu mais a tensão, enquanto o óleo mineral promoveu maior depósito foliar (X. Wang *et al.*, 2024; Cunha *et al.*, 2024). Em amendoim, as concentrações necessárias ao superespalhamento e à inibição do ressalto diferiram entre MO501, Silwet 408 e XL-70 (Sun *et al.*, 2024). A literatura selecionada quantificou principalmente tensão, viscosidade, densidade e ângulo de contato, enquanto pH, condutividade, compatibilidade, espuma e evaporação foram pouco avaliados de forma comparável, constituindo lacuna para caldas concentradas de drones (Liu *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2024; Zeeshan *et al.*, 2024).

O espectro de gotas respondeu à composição da calda e ao sistema de atomização, sem direção única entre classes (S. Wang *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2024; Kannan *et al.*, 2024). Óleos, silicones, ésteres e polímeros alteraram Dv0,1, Dv0,5, Dv0,9, amplitude relativa ou fração fina, mas o resultado dependeu da ponta, rotação, vazão e formulação associada (S. Wang *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2024). Polímeros de alginato e feno-grego produziram gotas maiores e reduziram a fração suscetível à deriva, enquanto diferentes concentrações de organossilicones e óleos modificaram simultaneamente espalhamento, ressalto e atomização (Kannan *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2024). Valores obtidos por difração a laser, papel hidrossensível, coletores e análise de imagem não são diretamente intercambiáveis (S. Wang *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022).

Deposição, cobertura, densidade e penetração representaram respostas distintas no dossel (Meng *et al.*, 2022; Dou *et al.*, 2023; Cunha *et al.*, 2024). Em citros, o organossilicone diminuiu o ângulo de contato e aumentou cobertura e diâmetro mediano, mas a resposta variou entre estratos e modelos de drone (Meng *et al.*, 2022). Em olmo, o modo autônomo para frutíferas e o Jiexiaofeng produziram efeito conjunto sobre densidade, depósito, uniformidade e penetração (Dou *et al.*, 2023). Em café, maior redução da tensão não coincidiu com maior deposição (Cunha *et al.*, 2024). Assim, cobertura elevada não equivale necessariamente a maior massa depositada, retenção ou distribuição no interior do dossel (Meng *et al.*, 2022; Dou *et al.*, 2023; Cunha *et al.*, 2024).

A mitigação de deriva ocorreu principalmente quando o adjuvante aumentou o diâmetro das gotas ou reduziu a fração fina, mas o efeito de campo permaneceu condicionado ao vento, à altura e ao dossel (Kannan *et al.*, 2024; Baek *et al.*, 2025; B. Wang *et al.*, 2025). Em arroz, lecitina a 1% associada a 75% da dose reduziu a deriva fora da faixa entre 2,62 e 3,16 vezes; em lichia, óleo vegetal a 1% reduziu a deriva acumulada em 48,10% e a distância máxima de 20 para 12 m (Baek *et al.*, 2025; B. Wang *et al.*, 2025). No trigo, alterações favoráveis no espectro em túnel não produziram diferença de deposição no campo, cujos coeficientes de variação superaram 30% (S. Wang *et al.*, 2022). Logo, resultado de atomização ou túnel não substitui a mensuração de deriva com o drone em operação (S. Wang *et al.*, 2022; Kannan *et al.*, 2024).

A resposta dos adjuvantes variou com volume, dose, configuração do drone e meteorologia (S. Wang *et al.*, 2022; Meng *et al.*, 2022; Rodrigues; Pelegrini; Ferreira, 2026). Altura, velocidade, faixa, vazão, tipo de ponta ou atomizador e fluxo descendente alteram o tempo de queda, a penetração e a exposição ao vento (Soares; Schröder, 2025). Além disso, dose por hectare, concentração percentual e quantidade no tanque não são equivalentes; em baixo volume, a concentração pode aumentar mesmo que a dose por área seja mantida (Zhao *et al.*, 2022a, 2022b). A calibração deve verificar compatibilidade da calda, espectro, cobertura, depósito e risco de escorrimento na mesma combinação de produto, adjuvante, volume e equipamento (Sun *et al.*, 2024; Zeeshan *et al.*, 2024).

A eficiência biológica somente foi demonstrada quando praga, doença ou resposta fisiológica foram medidas diretamente (Meng *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2022; X. Wang *et al.*, 2023; Dou *et al.*, 2023). Em trigo, pimenta, arroz e olmo, combinações específicas aumentaram controle ou desfolha junto com melhorias físicas (Meng *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2022; X. Wang *et al.*, 2023; Dou *et al.*, 2023). Em arroz, Wonderful Rosin e Tiandun a 0,5% elevaram uniformidade, penetração e controle, e no algodão houve interação entre formulação de acetamiprido e adjuvante (L. Wang *et al.*, 2024; Zeeshan *et al.*, 2024). Esses resultados não autorizam reduzir dose ou recomendar outra cultura sem repetir a avaliação biológica na combinação pretendida (Zhao *et al.*, 2022b; X. Wang *et al.*, 2023; L. Wang *et al.*, 2024).

A evidência brasileira direta ainda se concentrou no cafeeiro (Cunha *et al.*, 2024; Rodrigues; Pelegrini; Ferreira, 2026). O óleo mineral elevou a deposição mesmo quando o espalhante reduziu mais a tensão superficial; em outro ensaio, o óleo vegetal aumentou o depósito em 15-20%, porém o maior depósito foliar não correspondeu ao melhor controle da broca-do-café (*Hypothenemus hampei*). (Cunha *et al.*, 2024; Rodrigues; Pelegrini; Ferreira, 2026). A predominância de estudos asiáticos, a diversidade de produtos comerciais e a escassez de dados sobre pH, condutividade, evaporação, fitotoxicidade e estabilidade limitam generalizações. Pesquisas brasileiras devem integrar propriedades da calda, espectro, deposição, cobertura, deriva e eficácia em café, soja, milho, algodão, cana e frutíferas, com meteorologia e regulagens completas (Soares; Schröder, 2025).

Conclusão

Os adjuvantes podem modificar as propriedades da calda, o espectro de gotas, a deposição, a cobertura e a deriva em pulverizações com drones, sendo um fator auxiliador nas aplicações, mas os efeitos variam entre classes e produtos. Óleos, polímeros e lecitina apresentaram respostas recorrentes de maior deposição, aumento do tamanho das gotas ou menor deriva, enquanto surfactantes e organossilicones favoreceram o espalhamento sem assegurar maior retenção ou eficácia. Não existe adjuvante universalmente adequado. A seleção deve considerar composição, concentração, formulação fitossanitária, volume, sistema de atomização, regulagens do drone, meteorologia e arquitetura do dossel. A calibração específica e a validação no alvo são indispensáveis. A limitada evidência brasileira e a baixa padronização dos métodos exigem pesquisas que integrem propriedades físico-químicas, qualidade da aplicação, deriva e eficácia biológica em culturas e condições nacionais.

Referências

BAEK, J.-W. *et al.* Reduction of pesticide dosage and off-target drift with enhanced control efficacy in unmanned aerial vehicle-based application using lecithin adjuvants. **Pest Management Science**, v. 81, n. 8, p. 4831–4838, 2025.

BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Portaria MAPA nº 298, de 22 de setembro de 2021.

CUNHA, J. P. A. R. da *et al.* Spray deposition from an unmanned aerial vehicle on a coffee crop. **Engenharia Agrícola**, v. 44, art. e20240021, 2024.

DOU, Z. *et al.* Effects of spray adjuvants and operation modes on droplet deposition and elm aphid control using an unmanned aerial vehicle. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 16, n. 2, p. 1–9, 2023.

HU, H. *et al.* Tank-mix adjuvants enhance pesticide efficacy by improving physicochemical properties and spraying characteristics for application to cotton with unmanned aerial vehicles. **ACS Omega**, v. 9, n. 28, p. 31011–31025, 2024.

IBGE – **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. PAM 2024: com queda nos preços e na safra de grãos, valor da produção agrícola cai pelo segundo ano seguido. Rio de Janeiro: IBGE, 2025.

KANNAN, N. *et al.* Adjuvants for drone-based aerial chemical applications to mitigate off-target drift. **Drones**, v. 8, n. 11, art. 667, 2024.

LIU, Y. *et al.* Effect of aerial application of adjuvants on pepper defoliant droplet deposition and efficacy of defoliation sprayed by unmanned aerial vehicles. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, art. 917462, 2022.

MACIEL, C. M. de G.; GAZZIERO, D. L. P.; THEISEN, R.; BRIDI, L. G. H.; ADEGAS, F. S. **Tecnologia de aplicação de pesticidas**. Londrina: Embrapa Soja, 2025. 31 p.

MENG, Y. *et al.* Effect of aerial spray adjuvant applying on the efficiency of small unmanned aerial vehicle for wheat aphids control. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 11, n. 5, p. 46–53, 2018.

MENG, Y. *et al.* UAV spraying on citrus crop: impact of tank-mix adjuvant on the contact angle and droplet distribution. **PeerJ**, v. 10, art. e13064, 2022.

RODRIGUES, Anderson V.; PELEGRINI, Gabriela; FERREIRA, Marcelo C. Comparative efficacy of low-volume remotely piloted aircraft spraying with adjuvants for coffee berry borer control. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 30, n. 01, p. e291970, 2026.

SOARES, R. M.; SCHRÖDER, E. P. **Uso de drones agrícolas no Brasil: da pesquisa à prática**. Londrina: Embrapa Soja, 2025. 83 p, 2025.

SUN, Z. *et al.* Enhanced dosage delivery of pesticide under unmanned aerial vehicle condition for peanut plant protection: tank-mix adjuvants and formulation improvement. **Pest Management Science**, v. 80, n. 3, p. 1632–1644, 2024.

WANG, B. *et al.* Effect of vegetable oil adjuvant on wetting, drift, and deposition of pesticide droplets from UAV sprayers on litchi leaves. **Agronomy**, v. 15, n. 2, art. 293, 2025.

WANG, L. *et al.* Tank-mix adjuvants improved spray performance and biological efficacy in rice insecticide application with unmanned aerial vehicle sprayer. **Pest Management Science**, v. 80, p. 4371–4385, 2024.

WANG, S. *et al.* Effects of adjuvants on spraying characteristics and control efficacy in unmanned aerial application. **Agriculture**, v. 12, n. 2, art. 138, 2022.

WANG, X. *et al.* Effects of spray adjuvants on droplet deposition characteristics in litchi trees under UAV spraying operations. **Agronomy**, v. 14, n. 9, art. 2125, 2024.

WANG, X. *et al.* Evaluation of the droplet deposition and control effect of a special adjuvant for unmanned aerial vehicle (UAV) sprayers. **Journal of Pesticide Science**, v. 48, n. 3, p. 78–85, 2023.

ZANG, Y. *et al.* Optimization of aviation adjuvants based on wettability analysis for insecticide application on maize using UAV. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 14, n. 5, p. 11–18, 2021.

ZEESHAN, M. *et al.* Effect of formulations and adjuvants on the properties of acetamiprid solution and droplet deposition characteristics sprayed by UAV. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, art. 1441193, 2024.

ZHAO, R. *et al.* Effects of tank-mix adjuvants on physicochemical properties and dosage delivery at low dilution ratios for unmanned aerial vehicle application in paddy fields. **Pest Management Science**, v. 78, n. 4, p. 1582–1593, 2022a.

ZHAO, R. *et al.* Using tank-mix adjuvant improves the physicochemical properties and dosage delivery to reduce the use of pesticides in unmanned aerial vehicles for plant protection in wheat. **Pest Management Science**, v. 78, n. 6, p. 2512–2522, 2022b.