

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VINÍCIUS SOUZA SANTANA

Deposição e eficácia da aplicação de calda herbicida com aeronave remotamente pilotada em
função de taxas de aplicação e classes de gotas

Uberlândia
2026

VINÍCIUS SOUZA SANTANA

Deposição e eficácia da aplicação de calda herbicida com aeronave remotamente pilotada em função de taxas de aplicação e classes de gotas

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Fitotecnia, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Cleyton Batista de Alvarenga

Uberlândia
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S232d
2026 Santana, Vinícius Souza, 1999-
Deposição e eficácia da aplicação de calda herbicida com aeronave remotamente pilotada em função de taxas de aplicação e classes de gotas [recurso eletrônico] / Vinícius Souza Santana. - 2026.

Orientador: Cleyton Batista de Alvarenga.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Agronomia.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.5527>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Alvarenga, Cleyton Batista de, 1981-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Agronomia. III. Título.

CDU: 631

André Carlos Francisco - Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Secretaria da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia

Rodovia BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP
38400-902

Telefone: (34) 2512-6715/6716 - www.ppgagro.iciag.ufu.br - posagro@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 003/2026, PPGAGRO				
Data:	Dezenove de fevereiro de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	12412AGR013				
Nome do Discente:	Vinícius Souza Santana				
Título do Trabalho:	Deposição e eficácia da aplicação de calda herbicida com aeronave remotamente pilotada em função de taxas de aplicação e classes de gotas				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Produção Vegetal em Áreas de Cerrado				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: João Paulo Arantes Rodrigues da Cunha - UFU; Edson Aparecido dos Santos - UFU; Marconi Ribeiro Furtado Júnior - UFV; Cleyton Batista de Alvarenga - UFU - orientador do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. Cleyton Batista de Alvarenga, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu à(o) Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Essa dissertação possui mérito para ser indicada como destaque do Programa?

(x) SIM NÃO ()

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Cleyton Batista de Alvarenga, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/02/2026, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Paulo Arantes Rodrigues da Cunha, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/02/2026, às 11:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edson Aparecido dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/02/2026, às 13:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marconi Ribeiro Furtado Júnior, Usuário Externo**, em 19/02/2026, às 15:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7067434** e o código CRC **89C7A2D4**.

Referência: Processo nº 23117.009112/2026-61

SEI nº 7067434

RESUMO

SANTANA, Vinícius Souza. **Deposição e eficácia da aplicação de calda herbicida com aeronave remotamente pilotada em função de taxas de aplicação e classes de gotas.** 2026. 68 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2026.

A agricultura brasileira destaca-se no cenário global pela elevada produtividade e crescente adoção de tecnologias sustentáveis. Nesse contexto, as aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) emergiram como uma inovação tecnológica de rápida adoção para a aplicação de produtos fitossanitários. Porém, diversos questionamentos técnicos desafiam agricultores e profissionais no momento das recomendações para a aplicação de herbicidas. Objetivou-se avaliar como a taxa de aplicação (10, 20 e 150 L ha⁻¹) e classe de gota (média e grossa) influenciam na eficácia de controle de plantas daninhas promovida pela aplicação de glifosato + carfentrazone-etílica via RPA, com atomizadores rotativos, e pulverizador costal. Para isso, foram conduzidos dois experimentos a campo em área com forte presença de *Ipomoea triloba*, *Alternanthera tenella* e *Commelina benghalensis*. As análises da pulverização consistiram na avaliação do diâmetro da mediana volumétrica (DMV), da amplitude relativa (AR), do potencial risco de deriva (PRD), da densidade de gotas (gotas cm⁻²), da cobertura (%) e da deposição (µg cm⁻²). A eficácia de controle foi determinada por meio de atribuição de notas a campo (3, 7, 14, 21 e 28 DAA). Os resultados indicam que os atomizadores rotativos produziram gotas nas classes “Finas” e “Médias”. A taxa de 10 L ha⁻¹ igualou-se à taxa de 20 L ha⁻¹, na maioria das avaliações realizadas, especialmente no Experimento 2. As aplicações com RPA (10 e 20 L ha⁻¹) produziram DMV menor que 205,41 µm, enquanto que as pontas hidráulicas (GRD 120015 e ULD 120015), utilizadas nas aplicações terrestres (150 L ha⁻¹), produziram DMV maior que 484,59 µm. De maneira geral, ambos os métodos de aplicação resultaram em AR e densidade de gotas semelhantes. As aplicações aéreas apresentaram maior PRD (>24,94%) em relação às aplicações terrestres (<1,66%). As aplicações terrestres (>23,52%) promoveram coberturas superiores às das aplicações aéreas (<3,58%). Apesar das menores coberturas, as aplicações aéreas promoveram deposições semelhantes às das aplicações terrestres. Conclui-se, que as aplicações via RPA promoveram elevados níveis de controle (> 90%), assim como as aplicações terrestres.

PALAVRAS-CHAVE: drones; pulverização; tecnologia de aplicação.

ABSTRACT

SANTANA, Vinicius Souza. **Deposition and efficacy of herbicide spray application with a remotely piloted aircraft as a function of application rates and droplet sizes.** 2026. 68 p. Dissertation (Masters in Agronomy). Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2026.

Brazilian agriculture stands out on the global stage for its high productivity and increasing adoption of sustainable technologies. In this context, remotely piloted aircraft (RPAs) have emerged as a rapidly adopted technological innovation for the application of pesticides. However, several technical questions challenge farmers and professionals when it comes to herbicide application. This study aimed to evaluate the effects of application rate (10, 20, and 150 L ha⁻¹) and droplet size (medium and coarse) on the weed control efficacy of glyphosate + carfentrazone-ethyl applied using RPA equipped with rotary atomizers and a backpack sprayer. To this end, two field experiments were conducted in an area with high infestation of *Ipomoea triloba*, *Alternanthera tenella*, and *Commelina benghalensis*. Spray quality was characterized by evaluating the volumetric median diameter (VMD), relative span (RS), potential drift risk (PDR), droplet density (droplets cm⁻²), coverage (%), and deposition (µg cm⁻²). Weed control efficacy was determined by assigning field scores (3, 7, 14, 21, and 28 DAA). The results indicate that rotary atomizers produced droplets in the “Fine” and “Medium” classes. The application rate of 10 L ha⁻¹ was equal to the rate of 20 L ha⁻¹ in most evaluations, especially in Experiment 2. Applications with RPA (10 and 20 L ha⁻¹) produced a VMD lower than 205,41 µm, while hydraulic nozzles (GRD 120015 and ULD 120015), used in ground applications (150 L ha⁻¹), produced a VMD greater than 484,59 µm. In general, both application methods resulted in similar RA and droplet density. Aerial applications showed higher PDR (>24,94%) compared to ground applications (<1,66%). Ground applications (>23,52%) promoted higher coverage than aerial applications (<3,58%). Despite lower coverage, RPA promoted depositions similar to ground applications. In conclusion, RPA applications promoted high levels of control (> 90%), comparable to ground applications.

Key-words: drones; atomization; spray application technology.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1 Caracterização da área experimental	15
3.2 Delineamento experimental e tratamentos	16
3.3 Equipamentos e parâmetros da aplicação	17
3.5 Composição e preparo da calda herbicida	19
3.6 Variáveis analisadas	20
3.6.1 Tamanho de gotas	20
3.6.2 Deposição da calda	21
3.7 Eficácia de controle das plantas daninhas	23
3.8 Análises estatísticas	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 Espectro de gotas	26
4.1.1 Diâmetro da Mediana Volumétrica (DMV)	26
4.1.2 Amplitude Relativa (AR)	29
4.1.3 Potencial risco de deriva (PRD)	31
4.1.4 Densidade de gotas	34
4.1.5 Cobertura	38
4.1.6 Deposição	40
4.2 Eficácia de controle	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira destaca-se no cenário global pela elevada produtividade e crescente adoção de tecnologias sustentáveis (FAO, 2020; SILVA; CAVICHIOLI, 2020; BARBOSA, 2025). Nesse contexto, as aeronaves remotamente pilotadas (RPAs), conhecidas como drones de pulverização, emergiram como uma inovação tecnológica de rápida adoção. Sua utilização no manejo de pragas, doenças e plantas daninhas em diversas culturas tem demonstrado eficácia comparável à de métodos terrestres convencionais no controle de alvos fitossanitários (WANG *et al.*, 2019; MONTANHANI, 2023; SANDMANN *et al.*, 2025).

A aplicação terrestre de defensivos agrícolas, no Brasil, ainda é a mais utilizada (PROHUMA, 2018). Os agricultores já conhecem os bons resultados que as aplicações terrestres podem apresentar, em termos de eficácia, principalmente, pela alta cobertura do alvo biológico, em função das elevadas taxas de aplicação, e pelo menor risco de deriva (PEREIRA, 2023; SAFAEINEZHAD; GHASEMI-NEJAD-RAEINI; TAKI, 2025). No entanto, a modalidade de aplicação aérea via RPA tem ganhado popularidade por apresentar outras vantagens.

A introdução das RPAs, no Brasil, foi liderada por prestadores de serviço que adotaram a tecnologia, até então pouco difundida. Dessa forma, o conhecimento inicial sobre sua eficiência derivou primariamente de observações empíricas e da experiência prática de campo, antecedendo a consolidação de dados científicos. Nesse contexto, foram identificadas vantagens operacionais significativas das aplicações com RPAs em comparação aos métodos terrestres, como a ausência de compactação do solo, a redução no volume de água, a eliminação do amassamento da cultura e a viabilidade de operação em terrenos declivosos (SOARES; SCHRÖDER, 2025).

Essa fase inicial de adoção empírica foi crucial para impulsionar o desenvolvimento da tecnologia e demonstrar o potencial prático, estimulando o interesse da comunidade científica. Contudo, a validação por meio de metodologia científica rigorosa é fundamental para diagnosticar com precisão as limitações e qualidades da tecnologia, identificar necessidades de aprimoramento e, assim consolidar a confiabilidade e a eficácia das aplicações com RPAs (SOARES; SCHRÖDER, 2025).

Pesquisas adicionais com os drones de pulverização são imperativas para elucidar como os fatores da tecnologia de aplicação impactam a eficácia de controle dos alvos biológicos. É fundamental investigar a influência de parâmetros como taxa de aplicação, velocidade e altura de voo, diâmetro de gota, largura da faixa de deposição, compatibilidade de misturas e potencial

de deriva. Essas variáveis afetam diretamente os resultados de deposição, cobertura foliar, densidade de gotas e a uniformidade do espectro de pulverização. Adicionalmente, o setor de RPAs está em contínua evolução, com novos modelos sendo lançados periodicamente. Tal dinâmica reforça a necessidade de avaliações científicas constantes para caracterizar precisamente o desempenho dos equipamentos utilizados no campo.

A partir do ano de 2022, uma inovação técnica relevante nos sistemas de pulverização de RPAs foi a introdução de atomizadores rotativos em substituição às tradicionais pontas de pulverização hidráulicas (SOARES; SCHRÖDER, 2025). Esses componentes, constituídos por discos giratórios, permitem modular o diâmetro das gotas por meio da variação na velocidade de rotação, visando otimizar a aplicação para diferentes alvos. As RPAs equipadas com essa tecnologia foram desenvolvidas com o objetivo de gerar espectros de gotas mais uniformes e, conseqüentemente, aprimorar a eficácia no controle dos alvos biológicos (BAIO *et al.*, 2025; YANG *et al.*, 2023). Contudo, a literatura científica sobre o desempenho dos atomizadores rotativos em condições de campo ainda é incipiente, o que torna fundamental a condução de estudos que avaliem esses novos equipamentos (AHRENS; HERBST; WEGENER, 2025).

Dentre as operações relacionadas à aplicação de produtos fitossanitários, uma das mais importantes é a aplicação de herbicidas dessecantes. Frequentemente, tais operações envolvem misturas em tanque de herbicidas sistêmicos e de contato, como a associação entre glifosato e carfentrazone-etílica (QUADROS *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2025). Contudo, a otimização da pulverização para essa mistura apresenta um desafio técnico devido a recomendações de bula aparentemente conflitantes. A bula do Roundup Transorb® (glifosato) preconiza gotas grossas para mitigar o risco de deriva, enquanto a do Aurora® (carfentrazone-etílica) recomenda o maior tamanho de gota possível sem prejudicar a cobertura e eficiência. Considerando que, de acordo com Prado *et al.* (2024), a eficácia de herbicidas de contato é geralmente favorecida por gotas de menor diâmetro, que proporcionam maior cobertura, emerge um paradoxo técnico. Essa dificuldade é agravada pela carência de informações sobre o espectro de gotas efetivamente gerado pelos novos atomizadores rotativos sob diferentes configurações.

A taxa de aplicação é outro fator que influencia diretamente a eficácia de herbicidas (KAUR *et al.*, 2024). As RPAs caracterizam-se por operar com baixos volumes de calda, normalmente entre 10 e 30 L ha⁻¹. Existe uma tendência operacional de reduzir ainda mais esse volume para maximizar a autonomia de voo e a capacidade de trabalho das aeronaves (ALVES *et al.*, 2025). Contudo, uma redução excessiva na taxa de aplicação pode resultar em cobertura

inadequada do alvo, comprometendo a eficácia no controle de plantas daninhas (SHAN *et al.*, 2021).

Nas aplicações terrestres, as altas taxas de aplicação utilizadas promovem elevada cobertura do alvo, e, quando combinadas com gotas de diâmetro reduzido, resultam em alta densidade de gotas e podem melhorar a performance dos defensivos agrícolas, principalmente os de contato (PRADO *et al.*, 2024). No entanto, de acordo com Cunha e Silva (2023) as aplicações terrestres podem promover maior escoamento da calda para solo, o que pode levar a perda de ingredientes ativos e interferir negativamente no resultado de controle.

Portanto, com as novas tecnologias embarcadas nas RPAs faz-se necessárias mais pesquisas para a compreensão da eficiência desses equipamentos quanto a uniformidade de deposição de produtos fitossanitários, quando comparados às aplicações terrestres. Diante disso, o presente estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o controle de plantas daninhas, após a aplicação de calda herbicida via RPA com atomizadores rotativos e via pulverizador costal, com diferentes taxas de aplicação e tamanhos de gota.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A interferência imposta por plantas daninhas é um dos fatores de maior impacto sobre a produtividade agrícola e a sustentabilidade dos sistemas de produção. Ao competirem com as culturas por recursos essenciais, como água, luz, nutriente e espaço, e ao atuarem como hospedeiras de pragas e doenças, causam prejuízos diretos, como redução de estande, produtividade e qualidade do produto (FRIED *et al.*, 2017; SALOMÃO, 2022). A fase de estabelecimento inicial do cultivo, que engloba a semeadura e a emergência, é particularmente crítica. A ausência de plantas daninhas nesse período é crucial para garantir que a cultura expresse seu máximo potencial produtivo (BRIGHENTI; OLIVEIRA 2011).

A relevância do controle químico no Brasil é evidenciada por dados de mercado. Em 2024, os herbicidas corresponderam a 45% de um mercado de produtos fitossanitários que movimentou aproximadamente US\$ 18 bilhões (SINDIVEG, 2026). Mais recentemente, dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) indicam que o consumo de herbicidas no país atingiu 492.445,11 toneladas em 2022 (FAO, 2022). Esse volume substancial destaca a importância desta ferramenta nas estratégias de manejo de plantas daninhas adotadas pelos agricultores brasileiros.

A predominância do controle químico no Brasil é explicada por um conjunto de vantagens operacionais e econômicas. Os herbicidas oferecem amplo espectro, flexibilidade na

época de aplicação, ação residual prolongada e rapidez na operação. Adicionalmente, proporcionam elevado rendimento operacional e demandam menor mão de obra em comparação a outros métodos de manejo.

Contudo, a eficácia e a sustentabilidade do controle químico dependem da observância de princípios técnicos rigorosos: o produto deve ser utilizado na dose correta, no momento adequado de forma econômica e com mínimo risco ambiental (MATUO, 1990). O campo de estudo que se dedica a otimizar esses fatores é a tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários (GRIESANG; FERREIRA, 2021).

A tecnologia de aplicação é o conjunto de informações que propicia maior qualidade no controle de pragas, doenças e plantas daninhas, e melhor eficiência nas aplicações. Essas informações referem-se à regulagem e calibração de pulverizadores, que englobam aspectos relacionados ao tamanho de gotas, velocidade de trabalho, altura da barra em relação ao alvo, pressão de trabalho, taxa de aplicação, condições meteorológicas no momento da aplicação, composição da calda, características do alvo e habilitação dos operadores (GRIESANG; FERREIRA, 2018; CAVENAGHI; CARBONARI, 2019).

No Brasil, os pulverizadores terrestres configuram-se como a principal tecnologia para a distribuição de herbicidas, fungicidas e inseticidas. Um ponto positivo dessa modalidade de aplicação é a pequena distância (0,5 m) entre a barra e as plantas, o que minimiza a ocorrência de deriva (MUNIZ *et al.*, 2024). Além disso, as elevadas taxas utilizadas nas aplicações terrestres combinadas com diâmetros de gotas reduzidos têm a tendência de promover um incremento na densidade de gotas depositadas no alvo, o que pode aumentar a performance dos defensivos agrícolas (WANG *et al.*, 2019; PEREIRA, 2023; PRADO *et al.*, 2024). No entanto, seu uso apresenta algumas desvantagens conhecidas, como dispersão desigual dos produtos, a exposição dos operadores a substâncias tóxicas, danos mecânicos às culturas, limitações operacionais em terrenos declivosos e perda de produto por escorrimento (OLIVEIRA *et al.*, 2025).

Em resposta às limitações das aplicações terrestres, o uso de RPAs, ou drones, tornou-se uma prática crescente na agricultura brasileira, desde 2015. Essa tecnologia oferece vantagens como a potencial redução do custo operacional, a viabilidade de aplicações em áreas declivosas, a execução de operações localizadas, a eliminação de perdas por amassamento da cultura e a minimização do contato do operador com defensivos agrícolas (SALATTA JÚNIOR, 2023).

Inicialmente, as RPAs agrícolas eram equipamentos de pequeno porte, com depósitos de aproximadamente 10 litros. Com a popularização da tecnologia, foram desenvolvidos

modelos com maior capacidade de armazenamento (SCHRÖDER; BURKERT, 2023). Atualmente, entre as principais RPAs de pulverização, destacam-se os modelos da linha AGRAS (DJI), como o T10, T20P, T25, T30, T40, T50, T75 e T100, que apresentam capacidade de tanque progressivamente maior (JUNIOR *et al.*, 2025).

Apesar das vantagens apresentadas, a eficiência das aplicações com RPAs ainda é questionável no cenário científico mundial (RICHARDSON *et al.*, 2020). A eficácia do controle e a eficiência operacional são diretamente influenciadas por fatores como altura e velocidade de voo, tamanho de gota, taxa de aplicação e propriedades da calda. O manejo inadequado desses parâmetros eleva o risco de deriva, o que pode resultar em danos a culturas suscetíveis e contaminação ambiental (CUNHA *et al.*, 2021; CUNHA; SILVA, 2023).

As aplicações com RPAs, naturalmente, ocorrem a uma distância maior entre o ponto de saída da calda pulverizada e o alvo comparado com as aplicações terrestres, o que dificulta a deposição das gotas onde é desejado. Alturas de voo acima de dois metros aumentam o risco de deriva e podem promover baixa uniformidade de distribuição da solução aplicada (HUSSAIN *et al.*, 2019; SHI *et al.*, 2024). No entanto, alturas de voo próximas de um metro podem ser prejudiciais, comprometendo, também, a uniformidade de distribuição, além de aumentar os riscos de perda para o solo, ao dificultar a retenção pela camada foliar, em função do excesso de vento vertical gerado pelos rotores, efeito conhecido como “downwash” (YANG *et al.*, 2018; HU *et al.*, 2021).

Além de ajustar a altura de voo, escolher a tecnologia de geração de gotas adequada, com uma maior uniformidade de tamanho, pode ser uma alternativa para ter uma melhor distribuição da calda e maior controle da deposição dos produtos aplicados (LI *et al.*, 2022). Diversas tecnologias podem ser usadas para a produção de gotas na pulverização agrícola, sendo as principais delas as pontas hidráulicas e os atomizadores rotativos. As pontas hidráulicas são as mais utilizadas por apresentarem baixo custo e mecanismo de funcionamento simples (as gotas são formadas quando o líquido pressurizado passa pelo orifício de saída). No entanto, pontas hidráulicas produzem gotas de tamanhos desuniformes, com amplitude relativa elevada. Diante desse inconveniente, estudos recentes mostram que os atomizadores rotativos vêm sendo adaptados nas RPAs e podem melhorar a uniformidade das gotas, levando a uma deposição mais precisa da calda (BAIO *et al.*, 2025; YANG *et al.*, 2023).

A escolha de um tamanho de gota que garanta a eficácia dos herbicidas e a eficiência da aplicação é difícil, pois é necessário escolher o maior tamanho de gota possível, com o objetivo de evitar perdas por deriva e evaporação e, ao mesmo tempo, o menor tamanho possível que seja suficiente para garantir uma boa cobertura e penetração no dossel das plantas

(ANTUNIASSI; BOLLER, 2019). De maneira geral, para herbicidas sistêmicos recomenda-se a utilização de gotas grossas e para herbicidas de contato gotas finas. No entanto, com a maior utilização de mistura de herbicidas sistêmicos e de contato em tanque torna-se desafiador estabelecer uma recomendação em relação ao tamanho de gota a ser empregada nas aplicações.

A mistura de herbicidas é prática indispensável para aumentar o espectro de controle, controlar plantas resistente e de difícil controle, como *Ipomoea* spp. e *Commelina benghalensis*. Diante disso, a literatura mostra que a aplicação em mistura ou isolada dos herbicidas glifosato (sistêmico) e carfentrazone-etílica (contato), por exemplo, tem apresentado elevada eficácia de controle dessas espécies e de outras como *Alternanthera tenella*, as quais são comumente encontradas em diversas regiões do Brasil (AGOSTINETO *et al.*, 2016; CARNEIRO, 2021; PERISSATO *et al.*, 2023; SANTOS *et al.*, 2025).

A mobilidade dos herbicidas nas plantas é determinante para a escolha de fatores relacionados à tecnologia de aplicação, como a taxa de aplicação e o tamanho de gota. Esses dois fatores influenciam, consideravelmente, a densidade de gotas e a cobertura do alvo requerida. A eficácia dos herbicidas imóveis, por exemplo, também conhecidos como de contato, tende a ser potencializada com maiores taxas de aplicação e menores tamanhos de gotas, por garantir uma maior cobertura das plantas pela calda aplicada (SHAN *et al.*, 2021). Em contrapartida, a taxa de aplicação e o tamanho de gota não interferem com mesma intensidade na eficácia dos herbicidas móveis ou sistêmicos, pois uma menor cobertura nesse caso ainda permite que o produto consiga ser absorvido e redistribuído na planta, desempenhando o papel de controle (VAZ, 2022).

Quanto à taxa de aplicação, em RPAs, volumes reduzidos de calda têm sido adotados, porém tal procedimento ter impacto negativo na eficiência da aplicação e na eficácia dos defensivos agrícolas, principalmente quando utilizados em mistura, por comprometer a solubilidade e aumentar os riscos de incompatibilidades físicas e químicas (GAZZIERO, 2021). Estudos mostram, também, que quanto menor a taxa, menor a densidade de gotas, o que pode culminar em menores porcentagens de área de folha coberta, prejudicando a eficácia de produtos de contato (ÖNLER *et al.*, 2023).

É evidente que as RPAs podem ser mais vantajosas em relação aos pulverizadores terrestres, em determinadas situações. No entanto, são muitos os fatores que influenciam, simultaneamente, a eficiência das aplicações aéreas. Richardson *et al.* (2020) relataram que apesar da crescente utilização das RPAs nas operações de pulverização agrícola, ainda existem muitas dúvidas sobre como manipular cada variável e obter o melhor desempenho dessa tecnologia.

A interação entre taxa de aplicação e diâmetro de gota interfere na qualidade da aplicação com RPA, quando avaliada por parâmetros como deposição das gotas, cobertura e densidade de gotas (SHAN *et al.*, 2021). A necessidade de aprimorar as aplicações aéreas é corroborada por outros autores, que recomendam priorizar pesquisas sobre penetração no dossel, deposição de gotas, cobertura e controle de deriva. Adicionalmente, aponta-se como desafio a escassez de operadores qualificados que compreendem os parâmetros que governam a qualidade da aplicação e a eficácia dos produtos (CHEN *et al.*, 2021).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi composto por dois experimentos conduzidos a campo, na mesma área, porém em épocas diferentes. Os Experimentos 1 e 2 foram realizados nos dias 18 de janeiro e 11 de abril de 2025, respectivamente. As instalações ocorreram na Fazenda Experimental do Glória, pertencente à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em Uberlândia - MG, sob as coordenadas geográficas 18°57'19,60" S e 48°12'39,60" W, a uma altitude média de 879 m.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw (tropical úmido), caracterizado por verão quente e chuvoso e inverno frio e seco, com precipitação média anual de 1.500-1.600 mm (RODRIGUES; LIMA, 2019).

A área experimental apresentava infestação natural e predominante de *Ipomoea triloba* (Corda-de-viola) e *Alternanthera tenella* (Apaga-fogo), com ocorrência em reboleiras de *Commelina benghalensis* (Trapoeraba). No dia das aplicações do Experimento 1, as plantas apresentavam altura média entre 10 e 15 cm. Para o Experimento 2, as plantas estavam em estágio mais avançado, com altura entre 15 e 25 cm e maior densidade foliar (Figura 1).

Figura 1 - Áreas dos experimentos 1 (A) e 2 (B)



(A)

(B)

Fonte: O Autor, 2026.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

Os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado (DIC). Os tratamentos foram arranjados em um esquema fatorial $2 \times 2 + 2$, com oito repetições. Os fatores avaliados na aplicação com RPA foram: 1) taxa de aplicação, em dois níveis (10 e 20 L ha^{-1}); e 2) diâmetro de gota, em duas configurações nominais (média e grossa). Os dois tratamentos adicionais corresponderam à aplicação terrestre com pulverizador costal, na taxa de aplicação de 150 L ha^{-1} também com gotas médias e grossas.

As parcelas para os tratamentos com RPA (T1 a T4) mediram 20 m de largura por 40 m de comprimento (800 m^2) (Figura 2). Para os tratamentos terrestres com o pulverizador costal pressurizado com CO_2 (T5 e T6), as parcelas mediram 8 m de largura e 40 m de comprimento (320 m^2). Cada parcela representou um tratamento, com suas respectivas repetições (8) no interior. Um experimento com RPA exige a utilização de parcelas maiores, o que inviabiliza a execução do experimento em blocos (LOPES, 2024). Outros autores utilizaram arranjo experimental semelhante (MENG *et al.*, 2018; LOPES, 2024). Para as avaliações, foi estabelecida uma área útil central em cada parcela, desconsiderando-se bordaduras de 5,0 m nas extremidades das parcelas que receberam aplicação via RPA e 1,0 m em todos os lados para as parcelas que receberam aplicações terrestres. A descrição detalhada dos tratamentos é apresentada na Tabela 1.

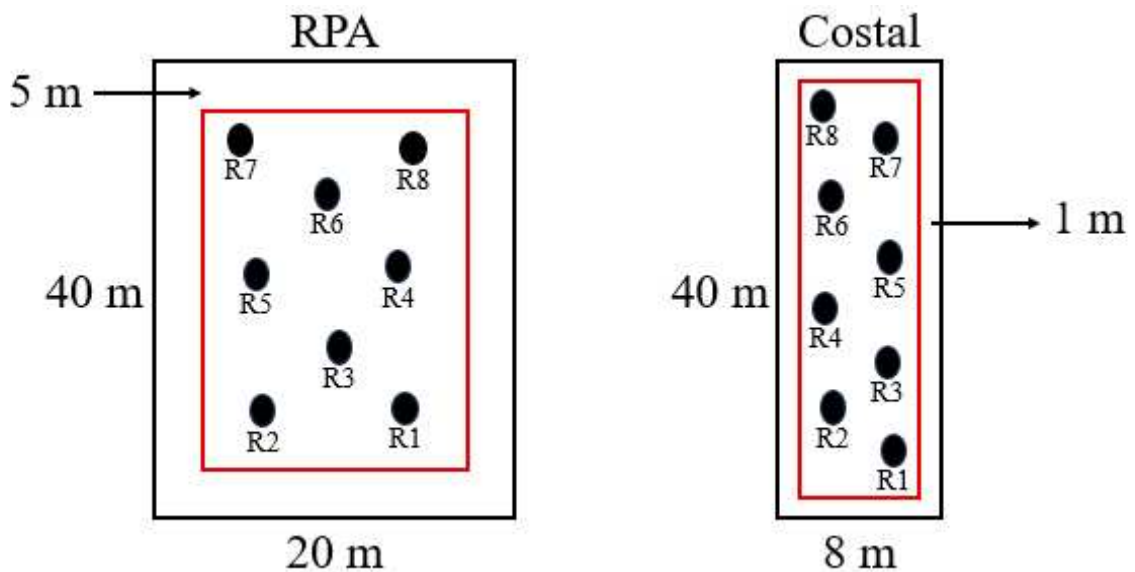
Tabela 1 - Descrição dos tratamentos

Tratamento:	Elemento pulverizador / Ponta	Método de Aplicação	Classe de gota*	Taxa de Aplicação (L ha ⁻¹)
1	Atomizador	Aérea (RPA)	Média	10
2	Atomizador	Aérea (RPA)	Grossa	10
3	Atomizador	Aérea (RPA)	Média	20
4	Atomizador	Aérea (RPA)	Grossa	20
5	GRD 120015	Terrestre	Média	150
6	ULD 120015	Terrestre	Grossa	150

*Para RPA o tamanho de gota foi definido pelo controle, no momento do planejamento de voo. Para o equipamento costal, o tamanho é correspondente à pressão de trabalho informada no catálogo do fabricante.

Fonte: O Autor, 2026.

Figura 2 – Croqui das parcelas para RPA (T1 a T4) e pulverizador costal (T5 e T6)



Fonte: O Autor, 2026.

3.3 Equipamentos e parâmetros da aplicação

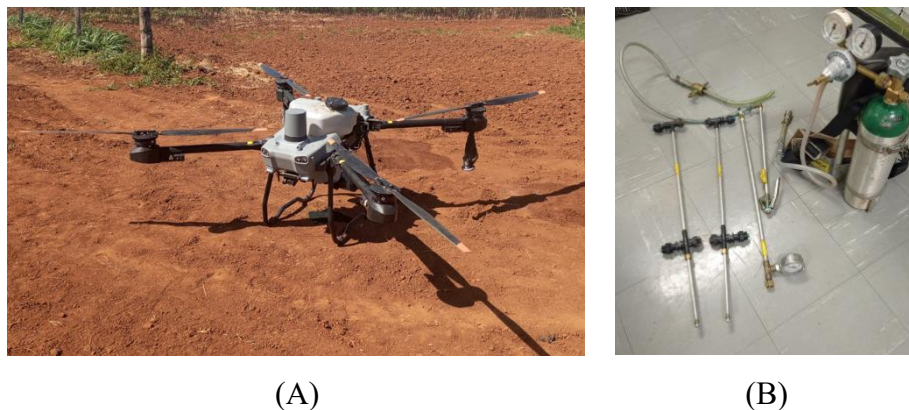
A aplicação aérea foi realizada com uma RPA modelo Agras T25 (DJI, Shenzhen, China), equipada com dois atomizadores rotativos (Tabela 2 e Figura 3A).

Tabela 2 – Especificações da aeronave remotamente pilotada

Parâmetro	Descrição
Método de Operação	Controle remoto
Dimensões (mm)	2585 x 2675 x 780 (medidas com braços e hélices desdobrados)
Sistema de pulverização	Atomização dupla
Capacidade do tanque (L)	20
Número de bicos rotativos	2
Faixa de aplicação (m)	4 a 7 (a uma altura de 3 metros da cultura)
Velocidade máxima operacional (km h ⁻¹)	36
Modo de posicionamento	GPS + Galileo + BeiDou* ou manual

Fonte: DJI, 2024.

Figura 3 – Equipamentos de pulverização



(A) Aeronave remotamente pilotada AGRAS T25; (B) Pulverizador costal pressurizado com CO₂.

Fonte: O Autor, 2026.

O plano de voo foi pré-programado utilizando o controle remoto do equipamento. Os parâmetros operacionais foram: velocidade de voo de 15 km h⁻¹, altura de voo de 3,0 m em relação ao dossel das plantas daninhas e largura da faixa de deposição de 4,0 m.

A aplicação terrestre foi realizada com um pulverizador costal pressurizado com CO₂ (Figura 3B), operando com pressão constante de 200 kPa. A barra de pulverização possuía 2,0 m de largura, com quatro pontas de jato plano espaçadas a 0,5 m. Os modelos utilizados foram Guardian™ GRD 120015, de jato plano com pré-orifício, e Ultra Lo-Drift™ ULD 120015, de jato plano com indução de ar, para gotas médias e grossas, respectivamente (Hypro, Gonden

Valley, EUA). A velocidade de trabalho do operador foi de 3,96 km h⁻¹, e a altura da barra foi mantida a 0,5 m acima do alvo.

Em todos os tratamentos, as aplicações foram realizadas no sentido Leste (90°) – Oeste (270°), no sistema “back-to-back” para cobrir a área da parcela. Nos Experimentos 1 e 2, a direção do vento foi, em média, de 297° (Noroeste) e 220° (Sudoeste), respectivamente, caracterizando uma condição de vento lateral.

3.4 Condições meteorológicas

Os parâmetros meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento) foram monitorados durante cada aplicação com um termo-higroanemômetro digital portátil (KR825, Akrom®, São Leopoldo, Brasil). Os dados médios para cada tratamento e experimento são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições meteorológicas durante as aplicações

Condições meteorológicas	Experimento 1					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Temperatura média (°C)	29,60	27,20	29,70	29,20	29,60	29,20
Umidade relativa do ar média (%)	77,00	82,00	78,85	83,80	56,50	60,00
Velocidade do vento mínima (km h ⁻¹)	1,98	5,69	5,00	4,50	3,78	2,48
Velocidade do vento máxima (km h ⁻¹)	5,0	7,78	11,00	16,00	5,29	4,00
Velocidade do vento média (km h ⁻¹)	3,35	6,66	10,22	9,61	4,54	3,24
Condições meteorológicas	Experimento 2					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Temperatura média (°C)	25,30	27,30	28,40	27,10	29,90	29,50
Umidade relativa do ar média (%)	73,60	77,50	74,50	77,60	56,50	55,90
Velocidade do vento mínima (km h ⁻¹)	2,20	1,80	2,38	1,62	3,38	4,03
Velocidade do vento máxima (km h ⁻¹)	3,00	3,71	5,76	6,12	5,62	12,60
Velocidade do vento média (km h ⁻¹)	1,70	2,41	4,32	4,50	4,54	7,52

Fonte: O Autor, 2026.

3.5 Composição e preparo da calda herbicida

Foram preparadas três caldas distintas para atender às diferentes taxas de aplicação (10, 20 e 150 L ha⁻¹). Todas as caldas continham as mesmas doses de herbicidas. A composição incluiu: 1) herbicida sistêmico Roundup Transorb® (Bayer, São José dos Campos/SP, Brasil), à

base de sal de potássio de glifosato (588 g L^{-1}) e equivalente ácido de glifosato (480 g L^{-1}), na dose de $2,5 \text{ L ha}^{-1}$; 2) herbicida de contato Aurora[®] 400 EC (FMC Corporation, Middleport, 14105, New York, EUA), à base de carfentrazone-etílica (400 g L^{-1}), na dose de $0,075 \text{ L ha}^{-1}$; 3) adjuvante Argenfrut[®], que consiste em uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos, ciclo parafínicos e aromáticos saturados e insaturados provenientes da destilação do petróleo, à base de óleo mineral ($845,75 \text{ g L}^{-1}$) (Belisario Roldán, 2601 – 1744 La Reja Moreno, Buenos Aires, Argentina), na concentração de 0,5% v/v; e 4) Traçador corante alimentício Azul Brillhante (FD&C Blue n.1) (Duas Rodas, Jaraguá do Sul, Brasil), na dose de $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$, para as análises de deposição.

3.6 Variáveis analisadas

3.6.1 Tamanho de gotas

Para caracterizar o tamanho de gotas de cada tratamento, foram posicionadas etiquetas de papel hidrossensível (26 x 76 mm, Syngenta[®], Basileia, Suíça) na área útil de cada parcela, uma por repetição, presas sobre as folhas superiores das plantas daninhas. Após a pulverização e secagem, as etiquetas foram coletadas, acondicionadas em envelopes identificados e digitalizadas. A análise foi realizada com o software DropScope[®] (SprayX, São Carlos, Brasil) para determinar os seguintes parâmetros: diâmetro da mediana volumétrica (DMV), amplitude relativa (AR ou Span), densidade de gotas, cobertura da pulverização e a porcentagem do volume de gotas com diâmetro inferior a $100 \mu\text{m}$ (v100), (Figura 4).

Figura 4 – Papel hidrossensível grampeado na folha de uma planta daninha



Fonte: O Autor, 2026.

3.6.2 Deposição da calda

A quantificação da deposição foi realizada coletando-se toda a biomassa vegetal presente em oito pontos aleatórios por parcela, utilizando um gabarito metálico de 25 x 25 cm (0,0625 m²) (Figura 5). As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos identificados e armazenadas em caixas térmicas.

Figura 5 – Gabarito para delimitação de área amostrada.



Fonte: O Autor, 2026.

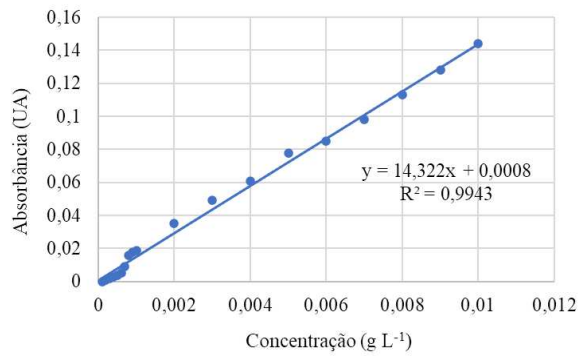
No laboratório, 150 mL de água destilada foram adicionados a cada saco plástico. A extração do traçador foi por agitação em mesa pendular (TE-240/I, Tecnal, Piracicaba, Brasil) a 250 rpm por 15 minutos. A concentração do corante Azul Brilhante na solução de lavagem foi determinada por espectrofotometria (SP-22, Bioespectro, Curitiba, Brasil), com lâmpada de tungstênio-halogênio, e cubetas de vidro de 3,5 mL com caminho óptico de 10 mm, que permitiu a determinação da absorbância no comprimento de onda de 630 nm.

A calibração foi estabelecida a partir de soluções padrão com concentrações conhecidas do corante (de 0,1 a 10 mg L⁻¹) para converter os valores de absorbância (y) em concentração (x, g L⁻¹) (Figura 6A, 6B e 6C).

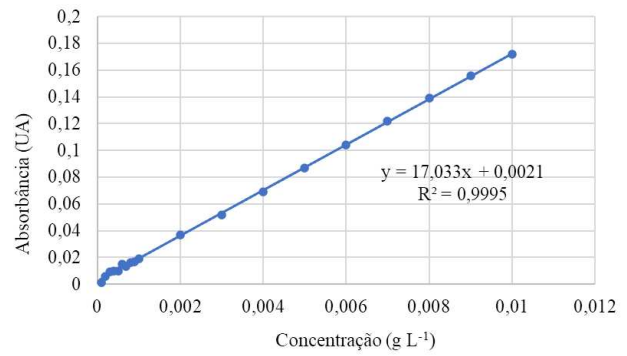
Figura 6 - Diluições a partir da solução de concentração de corante conhecida (A) e curvas de calibração (B e C)



(A)



(B)



(C)

B: Experimento 1; C: Experimento 2.
Fonte: O Autor, 2026.

A área foliar de cada amostra foi determinada com um medidor de área foliar (LI-3100C, LI-COR[®], Lincoln, EUA). A deposição, foi calculada utilizando a Equação 1:

$$\text{Deposição } (\mu\text{g cm}^{-2}) = \frac{C_i * V_i}{A} \quad (1)$$

Onde: C_i é a concentração do traçador na solução de lavagem ($\mu\text{g L}^{-1}$) de cada amostra, V_i é o volume de lavagem (L) de cada amostra e A é a área foliar da amostra (cm^2).

3.7 Eficácia de controle das plantas daninhas

A eficácia de controle das plantas daninhas foi avaliada visualmente aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação (DAA). Foram atribuídas notas gerais de controle com base na escala percentual proposta pela Asociación Latino Americana de Malezas (ALAM, 1974), onde 0% representa ausência de controle e 100% representa a morte total das plantas (Tabela 4).

Tabela 4 – Escala da ALAM utilizada para avaliação da eficácia de controle de plantas daninhas

Classe de porcentagem (%)	Nota e conceito de controle
0 - 40	1 - Nenhum a pobre
41 - 60	2 - Regular
61 - 70	3 - Suficiente
71 - 80	4 - Bom
81 - 90	5 - Muito bom
91 - 100	6 - Excelente

Fonte: ALAM, 1974.

3.8 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para um DIC, conforme os princípios de modelos lineares (BANZATTO; KRONKA, 1995; PIMENTEL-GOMES, 2000). Os pressupostos de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk), homogeneidade das variâncias (Bartlett) e independência dos resíduos (Durbin-Watson) foram verificados. Quando os pressupostos foram atendidos (p -valor $> 0,05$), o teste F foi seguido pela comparação de médias pelo teste de Tukey (p -valor $\leq 0,05$). Quando os pressupostos não foram atendidos, mesmo após transformação de dados (raiz quadrada ou logarítmica), utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (MORAIS, 2001).

Adicionalmente, a variabilidade da deposição foi monitorada por meio de gráficos de controle para medidas individuais e de amplitude móvel, seguindo a metodologia de Controle Estatístico de Processos (BIEGEL *et al.*, 2022; MONTGOMERY, 2017). As análises foram conduzidas no software R 4.2.2 (R CORE TEAM, 2020) e os gráficos de controle no Minitab® 16.2 (MINITAB INC., 2010).

O gráfico de controle individual é constituído pelos limites de controle inferior (LCL) e superior (UCL), e a linha central, que são calculados conforme as Equações 2, 3 e 4.

$$UCL = \bar{x} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2)$$

$$\text{Linha central} = \bar{x} \quad (3)$$

$$LCL = \bar{x} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (4)$$

Em que:

UCL = limite de controle superior;

\bar{x} = média das observações;

\overline{MR} = média das amplitudes móveis de duas observações;

d_2 = valor tabulado dependente do número de observações;

LCL = limite de controle inferior.

As Equações 5 e 6 foram utilizadas para o cálculo da média das amplitudes.

$$\overline{MR} = \frac{MR_1 + MR_2 + \dots + MR_m}{m} \quad (5)$$

$$MR = |x_i - x_{i-1}| \quad (6)$$

Em que:

MR = amplitude móvel;

x = observação.

Para a confecção dos gráficos de controle da variabilidade, utilizando a amplitude móvel, os quais também apresentam os limites superior e inferior e a linha central, foram utilizadas as Equações 7, 8 e 9.

$$UCL = D_4 \overline{MR} \quad (7)$$

$$\text{Linha central} = \overline{MR} \quad (8)$$

$$LCL = D_3 \overline{MR} \quad (9)$$

Em que:

D_4 e D_3 = são valores tabulados dependente do número de observações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Espectro de gotas

4.1.1 Diâmetro da Mediana Volumétrica (DMV)

O Diâmetro da Mediana Volumétrica (DMV) é um dos parâmetros que caracteriza o processo de pulverização. A análise dos tratamentos com a RPA revela um ponto crítico para a pesquisa: a capacidade de modular o DMV foi inconsistente entre os experimentos. No Experimento 2, a alteração da configuração de “Média” para “Grossa”, no controle da RPA, produziu um aumento significativo do DMV em 18%, validando que o equipamento pode alterar o tamanho de gotas. No entanto, essa diferença não foi observada no Experimento 1 (Tabela 5).

Tabela 5 – Medianas do diâmetro da mediana volumétrica obtidas pela aplicação de calda herbicida (glifosato + carfentrazona etílica) via RPA, com duas taxas de aplicação e duas configurações de classe de gota

Taxa de aplicação (L ha ⁻¹)	Experimento 1	Experimento 2
	DMV (µm)	DMV (µm)
10	169,75 a	185,12 a
20	202,88 a	182,57 a
Configuração da classe de gota		
Média	190,22 a	169,75 b
Grossa	185,12 a	200,36 a
Pressupostos	<i>W=0,92; B=39,22; DW=2,33</i> <i>W=0,83; B=37,87; DW=1,88</i>	

Medianas seguidas por letras distintas, na coluna, diferem-se pelo teste de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$). W, B e DW: estatísticas dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, Bartlett para homogeneidade de variâncias e Durbin-Watson para independência dos resíduos, respectivamente. Valores em negrito indicam pressupostos atendidos ($\alpha = 0,05$).

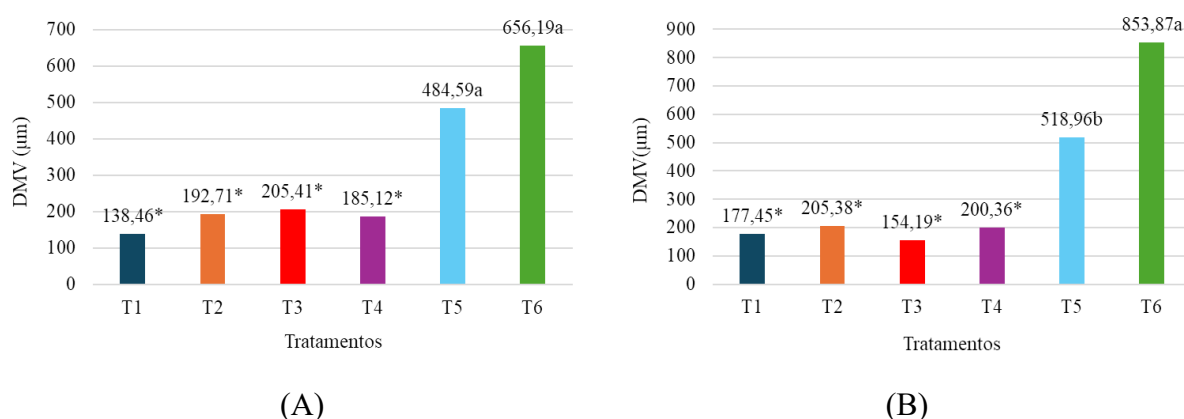
Fonte: O Autor, 2026.

Essa inconsistência pode ser atribuída à limitação metodológica de amostragem, em condições de campo, ou seja, a análise com papéis sensíveis apenas contabilizou as gotas que os atingiram. Conforme Wu, Yang e Lin (2025), o papel hidrossensível tem baixa precisão para determinar o tamanho de gotas. Mas é uma ferramenta útil para condições de campo e de fácil acesso para avaliar a aplicação.

Adicionalmente, em ambos os experimentos, a alteração da taxa de aplicação (10 e 20 L ha⁻¹) não teve efeito significativo sobre o DMV. Este resultado está alinhado com o princípio do funcionamento dos atomizadores rotativos. Como concluíram Baio *et al.* (2025), a variação do tamanho da gota neste sistema é significativamente mais influenciada pela rotação do disco do que pela taxa de aplicação. Isso representa uma vantagem operacional, permitindo o ajuste do volume de calda sem alterar drasticamente o tamanho de gotas.

O contraste mais expressivo, contudo, surge na comparação com a tecnologia terrestre (Figura 7). Enquanto todos os tratamentos da RPA geraram gotas na classe "Fina" a "Média" (<205 µm), os tratamentos terrestres com pontas de redução de deriva produziram um espectro na classe "Muito Grossa" a "Extremamente Grossa" (>484 µm) de acordo com a análise do DropScope®. Além disso, as pontas GRD 120015 e ULD 120015 apresentaram DMVs semelhantes, no Experimento 1, e diferentes no Experimento 2.

Figura 7 - Diâmetro da mediana volumétrica (DMV) promovido por RPA e aplicações terrestres



(A) = Experimento 1; (B) = Experimento 2. Medianas seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$); T1 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota "Média" (RPA); T2 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota "Grossa" (RPA); T3 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota "Média" (RPA); T4 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota "Grossa" (RPA); T5 - 150 L ha⁻¹ e gota média (Terrestre); T6 - 150 L ha⁻¹ e gota grossa (Terrestre); *: com diferença significativa em relação aos tratamentos T5 e T6, pelo teste de Kruskal-Wallis.

Fonte: O Autor, 2026.

Os resultados mostram que confiar na calibração de fábrica ou na seleção nominal de gotas disponível no controle da RPA pode induzir a erros de aplicação, com consequências diretas para a eficiência da aplicação, a eficácia do controle e a segurança ambiental. Na prática, conforme demonstrado nos experimentos, um operador que seleciona "Grossa" esperando mitigar riscos pode, na verdade, estar realizando uma aplicação com uma classe de gotas mais fina do que a pretendida.

Para além da observação direta de que as aplicações terrestres geraram gotas maiores, uma análise mais profunda revela três implicações críticas que devem ser destacadas.

Primeiramente, a magnitude da diferença é categórica: os tratamentos terrestres (T5 e T6) produziram um DMV consistentemente 2,5 a 4 vezes superior ao dos tratamentos com RPA. Em segundo lugar, os resultados demonstram a robustez e repetibilidade da tecnologia terrestre. Observa-se que o DMV para T5 e T6 são notavelmente estáveis entre os experimentos, sugerindo menor sensibilidade às variações das condições meteorológicas entre os ensaios. Em contraste, a performance dos tratamentos da RPA mostrou maior variabilidade entre os experimentos. Por fim, as pontas GRD 120015 e ULD 120015 foram eficientes em produzir um espectro de gotas de baixo risco, conferindo ao operador flexibilidade na escolha da ponta sem comprometer o objetivo primário de controle de deriva.

O DMV produzido pelos bicos centrífugos, na RPA, foi significativamente menor que o DMV produzido pelas pontas hidráulicas, o que corrobora outras pesquisas, na literatura. Zhu *et al.* (2024) e Jiaxun *et al.* (2024) obtiveram DMV variando de 60 a 145 μm , com os bicos centrífugos trabalhando em rotações de 6.000 a 12.000 rpm. Em contrapartida, Wang *et al.* (2023a) e Yang *et al.* (2023), relataram que os bicos centrífugos utilizados nesses estudos produziram DMV de 277,3 e 315,22 μm , sob rotações de 4.000 e 600 rpm, respectivamente. Fica evidente que a alteração da classe de gota nas RPA com atomizadores rotativos varia conforme a rotação do disco. No entanto, neste estudo, possivelmente, as configurações de gota “Média” e “Grossa”, na aeronave utilizada, não conseguem fazer com que a rotação do disco seja ideal para produzir de fato gotas de classe “Grossa”, principalmente.

Em contrapartida, Lopes (2024) relatou que o DMV produzido por uma ponta hidráulica, em aplicação terrestre, foi de 436 μm . A autora, também, comentou que de acordo com o catálogo da ponta estudada a classe de gota deveria variar de “Finas” a “Grossas”, no entanto, apresentou espectro na classe “Grossa” a “Muito Grossa”. Diante disso, justificou que a avaliação com papéis hidrossensíveis pode superestimar o DMV por subestimar as gotas finas, o que também pode ter ocorrido nesta pesquisa para os tratamentos terrestres. Além disso, Gibbs, Peters e Heck (2021) explicaram que, apesar de as aplicações terrestres produzirem, geralmente, gotas maiores que as RPAs, nem sempre promoverão maiores controles fitossanitários, porque isso depende, também, do mecanismo de ação dos produtos.

Na aplicação de herbicidas de contato via RPA, por exemplo, a utilização de gotas de classe “Fina” a “Média” tende a promover maior eficácia de controle em comparação com as de classe “Grossa”, por promover maior uniformidade de distribuição das gotas e maior cobertura do alvo. No entanto, segundo Richardson *et al.* (2020), a escolha da classe de gotas para aplicação de herbicidas via RPA, principalmente, deve ser cautelosa, buscando elevar a eficácia de controle e, ao mesmo tempo, minimizar o risco da exoderiva. Por isso, em situações

adversas nas condições meteorológicas deve-se optar pela utilização de gotas de classe “Grossa”.

Para a aplicação terrestre, Prado *et al.* (2024) encontraram que gotas de classe “Fina” promoveram os maiores níveis de controle de plantas daninhas, na aplicação de glufosinato. No entanto, alertaram que a utilização de gotas maiores, como médias e grossas, pode ser uma boa opção para aliar redução do risco de deriva e boa eficácia de controle, mesmo na aplicação do herbicida de contato utilizado. Além disso, Butts *et al.* (2018) afirmaram que o aumento no tamanho das gotas leva a uma redução na eficácia de controle, mas, nas aplicações terrestres, o elevado volume de calda tende a minimizar o efeito do tamanho da gota, por isso, gotas de classes “Média” e “Grossa” mantêm um alto nível de controle de plantas daninhas, mesmo estando sujeitas a promover maior escoamento de princípios ativos para o solo.

4.1.2 Amplitude Relativa (AR)

A amplitude relativa (AR), ou Span, é um parâmetro que representa a uniformidade do espectro de gotas, em que valores menores indicam maior homogeneidade. A análise dos fatores da RPA buscou verificar se a alteração da taxa de aplicação ou da configuração de gota impactaria essa uniformidade. Os resultados indicam que não houve diferença na AR para nenhum dos fatores, em ambos os experimentos. Isso sugere uma consistência na qualidade do espectro de gotas gerado pela aeronave, independentemente dos ajustes de taxa ou de rotação dos atomizadores (Tabela 6).

Tabela 6 - Médias e medianas da amplitude relativa obtida pela aplicação da calda herbicida (glifosato + carfentrazona etílica) com RPA (DJI T25), empregando-se duas taxas de aplicação e duas configurações de classe de gotas

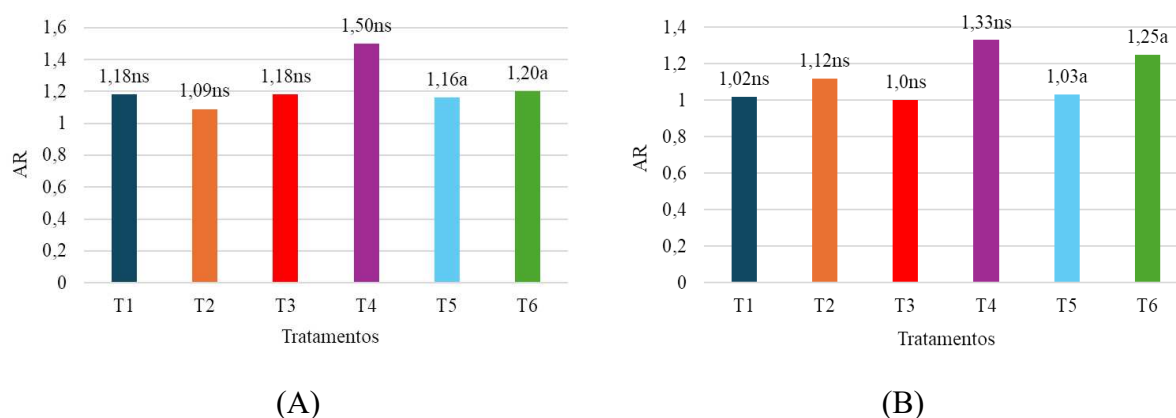
Taxa de aplicação (L ha ⁻¹)	Experimento 1	Experimento 2
	AR ¹	AR ²
10	1,13 a	1,04 a
20	1,34 a	1,15 a
Configuração da Classe de gota		
Média	1,18 a	1,0 a
Grossa	1,29 a	1,25 a
Pressupostos	<i>W = 0,97; B = 10,5; DW = 2,09</i> <i>W = 0,89; B = 37,0; DW = 1,86</i>	

¹Médias e ²Medianas seguidas por letras minúsculas iguais, na coluna, não diferem-se pelo teste de Tukey e pelo teste de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$), respectivamente; *W*, *B* e *DW*: estatísticas dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, Bartlett para homogeneidade de variâncias e Durbin-Watson para independência dos resíduos, respectivamente; Valores em negrito indicam pressupostos atendidos ($\alpha = 0,05$).

Fonte: O Autor, 2026.

Após a análise da uniformidade do espectro gerado pelos atomizadores rotativos embarcados na RPA, o passo seguinte foi comparar essa característica com pontas hidráulicas, na aplicação terrestre. O objetivo foi determinar se o atomizador rotativo apresenta uma vantagem mensurável sobre pontas hidráulicas na AR (Figura 8).

Figura 8 - Amplitude relativa (AR) promovida por RPA e aplicações terrestres



(A) Experimento 1; (B) Experimento 2. Médias (A) e medianas (B) seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey e Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$), respectivamente; T1 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); T2 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); T3 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); T4 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); T5 - 150 L ha⁻¹ e gota média (Terrestre); T6 - 150 L ha⁻¹ e gota grossa (Terrestre); ns: sem diferença significativa em relação aos tratamentos T5 e T6 (A = Dunnett; B = Kruskal-Wallis).

Fonte: O Autor, 2026.

Inicialmente, para os tratamentos com a RPA, não houve diferença na uniformidade do espectro de gotas ao alterar a taxa de aplicação ou a configuração da classe de gota, em ambos

os experimentos. Os valores de AR mantiveram-se consistentes na faixa de 1,0 a 1,34. Tal resultado que está de acordo com os dados de outras pesquisas com atomizadores rotativos (WANG *et al.*, 2020; BAIO *et al.*, 2025).

Os parâmetros de uniformidade do espectro de gotas apresentaram equivalência estatística entre as modalidades de aplicação. Esses resultados indicam que a vantagem teórica frequentemente atribuída aos atomizadores rotativos, no que se refere à uniformidade do espectro de gotas, não se converteu em vantagem prática mensurável nas condições avaliadas, o que pode estar relacionado à limitação metodológica com papéis hidrossensíveis.

Como implicação, a adoção da tecnologia RPA com atomizadores rotativos, em detrimento de uma aplicação terrestre tecnicamente otimizada, não deve se basear exclusivamente na premissa de maior qualidade ou uniformidade de pulverização. A escolha entre os métodos de aplicação deve considerar critérios adicionais, como eficiência logística, acessibilidade operacional e velocidade de trabalho, em vez de uma suposta superioridade absoluta na qualidade do espectro de gotas.

Esses resultados não indicam desempenho inferior da RPA, mas refletem a evolução das pontas hidráulicas avaliadas. As pontas GRD 120015, com pré-orifício, e ULD 120015, com indução de ar, produziram espectros de gotas altamente uniformes em condições de campo, evidenciando o avanço da engenharia dessas pontas. Lopes (2024) relatou resultados semelhantes ao avaliar a amplitude relativa do espectro de gotas gerado por diferentes pontas hidráulicas.

4.1.3 Potencial risco de deriva (PRD)

A análise do Potencial Risco de Deriva (PRD), refere-se à porcentagem do volume aplicado formado por gotas menores que 100 μm e é uma referência à segurança ambiental da aplicação. Este parâmetro está ligado ao DMV, além de ser um indicador direto da probabilidade de perdas do produto para fora da área-alvo. Os resultados indicam que não houve interação entre os fatores, em ambos os experimentos. A diferenciação entre as configurações de classe de gota foi significativa apenas no Experimento 2, em que a configuração "Média" resultou em um PRD 39,5% maior do que a "Grossa" (Tabela 7).

Tabela 7 - Médias e medianas do potencial risco de deriva obtido pela aplicação de calda herbicida (glifosato + carfentrazona etílica) via RPA, com duas taxas de aplicação e duas configurações de classe de gota

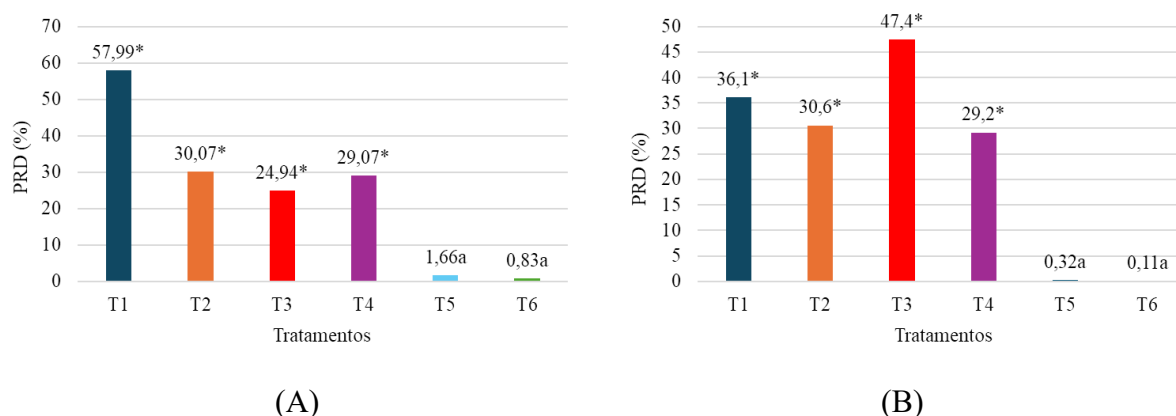
Taxa de aplicação (L ha ⁻¹)	Experimento 1	Experimento 2
	PRD ² (%)	PRD ^{1,3} (%)
10	35,19 a	33,3 a
20	28,32 a	38,3 a
Configuração da classe de gota		
Média	31,0 a	41,7 a
Grossa	29,07 a	29,9 b
Pressupostos	$W = 0,92$; $B = 62,1$; $DW = 1,50$	$W = 0,98$; $B = 5,13$; $DW = 2,42$

¹Médias e ²Medianas seguidas por letras minúsculas iguais, na coluna, não diferem-se pelo teste de Tukey e pelo teste de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$), respectivamente; W , B e DW : estatísticas dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, Bartlett para homogeneidade de variâncias e Durbin-Watson para independência dos resíduos, respectivamente; Valores em negrito indicam pressupostos atendidos ($\alpha = 0,05$). ³Transformação logarítmica.

Fonte: O Autor, 2026.

Uma vez caracterizado o risco de deriva inerente aos parâmetros da RPA, a comparação com a tecnologia terrestre torna-se indispensável para dimensionar a segurança relativa de cada sistema. A análise subsequente destaca a diferença entre o PRD observado nas aplicações aéreas e nas aplicações terrestres (Figura 9).

Figura 9 – Potencial risco de deriva (PRD) promovido por RPA e aplicações terrestres



(A) = Experimento 1; (B) = Experimento 2. Médias (B) e medianas (A) seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey e Kruskal Wallis ($\alpha = 0,05$), respectivamente; T1 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); T2 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); T3 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); T4 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); T5 - 150 L ha⁻¹ e gota média (Terrestre); T6 - 150 L ha⁻¹ e gota grossa (Terrestre); *: com diferença significativa em relação aos tratamentos T5 e T6 (A = Kruskal-Wallis; B = Dunnet).

Fonte: O Autor, 2026.

O PRD variou de 28,32% a 38,3%, sem diferença entre as taxas de 10 e 20 L ha⁻¹. A variação da taxa de aplicação pouco interfere no DMV do espectro de gotas produzido pelos bicos rotativos. Logo, as taxas de 10 e 20 L ha⁻¹, também, possivelmente não foram suficientes para interferir de maneira significativa na produção de gotas menores que 100 µm. Baio *et al.* (2025) observaram que o PRD é mais influenciado pela variação da rotação do bico centrífugo do que pela variação da taxa aplicada. Logo, quanto maior a rotação, mais gotas menores que 100 µm são produzidas.

Para as diferentes configurações de classe de gota, no experimento 1, os PRDs foram próximos. Mas como os DMVs, também foram parecidos, a análise dos papéis hidrossensíveis, possivelmente, detectou quantidade de gotas menores que 100 µm semelhantes. No entanto, no experimento 2, a configuração de gota média apresentou um PRD 39,5% maior que a configuração de gota grossa. Esse resultado deve-se ao fato de que, provavelmente, a maior rotação do bico centrífugo produziu maior quantidade de gotas menores que 100 µm, na configuração de gota média. Além disso, as melhores condições de velocidade do vento, nesse experimento, podem ter contribuído para que essas gotas atingissem os papéis hidrossensíveis e fossem contabilizadas, elevando o PRD.

Pode-se dizer que os valores de PRD das aplicações aéreas foram altos, indicando uma alta probabilidade de deriva. Cunha *et al.* (2003) sugeriram que para aplicações mais seguras, com menores riscos de deriva, é ideal que a quantidade de gotas menores que 100 µm não ultrapasse 15% do volume pulverizado. A literatura mostra que aplicações com RPAs apresentam elevado risco de deriva. Wang *et al.* (2020) avaliaram o risco de deriva em uma aplicação via RPA com atomizadores rotativos e encontraram taxas de deriva entre 23,8% e 35,5%.

Wang *et al.* (2023a) compararam a taxa de deriva acumulada entre uma aplicação com RPA equipada com atomizadores rotativos e RPA equipada com pontas hidráulicas, em túnel de vento, e concluíram que a uma velocidade do vento de 12,6 km h⁻¹ e mesmo DMV, a RPA de atomizadores rotativos apresentou 90,1% de taxa de deriva acumulada, enquanto a RPA com pontas hidráulicas apresentou 40,6%. Wang *et al.* (2020) conduziram um experimento e verificaram que em rotações acima de 7.000 rpm as gotas menores que 100 µm superaram 15% do volume pulverizado. Os autores explicaram que altas rotações dos atomizadores rotativos têm a tendência de produzir maior quantidade de gotas menores que 100 µm, aumentando o risco de deriva. No entanto, outra característica que pode promover o aumento da deriva com esse tipo de bico é a projeção horizontal das gotas, com menor velocidade vertical descendente.

Quanto às pontas hidráulicas utilizadas nas aplicações terrestres, ambas mostraram que podem promover baixo risco de deriva. A ponta GRD 120015 é uma ponta de jato plano com pré-orifício, caracterizada por reduzir a pressão do líquido no bocal, resultando em menor produção de gotas com diâmetro inferior a 100 μm . A ponta ULD 120015 promove a incorporação de ar dentro das gotas, aumentando o diâmetro dessas e reduzindo o potencial de deriva (MCGINTY *et al.*, 2024).

Mcginty *et al.* (2016) avaliaram o espectro de gotas produzido por uma ponta hidráulica com pré-orifício, a qual promoveu PRDs de 1% e 3,6%, nas pressões de trabalho de 207 e 414 kPa. De maneira semelhante, Wang *et al.* (2023b) obtiveram PRDs de 2,30% e 2,77%, nas pressões de 300 e 400 kPa, com pontas de indução de ar, com classe de gota “Grossa”. Kramer e Legleiter (2022), avaliaram o PRD da ponta ULD 12005, a qual promoveu 2,2% do volume com gotas menores que 200 μm . Os autores concluíram que as pontas com pré-orifício e com indução de ar são excelentes opções para a redução do potencial de deriva, o que pode potencializar a ação de herbicidas e manter bons níveis de controle de plantas daninhas.

Para além das diferenças estatísticas, os resultados da Tabela 7 e da Figura 8 revelam uma implicação pragmática importante deste estudo, a existência de uma relação fundamental entre as duas técnicas de aplicação. Mesmo na sua configuração mais otimizada (gota "Grossa"), a RPA produziu um PRD próximo a 30%. Em contraste, as pontas terrestres de redução de deriva apresentaram um risco quase nulo. Contudo, é crucial interpretar este resultado não como uma condenação da tecnologia, mas sim como um chamado à máxima responsabilidade profissional. O alto risco inerente da técnica transfere para o operador a obrigação de certificar-se rigorosamente de que todas as variáveis, desde a regulagem e calibração do equipamento e a seleção da classe de gotas até as condições meteorológicas em tempo real, sejam gerenciadas com o máximo rigor para garantir uma aplicação segura.

4.1.4 Densidade de gotas

A densidade de gotas quantifica o número de impactos no alvo, sendo crucial para a ação da carfentrazona-etílica, um dos componentes da calda aplicada. Investigou-se como as taxas de aplicação e as classes de gota configuradas na RPA influenciaram este parâmetro. No experimento 1, a taxa de 20 L ha⁻¹ produziu uma densidade de gotas 2,18 vezes maior que a taxa de 10 L ha⁻¹. Enquanto as duas configurações de gotas promoveram densidades próximas, nos dois experimentos (Tabela 8).

Tabela 8 – Medianas das densidades de gotas obtidas pela aplicação da calda herbicida (glifosato + carfentrazona etílica) com RPA (DJI T25), empregando-se duas taxas de aplicação e duas configurações de classe de gota

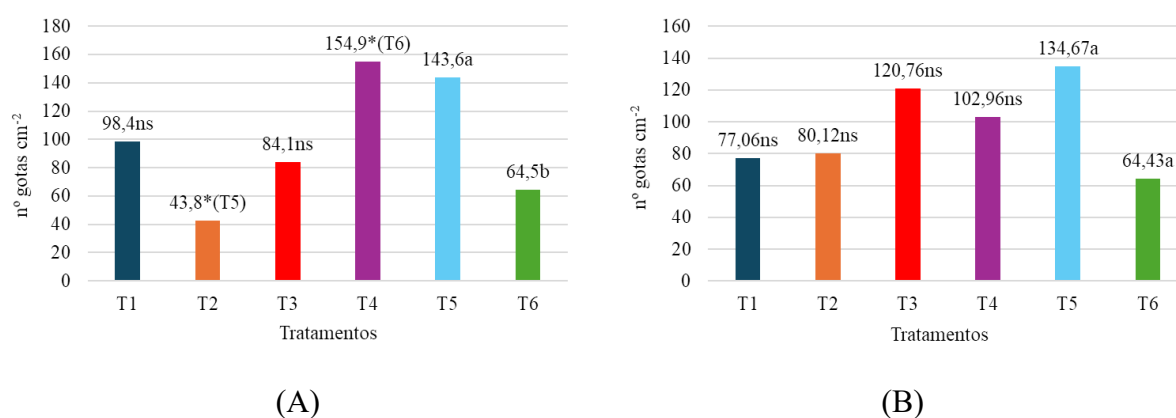
Taxa de aplicação (L ha ⁻¹)	Experimento 1	Experimento 2
	Den (gotas cm ⁻²)	Den (gotas cm ⁻²)
10	43,8 b	80,1 a
20	95,6 a	120,8 a
Configuração da classe de gota		
Média	90,2 a	113,3 a
Grossa	75,3 a	80,1 a
Pressupostos	$W = 0,97$; B= 11,1; $DW = 1,98$ $W = 0,93$; B= 16,6; $DW = 2,09$	

Medianas seguidas por letras distintas, na coluna, diferem-se pelo teste de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$). W, B e DW: estatísticas dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, Bartlett para homogeneidade de variâncias e Durbin-Watson para independência dos resíduos, respectivamente. Valores em negrito indicam pressupostos atendidos ($\alpha = 0,05$).

Fonte: O Autor, 2026.

Após a definição da resposta da densidade de gotas aos parâmetros da RPA, com atomizadores rotativos, a comparação com a tecnologia terrestre, com pontas hidráulicas, torna-se natural. Esta análise compara a maior quantidade de gotas, teoricamente, gerada por um DMV menor (RPA) contra o efeito de um volume de calda 7,5 a 15 vezes superior (terrestre). O objetivo é responder se a aplicação em baixo volume da RPA, produzindo gotas de menor tamanho, consegue produzir um número de impactos no alvo equivalente ao de uma aplicação terrestre de alto volume (Figura 10).

Figura 10 – Densidade de gotas promovida por RPA e aplicações terrestres



(A) Experimento 1; (B) Experimento 2. Medianas seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$); T1 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); T2 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); T3 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); T4 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); T5 - 150 L ha⁻¹ e gota média (Terrestre); T6 - 150 L ha⁻¹ e gota grossa (Terrestre); *(T5): diferença

significativa em relação ao tratamento T5 (Kruskal-Wallis); *(T6); diferença significativa em relação ao tratamento T6 (Kruskal-Wallis); ns: sem diferença significativa em relação aos tratamentos T5 e T6 (Kruskal-Wallis).
Fonte: O Autor, 2026.

Shan *et al.* (2021) concluíram que a quantidade de gotas tende a aumentar com o aumento da taxa de aplicação. Esse comportamento, também, foi identificado, no experimento 1, desta pesquisa, com a RPA.

Quanto às configurações da classe de gota, ambas produziram quantidades de gotas iguais, variando de 75,27 a 113,28 gotas cm^{-2} , nos tratamentos via RPA. Como foi mencionado, as configurações “Média” e “Grossa” produziram espectros de gotas nas classes “Finas” e “Médias” no papel sensível. No entanto, ao avaliar o DMV, de maneira geral, as gotas apresentaram tamanhos próximos, o que pode ter contribuído para que a densidade de gotas fosse semelhante, entre as duas configurações estudadas. Apesar disso, na literatura, é comum encontrar a informação de que reduzir o tamanho das gotas tende a aumentar sua densidade, elevando a eficácia dos produtos de contato, principalmente, por aumentar a chance de as gotas atingirem o alvo. Mas alguns autores alertaram que essa prática pode potencializar o risco de deriva, provocando a perda de princípios ativos para o ambiente (FERGUSON *et al.*, 2018; RODRIGUES *et al.*, 2023; SHAN *et al.*, 2021).

A análise da densidade de gotas revela uma relação complexa e variável entre as tecnologias de aplicação (RPA vs. terrestre) quando se comparam os dois experimentos. No Experimento 1, a performance da RPA foi heterogênea: enquanto o tratamento T2 apresentou a menor densidade de gotas, o T4 alcançou a maior, com ambos diferindo dos tratamentos terrestres. Adicionalmente, na própria abordagem terrestre, a ponta GRD (T5) promoveu uma densidade de gotas 1,23 vezes maior que a da ponta ULD (T6), confirmando a diferença entre as duas pontas neste cenário. Em contraste, o Experimento 2 demonstrou equivalência estatística. Neste ensaio, todos os tratamentos via RPA geraram densidades de gotas (77 a 121 gotas cm^{-2}) que não diferiram das aplicações terrestres (64 a 135 gotas cm^{-2}), as quais também se igualaram.

Embora a redução do volume aplicado diminua a densidade de gotas, a concomitante redução do tamanho da gota atua em sentido oposto, o que pode promover um aumento do número de impactos por unidade de área. No entanto, esse comportamento nem sempre foi observado, nesta pesquisa. No experimento 1, por exemplo, a menor densidade de gotas promovida pelo T2 em relação ao T5 pode ser explicada pelo fato de se tratar de um tratamento aplicado com a menor taxa (10 L ha^{-1}). Aliado a isso, dentre os tratamentos aplicados com esse volume, foi durante a aplicação do T2 que ocorreu a maior velocidade do vento (Tabela 3), o

que pode ter diminuído a quantidade de gotas que atingiram o alvo, em função da deriva, gerando a diferença encontrada em relação ao T5, nesta análise.

A maior densidade de gotas promovida pelo T4 em relação ao T6 no experimento 1 pode ser explicada, principalmente, pela maior empregada na RPA (20 L ha⁻¹). Associado a isso, dentre os tratamentos aplicados com esse volume, foi o T4 que produziu o menor DMV (185,12 µm), enquanto o T6 (656,19 µm) produziu um DMV 3,5 vezes maior. Esse resultado corrobora outros autores que concluíram que mesmo com uma baixa taxa de aplicação, a redução do tamanho da gota, na RPA, pode impactar em maiores quantidades de gotas que atingem o alvo, igualando ou superando os altos volumes das aplicações terrestres (CHEN *et al.*, 2021; GABRIEL *et al.*, 2025).

No experimento 2, de maneira geral, todos os tratamentos com RPA promoveram densidades de gotas semelhantes às aplicações terrestres, variando de 64,43 a 120,76 gotas cm⁻². Esse é um resultado positivo, pois sugere que as aplicações via RPA podem equiparar-se às aplicações terrestres na quantidade de gotas que atingem o alvo, o que pode promover eficácias de controles semelhantes.

Nas aplicações terrestres, a ponta GRD promoveu populações de gotas que variaram entre 134,67 e 143,6 gotas cm⁻², enquanto a ponta ULD produziu densidade de gotas próximo a 64 gotas cm⁻². A maior densidade de gotas promovida pela ponta GRD, no experimento 1, no entanto, reforça mais uma vez que aplicações com gotas menores podem produzir mais gotas por unidade de área, quando a taxa de aplicação se mantém inalterada (MUR *et al.*, 2020).

A análise aprofundada da densidade de gotas revela um paradoxo da tecnologia RPA e suas implicações práticas. Por um lado, a equivalência de densidade entre a RPA (10-20 L ha⁻¹) e a aplicação terrestre (150 L ha⁻¹) no Experimento 2 é um resultado de destaque. Isso demonstra a eficiência de atomização dos bicos rotativos, que compensam o volume de calda menor com uma produção maior de gotas, se destacando em termos de eficiência hídrica e logística. Por outro lado, a inconsistência de performance da RPA entre os experimentos (Figura 10) representa um risco agrônômico, especialmente para herbicidas de contato como a carfentrazone-etílica, cuja eficácia depende diretamente de uma densidade de gotas alta. Por isso, embora a RPA possua potencial para uma deposição eficiente, sua confiabilidade em campo é mais imprevisível do que a da tecnologia terrestre.

De acordo com Gazziero *et al.* (2001), para a aplicação de herbicidas pós-emergentes de contato recomenda-se uma densidade entre 30 e 50 gotas cm⁻² e para os herbicidas pós-emergentes de ação sistêmica entre 20 e 30 gotas cm⁻². Então, neste estudo, todos os tratamentos apresentaram potencial para proporcionar um controle eficiente das plantas daninhas,

independente do equipamento de pulverização utilizado. Contudo, é imperativo contextualizar esta recomendação clássica. O limiar de 20-50 gotas cm^{-2} foi estabelecido sob o paradigma de aplicações terrestres com volumes de calda maiores. A equivalência biológica de uma gota gerada por baixo volume via RPA, com maior concentração de ingrediente ativo, mas menor volume e energia cinética individual, com uma gota de aplicação terrestre é um campo que carece de investigação. Portanto, embora o limiar numérico de impactos tenha sido atingido, a eficácia biológica de cada impacto individual não pode ser assumida como idêntica entre as técnicas de aplicação, um fator que será melhor elucidado pelos dados de eficácia de controle.

4.1.5 Cobertura

Após a análise da densidade, procedeu-se a determinação do percentual de cobertura do alvo, parâmetro que integra o tamanho e o número de gotas. A investigação destacou como os parâmetros operacionais da RPA (taxa de aplicação e configuração da classe de gota) influenciaram na área coberta. Os resultados demonstram uma influência limitada e inconsistente destes fatores, com a taxa de 20 L ha^{-1} promovendo uma cobertura 2 vezes maior que a taxa de 10 L ha^{-1} , no experimento 1, e a classe de gota não apresentando impacto significativo, em nenhum dos experimentos (Tabela 9).

Tabela 9 – Médias das coberturas obtidas pela aplicação da calda herbicida (glifosato + carfentrazona-etílica) com RPA (DJI T25), empregando-se duas taxas de aplicação e duas configurações de classe de gota

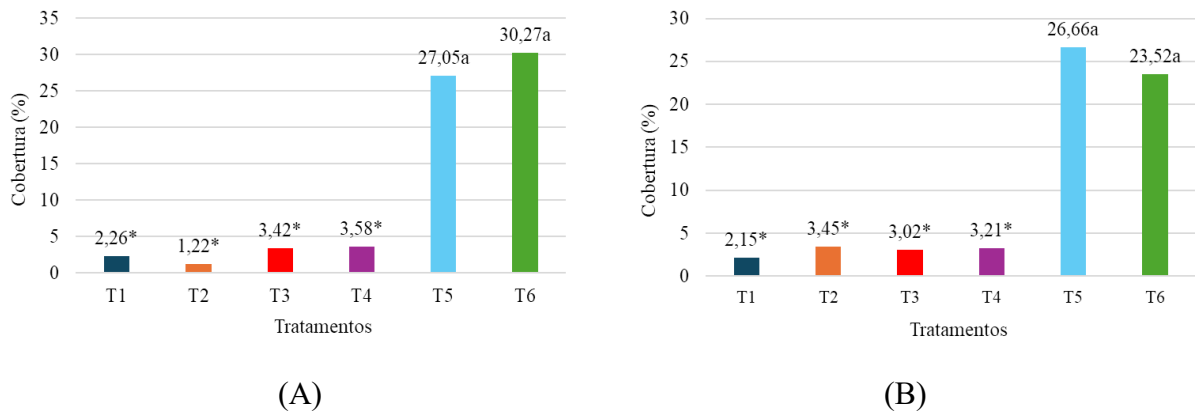
Taxa de aplicação (L ha^{-1})	Experimento 1	Experimento 2
	Cob ^{1,3} (%)	Cob ^{1,4} (%)
10	1,74 b	2,80 a
20	3,50 a	3,12 a
Configuração da classe de gota		
Média	2,84 a	2,59 a
Grossa	2,40 a	3,33 a
Pressupostos	$W = 0,98$; $B=8,07$; $DW = 2,42$ $W = 0,99$; $B=2,81$; $DW = 1,96$	

¹Médias seguidas por letras minúsculas iguais, na coluna, não diferem-se pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). *W*, *B* e *DW*: estatísticas dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, Bartlett para homogeneidade de variâncias e Durbin-Watson para independência dos resíduos, respectivamente; Valores em negrito indicam pressupostos atendidos ($\alpha = 0,05$). ³Transformação logarítmica. ⁴Transformação raiz quadrada.

Fonte: O Autor, 2026.

Uma vez avaliada a performance da RPA sob diferentes configurações, a análise prosseguiu para a comparação da cobertura do alvo promovida pela RPA em relação ao padrão terrestre. Esta é a análise que revela a diferença prática entre os dois métodos de aplicação. Os dados expõem uma grande disparidade de performance entre as duas tecnologias (Figura 11).

Figura 11 – Cobertura promovida por RPA e aplicações terrestres



(A) Experimento 1; (B) Experimento 2. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$); T1 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); T2 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); T3 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “média” (RPA); T4 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa”; T5 - 150 L ha⁻¹ e gota média (Terrestre); T6 - 150 L ha⁻¹ e gota grossa (Terrestre); *: diferença significativa em relação às aplicações terrestres (T5 e T6), pelo teste de Dunnet.

Fonte: O Autor, 2026.

A cobertura do alvo é muito influenciada pela taxa de aplicação e pelo tamanho das gotas. Estudos mostraram que maiores taxas têm a tendência de promover maiores coberturas (RIBEIRO *et al.*, 2023; CARNEIRO *et al.*, 2024; MEJÍAS *et al.*, 2024). Esse comportamento foi observado, no experimento 1, entre as taxas de 10 e 20 L ha⁻¹. No entanto, as melhores condições meteorológicas, principalmente em relação à velocidade do vento (Tabela 3), durante o experimento 2, podem ter contribuído para que ocorresse menos deriva durante os tratamentos aplicados com 10 L ha⁻¹, principalmente, igualando as coberturas promovidas pelas duas taxas.

Em teoria, quando a taxa de aplicação mantém-se inalterada e o tamanho de gota é reduzido pela metade, o número de gotas aumenta em oito vezes. Portanto, quanto menor o tamanho da gota, existe grande possibilidade de aumentar a cobertura do alvo (BUTTS *et al.*, 2018). Esse princípio está relacionado com a densidade de gotas, ou seja, maiores densidades de gotas podem promover coberturas maiores. No entanto, como já foi mencionado, as configurações de classes de gota “Média” e “Grossa” promoveram densidades de gotas semelhantes (Tabela 8), o que ajuda a explicar o fato de ambos tamanhos de gotas estudados terem promovido coberturas, também, semelhantes.

Os resultados de cobertura promovidos pelas aplicações via RPA, neste estudo, estão de acordo com Ranabhat e Price (2025), que obtiveram cobertura de 2,5% promovida por uma RPA com bicos centrífugos, a uma altura de voo de 3 m e 18,7 L ha⁻¹. Porém as aplicações aéreas apresentaram coberturas muito inferiores às aplicações terrestres, variando de 1,22% a 3,58% e de 23,52% a 30,27%, respectivamente. Essa grande diferença de área coberta promovida pelos dois métodos de aplicação é explicada pelo modelo que Courshee (1967) apresentou, no qual a cobertura do alvo tem correlação positiva com a taxa de aplicação, portanto, maiores taxas de aplicação promovem maiores coberturas. Estudos prévios também provaram que a cobertura do alvo é proporcional à taxa de aplicação (BUTTS *et al.*, 2024; OLIVEIRA *et al.*, 2024b; COSTA *et al.*, 2025).

Quanto às diferentes pontas utilizadas nas aplicações terrestres, a ponta GRD (Classe de gota “Média”) e a ponta ULD (Classe de gota “Grossa”) promoveram coberturas semelhantes. Esse resultado pode ser explicado com base nos resultados encontrados por Butts *et al.* (2018) e Sapkota (2023), os quais avaliaram a cobertura promovida pela taxa de 187 L ha⁻¹ com gotas médias e grossas, e concluíram que elevados volumes de calda podem reduzir a interferência do tamanho das gotas na cobertura. Assim, gotas médias e grossas podem promover coberturas semelhantes. Além disso, os resultados de cobertura promovidos pelas aplicações terrestres, neste estudo, corroboram Seibt *et al.* (2025) que obtiveram coberturas de 22,2% e 25,6%, com a ponta AIXR 110015, que apresenta classe de gota de “Média” a “Muito Grossa”.

É necessário destacar que a cobertura do alvo pode impactar de maneira significativa na performance de herbicidas de contato, principalmente, pois esses necessitam de elevadas coberturas para promover altos níveis de controle de plantas daninhas (TAKANO *et al.*, 2020). Diante disso, os resultados desta pesquisa, mostram que as coberturas promovidas pelas aplicações terrestres tem maiores chances de potencializar o efeito de produtos de contato em relação às aplicações via RPA. Em contrapartida, baixas coberturas não impactam tanto a eficácia de controle dos herbicidas sistêmicos, pois esses conseguem translocar internamente, nas plantas alvo (ZUÑIGA *et al.*, 2024).

4.1.6 Deposição

A análise de deposição de corante é uma avaliação complementar às de densidade de gotas e cobertura. Muitas vezes, os resultados desta análise podem auxiliar no entendimento de como os fatores (taxa de aplicação e classe de gota) influenciam na eficácia de controle das

plantas daninhas, apesar da quantidade de herbicida depositada de não ser quantificada diretamente.

A baixa cobertura observada nos papéis hidrossensíveis poderia levar à conclusão precipitada de que a deposição do produto no alvo seria igualmente deficiente. Contudo, a análise de deposição, realizada diretamente sobre o alvo biológico (folhas), demonstra que a análise é mais complexa, e revela as limitações do alvo artificial 2D para caracterizar a performance de uma aplicação aérea 3D. É nesta seção que o papel fundamental do downwash da aeronave se torna evidente, como o mecanismo que pode permitir que uma baixa cobertura em superfície se traduza em uma alta deposição na estrutura tridimensional da planta.

Nesse caso, na Tabela 10, são apresentadas as médias de deposição de corante obtidas pela RPA. É possível observar que as deposições foram iguais, no experimento 1, entre os níveis de cada fator, variando de 7,07 a 7,69 $\mu\text{g cm}^{-2}$. Já no experimento 2, a taxa de 10 L ha⁻¹ promoveu uma deposição 23,18% maior que a taxa de 20 L ha⁻¹. Enquanto a configuração de classe de gota “Grossa” promoveu uma deposição 27,7% maior que a configuração de classe de gota “Média”.

Tabela 10 – Médias da deposição do traçador obtidas pela aplicação de calda herbicida (glifosato + carfentrazona etílica) com RPA (DJI T25)

Taxa de aplicação (L ha ⁻¹)	Experimento 1	Experimento 2
	Deposição ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	Deposição ($\mu\text{g cm}^{-2}$)
10	7,24 a	1,86 a
20	7,52 a	1,51 b
Configuração da classe de gota	Deposição ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	Deposição ($\mu\text{g cm}^{-2}$)
Média	7,69 a	1,48 b
Grossa	7,07 a	1,89 a
Pressupostos	<i>W=0,95; B=4,93; DW=2,14 W=0,98; B=3,29; DW=1,76</i>	

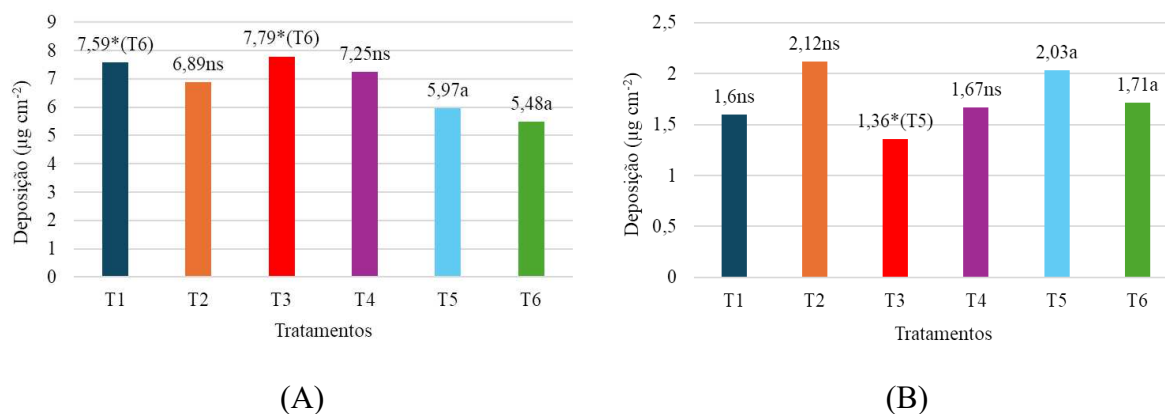
Médias seguidas por letras distintas minúsculas, na coluna, diferem-se entre si pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$); *W*, *B* e *DW*: estatísticas dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, Bartlett para homogeneidade de variâncias e Durbin-Watson para independência dos resíduos, respectivamente; Valores em negrito indicam pressupostos atendidos ($\alpha = 0,05$).

Fonte: O Autor, 2026.

Após analisar a deposição promovida pela RPA sob diferentes configurações foi realizada uma análise para comparar as deposições entre os métodos de aplicação, aéreo e terrestre (Figura 12). No experimento 1, as deposições variaram de 6,89 a 7,79 $\mu\text{g cm}^{-2}$, nas aplicações aéreas, com destaque para os tratamentos T1 e T3, os quais promoveram deposições 38,5% e 42,1% maiores que o T6, respectivamente. Enquanto, no experimento 2, as deposições via RPA variaram de 1,36 a 2,12 $\mu\text{g cm}^{-2}$, e o tratamento T3 promoveu uma deposição 43,3%

menor que o T5. Quanto as aplicações terrestres, ambas promoveram deposições semelhantes entre si, nos dois experimentos, variando de 1,71 a 5,97 $\mu\text{g cm}^{-2}$.

Figura 12 – Deposição de corante promovida por RPA e aplicações terrestres



(A) = Experimento 1; (B) = Experimento 2. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$); T1 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota média (RPA); T2 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); T3 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); T4 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); T5 - 150 L ha⁻¹ e gota média (Terrestre); T6 - 150 L ha⁻¹ e gota grossa (Terrestre); Experimento 1 - ns: não significativo em relação a nenhum tratamento adicional, pelo teste de Dunnet; *(T6): diferença significativa em relação ao T6 (Dunnet). Experimento 2 - ns: não significativo em relação a nenhum tratamento adicional, pelo teste de Dunnet; *(T5): diferença significativa em relação ao T5 (Dunnet).

Fonte: O Autor, 2026.

As deposições, no experimento 1, são consideradas altas, quando comparadas com as do experimento 2, e em relação às encontradas na literatura (CUNHA; SILVA, 2023; LOPES, 2024; SEIBT *et al.*, 2025). No entanto, essa diferença pode ser explicada, principalmente, pela diferença de estágio das plantas entre os dois experimentos. Alguns autores relataram que plantas em estádios iniciais de desenvolvimento receberam maiores deposições do que plantas em estádios mais avançados, em função da maior uniformidade de distribuição das gotas na superfície de plantas menores devido a menor sobreposição de folhas e maior exposição à aplicação (FAILLA; ROMANO, 2020; GAZZIERO *et al.*, 2006).

De maneira geral, ambos os experimentos, mostram que com taxas de aplicação iguais ou menores que 20 L ha⁻¹ o depósito de calda não é comprometido, evidenciando que a utilização de taxas reduzidas não prejudica a deposição de produtos fitossanitários.

Em relação ao tamanho da gota, a literatura mostra que gotas mais finas podem promover maior deposição dos produtos fitossanitários (SHAN, 2021; XUE *et al.*, 2024). Logo, uma gota média tem maiores chances de resultar em uma deposição maior que uma gota grossa. No entanto, no experimento 1, as diferentes classes de gotas promoveram deposições iguais do traçador, nas folhas das plantas daninhas. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que,

de acordo com a análise dos papéis sensíveis, as configurações de gota “Média” e “Grossa”, na RPA, produziram, na verdade, DMV e densidades de gotas próximos, o que pode ter contribuído para promover deposições semelhantes.

De forma contrária, no segundo experimento, a configuração de gota “Grossa” promoveu maior deposição do que a configuração de gota “Média”. Uma explicação para esse resultado é que os DMVs produzidos pelas diferentes configurações de classe de gota apresentaram diferença (“Média” – 169,75 μm ; “Grossa” – 200,36 μm), assim como o PRD (“Média” – 41,7%; “Grossa” – 29,9%), sugerindo que as aplicações com configuração de gota “Média” podem ter sofrido mais deriva, prejudicando a deposição do corante no alvo.

Oliveira (2020) observou que gotas muito grossas e extremamente grossas promoveram maiores deposições em relação às gotas finas e grossas, na aplicação de glifosato para controle de *Euphorbia heterophylla*. Chen *et al.* (2020), ao avaliarem a deposição promovida por diferentes tamanhos de gota (95 μm , 121 μm , 147 μm e 185 μm), concluíram que a aplicação com gotas de DMV de 185 μm promoveu maior deposição de gotas. Os autores alertaram, também, que gotas maiores podem manter uma boa eficácia de controle, com riscos de deriva reduzidos.

No experimento 1, os tratamentos T1 e T3 promoveram deposições maiores que o T6. Esse resultado evidencia que os parâmetros densidade de gotas e cobertura do alvo não apresentaram uma relação direta e bem definida com a deposição. Mas é importante destacar que a análise dos papéis sensíveis é limitada, visto que muitas gotas podem não ter atingido. Dessa forma é possível que esses tratamentos tenham promovido a deposição de mais gotas, com concentrações de corante maiores, diferenciando-se do tratamento T6. Ou seja, o alvo artificial tem comportamento diferente das folhas das plantas, durante a aplicação. No experimento 2, o T3 promoveu uma deposição menor que o T5, possivelmente, pela maior ocorrência de deriva, evidenciada pelo maior PRD promovido pelo tratamento T3.

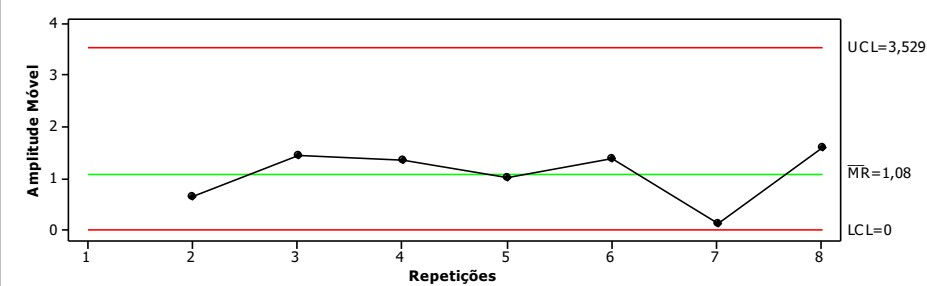
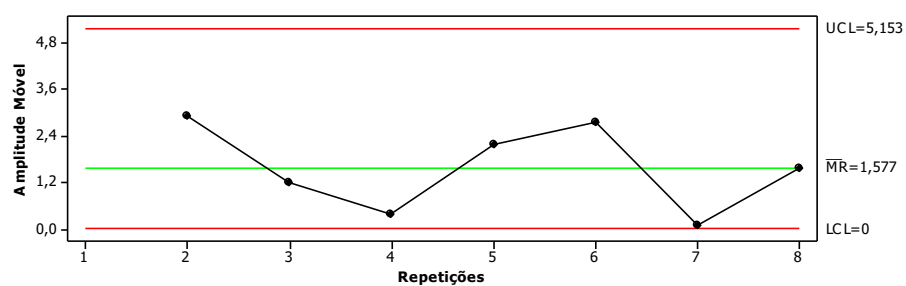
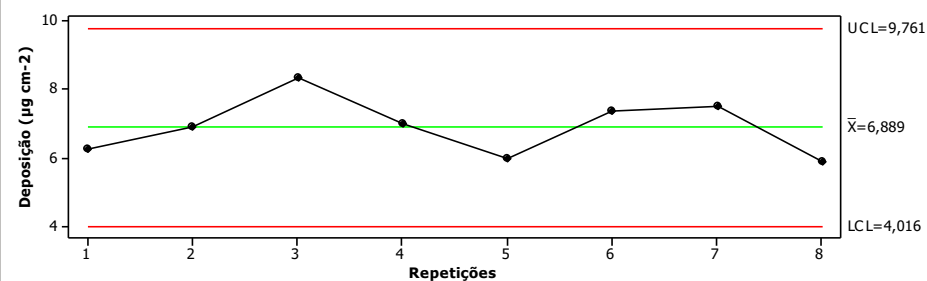
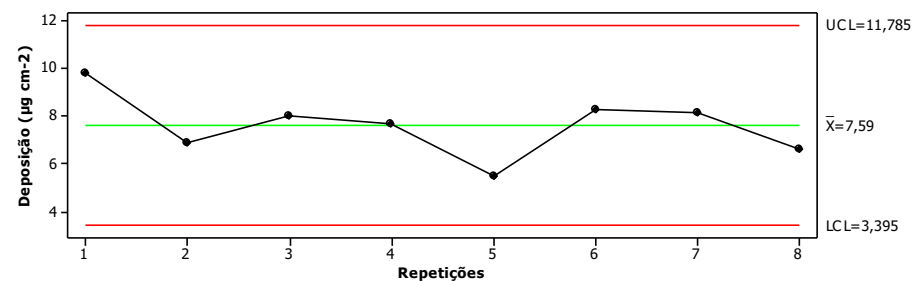
Quanto as pontas GRD 120015 e ULD 120015, ambas promoveram deposições semelhantes, nos dois experimentos, sugerindo que são boas opções para aplicação de herbicidas. Esse resultado corrobora com Oliveira (2024a), que conduziu um experimento com aplicação terrestre de herbicida para controle de soja voluntária e concluiu que gotas médias e grossas promoveram deposições com diferença não significativa, 86,1 $\mu\text{L g}^{-1}$ e 90,9 $\mu\text{L g}^{-1}$ de massa seca da parte aérea, respectivamente.

De maneira geral, as aplicações via RPA promoveram deposições iguais e, em alguns casos, maiores que as das aplicações terrestres. Isso deve-se ao fato de que, normalmente, as aplicações com RPA apresentam maior concentração de corante nas gotas e baixo risco de

escorrimento da calda para o solo, o que pode promover deposições iguais ou superiores às aplicações terrestres, indicando que são eficientes na aplicação de produtos fitossanitários, como os herbicidas. Esses resultados estão de acordo com Wang *et al.* (2019), os quais reportaram que a quantidade de imidacloprid ($\mu\text{g cm}^{-2}$) depositado no trigo foi estatisticamente igual nas aplicações via RPA e na aplicação terrestre com pulverizador costal. Montanhani (2023) também relataram que o depósito de corante foi maior com a aplicação via RPA, em relação à aplicação terrestre.

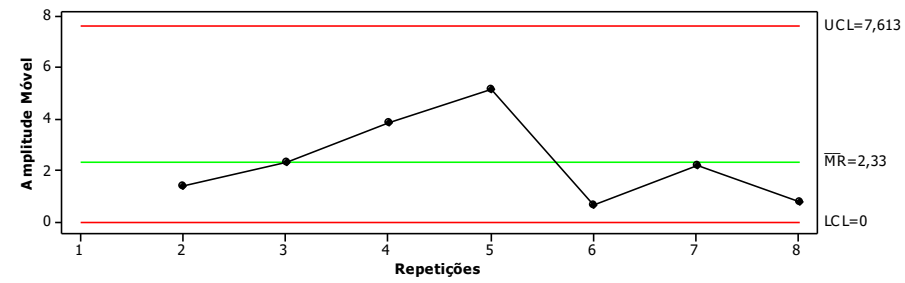
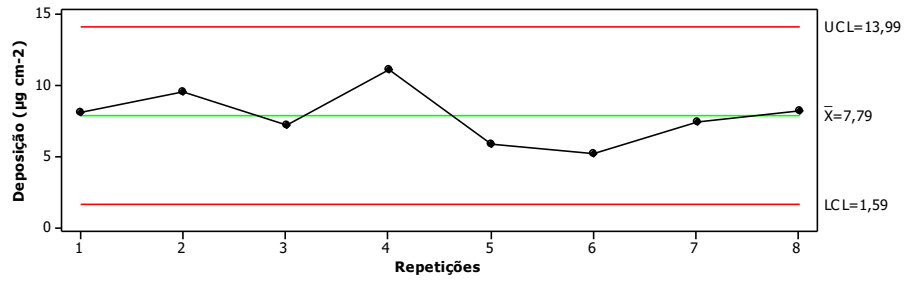
Durante um processo, alterações indesejáveis podem ocorrer e para monitorá-las é comum utilizar os gráficos de controle (ALI *et al.*, 2023; LOPES, 2024). Mesmo com o avanço tecnológico na pulverização agrícola e o aperfeiçoamento das RPAs, o processo de pulverização, terrestre ou aéreo, pode apresentar imperfeições. Por isso, torna-se interessante lançar mão dos gráficos de controle para compor a análise de deposição e verificar se, nesse aspecto, a aplicação está sob controle (Figuras 13 e 14).

Figura 13 - Gráficos de controle para a deposição do traçador ($\mu\text{g cm}^{-2}$) na aplicação de calda herbicida (glifosato + carfentrazona etílica) com RPA (DJI T25), empregando-se duas taxas de aplicação e duas configurações de tamanho de gota (Experimento 1)

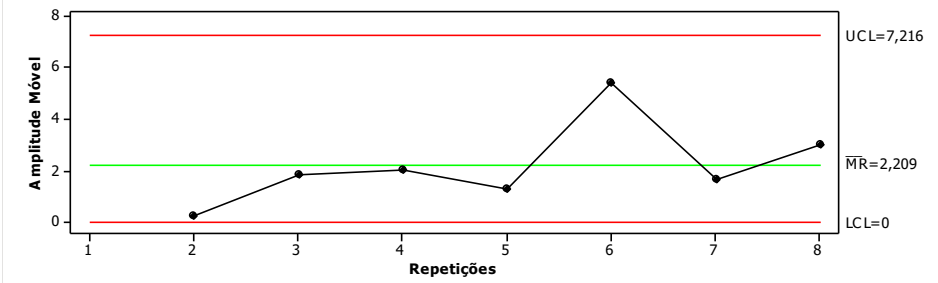
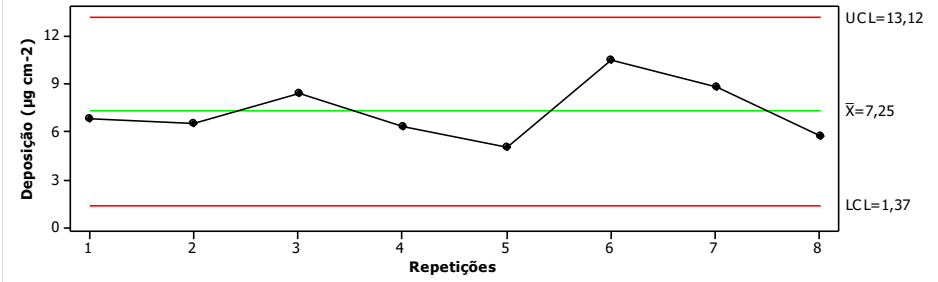


(A)

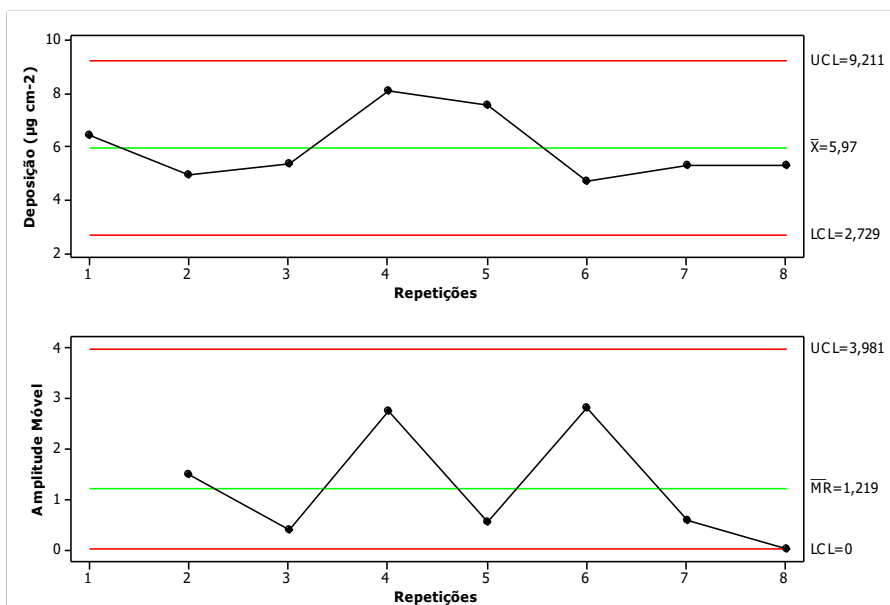
(B)



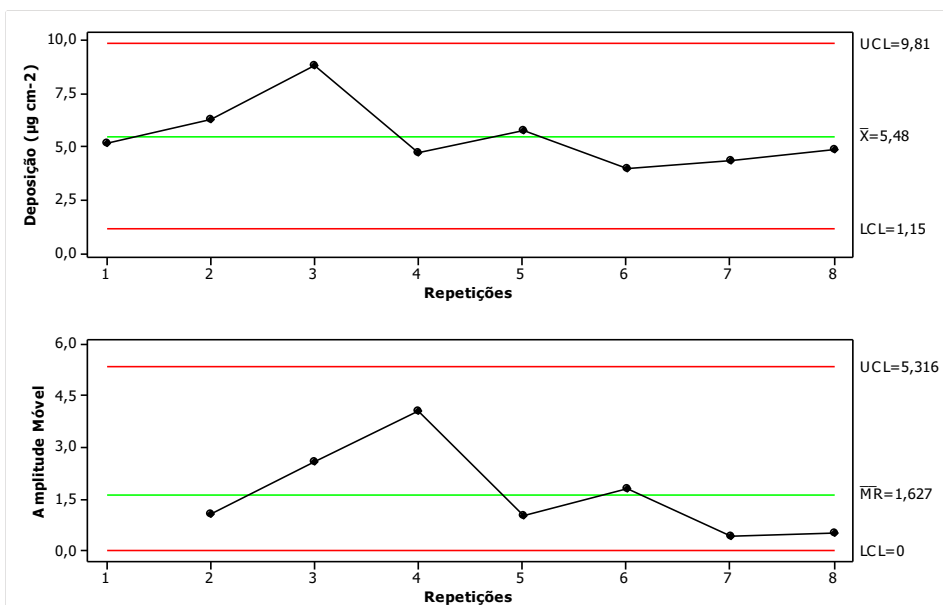
(C)



(D)



(E)

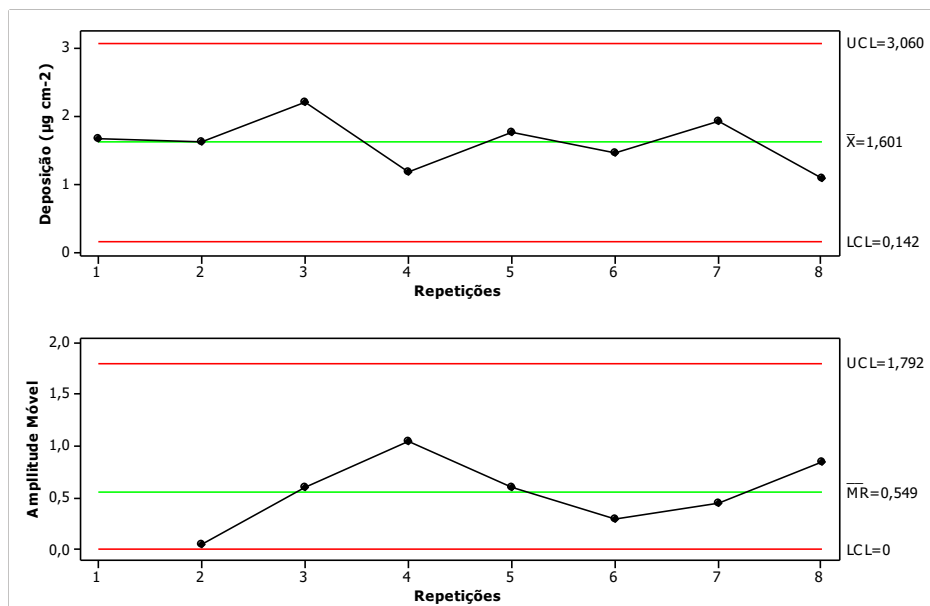


(F)

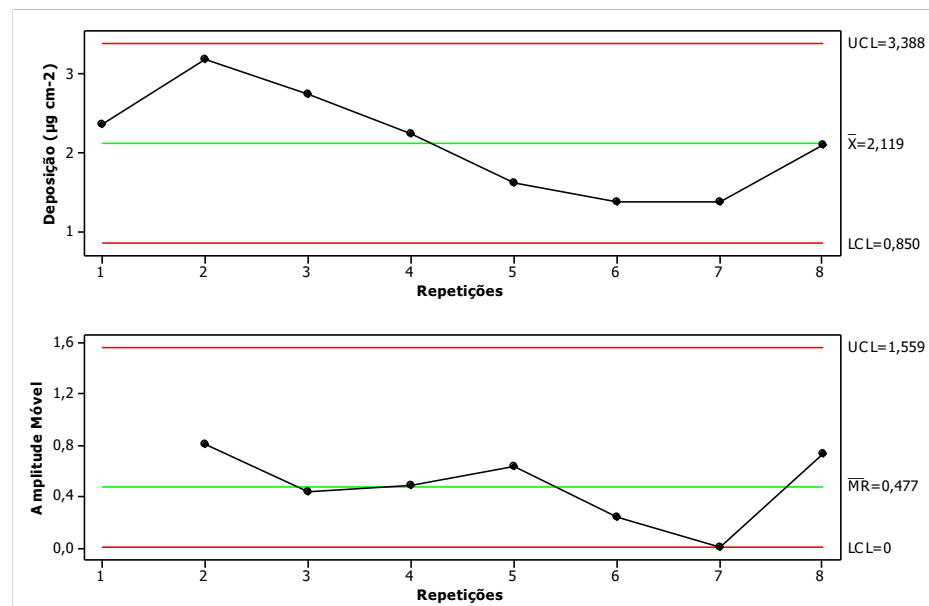
(A) T1 – 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); (B) T2 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); (C) T3 – 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); (D) T4 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); (E) T5 – 150 L ha⁻¹ e gota média (Terrestre); (F) T6 - 150 L ha⁻¹ e gota grossa (Terrestre). UCL: limite superior; \bar{X} : média do tratamento; LCL: limite inferior; \overline{MR} : médias móveis; RPA: aeronave remotamente pilotada.

Fonte: O Autor, 2026.

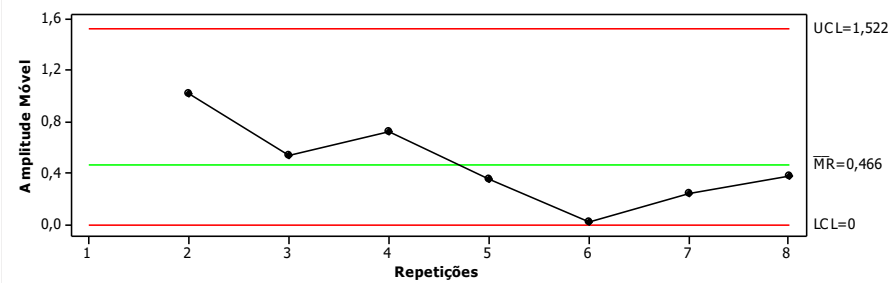
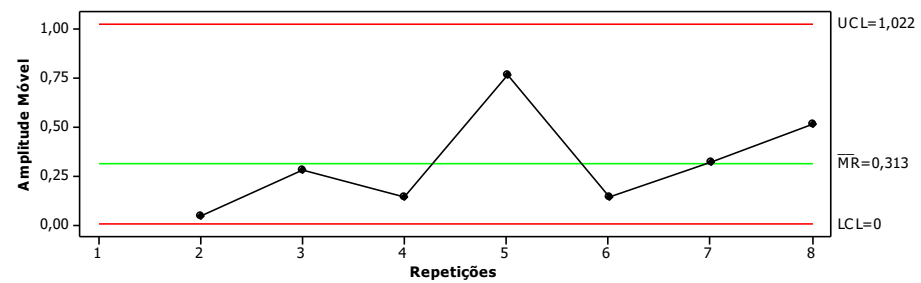
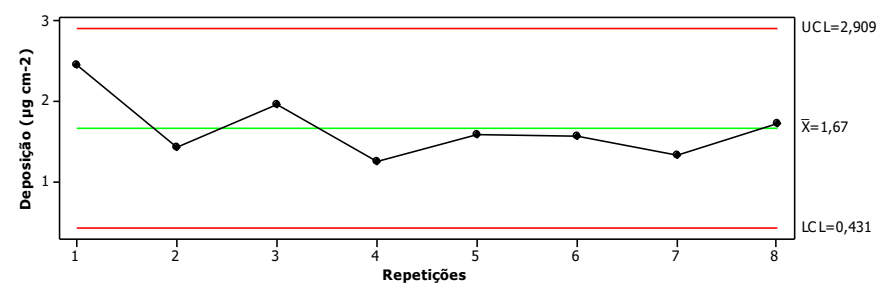
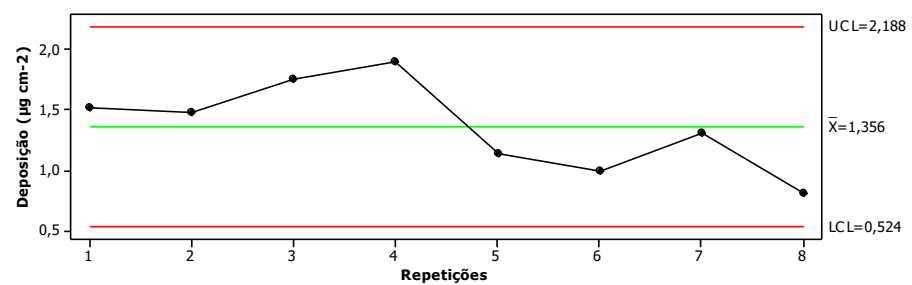
Figura 14 - Gráficos de controle para a deposição do traçador ($\mu\text{g cm}^{-2}$) na aplicação de calda herbicida (glifosato + carfentrazona etílica) com RPA (DJI T25), empregando-se duas taxas de aplicação e duas configurações de tamanhos de gota (Experimento 2)



(A)

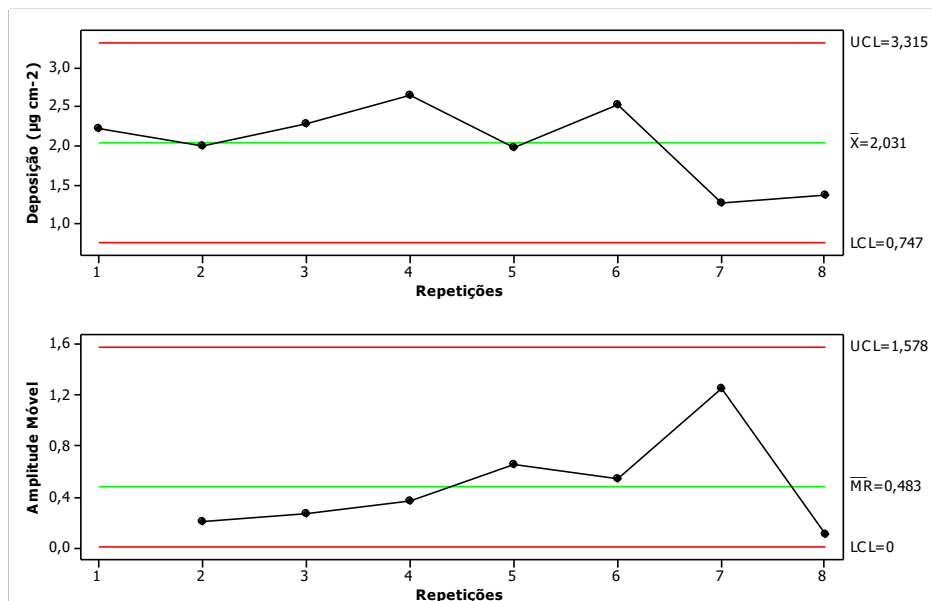


(B)

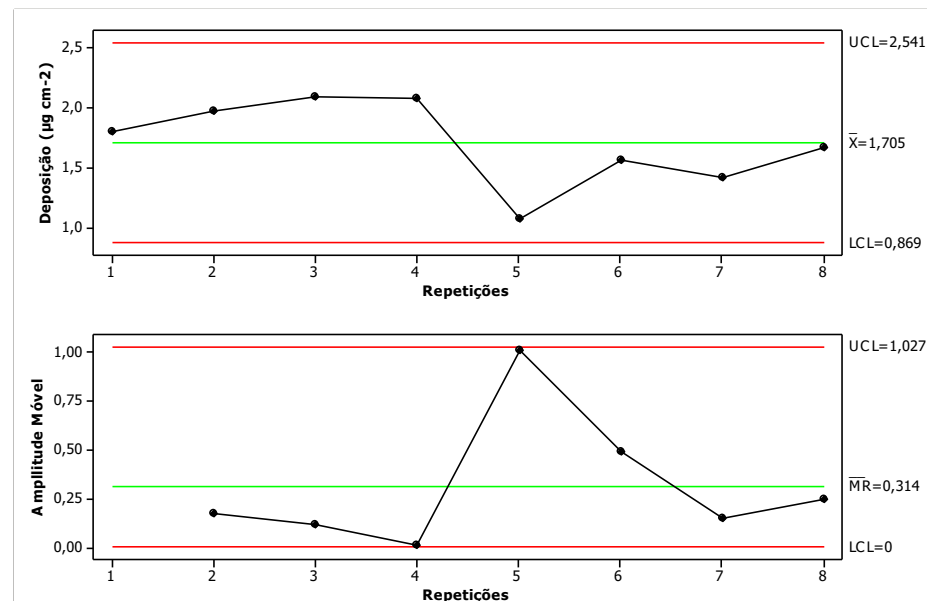


(C)

(D)



(E)



(F)

(A) T1 – 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); (B) T2 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); (C) T3 – 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); (D) T4 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); (E) T5 – 150 L ha⁻¹ e gota média (Terrestre); (F) T6 - 150 L ha⁻¹ e gota grossa (Terrestre). UCL: limite superior; \bar{X} : média do tratamento; LCL: limite inferior; \bar{MR} : médias móveis; RPA: aeronave remotamente pilotada.

Fonte: O Autor, 2026

A análise dos gráficos de controle permite uma avaliação da estabilidade do processo de deposição, para além das médias. Embora todos os tratamentos tenham operado dentro dos limites de controle, indicando ausência de causas especiais de variação, conforme os princípios de Montgomery (2020), e demonstrando que o processo esteve sujeito apenas à sua variabilidade natural (Leiva *et al.*, 2023), a análise agrônômica não se limita a esta constatação. A informação fundamental reside na magnitude desta variabilidade natural, visualizada pela amplitude dos limites de controle. Uma análise comparativa revela que os intervalos para os tratamentos com RPA são consistentemente mais amplos que os da aplicação terrestre, que demonstrou maior robustez, especialmente no Experimento 1. Isso corrobora a tese de que, embora eficaz em média, a consistência ponto a ponto da deposição com RPA é inferior, um fator crítico para a uniformidade do controle em campo.

4.2 Eficácia de controle

A análise de eficácia de controle é a que revela como os parâmetros das aplicações influenciaram o controle das plantas daninhas de forma direta. Na Tabela 11, apresentam-se as notas gerais de controle das plantas daninhas, após as aplicações com RPA. De acordo com a análise estatística não houve interação entre os fatores taxa de aplicação e configuração da classe de gota, em ambos os experimentos.

No experimento 1, a taxa de 10 L ha⁻¹ promoveu controles maiores do que a taxa de 20 L ha⁻¹, dos 3 aos 21 DAA. Já no experimento 2, houve uma inversão de comportamento em que a taxa de 20 L ha⁻¹ promoveu controles maiores que a taxa de 10 L ha⁻¹, aos 3 e 7 DAA. Quanto a classe de gota, as configurações de gota “Média” e “Grossa” promoveram controles iguais, em todos os dias avaliados, variando de 75% a 95% e de 49,7 a 95%, no primeiro e no segundo experimento, respetivamente.

Tabela 11 - Médias e medianas das eficácias de controle de plantas daninhas promovidas pelas aplicações via RPA, aos 3, 7, 14, 21 e 28 DAA

Taxa de aplicação (L ha ⁻¹)	Experimento 1				
	3 DAA ²	7DAA ²	14DAA ²	21DAA ²	28DAA ²
10	80 a	90 a	87,5 a	95 a	85 a
20	70 b	80 b	80,0 b	90 b	85 a

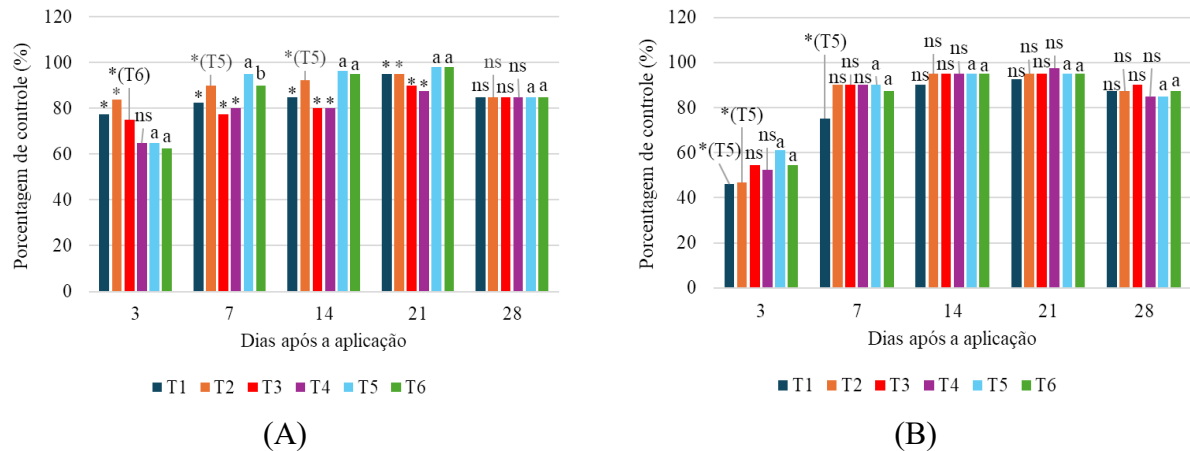
Configuração da Classe de gota					
Média	75 a	80 a	80,0 a	95,0 a	85 a
Grossa	80 a	85 a	87,5 a	92,5 a	85 a
Pressupostos	W = 0,98; B= 5,78; DW = 1,47	<i>W</i> =0,85; B=32,42; DW=1,73	<i>W</i> =0,86; B=29,19; DW=1,93	<i>W</i> =0,90; B=27,68; DW=1,54	<i>W</i> =0,77; B=2,21; DW=1,59
Taxa de aplicação (L ha ⁻¹)			Experimento 2		
	3DAA ¹³	7DAA ²	14DAA ²	21DAA ²	28DAA ²
10	46,6 b	82,5 b	95 a	95 a	87,5 a
20	53,4 a	90 a	95 a	95 a	90 a
Configuração da Classe de gota					
Média	50,3 a	85 a	95 a	95 a	90 a
Grossa	49,7 a	90 a	95 a	95 a	85 a
Pressupostos	W=0,97; B=1,92; DW=1,83	W=0,96; B=13,54; DW=1,72	<i>W</i> =0,70; B=22,85; DW=2,14	<i>W</i> =0,91; B=14,08; DW=2,56	<i>W</i> =0,86; B=4,71; DW=2,14

¹Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$); ²Medianas seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$); ³Transformação logarítmica; W, B e DW: estatísticas dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, Bartlett para homogeneidade de variâncias e Durbin-Watson para independência dos resíduos, respectivamente. Valores em negrito indicam pressupostos atendidos ($\alpha = 0,05$).

Fonte: O Autor, 2026.

A análise torna-se mais robusta ao comparar o desempenho das diferentes tecnologias de aplicação na eficácia de controle (Figura 15). Os resultados evidenciam que a aplicação aérea dos herbicidas pôde promover controles semelhantes aos das aplicações terrestres, especialmente no Experimento 2, mesmo no controle de plantas daninhas em estádios mais avançados.

Figura 15 – Eficácia de controle de plantas daninhas promovida pelas aplicações via RPA e terrestres



(A) = Experimento 1; (B) = Experimento 2. Médias (B = 3 DAA) e medianas (A = 3,7,14,21 e 28 DAA; B = 7,14,21 e 28 DAA) seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey e Kruskal Wallis ($\alpha = 0,05$), respectivamente; T1 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); T2 - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa” (RPA); T3 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Média” (RPA); T4 - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota “Grossa”; T5 - 150 L ha⁻¹ e gota média (Terrestre); T6 - 150 L ha⁻¹ e gota grossa (Terrestre); *: com diferença significativa em relação aos tratamentos T5 e T6.

Fonte: O Autor, 2026.

É notório, entretanto, que os resultados de deposição nem sempre corresponderam, proporcionalmente às notas de controle observadas, ao longo dos dias avaliados, corroborando com Oliveira *et al.* (2021) que também não encontram uma relação bem definida entre a análise de deposição e a resposta biológica das plantas, após a aplicação de glifosato. Isso acontece porque o traçador utilizado na calda atuou somente como um indicador físico da aplicação. Os herbicidas e o corante possuem características distintas, por isso, após a deposição apresentam comportamentos diferentes. O corante, por ser hidrossolúvel, tende a permanecer na superfície foliar. Os herbicidas, por sua vez, apresentam propriedades físico-químicas próprias que influenciam a retenção, absorção e translocação nos tecidos vegetais. Dessa forma, uma grande quantidade de corante depositada nas plantas não garante a absorção do herbicida, na quantidade suficiente para promover o controle. (PALLADINI; RAETANO; VELINI, 2005; SZARKA *et al.*, 2021).

Aos 3 DAA, as plantas daninhas começaram a apresentar sintomas da carfentrazona-etílica, a qual atua na inibição da enzima PROTOX, produzindo radicais livres e provocando amarelecimento das folhas e rápida necrose (BARKER *et al.*, 2023). Aos 7 DAA, os efeitos de controle foram potencializados pelo glifosato, em ambos os experimentos. Os picos de controle foram observados aos 21 e 14 DAA, nos experimentos 1 e 2, respectivamente. Por fim, aos 28 DAA, as notas de controle reduziram, em ambos os experimentos, devido à recuperação de plantas que toleraram a aplicação dos herbicidas. Mas é importante destacar que os

comportamentos das notas de controle foram muito influenciados, além dos aspectos relacionados à tecnologia de aplicação, pela distribuição das plantas daninhas nas parcelas de cada tratamento e pela diferença de estádios de desenvolvimento das mesmas entre os Experimentos 1 e 2.

De acordo com a eficácia de controle promovida pelas diferentes configurações na RPA a taxa de 10 L ha⁻¹ destacou-se no controle das plantas daninhas, entre os 3 e 21 DAA, no primeiro experimento, em função da maior concentração dos ingredientes ativos nas gotas produzidas por essa taxa. A maior concentração de carfentrazona-etílica promoveu lesões mais intensas aos 3 DAA, que foram mantidas pela alta concentração de glifosato até os 21 DAA. No segundo experimento houve uma inversão no comportamento das taxas de aplicação em que a taxa de 20 L ha⁻¹ destacou-se, com 53,4% e 90% de controle, aos 3 e 7 DAA, respectivamente. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, como as plantas estavam maiores, neste experimento, pode ter ocorrido maior efeito guarda-chuva nas parcelas que receberam aplicação com 10 L ha⁻¹, fazendo com que essa taxa promovesse controles menores que a taxa de 20 L ha⁻¹, nessas avaliações.

As duas classes de gotas promoveram eficácias de controle semelhantes, em todos os dias avaliados, pois a diferença no DMV produzido pelas configurações de gota “Média” e “Grossa”, no controle remoto da RPA, em ambos os experimentos, foi pequena, o que pode ter contribuído para promoverem coberturas, deposições e, conseqüentemente, níveis de controle próximos.

Após a análise da eficácia de controle em função da alteração dos parâmetros na RPA, foi realizado a análise de comparação entre os dois sistemas de aplicação utilizados. O melhor desempenho inicial das aplicações via RPA (>65%) no experimento 1, especialmente aos 3 DAA, pode ser atribuído à maior concentração de produto que as gotas produzidas pelas aplicações a baixo volume possuem, especialmente a de 10 L ha⁻¹, associada aos estádios iniciais de desenvolvimento das plantas, que facilita o controle. Além disso, o elevado volume de calda utilizado nas aplicações terrestres pode ter proporcionado maior escoamento de calda para o solo, prejudicando a absorção dos herbicidas. Segundo Martin *et al.* (2020) o “downwash” e a turbulência de vento provocados pelas RPAs fazem com que as folhas se movimentem, o que pode favorecer a deposição de calda e aumentar a eficácia de controle de herbicidas, especialmente os de contato, mesmo com taxas reduzidas.

Os menores valores de eficácia de controle promovidos pelas aplicações com 10 L ha⁻¹, aos 3 DAA, no segundo experimento, podem ser atribuídos ao efeito guarda-chuva, decorrente da associação entre a menor taxa e o maior desenvolvimento das plantas. Cauwer *et al.* (2024)

comentaram que a análise com papéis hidrossensíveis é limitada, assim, muitas vezes o efeito guarda-chuva não é detectado. Porém, esse resultado reforça a ideia de que à medida que se reduz a taxa de aplicação, a eficácia de controle promovida por herbicidas de contato pode ser prejudicada, quando aplicados em plantas daninhas em estádios fenológicos mais avançados, pela menor cobertura da planta como um todo (MONTANHANI, 2023).

Em contrapartida, aos 3 DAA, as aplicações com 20 L ha⁻¹ apresentaram controles semelhantes aos tratamentos com 150 L ha⁻¹, no segundo experimento. O maior volume de calda na RPA associado ao efeito downwash pode ter favorecido a chegada de produto em estratos inferiores das plantas, reduzindo o efeito guarda-chuva.

Nota-se que, no Experimento 1, as aplicações terrestres (>90%) promoveram controles maiores que as aplicações via RPA (<90%), aos 7, 14 e 21 DAA. Já no Experimento 2, em geral, os métodos de aplicação promoveram controles semelhantes, a partir dos 7 DAA (>87,5%), com exceção do tratamento 1 (75%). Além disso, os tratamentos terrestres promoveram controles iguais entre si, nos dois experimentos (54,4% a 98%), majoritariamente. A única exceção ocorreu aos 7 DAA, no Experimento 1, em que a aplicação com a ponta GRD 120015 promoveu um controle maior que a ponta ULD 120015, no entanto, essa diferença pode ter sido influenciada pela subjetividade do método de avaliação (CAMPOS; CUNHA; LEMES, 2021).

Os incrementos nos controles observados aos 7 DAA em todos os tratamentos, são decorrentes da ação do herbicida glifosato, que agiu sinergicamente com o herbicida carfentrazone-etílico. O glifosato é um herbicida sistêmico que se move até os meristemas e promove uma ação lenta, mas com elevada eficácia a longo prazo. Por isso, sua mistura com a carfentrazone-etílico, de ação rápida, permite um bom controle inicial das plantas daninhas e a manutenção prolongada do efeito herbicida, o que explica os elevados níveis de controle nas avaliações finais (NETO *et al.*, 2023). Além disso, estudos indicaram que o efeito do glifosato tende a aumentar com a redução do volume de calda, principalmente, pela maior concentração de ingrediente ativo nas gotas, indicando que a ação desse herbicida via RPA não é prejudicada (PAUL *et al.*, 2024; ZUÑIGA *et al.*, 2024).

No entanto, no primeiro experimento, a menor eficácia de controle promovida pelas aplicações via RPA, dos 7 até os 21 DAA, em relação às aplicações terrestres pode ser explicada pelo fato de que a rápida necrose provocada pela carfentrazone-etílico, nas aplicações a baixo volume (calda mais concentrada), aos 3 DAA, possivelmente dificultou a translocação do herbicida glifosato, interferindo na ação desse herbicida. Em contrapartida, nas aplicações terrestres (calda menos concentrada), possivelmente, os tecidos foliares puderam manter-se ativos por mais tempo, garantindo uma melhor translocação do herbicida sistêmico, resultando

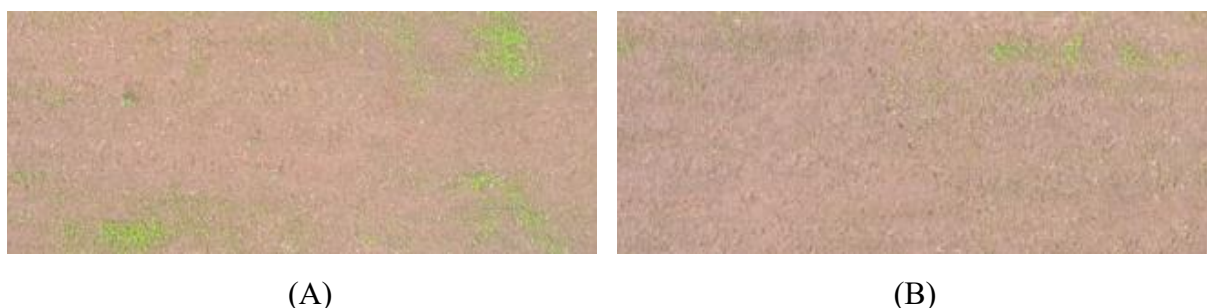
em maiores notas de controle. Esse resultado está de acordo com outros autores, os quais também explicaram que a rápida ação dos herbicidas de contato pode dificultar a translocação do glifosato (AGOSTINETO *et al.*, 2016; BARBIERI *et al.*, 2022; SOUSA *et al.*, 2023)

No segundo experimento, a maior ocorrência de efeito guarda-chuva, de maneira geral, pode ter reduzido as necroses, aos 3 DAA, permitindo que o glifosato translocasse pelo floema das plantas com maior facilidade, igualando as notas de controle promovidas pelas aplicações via RPA e terrestres, dos 7 aos 28 DAA. No entanto, a menor eficácia promovida pelo T1, em relação ao T5, aos 7 DAA, pode ser explicada pelo fato de o primeiro tratamento ter produzido um dos menores DMVs, favorecendo a deriva, o que pode ter reduzido a deposição e a absorção de Glifosato, provocando um atraso ainda maior no controle.

Por fim, aos 28 DAA, houve uma redução do nível de controle, em todos os tratamentos, nos dois experimentos, que pode ser explicada pela recuperação de plantas, em especial *C. benghalensis*, que não foram completamente controladas. Estudos prévios mostraram que a mistura carfentrazone-etílica + glifosato pode promover controles maiores que 76% dessa espécie (FERREIRA *et al.*, 2017; LIMA, 2020). No entanto, casos de resistência de *C. benghalensis* ao herbicida Glifosato foram relatados, o que pode justificar a queda do nível de controle observada nesta pesquisa (PERISSATO *et al.*, 2023). De maneira semelhante, Silva *et al.* (2014) obtiveram controle insatisfatório de *C. benghalensis* (<21%) após a aplicação de carfentrazone-etílica + glifosato.

Na Figura 16, são mostradas imagens aéreas das áreas aplicadas (14 DAA), referente à cada tratamento e às áreas que não receberam aplicação.

Figura 16 – Imagens aéreas das áreas aplicadas (14 DAA)





(C)



(D)



(E)



(F)



(G)



(H)



(I)



(J)



(K)



(L)



(M)



(N)

Experimento 1: (A) RPA – 10 L ha⁻¹ e configuração de gota Média; (B) RPA - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota Grossa; (C) RPA - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota Média; (D) 20 L ha⁻¹ e configuração de gota Grossa; (E) Pulverizador costal – 150 L ha⁻¹ e gota Média (GRD 120015); (F) Pulverizador costal – 150 L ha⁻¹ e gota Grossa (ULD 120015); (M) Área sem aplicação. Experimento 2: (G) RPA – 10 L ha⁻¹ e configuração de gota Média; (H) RPA - 10 L ha⁻¹ e configuração de gota Grossa; (I) RPA - 20 L ha⁻¹ e configuração de gota Média; (J) 20 L ha⁻¹ e configuração de gota Grossa; (K) Pulverizador costal – 150 L ha⁻¹ e gota Média (GRD 120015); (L) Pulverizador costal – 150 L ha⁻¹ e gota Grossa (ULD 120015); (N) Área sem aplicação.

Fonte: O Autor, 2026.

É importante destacar que, apesar das variações iniciais (3DAA), os controles intermediários (7 a 21 DAA) e o final (28 DAA) das plantas daninhas foram equivalentes entre os métodos de aplicação, especialmente no experimento 2. Esse resultado corrobora outros autores que comentaram que a aplicação de herbicidas de contato e sistêmicos via RPA promoveram eficácias de controle semelhantes às das aplicações terrestres (RODRIGUES, 2022; ZUÑIGA *et al.*, 2024). Isso indica que a aplicação de glifosato + carfentrazona-etílica pode promover controles elevados de plantas daninhas, mesmo quando aplicados com taxas reduzidas.

Entre as espécies avaliadas, *Commelina benghalensis* apresentou maior tolerância às doses dos herbicidas, sendo a principal responsável pela redução das notas de controle ao longo das avaliações. Em contraste, *Ipomoea triloba* e *Alternanthera tenella* mostraram elevada suscetibilidade aos tratamentos aplicados. Por ocuparem a maior proporção da área experimental, essas espécies contribuíram de forma significativa para o aumento das notas de controle em todos os tratamentos, nos dois experimentos.

Ao integrar os resultados de cobertura, deposição e eficácia, constata-se o resultado agrônomo mais contraintuitivo deste estudo de que a baixa cobertura promovida pela RPA promoveu um controle eficaz das plantas daninhas. A pesquisa demonstra que a avaliação em alvos artificiais (papéis hidrossensíveis), que indicou uma cobertura baixa da RPA, subestima drasticamente a interação da tecnologia com o alvo biológico real. A alta deposição observada nas folhas é a prova de que o downwash da aeronave não é um fator secundário, mas sim um mecanismo primário que auxilia a retenção no baixo volume, garantindo a chegada do produto ao dossel por meio de uma deposição forçada em toda a estrutura 3D da planta. Consequentemente, a eficácia de controle, em grande parte equivalente à da aplicação terrestre, é a resposta biológica a esta deposição efetiva, impulsionada pela ação sistêmica do glifosato.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo ampliou o conhecimento sobre o desempenho em campo de uma nova tecnologia embarcada nas RPAs modernas, os atomizadores rotativos, em comparação com as aplicações terrestres. Os resultados permitiram avaliar o impacto da variação da taxa de aplicação e da classe de gota na eficácia de um herbicida sistêmico (glifosato) e de um herbicida de contato (carfentrazona-etílica), aplicados em mistura para o manejo de plantas daninhas.

Um dos principais destaques do estudo está relacionado às classes de gotas produzidas pelos atomizadores rotativos. Embora o software de RPA (DJI T25) tenha sido ajustado para gerar gotas das classes “Média” e “Grossa”, os diâmetros médios volumétricos (DMV) obtidos por meio da análise dos papéis sensíveis indicaram a predominância das classes “Fina” e “Média”, de acordo com a análise realizada pelo DropScope®. Essa divergência influenciou diretamente a estimativa do potencial risco de deriva (PRD), resultando em valores superiores a 24,9% para a RPA, enquanto as aplicações terrestres apresentaram PRD inferior a 1,66%. Esses resultados evidenciam diferenças marcantes entre os métodos de aplicação, nas condições avaliadas.

A taxa de 10 L ha⁻¹ teve um desempenho semelhante (DMV, AR, PRD, gotas cm⁻² e cobertura) e algumas vezes superior (Deposição) à taxa de 20 L ha⁻¹, especialmente no segundo experimento. De modo geral, as aplicações via RPA promoveram deposições semelhantes às obtidas nas aplicações terrestres, mesmo com coberturas significativamente inferiores. Esse comportamento foi atribuído à maior concentração de corante nas gotas pulverizadas, em ambas as avaliações. Esse fator foi determinante para a equivalência da eficácia de controle entre os métodos de aplicação a partir de 7 dias após a aplicação (DAA), sobretudo no Experimento 2. Esses resultados indicam que aplicações via RPA podem representar uma alternativa viável, ao aliar economia de água e maior eficiência operacional, sem comprometer a eficácia no controle de plantas daninhas, nas condições testadas.

O desempenho dos herbicidas, especialmente do produto de contato (carfentrazona-etílica), foi fortemente influenciado, principalmente pela taxa de aplicação, pelo estágio de desenvolvimento das plantas daninhas e pelas condições de velocidade do vento, durante as aplicações, sobretudo aos 3 DAA. Ainda assim, a mistura de glifosato e carfentrazona-etílica promoveu elevados níveis de controle aos 14 e 21 DAA, configurando-se como uma alternativa eficiente para o manejo de plantas daninhas.

Os resultados não indicam a inviabilidade do uso de RPAs em função da menor cobertura em alvos bidimensionais, mas demonstram que sua eficácia está associada a um

mecanismo de deposição distinto. Enquanto as aplicações terrestres baseiam-se na saturação da cobertura por meio de altos volumes de calda, as aplicações via RPA dependem da deposição forçada induzida pela turbulência gerada pelos rotores. Esse mecanismo mostra-se adequado para herbicidas sistêmicos, mas ainda representa um fator de risco para produtos estritamente de contato.

Por fim, os resultados relacionados ao DMV evidenciam a necessidade de estudos adicionais para o aprimoramento dos sistemas de pulverização das RPAs, visando maior coerência entre a nomenclatura das classes de gotas apresentada no software da aeronave e aquelas efetivamente produzidas pelos atomizadores rotativos. Adicionalmente, pesquisas envolvendo diferentes adjuvantes na calda fitossanitária são fundamentais para avaliar sua influência na formação de gotas por bicos centrífugos, em condições reais de campo.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINETO, M. C. et al. Sinergismo de misturas de glyphosate e herbicidas inibidores da PROTOX no controle de corda-de-viola. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 1, p. 8-15, 2016. <https://doi.org/10.5965/223811711512016008>. Acesso em: 5 jun. 2025.
- AHRENS, K.; HERBST, A.; WEGENER, J. K. Field comparison of spray drift from unmanned aerial spraying systems using air-induction nozzles versus rotary atomizers. **Frontiers in Agronomy**, v. 7, p. 1716113, 2025. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1716113>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- ALI, S. et al. Memory-type control charts for censored reliability data. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 39, n. 6, p. 2365-2384, 2023. <https://doi.org/10.1002/qre.3347>. Acesso em: 24 jul. 2025.
- ALVES, R. F. Q. et al. Comparison of volumetric distribution in drone spraying considering height, application volume, and nozzle type. **AgriEngineering**, v. 7, n. 4, p. 123, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7040123>. Acesso em: 3 jun. 2025.
- ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. **Tecnologia de aplicação para culturas anuais**. 2. ed. Passo Fundo, RS: FEPAF; Botucatu, SP: Aldeia Norte, 2019.
- ASOCIACIÓN LATINO AMERICANA DE MALEZAS – ALAM. Recomendaciones sobre unificación de los sistemas de evaluación en ensayos de control de malezas. **ALAM**, v. 1, n. 1, p. 35-38, 1974.
- BAIO, F. H. R. et al. Characterization of the droplet population generated by centrifugal atomization nozzles of UAV sprayers. **AgriEngineering**, v. 7, n. 1, p. 15, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7010015>. Acesso em: 5 jul. 2025.
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 3. ed. Jaboticabal: Funep, 1995. 247 p.
- BARBIERI, G. F. et al. Herbicide mixtures: interactions and modeling. **Advances in Weed Science**, v. 40, n. spe 1, p. e020220051, 2022. <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:seventy-five011>. Acesso em: 27 ago. 2025.
- BARBOSA, M. F. et al. Biological resources driving productivity: bioinputs for sustainable plant agriculture in Brazil. **Sustainable Microbiology**, v. 2, n. 3, p. qvaf011, 2025. <https://doi.org/10.1093/sumbio/qvaf011>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- BARKER, A. L. et al. Discovery, mode of action, resistance mechanisms, and plan of action for sustainable use of Group 14 herbicides. **Weed Science**, v. 71, n. 3, p. 173-188, 2023. <https://doi.org/10.1017/wsc.2023.15>. Acesso em: 5 ago. 2025.
- BIEGEL, T.; JOURDAN, N.; HERNANDEZ, C.; CVIKO, A.; METTERNICH, J. Deep learning for multivariate statistical in-process control in discrete manufacturing: A case study in a sheet metal forming process. **Procedia CIRP**, v. 107, p. 422-427, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.002>. Acesso em: 9 jun. 2025.

BRIGHENTI, A. M.; OLIVEIRA, M. F. Biologia de plantas daninhas. *In*: OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (Ed.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011. p. 1-36.

BUTTS, T. R. *et al.* Spray droplet size and carrier volume effect on dicamba and glufosinate efficacy. **Pest Management Science**, v. 74, n. 9, p. 2020-2029, 2018. <https://doi.org/10.1002/ps.4913>. Acesso em: 6 jul. 2025.

BUTTS, T. R. *et al.* Spray coverage and deposits from a remotely piloted aerial application system using various nozzle types. **Frontiers in Agronomy**, v. 6, p. 1493799, 2024. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1493799>. Acesso em: 15 jul. 2025.

CAMPOS, S. F. B.; CUNHA, J. P. A. R.; LEMES, E. M. Controle de plantas daninhas avaliado visualmente e por imagens aéreas. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 24, n. 3, p. 216-225, 2021. <https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2021.v24i3.977>. Acesso em: 10 ago. 2025.

CARNEIRO, R. M. **Controle químico de espécies do gênero Commelina**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2021.

CARNEIRO, R. P. *et al.* Variation of glyphosate spray volume in the drying of ground cover plants with an unmanned aerial vehicle. **Crop Protection**, v. 181, p. 106694, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106694>. Acesso em: 15 jul. 2025.

CAUWER, B. *et al.* Efficiency of contact herbicides in controlling small weed seedlings using drift reducing nozzles. **Aspects of Applied Biology: International Advances in Pesticide Application**, p. 241-252, 2024.

CAVENAGHI, A. L.; CARBONARI, C. A. Tecnologia de aplicação de herbicidas para o controle de plantas daninhas. *In*: ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. (org.) **Tecnologia de aplicação para culturas anuais**. Passo Fundo: Aldeia Norte; Botucatu: FEPAF, 2019, p. 261-282.

CHEN, S. *et al.* Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV. **Agronomy**, v. 10, n. 2, p. 195, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020195>. Acesso em: 23 jul. 2025.

CHEN, H. *et al.* Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 14, n. 1, p. 38-49, 2021. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211401.5714>. Acesso em: 5 jun. 2025.

COSTA, A. G. F. *et al.* Nozzle type and spray volume effects on site-specific herbicide application in turfgrass using a remotely piloted aerial application system. **Weed Technology**, v. 39, p. e43, 2025. <https://doi.org/10.1017/wet.2025.15>. Acesso em: 15 jul. 2025.

COURSHEE, R. J. Application and use of foliar fungicides. *In*: TORGESON, D. C. **Fungicide: an advanced treatise**. [s. l]: Academic Press, 1967, p. 239-286. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-395514-2.50014-4>. Acesso em: 10 ago. 2025.

CUNHA, J. P. A. R. *et al.* Evaluation of strategies to reduce pesticide spray drift. **Planta Daninha**, v. 21, p. 325-332, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582003000200019>. Acesso em: 9 jul. 2025.

CUNHA, J. P. A. R. *et al.* Use of remotely piloted aircrafts for the application of plant protection products. **Engenharia Agrícola**, v. 41, n. 2, p. 245-254, 2021. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v41n2p245-254/2021>. Acesso em: 4 jun. 2025.

CUNHA, J. P. A. R.; SILVA, M. R. A. Deposição de calda aplicada com aeronave remotamente pilotada na cultura do milho. **Revista Ciência Agronômica**, v. 54, p. e20217862, 2023. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230027>. Acesso em: 3 jun. 2025.

DJI. *AGRAS T50/T25 – Manual de voo de aeronaves não tripuladas (User Manual v1.0)*. 2024. Disponível em: https://dl.djicdn.com/downloads/t50_t25/20250109/T50_T25_User_Manual_v1.0_PT-BR.pdf. Acesso em: 24 mar. 2026.

FAILLA, S.; ROMANO, E. Effect of spray application technique on spray deposition and losses in a greenhouse vegetable nursery. **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 7052, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12177052>. Acesso em: 17 jul. 2025.

FERGUSON, J. C. *et al.* Effect of spray droplet size on herbicide efficacy on four winter annual grasses. **Crop Protection**, v. 112, p. 118-124, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.05.020>. Acesso em: 9 jul. 2025.

FERREIRA, S. D.; SALVALAGGIO, A. C.; MORATELLI, G.; VASCONCELOS, E. D.; COSTA, N. V. Controle de espécies de commelinas com dessecantes isolados e em misturas. **Planta Daninha**, v. 35, p. 17165664, 2017. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582017350100074>. Acesso em: 8 set. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **The State of Food and Agriculture** : Overcoming water challenges in agriculture. Rome: FAO, 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **FAO: Pesticides Indicators**. Rome: FAO, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>. Acesso em: 16 maio 2024.

FRIED, G.; CHAUVE, L. B.; REYNAUD, P.; SACHE, I. Decreases in crop production by nonnative weeds, pests, and pathogens. *In*: VILÀ, M.; HULME, P. E. **Impact of biological invasions on ecosystem services**. [s. l.]: Springer. 2017. p. 83-101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45121-3_6. Acesso em: 16 maio 2024.

GABRIEL, L. G. S. *et al.* Avaliação da qualidade na aplicação com pulverizador terrestre e drone de aplicação t20p. **Revista Ambientale**, v. 17, n. 1, p. 1-13, 2025. <https://doi.org/10.48180/ambientale.v17i1.616>. Acesso em: 5 jun. 2025.

GAZZIERO, D. L. P. *et al.* As plantas daninhas e a semeadura direta. **Embrapa Soja**, Londrina, n. 33, 2001.

GAZZIERO, D. L. P. *et al.* Deposição de glyphosate aplicado para controle de plantas daninhas em soja transgênica. **Planta Daninha**, v. 24, p. 173-181, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582006000100022>. Acesso em: 17 jul. 2025.

GAZZIERO, D. L. P. *et al.* Manual técnico para subsidiar a mistura em tanque de agrotóxicos e afins. **Embrapa Soja**, Londrina, n. 437, 2021, 23 p.

GIBBS, J. L.; PETERS, T. M.; HECK, L. P. Comparison of droplet size, coverage, and drift potential from UAV application methods and ground application methods on row crops.

Transactions of the ASABE, v. 64, n. 3, p. 819-828, 2021.

<https://doi.org/10.13031/trans.14121>. Acesso em: 6 jul. 2025.

GRIESANG, F.; FERREIRA, M. C. Tecnologia de aplicação: Como evitar a deriva? *In*: GUIMARÃES, A. C. D.; INOUE, M. H.; IKEDA, F. S. (org.). **Estratégias de Manejo de Plantas Daninhas para Novas Fronteiras**. Curitiba, PR: Editora da SBCPD; Cáceres, MT: Editora da Unemat, 2018.

GRIESANG, F.; FERREIRA, M. C. Tecnologia de aplicação para herbicidas. **Matologia: Estudos sobre plantas daninhas**. 1. ed. Jaboticabal–SP: Fábrica da Palavra, 2021, p. 428-449.

HUSSAIN, S.; CHEEMA, M. J. M.; ARSHAD, M.; CHATTA, A. A. Spray uniformity testing of unmanned aerial spraying system for precise agrochemical applications. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 56, n. 4, p. 897-903, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.21162/PAKJAS/19.8594>. Acesso em: 4 jun. 2025.

HU, H. *et al.* Control effect on cotton aphids of insecticides sprayed with unmanned aerial vehicles under different flight heights and spray volumes. **International Journal of Precision Agricultural Aviation**, v. 4, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20200401.161>. Acesso em: 4 jun. 2025.

JIA XUN, H. E. *et al.* Centrifugal spraying system design and droplet distribution characterization for maize plant protection UAV. **INMATEH-Agricultural Engineering**, v. 73, n. 2, 2024. <https://doi.org/10.35633/inmateh-73-06>. Acesso em: 5 jul. 2025.

JUNIOR, J. P. S. *et al.* Tecnologia de drones na agricultura: um estudo sobre a pulverização e suas aplicações. **Scientific Electronic Archives**, v. 18, n. 1, 2025.

<https://doi.org/10.36560/18120252022>. Acesso em: 4 jun. 2025.

KAUR, S. *et al.* Herbicide efficacy. **Frontiers in Agronomy**, v. 6, p. 1504465, 2024.

<https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1504465>. Acesso em: 3 jun. 2025.

KRAMER, M. D.; LEGLEITER, T. R. Influence of broadcast nozzle design and weed density on dicamba plus glyphosate deposition, coverage, and efficacy in dicamba-resistant soybean.

Frontiers in Agronomy, v. 4, p. 903669, 2022. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.903669>.

Acesso em: 9 jul. 2025.

LEIVA, V. *et al.* Bootstrap control charts for quantiles based on log-symmetric distributions with applications to the monitoring of reliability data. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 39, n. 1, p. 1-24, 2023. <https://doi.org/10.1002/qre.3072>. Acesso em: 26 jul. 2025.

LI, G. *et al.* Modeling and experimental validation of the atomization efficiency of a rotary atomizer for aerial spraying. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 419, 2022.

<https://doi.org/10.3390/agronomy12020419>. Acesso em: 4 jun. 2025.

LIMA, C. C. Controle de *Commelina benghalensis* e *Spermacoce densiflora* por herbicidas alternativos ao glyphosate. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) – Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/13398>. Disponível em: (<https://repositorio.ufscar.br/items/bab5d1c1-447e-4e48-88df-332b282955cc>). Acesso em: 17 set. 2025.

LOPES, L. L. **Uso de aeronave remotamente pilotada para pulverização agrícola em diferentes condições operacionais**. 2024. 145 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.360>. Disponível em: (<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/42109>). Acesso em: 6 jul. 2025.

MARTIN, D. *et al.* Spray deposition on weeds (Palmer amaranth and Morningglory) from a remotely piloted aerial application system and backpack sprayer. **Drones**, v. 4, n. 3, p. 59, 2020. <https://doi.org/10.3390/drones4030059>. Acesso em: 10 ago. 2025.

MATUO, T. **Técnicas de aplicação de defensivos agrícolas**. Jaboticabal: Funep, 1990.

MCGINTY, J. A. *et al.* Evaluation of the spray droplet size spectra of drift-reducing agricultural spray nozzle designs. **American Journal of Experimental Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 1, 2016. <https://doi.org/10.9734/AJEA/2016/23785>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MCGINTY, J. A.; BAUMANN, P. A.; MORGAN, G. D. Choosing the Right Nozzle to Reduce Spray Drift. **The OAKtrust Digital Repository**, jul. 2024. Disponível em: <https://oaktrust.library.tamu.edu/server/api/core/bitstreams/02fef113-3064-4ef7-a751-e90094df1d0e/content>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MEJÍAS, E. A. *et al.* Assessing two methods for agrochemical application (tractor-based and UAV) in rice fields. **Agronomía Costarricense**, v. 48, n. 2, p. 65-81, 2024.

MENG, Y.; LAN, Y.; MEI, G.; GUO, Y.; SONG, J.; WANG, Z. 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. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181105.4298>. Acesso em: 8 jun. 2025.

MINITAB Inc. **MINITAB®**. Version 16.2, 2010.

MONTANHANI, M. E. S. **Controle de plantas daninhas em pós-emergência na cultura da soja por aplicação terrestre e drone**. 2023. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2023. Disponível em: (<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/74893429-5cd5-4015-a727-3bb55d7f9a80>). Acesso em: 10 ago. 2025.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Tradução e revisão técnica Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 555 p.

MONTGOMERY, D. C. Introduction to statistical quality control. [*s. l.*]: **John Wiley & Sons**, 2020.

- MORAIS, A. R. **Estatística Experimental**: uma introdução aos delineamentos e análise de experimento. Lavras: Ed. UFLA, 2001. 197 p.
- MUNIZ, C. R. *et al.* Pesticide drift: comparing spraying systems under variable field climatic conditions. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo**, v. 57, n. 1, p. 115-125, 2025.
- MUR, M. *et al.* Spray nozzle performance on wheat. **Agrociencia (Uruguay)**, v. 24, n. 2, 2020. <https://doi.org/10.31285/AGRO.24.149>. Acesso em: 11 jul. 2025.
- NETO, I. C. G. *et al.* Eficiência de diferentes herbicidas na dessecação de área em pousio. **Brazilian Journal of Science**, v. 2, n. 4, p. 41-53, 2023. <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i4.274>. Acesso em: 20 ago. 2025.
- OLIVEIRA, O. G. T. M. **Influência do tamanho de gota nos depósitos da pulverização e controle de plantas daninhas com glifosato**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2023. Disponível em: (<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/39f81f76-e07e-41d0-8e07-102a064b4129>). Acesso em: 23 jul. 2025.
- OLIVEIRA, O. G. T. M. *et al.* Influence of droplet size on spray deposition and weed control using glyphosate. **Engenharia Agrícola**, v. 41, p. 449-457, 2021. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v41n4p449-457/2021>. Acesso em: 3 ago. 2025.
- OLIVEIRA, F. A. S. **Pontas de pulverização e tamanho de gotas na deposição e controle de soja voluntária**. 2024a. 44 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2024. Disponível em: (<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/538601a4-6873-4699-b1e1-a280237969b4>). Acesso em: 23 jul. 2025.
- OLIVEIRA, L. S. *et al.* Aerial spraying for downy mildew control in grapevines using a remotely piloted aircraft. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 46, p. e66613, 2024b. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v46i1.66613>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- OLIVEIRA, F. S. *et al.* Tecnologia de drones voltada para pulverização agrícola. **Scientific Electronic Archives**, v. 18, n. 1, 2025. <https://doi.org/10.36560/18120252017>. Acesso em: 4 jun. 2025.
- ÖNLER, E. *et al.* Spray characterization of an unmanned aerial vehicle for agricultural spraying. **The Philippine Agricultural Scientist**, v. 106, n. 1, p. 39-46, 2023. <https://doi.org/10.62550/AR007022>. Acesso em: 5 jun. 2025.
- PALLADINI, L. A.; RAETANO, C. G.; VELINI, E. D. Choice of tracers for the evaluation of spray deposits. **Scientia Agrícola**, v. 62, p. 440-445, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000500005>. Acesso em: 3 ago. 2025.
- PAUL, R. A. I. *et al.* Spray volume optimization with UAV-based herbicide application for effective droplet deposition and weed control in direct-seeded rice. **Frontiers in Agronomy**, v. 6, p. 1491842, 2024. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1491842>. Acesso em: 20 ago. 2025.
- PERISSATO, M. M. *et al.* Eficácia de herbicidas aplicados em trapoeraba (*Commelina benghalensis*) na região oeste do Estado do Paraná. **Revista De Agricultura Neotropical**, v.

10, n. 4, p. e7243-e7243, 2023. <https://doi.org/10.32404/rean.v10i4.7243>. Acesso em: 22 set. 2025.

PEREIRA, C. **Eficiência da aplicação com uso de drone e pulverizador terrestre**. 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2023. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n3-031>. Disponível em: (<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/33807>). Acesso em: 2 jun. 2025.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: Ed. Nobel, 2000. 467 p.

PROHUMA – Instituto Prohuma de Estudos Científicos. **Cenários agrícolas brasileiros: Estudo das principais modalidades de aplicação de agrotóxicos por cultivo no Brasil**. [s.l.]: Prohuma, 2018. Disponível em: <https://apublica.org/wp-content/uploads/2020/07/estudo-percentuais-de-modalidades-de-aplicacoes-por-lavouras-2018-prohuma.pdf> . Acesso em: 4 abr. 2026.

PRADO, E. P. *et al.* Performance of spray nozzles and droplet size on glufosinate deposition and weed biological efficacy. **Crop Protection**, v. 177, p. 106560, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106560>. Acesso em: 6 jul. 2025.

QUADROS, A. S. *et al.* Associações de herbicidas na dessecação pré-semeadura de soja. **Weed Control Journal**, v. 19, n. 2, p. e705 (1-9), 2020. <https://doi.org/10.7824/rbh.v19i2.705>. Acesso em: 2 jun. 2025.

RANABHAT, S.; PRICE, R. Effects of Flight Heights and Nozzle Types on Spray Characteristics of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Sprayer in Common Field Crops. **AgriEngineering**, v. 7, n. 2, p. 22, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7020022>. Acesso em: 15 jul. 2025.

R CORE TEAM. **The R Foundation for Statistical Computing Platform**. R Version, v. 4, 2020.

RIBEIRO, L. F. O. *et al.* Impact of operational parameters on droplet distribution using an unmanned aerial vehicle in a papaya orchard. **Agronomy**, v. 13, n. 4, p. 1138, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041138>. Acesso em: 9 jul. 2025.

RICHARDSON, B. *et al.* Swath pattern analysis from a multi-rotor unmanned aerial vehicle configured for pesticide application. **Pest Management Science**, v. 76, n. 4, p. 1282-1290, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.5638>. Acesso em: 6 jul. 2025.

RODRIGUES, E. A. S.; LIMA, S. C. Associação entre a incidência do levantamento de índice rápido de *Aedes aegypti* (Liraa) e as condições climáticas em Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, entre 2014 a 2016. **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 72, p. 251-263, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/RCG207245265>. Acesso em: 7 jun. 2025.

RODRIGUES, D. M. **Controle de plantas daninhas e da ferrugem asiática na cultura da soja com VANT pulverizador**. 2022. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, 2022. Disponível em: (<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/fa514678-3880-4b6b-86ea-a655008eebc3>). Acesso em: 7 out. 2025.

RODRIGUES, A. D. *et al.* Droplet spectrum characteristics and drift potential of different droplet classes and spray volumes application of atrazine with nicosulfuron. **Ciência Rural**, v. 53, n. 12, p. e20220509, 2023. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220509>. Acesso em: 9 jul. 2025.

SAFAEINEZHAD, M.; GHASEMI-NEJAD-RAEINI, M.; TAKI, M. Performance evaluation of spraying drones compared to boom sprayers for spray applications. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 41521, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-25353-1>. Acesso em: 2 jun. 2025.

SALATTA JUNIOR, A. B. **Acurácia e precisão de calibração na pulverização com drones**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/bcb3cbb2-d4ed-4332-81e9-29fe877db91e>. Acesso em: 4 jun. 2025.

SALOMÃO, H. M. **Competição de espécies daninhas com a cultura da soja**: determinação do nível de dano e de parâmetros fisiológicos e bioquímicos associados. 2022. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/29060>. Acesso em: 16 maio 2024.

SANDMANN, A. *et al.* Comparação da Eficiência de Pulverização Agrícola: Drones versus Pulverizadores Terrestres. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 11, p. e5432-e5432, 2025. <https://doi.org/10.7769/gesec.v16i11.5432>. Acesso em: 2 jun. 2025.

SANTOS, E. A. *et al.* Weed control efficacy of herbicide mixtures and digital assessment methods during pre-planting burndown in soybean. **Advances in Weed Science**, v. 43, p. e020250012, 2025. <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2025;43:00023>. Acesso em: 2 jun. 2025.

SAPKOTA, M. **Influence of Application Variables on Spray Deposition, Quality, Canopy Penetration and Pesticide Efficacy in Peanut**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade da Geórgia, Geórgia, 2023. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/adcc9caec131cbb58f085e1651e9f8ac/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>. Acesso em: 6 jul. 2025.

SCHRÖDER, E. P.; BURKERT, V. G. Relato sobre experiência de uso de drones agrícolas no Brasil. In: SOUZA, W. J. O.; SANCHES, A. G. **Tecnologia e Inovação na Agricultura**: aplicação, produtividade e sustentabilidade em pesquisa. [s.l.]: Editora Científica Digital, 2023. p. 227-238. <https://doi.org/10.37885/230312454>. Acesso em: 4 jun. 2025.

SEIBT, T. A. *et al.* Herbicide florasulfuron-benzyl via drone with different nozzles and spray volumes for weed control in rice crops. **Ciência Rural**, v. 55, n. 7, p. e20240187, 2025. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20240187>. Acesso em: 15 jul. 2025.

SHAN, C. *et al.* Effects of droplet size and spray volume parameters on droplet deposition of wheat herbicide application by using UAV. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 14, n. 1, p. 74-81, 2021. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20211401.6129>. Acesso em: 9 jul. 2025.

- SHI, X. *et al.* Optimizing UAV spray parameters to improve precise control of tobacco pests at different growth stages. **Pest Management Science**, v. 80, n. 11, p. 5809-5819, 2024. <https://doi.org/10.1002/ps.8312>. Acesso em: 4 jun. 2025.
- SILVA, T. B. G. *et al.* Eficiência de diferentes tipos de herbicidas associados ao glyphosate no controle da *Commelina benghalensis*. **Revista Agrogeoambiental**, v. 6, n. 1, 2014. <https://doi.org/10.18406/2316-1817v6n12014537>. Acesso em: 6 out. 2025.
- SILVA, J. M. P.; CAVICHIOLI, F. A. O uso da agricultura 4.0 como perspectiva do aumento da produtividade no campo. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 2, p. 616-629, 2020. <https://doi.org/10.31510/inf.v17i2.1068>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- SINDIVEG. **Área tratada por defensivos agrícolas no Brasil cresce 9,2% em 2024**. Disponível em: <https://sindiveg.org.br/ultimas-noticias/area-tratada-por-defensivos-agricolas-no-brasil-cresce-92-em-2024/>. Acesso em: 12 abr. 2026.
- SOARES, R. M.; SCHRÖDER, E. P. Uso de drones agrícolas no Brasil: da pesquisa à prática. **Embrapa Soja**, Londrina, n. 474, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1175882/uso-de-drones-agricolas-no-brasil-da-pesquisa-a-pratica>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- SOUSA, U. V. *et al.* Interação da mistura em tanque entre os herbicidas diquat e glyphosate na dessecação de área em pousio. **Brazilian Journal of Science**, v. 2, n. 2, p. 61-70, 2023. <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i2.264>. Acesso em: 8 set. 2025.
- SZARKA, A. Z. *et al.* Spray drift deposition comparison of fluorimetry and analytical confirmation techniques. **Pest Management Science**, v. 77, n. 9, p. 4192-4199, 2021. <https://doi.org/10.1002/ps.6456>. Acesso em: 3 ago. 2025.
- TAKANO, H. K. *et al.* Physiological factors affecting uptake and translocation of glufosinate. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, n. 10, p. 3026-3032, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07046>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- VAZ, V. Volume de calda e tamanho de gotas na aplicação de herbicidas. 2022. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Agronomia, Viçosa, 2022. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV_b9b1ace2ea72d6c855a36652d35b8a1b. Acesso em: 9 jul. 2025.
- WANG, G. *et al.* Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat field of the unmanned aerial vehicle with boom sprayer and two conventional knapsack sprayers. **Applied Sciences**, v. 9, n. 2, p. 218, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9020218>. Acesso em: 24 jul. 2025.
- WANG, G. *et al.* Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer. **Science of the Total Environment**, v. 737, p. 139793, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139793>. Acesso em: 5 jul. 2025.
- WANG, G. *et al.* Evaluation of spray drift of plant protection drone nozzles based on wind tunnel test. **Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 628, 2023a. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030628>. Acesso em: 5 jul. 2025.

- WANG, S. *et al.* Evaluation of compact air-induction flat fan nozzles for herbicide applications: Spray drift and biological efficacy. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1018626, 2023b. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1018626>. Acesso em: 5 jul. 2025.
- WU, C. L.; YANG, C. K.; LIN, J. Y. Water-sensitive paper detection and spray analysis. **Multimedia Tools and Applications**, v. 84, p. 1-55, March, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-025-20697-2>. Acesso em: 5 jul. 2025.
- XUE, X. *et al.* Research on a UAV spray system combined with grid atomized droplets. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1286332, 2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1286332>. Acesso em: 23 jul. 2025.
- YANG, F.; XUE, X.; CAI, C.; SUN, Z.; ZHOU, Q. Numerical simulation and analysis on spray drift movement of multirotor plant protection unmanned aerial vehicle. **Energies**, v. 11, n. 9, p. 2399, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11092399>. Acesso em: 4 jun. 2025.
- YANG, Z. *et al.* Optimization-design and atomization-performance study of aerial dual-atomization centrifugal atomizer. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 430, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020430>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- ZHU, Z. *et al.* Optimization Design and Atomization Performance of a Multi-Disc Centrifugal Nozzle for Unmanned Aerial Vehicle Sprayer. **Agronomy**, v. 14, n. 12, p. 2914, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122914>. Acesso em: 5 jul. 2025.
- ZUÑIGA, R. M. P. *et al.* Is herbicide applied using drones as efficient as when applied using terrestrial systems?. **Advances in Weed Science**, v. 42, p. e020240010, 2024. <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2024;42:00022>. Acesso em: 17 jul. 2025.