

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ROGÉRIO ROBES

PARÂMETROS DA PULVERIZAÇÃO NA FAIXA DE DISTRIBUIÇÃO COM VANT
UTILIZANDO DIFERENTES TAMANHOS DE GOTAS NA APLICAÇÃO DE
HERBICIDA

PONTA GROSSA

2026

ROGÉRIO ROBES

PARÂMETROS DA PULVERIZAÇÃO NA FAIXA DE DISTRIBUIÇÃO COM VANT
UTILIZANDO DIFERENTES TAMANHOS DE GOTAS NA APLICAÇÃO DE
HERBICIDA

Dissertação apresentada para obtenção de título de
mestre em Agronomia na Universidade Estadual de
Ponta Grossa, Área Fitotécnica e Fitossanidade.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Cláudio Garcia.

Coorientador: Pesquisador Dr. Fabrício Pinheiro Povh

PONTA GROSSA

2026

R652 Robes, Rogério
Parâmetros da pulverização na faixa de distribuição com VANT utilizando diferentes tamanhos de gotas na aplicação de herbicida / Rogério Robes. Ponta Grossa, 2026.
79 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia - Área de Concentração: Fitotecnia e Fitossanidade), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Cláudio Garcia.

Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Pinheiro Povh.

1. Agricultura de precisão. 2. Pulverização aérea. 3. Herbicidas - Aplicação. 4. Tecnologia de aplicação. I. Garcia, Luiz Cláudio. II. Povh, Fabrício Pinheiro. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Fitotecnia e Fitossanidade. IV.T.

CDD: 630

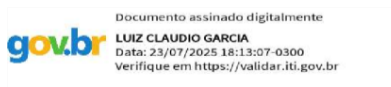


ROGÉRIO ROBES

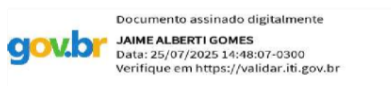
**“PARÂMETROS DA PULVERIZAÇÃO NA FAIXA DE DISTRIBUIÇÃO COM VANT
UTILIZANDO DIFERENTES TAMANHOS DE GOTAS NA APLICAÇÃO DE
HERBICIDA”**

Dissertação apresentada para obtenção de título de mestre em Agronomia na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área Fitotécnica e Fitossanidade.

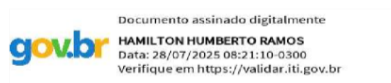
Ponta Grossa, 24 de fevereiro de 2026



Prof. Dr. Luiz Cláudio Garcia
Doutor em Agronomia
Universidade Estadual de Ponta Grossa



Prof. Dr. Jaime Alberti Gomes
Doutor em Engenharia Agrícola
Universidade Estadual de Ponta Grossa



Dr. Hamilton Humberto Ramos
Doutor em Agronomia
Instituto Agrônomo de Campinas

Dedico aos meus pais, Bento e Maria Luci.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por Sua presença constante em minha vida, por me conceder saúde, força e sabedoria ao longo desta jornada e por iluminar cada etapa do caminho até a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Bento e Maria Luci, expresso minha mais profunda gratidão pelo amor incondicional, pelo apoio irrestrito às minhas escolhas e pela confiança permanente em meu potencial. Vocês são meu alicerce e a base de todas as minhas conquistas.

À minha família, pelo incentivo contínuo, compreensão e apoio ao longo de toda essa trajetória. À minha noiva, Aline Thais, e à sua família, agradeço o companheirismo, acolhimento e apoio desde o início deste processo, tornando essa caminhada mais leve e significativa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Cláudio Garcia, agradeço a orientação segura, paciência, dedicação e pelos valiosos ensinamentos compartilhados durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Ao meu coorientador, Pesquisador Dr. Fabrício Pinheiro Povh, sou grato pela disponibilidade, incentivo e contribuições fundamentais para a concretização desta pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, professores Dr. Hamilton Humberto e Dr. Jaime Alberti, agradeço a disponibilidade em participar da defesa, pelas valiosas considerações e sugestões, que certamente enriqueceram e elevaram a qualidade desta dissertação.

Aos colegas e amigos que o curso de Agronomia me proporcionou, minha gratidão pela parceria, troca de experiências e apoio mútuo ao longo do mestrado.

Ao meu gestor, Roberto Simão De Carli, agradeço a compreensão, apoio e incentivo durante esse período, contribuindo para que essa jornada se tornasse mais leve e motivadora.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa, manifesto minha gratidão pela oportunidade de realizar este mestrado em uma instituição pública, gratuita e reconhecida pela excelência acadêmica.

A todos os professores do curso de Agronomia, agradeço pelos conhecimentos compartilhados, pela dedicação ao ensino e pela contribuição significativa para minha formação pessoal e profissional.

Meus sinceros agradecimentos.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”
(**Albert Einstein**)

RESUMO

ROBES, R. **Parâmetros da pulverização na faixa de distribuição com VANT utilizando diferentes tamanhos de gotas na aplicação de herbicida.** Orientador: Luiz Cláudio Garcia. Ponta Grossa, 2026. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2026.

O objetivo com o experimento foi determinar a faixa de pulverização com veículo aéreo não tripulado (VANT) utilizando diferentes tamanhos de gotas na aplicação de herbicida com ação de contato. Os diâmetros medianos das gotas utilizados foram de 100, 200, 300, 400 e 500 μm . O delineamento experimental foi em blocos aleatorizados, com 15 tratamentos e 03 repetições. Os tratamentos consistiram em papéis hidrossensíveis espaçados em 1,0 m, ao longo de uma faixa de 14 m, dispostos em estruturas metálicas a 0,5 m do solo, para coletar os impactos de gotas geradas na pulverização. A área de cada repetição de tratamento foi de 1.500 m^2 , com 50 m de comprimento e 30 m de largura. No que se refere à qualidade de pulverização foram consideradas como parcelas cada papel hidrossensível. Já para dessecação as repetições foram as faixas de dessecação mensuradas em cada parcela. O VANT utilizado foi o DJI™ Agras T40, munido de 02 bicos de pulverização rotativos LX8060SZ™, ajustado para distribuir um volume de calda de 10 L ha^{-1} , velocidade de 5,6 m s^{-1} e altura de voo de 4,0 m acima do alvo. O experimento foi repetido em três áreas no município de Palmeira - PR. As variáveis analisadas em papéis hidrossensíveis pelo aparelho DropScope™ foram: porcentagem de área coberta, volume recuperado (L ha^{-1}), densidade (impactos de gotas cm^{-2}), potencial risco de deriva (% de gotas com diâmetro menor que 150 μm), diâmetro da gota com 10%, 50% e 90% do volume acumulado ($DV_{0,1}$, $DV_{0,5}$ e $DV_{0,9}$ μm), amplitude relativa (SPAN) e coeficiente de variação dos diâmetros (%). Também se avaliou a faixa de dessecação mensurada 15 dias após a pulverização. Concluiu-se que as análises das variáveis em papéis hidrossensíveis (área coberta, volume recuperado, densidade de gotas e coeficiente de variação) apresentaram aumento nos amostradores centrais, especialmente com gotas maiores. O potencial risco de deriva foi reduzido no centro e elevado nas extremidades. Os maiores diâmetros ocorreram no centro. A faixa foi de 14 m para tamanhos de gota entre 100 e 200 μm e de 12 m para gotas acima de 300 μm . O índice SPAN indicou pulverização homogênea. Os registros das faixas dessecadas foram de 14,5 m para gotas com DMV de 100 μm , 12,8 m para 200 μm , 11,7 m para 300 μm , 10,0 m para 400 μm e 8,3 m para 500 μm .

Palavras-chave: agricultura de precisão; amplitude relativa; drone; tecnologia de aplicação.

ABSTRACT

ROBES, R. **Spraying parameters in the distribution range using UAV with different droplet sizes in the application of herbicide.** Supervisor: Luiz Cláudio Garcia. Ponta Grossa, 2026. Dissertation (Master in Agronomy) – State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2026.

This study aimed to evaluate the spray swath width and deposition characteristics of an unmanned aerial vehicle (UAV) operating with different droplet sizes in the application of a contact herbicide. The tested volumetric median diameters (VMD) were 100, 200, 300, 400, and 500 μm . The experiment followed a randomized complete block design with 15 treatments and three replications. Water-sensitive papers were positioned at 1.0 m intervals along a 14 m transect and mounted on metal supports 0.5 m above ground level to quantify droplet deposition. Each treatment replication covered an area of 1,500 m^2 (50 m $\times$ 30 m). For spray quality assessment, each water-sensitive paper was considered an experimental unit, whereas for desiccation evaluation, replications corresponded to the measured desiccated swaths within each treatment strip. Applications were performed using a DJITM Agras T40 UAV equipped with two LX8060SZTM rotary atomizers, calibrated to deliver 10 L ha^{-1} at a flight speed of 5.6 m s^{-1} and an operational height of 4.0 m above the target. The experiment was conducted in three different areas in the municipality of Palmeira, Paraná, Brazil. Spray deposition parameters were analyzed using the DropScopeTM system, including covered area percentage, recovered spray volume (L ha^{-1}), droplet density (impacts cm^{-2}), drift risk potential (percentage of droplets smaller than 150 μm), droplet diameters corresponding to 10%, 50%, and 90% of cumulative volume (DV0.1, DV0.5, and DV0.9), relative span (SPAN), and droplet size coefficient of variation (%). In addition, the effective desiccation swath was measured 15 days after application. Results demonstrated that covered area, recovered volume, droplet density, and droplet size variability were higher in the central sampling positions, particularly when larger droplets were used. Drift risk potential was lower in the central portion of the swath and increased toward the outer limits. Larger droplet diameters were predominantly observed in the central zone. Based on deposition data, the effective spray swath was 14 m for droplet sizes between 100 and 200 μm and 12 m for droplets larger than 300 μm . SPAN values indicated a homogeneous droplet size distribution. Field desiccation measurements showed swath widths of 14.5 m for 100 μm droplets, 12.8 m for 200 μm , 11.7 m for 300 μm , 10.0 m for 400 μm , and 8.3 m for 500 μm .

Keywords: precision agriculture; relative amplitude (SPAN); drone; application technology, desiccation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Veículo aéreo não tripulado (VANT) DJI AGRAS T40™, com capacidade de tanque de 40 litros, oito rotores e equipado com dois bicos de pulverização rotativos LX8060 SZ™, utilizado no experimento sobre faixa de pulverização com diferentes diâmetros de gotas, realizado em julho de 2025, em Palmeira – PR..... 24
- Figura 2 – Bico rotativo LX8060 SZ™ com sistema duplo de pulverização atomizada, utilizado no experimento sobre faixa de pulverização com diferentes diâmetros de gotas para dessecação, realizado em 2025, em Palmeira – PR..... 25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Porcentagem da área coberta dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha ⁻¹ , velocidade 5,6 m s ⁻¹ munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR (p < 0,05).....	28
Gráfico 2 – Volume recuperado (L ha ⁻¹) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT – drone), com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha ⁻¹ , velocidade de 5,6 m s ⁻¹ , equipado com dois bicos rotativos, variando o diâmetro das gotas em micrômetros (μm) Palmeira – PR, 2025 (p < 0,05).....	30
Gráfico 3 – Densidade (impactos cm ⁻²) das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha ⁻¹ , velocidade 5,6 m s ⁻¹ , munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR (p < 0,05).....	33
Gráfico 4 – Potencial risco de deriva (% de gotas com diâmetro menor que 150 micra) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha ⁻¹ , velocidade 5,6 m s ⁻¹ , munido dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR (p < 0,05).	51
Gráfico 5 – Diâmetro da gota com 10% do volume acumulado (DV _{0,1} μm) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha ⁻¹ , velocidade 5,6 m s ⁻¹ , munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR (p < 0,05).....	39
Gráfico 6 – Diâmetro da gota com 50% do volume acumulado (DV _{0,5} μm) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha ⁻¹ , velocidade 5,6 m s ⁻¹ , munido dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR (p < 0,05).....	57
gráfico 7 – Diâmetro da gota com 90% do volume acumulado (DV _{0,9} μm) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha ⁻¹ , velocidade 5,6 m s ⁻¹ , munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR (p < 0,05)	44
Gráfico 8 – Amplitude relativa (SPAN) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha ⁻¹ , velocidade 5,6 m s ⁻¹ , munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR (p < 0,05).....	47

Gráfico 9 – Coeficiente de Variação (CV) dos diâmetros dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha ⁻¹ , velocidade 5,6 m s ⁻¹ , munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (µm), 2025, Palmeira – PR ($p < 0,05$).....	49
Gráfico 10 – Faixa (m) dessecada com herbicida de contato, pulverizado por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do alvo, volume de calda de 10 L ha ⁻¹ , velocidade 5,6 m s ⁻¹ , munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (µm), 2025, Palmeira – PR.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do diâmetro de gotas para pulverização agrícola proposta pela ASABE	9
Tabela 2 – Coeficiente de variação (%) com base nos valores da faixa de porcentagem da área coberta dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha, velocidade 5,6 m s ⁻¹ munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (µm), 2025, Palmeira – PR	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
CDA	Controlled Drop Application
DMV	Diâmetro Mediano Volumétrico
DV	Diâmetro Volumetrico
SPAN	Amplitude Relativa
CV	Coefficiente de Variação
ADAPAR	Agência de Defesa Agropecuária do Paraná
ANDEF	Associação Nacional de Defesa Vegetal
ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	AGRICULTURA	18
2.2	PLANTIO DIRETO	18
2.3	HERBICIDAS	20
2.4	TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO	21
2.5	PULVERIZAÇÃO COM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT). 22	
2.6	QUALIDADE NA PULVERIZAÇÃO	23
2.6.1	Porcentagem de Área Coberta.....	24
2.6.2	Volume Recuperado.....	25
2.6.3	Densidade De Impacto De Gotas	27
2.6.4	Potencial Risco De Deriva	28
2.6.5	Diâmetro Da Gota Com 10% Do Volume Acumulado.....	29
2.6.6	Diâmetro Da Gota Com 50% Do Volume Acumulado.....	31
2.6.7	Diâmetro Da Gota Com 90% Do Volume Acumulado.....	32
2.6.8	Amplitude Relativa (SPAN)	33
2.6.9	Coeficiente de Variação (CV).....	34
2.7	FAIXA DE PULVERIZAÇÃO COM VANT.....	36
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	PORCENTAGEM DE ÁREA COBERTA	42
4.2	VOLUME RECUPERADO	44
4.3	DENSIDADE DE IMPACTO DE GOTAS	47
4.4	POTENCIAL RISCO DE DERIVA.....	50
4.5	DIÂMETRO DA GOTA COM 10% DO VOLUME ACUMULADO (DV0,1 µm)	53
4.6	DIÂMETRO DA GOTA COM 50% DO VOLUME ACUMULADO (DV0,5 µm)	56
4.7	DIÂMETRO DA GOTA COM 90% DO VOLUME ACUMULADO (DV0,9 µm)	59
4.8	AMPLITUDE RELATIVA (SPAN)	61
4.9	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV).....	63

4.10	FAIXA DESSECADA	66
5	CONCLUSÕES	70
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A agricultura passou por profundas transformações nas últimas décadas, impulsionadas pela incorporação de tecnologias voltadas à otimização dos processos produtivos e à sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, a tecnologia de aplicação desempenha papel fundamental na eficiência do uso de produtos fitossanitários, garantindo que o conjunto de conhecimentos e práticas adotadas contribua para conduzir o ingrediente ativo ao alvo na quantidade adequada, de forma economicamente viável e com mínimo impacto ambiental (Matuo, 1990; Matthews, 2023). Entre as inovações emergentes, destaca-se o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs), uma ferramenta integrada aos princípios da agricultura de precisão (Sinha *et al.*, 2022).

A eficácia da pulverização está diretamente relacionada a variáveis como o diâmetro das gotas, o volume de calda, a altura e a velocidade de voo, as condições meteorológicas e as características físico-químicas do produto aplicado. Entre esses fatores, o diâmetro mediano volumétrico das gotas constitui um dos principais determinantes da qualidade da aplicação, pois influencia tanto a deposição no alvo quanto o risco de deriva. Gotas muito finas tendem a proporcionar melhor cobertura, porém são mais suscetíveis à evaporação e ao deslocamento pelo vento; por outro lado, gotas mais grossas reduzem as perdas por deriva, mas podem comprometer a uniformidade da distribuição sobre o alvo (Antuniassi; Boller, 2011; Ramos, 2005).

Com a expansão do uso de herbicidas e a crescente necessidade de manejos mais eficientes na pré-semeadura das culturas de verão, a dessecação das plantas de cobertura consolidou-se como uma prática indispensável para o controle inicial de plantas daninhas e para o estabelecimento uniforme das culturas subsequentes no sistema de plantio direto. Nesse contexto, o uso de herbicidas de contato exige que o produto seja distribuído de forma homogênea sobre a superfície foliar, o que reforça a importância de compreender o comportamento das gotas geradas durante a pulverização com VANTs (Carneiro *et al.*, 2024; Carvalho *et al.*, 2017).

A qualidade da deposição e a uniformidade da distribuição espacial das gotas são essenciais para assegurar a eficácia da pulverização, conforme asseveram Gogolák *et al.* (2024). A variabilidade na distribuição das gotas ao longo da faixa pulverizada pode comprometer a ação do produto, além de aumentar desperdícios e riscos ambientais. Os autores destacam que condições meteorológicas, estabilidade da aeronave e alterações aerodinâmicas durante o voo

influenciam diretamente a formação e o comportamento das gotas, justificando a necessidade de avaliações detalhadas da deposição em condições de campo.

Considerando o avanço dessa tecnologia e a necessidade de informações científicas sobre o desempenho operacional de VANTs em aplicações de herbicidas, o presente estudo teve como objetivo determinar a faixa de pulverização obtida com diferentes diâmetros de gotas na aplicação de um herbicida de contato. As variáveis avaliadas incluíram a qualidade da pulverização e a extensão da faixa dessecada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AGRICULTURA

A agricultura é uma atividade destinada ao cultivo do solo com o propósito de produzir vegetais para consumo humano e/ou para a alimentação de animais. Além disso, o termo agricultura remete ao conjunto de técnicas e práticas utilizadas para o cultivo dos campos, envolvendo desde o preparo do solo até a obtenção dos produtos agrícolas. Historicamente, o desenvolvimento da agricultura ocorreu em paralelo à evolução humana. À medida que o ser humano buscou formas de se estabelecer de maneira permanente, tornou-se necessário desenvolver meios de garantir alimentos que não dependessem exclusivamente da oferta espontânea da natureza. Assim, a produção deliberada de plantas marca o início dos sistemas de cultivo. Com essa transição — da coleta de alimentos ao cultivo — o homem deixou de ser nômade. Passou a produzir seus próprios alimentos nas proximidades dos locais onde se fixava, incentivando o surgimento de núcleos habitacionais. Esse processo resultou no estabelecimento do sedentarismo, favorecendo a formação das primeiras tribos, aldeias e vilas (Castanho; Teixeira. 2017; Mazoyer; Roudart, 2010).

Ao longo desses 10 mil anos de história, os desafios enfrentados pela atividade agrícola para garantir a alimentação de uma população em constante crescimento tem sido permanentes. Na atualidade, a agricultura se depara com obstáculos ainda mais complexos, entre eles as mudanças climáticas, a escassez hídrica, a necessidade de ampliar a produção para atender à crescente demanda global, além da degradação ambiental associada ao uso inadequado de insumos químicos. Somam-se a esses fatores a instabilidade econômica, a carência de mão de obra qualificada, a insuficiência de investimentos em tecnologia, o desperdício ao longo da cadeia produtiva e a necessidade de adoção de práticas conservacionistas que assegurem a sustentabilidade do sistema. Entre as técnicas conservacionistas amplamente utilizadas destaca-se o sistema de plantio direto (Côrt *et al.*, 2025; Liu; Chen; Jiao, 2024; Saleem, 2024).

2.2 PLANTIO DIRETO

O plantio direto é uma técnica de cultivo conservacionista na qual a semeadura é realizada sem as etapas tradicionais de preparo do solo, como aração e gradagem, características do sistema convencional. Nessa abordagem, mantém-se o solo continuamente coberto por plantas em desenvolvimento e por resíduos vegetais. Essa cobertura tem como finalidade

proteger o solo da ação direta das gotas de chuva, reduzir o escoamento superficial e minimizar os processos de erosão hídrica e eólica. Esse sistema pode ser considerado uma modalidade de cultivo mínimo, uma vez que o revolvimento do solo é restrito ao sulco de semeadura. Assim, a deposição das sementes, a adubação e, quando necessário, a aplicação de produtos fitossanitários é realizada em uma única operação Cruz *et al.* (2021); Possamai *et al.* (2022).

Entre as premissas do sistema de plantio direto está o uso da palha deixada por culturas de cobertura na superfície do solo, somada aos resíduos das culturas comerciais. Esse conjunto de materiais cria um ambiente altamente favorável ao desenvolvimento vegetal, contribuindo para a estabilização da produção e para a recuperação ou manutenção da qualidade do solo. Nesse contexto, a adoção da rotação de culturas, envolvendo diferentes espécies vegetais — especialmente aquelas utilizadas como plantas de cobertura — é fundamental para garantir uma adequada cobertura do solo e uma ciclagem eficiente de nutrientes (Alvarenga *et al.*, 2001; Silva *et al.*, 2022).

Na região Sul do Brasil a aveia (*Avena* spp.), azevém (*Lolium multiflorum*), braquiária (*Urochloa* spp.), centeio (*Secale cereale*), ervilhaca comum (*Vicia sativa*) e o nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) são as principais plantas utilizadas como cobertura do solo no inverno. A preferência por determinadas espécies para cobertura do solo se justifica por sua elevada produção de fitomassa, resistência a doenças, boa adaptação a solos de baixa fertilidade e pela maior persistência de seus resíduos na superfície do solo. Além disso, emprega-se a técnica de implantação simultânea de várias espécies, conhecida como mix de culturas ou consorciação, que apresenta vantagens como maior produção de matéria seca — tanto da parte aérea quanto das raízes — maior acúmulo e reciclagem de nutrientes e melhor proteção do solo. Dessa forma, a utilização de culturas para cobertura do solo é indispensável no sistema de plantio direto, constituindo uma de suas premissas fundamentais. (Silveira *et al.*, 2020).

No sistema de plantio direto, o manejo envolve o controle químico das plantas cultivadas para cobertura do solo quando estas atingem a antese plena, a fim de evitar a produção de sementes e a perpetuação das espécies na área de cultivo. Esse procedimento, conhecido como “dessecação”, consiste na aplicação de herbicidas com o objetivo de eliminar a vegetação presente antes da semeadura da cultura principal (Pereira *et al.*, 2023; Schneider *et al.*, 2022).

2.3 HERBICIDAS

Herbicidas são produtos químicos ou biológicos utilizados para controlar o crescimento de plantas indesejadas, conhecidas como plantas daninhas, que competem com as culturas agrícolas por recursos como água, luz e nutrientes. Podem ser seletivos, afetando apenas espécies específicas, ou não seletivos, atuando sobre uma ampla gama de plantas. Seu mecanismo de ação envolve a inibição de processos vitais, como a fotossíntese, a síntese de aminoácidos ou outras rotas metabólicas essenciais. A introdução e o aprimoramento dos herbicidas representaram um marco no manejo integrado de plantas daninhas e no desenvolvimento das técnicas de cultivo, contribuindo significativamente para o aumento da produtividade, para a segurança alimentar global e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas modernos (Nath *et al.*, 2024; Ofosu *et al.*, 2023).

A eficiência da aplicação do herbicida pode ser avaliada por meio da porcentagem de injúria causada às plantas. A pontuação atribuída na avaliação da fitotoxicidade geralmente baseia-se em uma escala numérica, definida de acordo com o modelo metodológico adotado no estudo. Na escala proposta por Frans *et al.* (1986), há a atribuição de notas varia de 0 a 100, contemplando as seguintes classes de fitotoxicidade: 0 = nenhuma injúria; 10 = leve descoloração; 20 = descoloração; 30 = descoloração pronunciada com rápida recuperação; 40 = descoloração pronunciada com recuperação; 50 = descoloração pronunciada com recuperação lenta; 60 = não recuperável; 70 = grandes perdas na densidade; 80 = plantas quase destruídas; 90 = sobrevivência de poucas plantas; e 100 = morte total das plantas.

Os herbicidas podem atuar de diferentes maneiras no interior das plantas, destacando-se, entre seus mecanismos de ação, os efeitos sistêmicos e de contato. Os herbicidas sistêmicos são absorvidos pelos tecidos vegetais e translocados através dos sistemas vasculares (xilema e/ou floema), alcançando sítios de ação em regiões distantes do ponto de aplicação, como raízes, meristemas ou folhas jovens. Por outro lado, os herbicidas de contato atuam apenas nas superfícies vegetais atingidas pelas gotas, promovendo danos rápidos e localizados, sem penetração profunda ou translocação para outras partes da planta (Marchi; Marchi; Guimarães, 2008).

Embora as aplicações de herbicidas façam parte das operações agrícolas rotineiras, as técnicas específicas e os métodos empregados durante a pulverização são, muitas vezes, negligenciados, resultando no não cumprimento de etapas fundamentais para a otimização do desempenho do produto. A aplicação de herbicidas é um processo complexo, envolvendo diversas variáveis e múltiplas oportunidades de falhas, mesmo antes que as gotas da calda

atingam o alvo pretendido. Essas falhas podem gerar perdas econômicas significativas, além de aumentar o risco de contaminação ambiental. Práticas inadequadas, como a escolha incorreta de pontas de pulverização, definição inadequada da altura da barra ou da altura de voo, seleção equivocada do volume de calda, velocidade inadequada do pulverizador ou ajustes incorretos no equipamento, podem comprometer seriamente a eficácia da aplicação (Butts *et al.*, 2021).

Conforme revisado por Knoche (1994), a redução no diâmetro das gotas geralmente tende a aumentar o desempenho de herbicidas de ação de contato e, com menor frequência, de herbicidas sistêmicos, desde que o volume de calda seja mantido constante. Entre os experimentos avaliados envolvendo pulverizações em plantas, observou-se que, em 20% dos casos, o diâmetro das gotas não influenciou o desempenho do herbicida, enquanto em 9% dos estudos a redução do diâmetro resultou em menor eficácia. A absorção mostrou-se relativamente independentemente do tamanho das gotas, podendo aumentar conforme se eleva a quantidade de ingrediente ativo depositado na superfície-alvo, efeito que pode ser alcançado tanto pelo aumento do diâmetro das gotas quanto pelo incremento da concentração do ingrediente ativo em cada gota.

Ao estudar distintas tecnologias de aplicação na dessecação da aveia com herbicida de contato, em presença ou não de assistência de ar junto à barra do pulverizador, Garcia *et al.* (2004) pesquisou diferentes volumes de calda. A aveia foi cultivada como cultura de cobertura para fornecer palha ao sistema de plantio direto, sendo que a dessecação foi realizada em antese plena. Na aplicação terrestre com pulverizador de barras, se trabalhou com volumes de calda de 100 a 400 L ha⁻¹. As porcentagens de dessecação atingidas foram de 46 a 83%.

A dessecação da área, realizada antes da semeadura da cultura subsequente, geralmente ocorre quando as plantas de cobertura estão no estágio de antese plena, apresentando elevada massa foliar. Nessa condição, o volume de biomassa pode dificultar que o produto pulverizado alcance as plantas daninhas situadas abaixo do dossel, fenômeno conhecido como “efeito guarda-chuva”. Como herbicidas de contato não apresentam translocação no interior da planta, sua eficácia depende diretamente da cobertura e da deposição adequadas sobre os tecidos atingidos, o que impõe desafios específicos à tecnologia de aplicação (Garcia *et al.*, 2004).

2.4 TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO

A tecnologia de aplicação consiste no emprego integrado de conhecimentos e práticas que visam colocar o ingrediente ativo no alvo, na quantidade necessária, de forma econômica e com o mínimo risco de contaminação ambiental. Cinco fatores fundamentais influenciam

diretamente a qualidade da aplicação: o alvo, o produto, o momento, as condições meteorológicas e a máquina. No contexto atual, em que os sistemas de produção demandam elevados volumes de produtos fitossanitários, a tecnologia de aplicação torna-se um componente essencial para otimizar a ação desses insumos, assegurando maior eficácia no controle e reduzindo perdas e impactos indesejados (Matthews, 2023; Matuo, 1990).

A aplicação dos produtos é realizada de maneiras distintas, em razão da natureza do material a ser aplicado. Sendo assim, os métodos de aplicação são divididos em aplicações via sólida, via líquida e via gasosa. A aplicação via líquida, em razão da vasta diversidade de máquinas pulverizadoras, pode ser classificada em virtude do sistema de pulverização do líquido, ou seja, pela forma como a massa líquida é transformada em gotas, conforme o tipo de ponta utilizado. Em razão da forma de energia utilizada, as máquinas pulverizadoras são classificadas como hidráulicos (pulverizador), pneumáticos (atomizador), eletrostáticos térmicos (nebulizador). Os pulverizadores hidráulicos são máquinas que pressurizam a calda em um circuito hidráulico até o restritor, a ponta de pulverização, que divide a calda em gotas. Os pulverizadores podem ser classificados como manual costal, terrestre tratorizado, autopropelido ou aéreo (Azevedo; Freire, 2006; Frare *et al.*, 2025; Garcia *et al.*, 2023; Hafeez *et al.* 2022).

2.5 PULVERIZAÇÃO COM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT)

Os VANTs são disponibilizados em diversos modelos e destinados a diferentes finalidades. Podem ser utilizados para fins comerciais, corporativas, militares e experimentais. Na agricultura, os multirrotores são os mais empregados, principalmente devido à facilidade operacional e ao menor custo de aquisição e manutenção. Entre as principais vantagens da pulverização aérea, destacam-se: elevada capacidade operacional, ausência de danos à cultura decorrentes do deslocamento do equipamento, possibilidade de operação em áreas íngremes ou excessivamente úmidas, eliminação da compactação do solo, direcionamento das gotas para baixo pelo fluxo de ar gerado pelas hélices e maior segurança operacional uma vez que não exige piloto embarcado (Chen *et al.*, 2022; Melo *et al.*, 2024).

Entretanto, a eficácia da pulverização é significativamente influenciada pelas condições meteorológicas, sobretudo devido à distância entre a formação das gotas e o alvo. Para garantir uma aplicação bem-sucedida, com elevada qualidade deposicional, torna-se essencial analisar variáveis como porcentagem de área coberta, volume recuperado, densidade de gotas, coeficiente de variação, amplitude relativa e potencial risco de deriva. Com base

nessas informações, é possível determinar de forma precisa a faixa de deposição das gotas sobre a área alvo (Hafeez *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2025; Garcia *et al.*, 2024).

Atualmente, os VANTs destinados à pulverização podem ser equipados com bicos rotativos de disco, responsáveis por fragmentar a calda em gotas por meio de uma superfície giratória. Essa tecnologia está inserida no conceito de “Controlled Drop Application” (CDA), cujo princípio consiste em evitar a formação de gotas extremamente finas — que apresentam elevado potencial de deriva — e de gotas excessivamente grossas — suscetíveis a perdas por escorrimento. A principal vantagem das pontas rotativas é a capacidade de modular o diâmetro das gotas a partir da variação da velocidade tangencial do disco, permitindo ajustar a pulverização às necessidades específicas do produto, do alvo e das condições ambientais. Entretanto, permanece o desafio de manter a qualidade da pulverização à medida que aumenta a distância entre o ponto de formação das gotas e o alvo, condição típica das aplicações aéreas com VANTs (Park; Park, 2022; Ru *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2022).

2.6 QUALIDADE NA PULVERIZAÇÃO

A qualidade da pulverização depende de cinco fatores fundamentais: o alvo, o momento de aplicação, o produto, a máquina e as condições ambientais. Para assegurar uma aplicação eficiente, torna-se essencial utilizar um diluente adequado, realizar a regulagem e a calibração do pulverizador, selecionar corretamente as pontas de pulverização e controlar variáveis operacionais, como velocidade e altura de aplicação. Além disso, devem ser rigorosamente observados os limites das condições meteorológicas, uma vez que influenciam diretamente a trajetória das gotas. As recomendações técnicas são de que a temperatura seja inferior a 30 °C, a umidade relativa do ar superior a 50% e a velocidade do vento esteja entre 3 e 10 km h⁻¹ (Matthews, 2000; Matuo, 1990; Ramos, 2005).

No circuito hidráulico do pulverizador, a ponta de pulverização desempenha papel principal, pois é responsável por definir a faixa de pressão de trabalho, o volume de calda aplicado, o diâmetro das gotas, a cobertura sobre o alvo, o ângulo de jato, a vida útil das gotas e o risco de deriva (Garcia *et al.*, 2024; Matthews, 2018). Todas essas variáveis são fortemente influenciadas pelo espectro de gotas. Por apresentarem dimensões muito reduzidas, os diâmetros das gotas são expressos em micrômetros (µm), unidade que corresponde à milionésima parte do metro. Ao longo do tempo, diferentes propostas de classificação foram desenvolvidas para categorizar os espectros de gotas gerados na pulverização. Entre elas

destaca-se a classificação da ASABE (2018), que organiza as categorias de gotas com base em faixas de diâmetro mediano volumétrico (DMV) (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação do diâmetro de gotas para pulverização agrícola proposta pela ASABE.

Categoria	Símbolo	Diâmetro Mediano Volumétrico (DMV)
Muito Fina	VF	< 100 μm
Fina	F	100 - 175 μm
Média	M	175 - 250 μm
Grossa	C	250 - 375 μm
Muito Grossa	VC	375 - 450 μm
Extremamente Grossa	XC	> 450 μm

Fonte: ASABE (2018).

A avaliação da pulverização pode ser feita por meio de papéis hidrossensíveis. Quando as gotas da pulverização entram em contato com o papel amarelo, ele absorve a água e forma marcas azuis. Após a aplicação, as imagens dos papéis são digitalizadas e analisadas por softwares especializados, como o Conta-GotasTM ou e-SprinkleTM, que determinam a qualidade da pulverização. A qualidade da pulverização das pontas pode ser avaliada por parâmetros como a área coberta, densidade e amplitude relativa (Garcia; Ramos; Justino, 2004; Garcia *et al.*, 2024).

2.6.1 Porcentagem de Área Coberta

A porcentagem de área coberta corresponde à fração da superfície do alvo que foi efetivamente atingida pelas gotas da pulverização. Esse parâmetro é essencial para avaliar a eficácia da aplicação, pois está diretamente relacionado à probabilidade de o ingrediente ativo interagir com o tecido vegetal. A recomendação da área coberta varia conforme diversos fatores, especialmente o modo de ação dos produtos fitossanitários. Produtos sistêmicos, por se deslocarem pelos tecidos vasculares após a absorção, podem operar adequadamente mesmo com menor cobertura foliar. Nesses casos, frequentemente se utilizam gotas de maior diâmetro para reduzir o potencial de deriva. Por outro lado, produtos com ação de contato exigem maior uniformidade e porcentagem de cobertura, uma vez que seu desempenho depende da interação direta entre a gota e a superfície atingida. Assim, são normalmente aplicados com gotas de menor diâmetro, capazes de promover maior densidade de impactos (Matthews; Thornhill, 2019; Matuo, 1990).

As pontas de pulverização utilizadas na aplicação de fungicidas na cultura do feijão foram avaliadas por Garcia *et al.* (2023). O estudo foi conduzido com um pulverizador de barras terrestre, operando com volume de calda de 130 L ha⁻¹. A configuração utilizada permitiu a geração de gotas com diâmetros medianos volumétricos (DMV) classificados como muito finos, finos, médios, grossos e muito grossos. No terço superior das plantas, a porcentagem de área coberta variou de 32% a 14%, reduzindo com a elevação do tamanho das gotas.

A pesquisa desenvolvida por Guo *et al.* (2019) teve como foco a análise de vórtices — forte, moderado e ausente — gerados pelo voo do VANT WPH642™, operado a 20 metros acima do solo. Para avaliar o depósito de gotas, foram utilizados papéis hidrossensíveis posicionados nas camadas média e superior da cultura do arroz (*Oryza sativa*). Os autores observaram porcentagens de área coberta de 6% na camada média e 7% na camada inferior.

O impacto da altura de voo de VANTs pulverizadores sobre o espectro de gotas em áreas de café de montanha foi investigado por Souza *et al.* (2022). Os autores avaliaram três alturas de voo (2,5; 3,0 e 4,0 m), utilizando alvos posicionados nas partes superior e inferior das plantas, com velocidade média de deslocamento de aproximadamente 1,5 m s⁻¹. Os resultados indicaram que a área coberta variou entre 3,5% e 14,1%.

Em um experimento conduzido com o VANT E610P™, equipado com seis rotores e quatro pontas, Dengeru *et al.* (2022) utilizaram gotas finas e volume de calda de 54 L ha⁻¹. Papéis hidrossensíveis foram distribuídos em três estratos do dossel das plantas de feijão-guandu (*Cajanus cajan*) — superior, médio e inferior. As aplicações foram realizadas com o VANT operando a 3 m s⁻¹, a 3,0 m de altura, em uma faixa de deposição de 3,8 m. Os autores observaram maior área coberta no estrato superior, atingindo 15,7%.

O estudo conduzido por Carneiro *et al.* (2024) teve como objetivo avaliar parâmetros de qualidade da pulverização e determinar o volume ideal para a dessecação, utilizando o VANT AGRAS MG1-P, DJI™, operando com gotas finas (DMV de 100 µm) e volumes de aplicação de 5, 10, 15, 20 e 25 L ha⁻¹ de herbicidas. As pontas de pulverização utilizadas eram do tipo jato plano. Os autores concluíram que a porcentagem de área coberta aumentou proporcionalmente ao incremento do volume de calda, variando de 2% no volume de 5 L ha⁻¹ para 14% quando o volume foi elevado a 25 L ha⁻¹.

2.6.2 Volume Recuperado

O volume recuperado representa a quantidade de calda retida nos papéis hidrossensíveis após a pulverização. A partir da área bidimensional das manchas formadas pelas

gotas, o software estima o volume correspondente, expressando-o em L ha^{-1} . Com esses valores, torna-se possível comparar o volume efetivamente pulverizado com aquele que atingiu o alvo, permitindo quantificar as perdas ocorridas entre a formação da gota e o ponto desejado de deposição do produto (Matthews; Thornhill, 2019).

O depósito de pulverização com diferentes padrões de gotas na cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum*) foi analisado por Souza, Castro e Palladini (2007). Utilizando um pulverizador terrestre de barras, os autores avaliaram gotas finas, grossas, muito grossas e extremamente grossas, empregando volumes de calda de 150 e 200 L ha^{-1} . Os volumes recuperados variaram de 10,5 a 30,8 L ha^{-1} , correspondendo respectivamente a 7,0% e 20,5% do aplicado. Os autores concluíram que a pulverização com gotas grossas proporcionou maiores volumes de depósito nas folhas e maior uniformidade da distribuição da calda entre os diferentes estratos da planta.

Comparando métodos de qualificação da pulverização com VANT, Sarghini *et al.* (2019) trabalharam com volume de 10 L ha^{-1} , DMV de 190 μm , altura média de voo de 2,5 m acima do alvo, velocidade de 8,0 m s^{-1} e pontas do tipo jato plano. Entre os métodos avaliados, utilizaram papéis hidrossensíveis para quantificar a pulverização. Os valores registrados indicaram volume recuperado variando de 4,8 a 30,8%, com média de 16% do volume aplicado. Os maiores depósitos foram obtidos diretamente sob o VANT, com redução ao longo da faixa de aplicação. As perdas de aproximadamente 84% foram atribuídas às condições meteorológicas, à distância entre a formação da gota e o alvo, e aos vórtices gerados pelas hélices do VANT.

A comparação da qualidade da pulverização utilizando VANTs e aeronaves de asa fixa para o controle de insetos-praga na cultura da alfafa (*Medicago sativa*) foi realizada por Li *et al.* (2021). Os volumes de calda aplicados variaram de 47 a 94 L ha^{-1} . O volume recuperado em papéis hidrossensíveis atingiu até 64% do aplicado, evidenciando elevada eficácia de deposição em comparação aos demais tratamentos avaliados.

Pesquisando a relação entre a variação do volume de calda contendo glifosato na dessecação de plantas de cobertura do solo com drone, Carneiro *et al.* (2024) avaliaram o volume recuperado em papéis hidrossensíveis. Observou-se que essa variável aumentou proporcionalmente ao incremento do volume de calda aplicado, com os valores passando de 2,0 para 18 L ha^{-1} .

Trabalhando o volume recuperado com 10 L ha^{-1} de calda pulverizada por VANT, Moura (2025) distribuiu papéis hidrossensíveis em uma faixa de 14 m. Os maiores volumes recuperados foram obtidos na região central da área amostrada. A média dos dois anos de

pesquisa indicou que a distribuição na faixa alcançou 14 metros para gotas menores (100 e 200 μm) e 13 metros para gotas maiores (300, 400 e 500 μm). O volume recuperado variou de 0,03 a 1,32 L ha⁻¹ para gotas de 100 μm ; de 0,03 a 2,02 L ha⁻¹ para 200 μm ; de 0,08 a 2,54 L ha⁻¹ para 300 μm ; de 0,03 a 3,76 L ha⁻¹ para 400 μm ; e de 0,19 a 4,53 L ha⁻¹ para gotas de 500 μm .

2.6.3 Densidade De Impacto De Gotas

A densidade de impactos de gotas em papéis hidrossensíveis é um parâmetro fundamental para avaliar a qualidade e a eficácia da pulverização de produtos fitossanitários. Esse indicador corresponde ao número de gotas que atingem uma área específica, sendo geralmente expresso em gotas por centímetro quadrado. O método consiste na instalação dos papéis diretamente sobre a planta ou em suportes posicionados no alvo definido para a aplicação. Após a pulverização, as imagens escaneadas dos papéis são processadas por softwares especializados, que identificam e quantificam automaticamente diversos parâmetros. A densidade é então determinada pela contagem dos impactos dividida pela área efetivamente analisada (Garcia; Ramos; Justino, 2004; Wu; Yang; Lin, 2025).

A quantidade de gotas que atingem o alvo em aplicações de herbicidas em pós-emergência depende de diversos fatores, entre os quais se destacam o estágio fenológico da planta, o modo de ação do produto, as características do solo e as condições meteorológicas durante a aplicação. A recomendação proposta por Matthews (2000) estabelece como ideal uma densidade entre 30 e 40 gotas cm⁻². De forma complementar, a Associação Nacional de Defesa Vegetal (ANDEF, 2004), ao buscar orientar tecnicamente o processo de pulverização, sugere valores entre 20 e 30 gotas cm⁻².

Examinando diferentes tamanhos de gotas na aplicação de fungicidas em plantas de soja, Garcia *et al.* (2024) avaliaram cinco pontas de pulverização, mantendo o volume de calda constante em 130 L ha⁻¹. A calibração do pulverizador terrestre de barras resultou nos seguintes DMV: muito fina para a ponta de jato cônico vazio; muito fina a fina para jato plano duplo; fina para jato plano de faixa ampliada; média a grossa para jato plano de grande ângulo; e muito grossa para jato plano com indução de ar. No terço superior das plantas, os valores de densidade (impactos de gotas por cm²) foram: 785 para gotas muito finas, 1.045 para muito finas a finas, 744 para finas, 563 para médias a grossas e 376 para muito grossas.

Em uma revisão sobre a pulverização de produtos fitossanitários com VANTs, Subramanian *et al.* (2021) destacaram que o volume de calda mais utilizado é de 15 L ha⁻¹. A densidade média de impactos reportada nos estudos analisados foi de 35 gotas cm⁻². Os autores

afirmam que os resultados demonstram correlação direta entre o volume de pulverização e a densidade de impactos no alvo: à medida que o volume de calda é aumentado, maior é o número de gotas que atingem a superfície aplicada.

Os pesquisadores Dengeru *et al.* (2022) empregaram o VANT E610P™ para avaliar a deposição da pulverização em diferentes partes da planta do feijoeiro. O equipamento, equipado com seis rotores e quatro pontas centrífugas responsáveis pela geração de gotas finas, operou a 3,0 metros de altura e a uma velocidade de voo de $3,0 \text{ m s}^{-1}$, aplicando um volume de calda de 54 L ha^{-1} . A análise dos papéis hidrossensíveis indicou que a densidade de impactos variou de 47 a 53 gotas cm^{-2} .

Em sua pesquisa sobre a faixa de pulverização com VANT, Moura (2025) avaliou a densidade de impactos de gotas em papéis hidrossensíveis distribuídos ao longo de 14 m de largura, utilizando volume de calda de 10 L ha^{-1} . A densidade de impactos (gotas cm^{-2}) variou de 1 a 132 para gotas de $100 \mu\text{m}$, de 1 a 105 para $200 \mu\text{m}$, de 1 a 70 para $300 \mu\text{m}$, de 1 a 63 para $400 \mu\text{m}$ e de 1 a 41 para $500 \mu\text{m}$. A faixa efetiva de pulverização alcançou 14 m para gotas com DMV de 100 e $200 \mu\text{m}$, enquanto para gotas acima de $300 \mu\text{m}$ a largura efetiva registrada foi de 13 m.

2.6.4 Potencial Risco De Deriva

O potencial risco de deriva na pulverização agrícola corresponde à fração do volume de calda com alta probabilidade de não atingir o alvo pretendido. Esse risco é influenciado por diversos fatores, incluindo as condições meteorológicas (temperatura, umidade relativa do ar e velocidade/direção do vento), características operacionais da aplicação (tipo de máquina, pressão de trabalho, tipo de ponta e distância entre a formação da gota e o alvo) e a própria composição da calda. Para reduzir a deriva, é essencial adequar a aplicação às condições meteorológicas do momento, selecionar pontas e equipamentos que produzam gotas de maior diâmetro, empregar adjuvantes apropriados e minimizar a distância entre a geração da gota e o alvo (Fattahi; Abdollah, 2015; Madureira; Raetano; Cavalieri, 2015).

A deriva constitui uma via potencial de introdução de produtos fitossanitários na água, no solo e/ou na vegetação adjacente ao local de aplicação durante a pulverização. Uma revisão de artigos científicos sobre o tema indica que entre 1% e 30% dos produtos aplicados por pulverizadores terrestres podem ser perdidos por deriva. Como consequência, a deriva apresenta implicações econômicas, ecológicas e de saúde, podendo comprometer a eficiência da aplicação, causar impactos ambientais e expor organismos não alvo (Perine *et al.*, 2021).

O experimento conduzido por Wang *et al.* (2020) teve como objetivo comparar o potencial de deriva associado a três diferentes DMV: 100, 150 e 200 μm . Os autores utilizaram um VANT P20 (XAG CompanyTM), equipado com dois bicos rotativos, operando a 4,0 metros de altura e 5,0 m s^{-1} de velocidade. Os resultados mostraram que, à medida que aumentou a proporção de gotas com diâmetros inferiores a 150 μm , o potencial de deriva elevou-se substancialmente, variando de 3% até 96%.

A avaliação dos parâmetros que influenciam o potencial de deriva durante a aplicação de produtos fitossanitários por VANTs foi conduzida por Grant *et al.* (2022). Para caracterizar o padrão de deposição ao longo da faixa de pulverização, os autores testaram diferentes velocidades de voo (1,5 a 4,5 m s^{-1}), tamanhos de gotas (finas, médias e grossas) e cargas úteis (2,0 a 10,0 L). Os resultados indicaram que maiores velocidades de deslocamento e menores tamanhos de gotas aumentam significativamente a deriva. Mantendo-se constantes as demais variáveis, verificou-se que cada incremento de 10% na distância entre o VANT e o alvo elevou o risco de deriva em 16%.

A avaliação do potencial de deriva na pulverização realizada com um VANT de seis rotores foi conduzida por Wongsuk *et al.* (2024). O estudo considerou alturas de voo entre 1,5 e 3,0 m, velocidade de deslocamento de 3,5 m s^{-1} , diferentes tipos de pontas hidráulicas, tamanhos de gotas variando de finas a extremamente grossas e volumes de aplicação entre 15 e 40 L ha^{-1} . Os resultados mostraram que a deriva potencial variou de 6,7% a 53,3% do volume aplicado, aumentando progressivamente à medida que se reduziu o tamanho das gotas.

Na pesquisa sobre tamanho de gotas e faixa de aplicação com VANT, Moura (2025) avaliou a pulverização por meio de papéis hidrossensíveis. As análises de regressão quadrática evidenciaram que, à medida que aumenta a distância em relação ao bico, as gotas perdem massa. Para os menores diâmetros de gotas (100 e 200 μm), o potencial de deriva ao longo da faixa de 14 m permaneceu acima de 80%. Já para gotas de maior diâmetro (300 a 500 μm), observou-se um declínio acentuado no risco potencial de deriva: os pontos centrais da faixa aplicada apresentaram valores próximos de zero, enquanto as extremidades — a cerca de 7,0 m do centro — registraram aumento para valores próximos de 70%.

2.6.5 Diâmetro Da Gota Com 10% Do Volume Acumulado

O diâmetro de gota correspondente a 10% do volume acumulado é representado pela sigla $DV_{0,1}$, cuja unidade é o micrômetro (μm). O $DV_{0,1}$ é um parâmetro relevante na tecnologia de aplicação, pois indica a fração de gotas muito pequenas, as quais apresentam maior

suscetibilidade à deriva — isto é, ao deslocamento pelo vento para fora da área alvo — e à evaporação, fatores que podem comprometer a eficácia da aplicação. A determinação do $DV_{0,1}$ auxilia na escolha do espectro de gotas mais adequado para diferentes alvos, modos de ação dos produtos (sistêmicos ou de contato), distâncias entre formação da gota e alvo, além das condições meteorológicas vigentes (ASABE, 2018; Hoffmann; Hewitt, 2005).

Almejando avaliar os efeitos da pulverização de forma prática e precisa, Schampheleire *et al.* (2009) utilizaram papéis hidrossensíveis. Ao trabalhar com dez formulações comerciais de produtos fitossanitários, os autores aplicaram as caldas por meio de uma ponta hidráulica em ambiente controlado, a fim de analisar suas propriedades físico-químicas. Os valores de $DV_{0,1}$ determinados variaram entre 95 e 120 μm .

O efeito da rotação de um bico centrífugo sobre o tamanho das gotas foi investigado por Wang *et al.* (2020). No estudo, o VANT P20 (XAG Company™) foi operado a uma altura de voo de 4,0 m e velocidade de 5,0 m s^{-1} . Os DMV selecionados para avaliação foram 100, 150 e 200 μm . O tamanho das gotículas do bico centrífugo foi medido por um analisador de tamanho de partículas por difração a laser. Os autores concluíram que os valores de $DV_{0,1}$ variaram de 59 a 251 μm .

A capacidade de carga útil dos sistemas de aplicação aérea remotamente pilotados foi relacionada por Martin e Latheef (2022) ao padrão de pulverização e à faixa efetiva de deposição. A calibração das quatro máquinas avaliadas foi realizada com alturas de voo entre 2,0 e 4,0 m, velocidades de 1 a 7 m s^{-1} , pontas de jato plano e volumes de calda de 5 a 20 L ha^{-1} . Os registros indicaram que o $DV_{0,1}$ variou de 103 a 134 μm .

A comparação da qualidade de pulverização entre máquinas terrestres de barras e VANTs na cultura da soja foi conduzida por Gabriel *et al.* (2025). Os volumes de calda utilizados foram de 100 e 80 L ha^{-1} no pulverizador terrestre e de 20 L ha^{-1} no VANT. Os autores relataram que não houve diferenças significativas entre os tratamentos para a variável $DV_{0,1}$, sendo observado um valor médio de 126 μm .

Verificando a influência do tamanho de gotas e faixa de aplicação com VANT, Moura (2025) determinou o $DV_{0,1}$ em papéis hidrossensíveis por dois anos. Para 100 μm se obteve variação entre 62 a 95 μm , 200 μm foi 61 a 141 μm , 300 μm foi 64 a 161 μm , 400 μm foi 60 a 223 μm e para 500 μm foi 60 a 324 μm . Para diâmetros de gotas menores (100 e 200 μm) a faixa foi de 13 metros, enquanto para diâmetros maiores (acima de 300 μm) foi de 12 metros. Quanto maior o diâmetro de gota, mais acentuada a curva do centro de formação da gota para as extremidades da faixa.

2.6.6 Diâmetro Da Gota Com 50% Do Volume Acumulado

O diâmetro da gota com 50% do volume acumulado ($DV_{0,5}$) representa o diâmetro de referência onde 50% do volume total do líquido pulverizado é composto por gotas maiores que esse diâmetro e os outros 50% são gotas menores. Essa medida é muito usada para caracterizar o diâmetro das gotas de pulverização, especialmente em áreas como a agricultura, onde o diâmetro da gota influencia a deposição e a eficácia do produto aplicado (ASABE, 2018; Silva *et al.*, 2009).

A avaliação da atomização de líquidos e da redução da deriva em pontas hidráulicas utilizando quatro soluções adjuvantes foi conduzida por Liu *et al.* (2023). O experimento envolveu pontas formadoras de jatos cone vazio, plano e plano com indução de ar. Os autores verificaram que o $DV_{0,5}$ foi de 167 μm para o jato cônico, 190 μm para o jato plano e 270 μm para o jato plano com indução de ar.

O impacto da altura de voo de VANT pulverizador sobre o espectro de gotas foi avaliado por Souza *et al.* (2022). As aplicações foram realizadas a 2,5, 3,0 e 4,0 m de altura, utilizando uma ponta de jato plano de grande ângulo e velocidade de voo de 1,5 m s^{-1} . A qualidade da pulverização foi mensurada com papéis hidrossensíveis. Os autores observaram um $DV_{0,5}$ médio de 527 μm , sem variações significativas entre as diferentes alturas de voo.

O potencial de risco de deriva associado a diferentes rotações de um bico centrífugo foi averiguado por Wang *et al.* (2020). O pulverizador utilizado foi VANT P20 (XAG CompanyTM), operando a 4,0 metros de altura e 5,0 m s^{-1} . Os diâmetros medianos volumétricos iniciais foram de 100, 150 e 200 μm . Os resultados evidenciaram que o $DV_{0,5}$ foi de 93 a 591 μm .

A relação entre diâmetro de gotas e faixa de pulverização com VANT foi investigada por Moura (2025). Os papéis hidrossensíveis foram distribuídos ao longo de uma faixa de 14 m. A média dos valores de $DV_{0,5}$ obtidos ao longo de dois anos variou de 81 a 97 μm para gotas de 100 μm , de 56 a 459 μm para 200 μm , de 55 a 246 μm para 300 μm , de 62 a 317 μm para 400 μm e de 45 a 365 μm para 500 μm . A autora observou que os menores diâmetros de gotas (100 e 200 μm) apresentaram valores relativamente baixos de $DV_{0,5}$ e uma curvatura menos acentuada ao longo da faixa, quando comparados aos maiores diâmetros de gotas ($\geq 300 \mu\text{m}$). Notou-se, ainda, uma concentração expressiva de $DV_{0,5}$ nos coletores centrais para os maiores diâmetros, indicando maior concentração de pulverização na região central da faixa aplicada.

2.6.7 Diâmetro Da Gota Com 90% Do Volume Acumulado

A pulverização de produtos fitossanitários é influenciada por diversos fatores. Entre eles, o diâmetro das gotas é considerado a característica mais relevante, pois afeta diretamente todos os aspectos do controle de organismos indesejáveis: eficácia biológica, potencial de poluição ambiental e segurança do operador. O diâmetro da gota com 90% do volume acumulado ($DV_{0,9}$) é uma das métricas utilizadas para caracterizar o espectro de gotas de uma pulverização. Esse parâmetro representa o diâmetro para o qual 90% do volume pulverizado é composto por gotas de diâmetro igual ou menor, enquanto os 10% restantes são gotas maiores. O $DV_{0,9}$ é particularmente útil para identificar a presença e a proporção de gotas grandes no espectro, as quais influenciam a penetração no dossel, a uniformidade da deposição e o risco de escorrimento (ASABE, 2018; Basílio *et al.*, 2024).

Os efeitos do diâmetro das gotas na eficácia de herbicidas aplicados em pré-emergência na cultura da soja (*Glycine max*) foram avaliados por Ferreira *et al.* (2020). Os autores utilizaram diversos herbicidas e pontas hidráulicas de jato plano, operando com um pulverizador terrestre de barras. Em um túnel de vento equipado com sistema a laser, registraram-se valores de $DV_{0,9}$ variando de 244 a 1.151 μm . O controle de plantas daninhas superou 63% em todos os tratamentos. Os resultados dos experimentos de campo indicam que o controle de plantas daninhas com herbicidas pré-emergentes não é influenciado pelo diâmetro das gotas ou pela cobertura da pulverização. Dessa forma, pulverizações com gotas mais grossas podem ser adotadas como estratégia para reduzir o potencial de deriva de herbicidas pré-emergentes, mantendo níveis adequados de controle das plantas daninhas.

Objetivando mensurar o diâmetro das gotas de pulverização por meio de análise de imagem, Cerruto *et al.* (2021) conduziram um estudo utilizando um sistema de pulverização terrestre. A ponta empregada foi do tipo indução de ar, posicionada a 0,6 m do alvo, operando a 1,5 m s^{-1} e pressão de até 500 kPa. A análise dos impactos das gotas evidenciou que o $DV_{0,9}$ foi de 788 μm .

Os efeitos dos parâmetros de aplicação na deposição da pulverização com VANT foram examinados por Huang *et al.* (2023a). O pulverizador utilizado possuía seis rotores e oito pontas hidráulicas de jato plano. Os tratamentos contemplaram diferentes alturas de voo, faixas de pulverização, velocidades de deslocamento, números de bicos e pressões de trabalho. Com essas configurações, o $DV_{0,9}$ variou de 195 a 245 μm .

A avaliação em campo da deriva de pulverização e dos danos à soja causados pela aplicação de herbicidas por um sistema de pulverização aérea não tripulado foi realizada por

Huang *et al.* (2023b). O equipamento utilizado possuía seis rotores e oito pontas hidráulicas de jato plano. Os pesquisadores variaram o modelo da ponta, o número de bicos, a pressão de trabalho e a altura de voo. Os autores concluíram que os valores de $DV_{0,9}$ registrados variaram de 273 a 1.184 μm .

Na pesquisa conduzida por Moura (2025) a qualidade da pulverização foi observada em papéis hidrossensíveis. O VANT possuía oito rotores e dois bicos de pulverização rotativos, pulverizando 10 L ha^{-1} , velocidade de 5,6 m s^{-1} e altura de voo de 4,0 m acima do alvo. O diâmetro de gota com 90% do volume acumulado ($DV_{0,9}$ μm), ajustado com equações quadráticas ao longo da faixa pulverizada, apresentou os seguintes intervalos: 100 μm variou de 114 a 169 μm , 200 μm foi 76 a 250 μm , 300 μm foi 84 a 364 μm , 400 μm foi 61 a 412 μm e 500 μm foi 23 a 513 μm . A maior deposição de gotas atingiu os papéis hidrossensíveis centrais da faixa pulverizada e diminui nas extremidades. Gotas de diâmetros menores (100 e 200 μm) mostram curvas menos inclinadas quando comparada a maiores diâmetros de gotas (acima de 300 μm). A faixa de impactos registrados foi de 14 m para gotas inferiores aos DMV de 200 μm e de 13 m para DMV superiores a 300 μm .

2.6.8 Amplitude Relativa (SPAN)

A Amplitude Relativa, também conhecida como SPAN em inglês, é um indicador de dispersão do diâmetro de gotas em pulverizações agrícolas, calculado usando diâmetros específicos ($DV_{0,9} - DV_{0,1} / DV_{0,5}$), ressaltando a uniformidade das gotas. Determina se as gotas são homogêneas ou dispersas. Quanto menor o valor, mais homogêneo é o espectro de gotas (ASABE, 2018; Contiero; Biffe; Catapan, 2018).

Várias pontas de pulverização na aplicação de fungicidas na cultura da soja foram testadas por Garcia *et al.* (2024). O pulverizador empregado foi o terrestre de barras, o volume de calda em todas as pulverizações foi de 130 L ha^{-1} e pressão de trabalho utilizada foi de 200 kPa. Com tal configuração de pulverização os diâmetros de gotas gerados foram: muito fina para ponta com jato cônico vazio, muito fina a fina para jato plano duplo, fina para jato plano de faixa ampliada, média a grossa com jato plano de grande ângulo e muito grossa no jato plano com indução de ar. O SPAN foi de 1,7 para ponta com jato cônico vazio, 2,0 para jato plano duplo, 1,7 para jato plano de faixa ampliada, 1,4 para jato plano de grande ângulo e 1,3 para jato plano com indução de ar.

A avaliação das características de pulverização de produtos fitossanitários por VANTs agrícolas foi realizada por Yu *et al.* (2020). O desempenho de três tipos de bombas e de 18

modelos de bicos atualmente em uso foi analisado quanto à curva pressão–vazão, vazão de injeção, ângulo de pulverização e diâmetro das gotas. A maioria dos bicos testados apresentaram vazões muito próximas às recomendadas pelos fabricantes; entretanto, o diâmetro das gotas foi ligeiramente menor que os valores informados. O SPAN do espectro de gotas variou de 0,2 a 1,2.

A comparação entre a pulverização aérea realizada por VANTs e por aeronaves de asa fixa para o controle de insetos-praga na cultura da alfafa foi conduzida por Li *et al.* (2021). Os pesquisadores avaliaram a eficácia de controle, os resíduos e a qualidade da pulverização. Os volumes de calda aplicados variaram de 47 a 94 L ha⁻¹, utilizando pontas de jato plano que produziram um diâmetro mediano de gotas classificado como médio. O SPAN do espectro de gotas registrado foi de 1,2.

Na pesquisa conduzida por Cunha e Silva (2023), objetivou-se avaliar a deposição de calda na cultura do milho (*Zea mays*) utilizando um VANT da marca DJI™, modelo AGRAS MG⁻¹, equipado com pontas de jato plano, operando em alturas de voo de 1,5 e 3,0 m, com aplicação de 10 L ha⁻¹ de calda. Os autores verificaram que a amplitude relativa (SPAN) variou entre 0,8 e 1,0.

Os parâmetros de pulverização na faixa de distribuição com VANT, utilizando diferentes tamanhos de gotas, foram investigados por Moura (2025). A autora concluiu que os diâmetros das gotas registrados foram maiores nos amostradores posicionados no centro da faixa, reduzindo-se progressivamente à medida que se aumentou a distância em relação ao ponto de aplicação. Para gotas de menor diâmetro (100 e 200 µm), a faixa efetiva variou de 14 a 12 metros, enquanto para gotas de maior diâmetro (acima de 300 µm) a faixa observada foi de 13 a 12 metros. Quanto à amplitude relativa (SPAN), não foram constatadas diferenças significativas entre os tratamentos; os valores permaneceram inferiores a 1,0, indicando um espectro de gotas homogêneo ao longo da faixa pulverizada.

2.6.9 Coeficiente de Variação (CV)

O coeficiente de variação (CV) é uma medida estatística de dispersão relativa, que expressa o desvio-padrão como uma porcentagem da média. Sua fórmula é $CV = (\text{desvio-padrão} / \text{média}) \times 100$, sendo útil para comparar a variabilidade entre conjuntos de dados com unidades de medida diferentes ou médias muito distintas. Um CV menor indica menor variação e maior homogeneidade dos dados, enquanto um CV maior indica maior dispersão. O coeficiente de variação aceitável varia dependendo do contexto da pulverização (cultura, tipo

de produto, equipamento), mas existem diretrizes gerais: excelente uniformidade com CV abaixo de 10% e aceitável CV entre 10% e 15%. Alguns padrões, como a Norma prEN 12761-2, sugerem um máximo de 07 a 09% para condições ideais de altura e pressão, e 15% como limite máximo aceitável. Valores acima de 15% a 20% indicam problemas significativos na distribuição e não devem ser usados, muitas vezes associados a pontas de pulverização desgastadas. Para pulverizações aéreas, um CV de até 30% já foi considerado aceitável, mas em geral, na agricultura terrestre, busca-se valores bem menores. Um alto CV resulta em subdosagem em algumas áreas, levando a um controle ineficaz de pragas, doenças ou plantas daninhas e sobredosagem em outras áreas, o que pode causar fitotoxicidade (danos à cultura), desperdício de produto e maior impacto ambiental (ASABE, 2018; Chen *et al.*, 2022; ESC, 2001).

As características técnicas de pontas de pulverização hidráulicas de jato plano foram averiguadas por Cunha e Teixeira (2001). Em ambiente controlado testaram-se quatro pontas de pulverização com vazões distintas, montados em dois pulverizadores terrestre de barras de fabricantes diferentes, em pressões de 300 a 400 kPa e distantes do alvo de 0,3 a 0,5 m. Os CVs foram de 5,4 a 22,0%.

As discussões realizadas por Carvalho *et al.* (2020) mostram os desafios encontrados para pulverização com aeronaves. O estudo envolveu 24 aeronaves equipadas com pontas hidráulicas e bicos rotativos. Essa pesquisa revelou que o CV médio ficou em 17%, sendo considerado ideal abaixo de 15%.

Os efeitos dos parâmetros de pulverização na largura efetiva da aplicação com VANT na proteção de plantas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) foi verificado por Zhang *et al.* (2021). Os resultados demonstraram que o CV na densidade de deposição de gotas foi menor, de 51%, sob uma altura de voo de 6,0 m e velocidade de voo de $3,0 \text{ m s}^{-1}$. O CV chegou a 81% em outras configurações de altura e velocidade de voo.

O desenvolvimento de um sistema autônomo de controle de pulverização por VANTs, baseado no coeficiente de variação da distribuição da pulverização, foi realizado por Wang *et al.* (2024). Experimentos de simulação de pulverização em ambientes controlados demonstraram que o sistema autônomo de controle de pulverização atingiu um CV dentro dos requisitos padronizados em 15 de 23 ensaios, com um CV geral previsto inferior a 30%.

Trabalhando com VANT munido de bicos rotativos, Moura (2025) correlacionou parâmetros da pulverização na faixa de distribuição utilizando diferentes tamanhos de gotas. Os dados coletados para coeficiente de variação foram os seguintes: de 100 μm foi de zero a 22,0%; 200 μm foi zero a 13,1 %; 300 μm foi 0,3 a 11,0%; 400 μm foi 0,7 a 7,4% e 500 μm

foi 0,8 a 6,8%. O menor DMV de gotas testado (100 μm) apresentou maior dispersão de dados que as demais, seguindo a lógica de que quanto mais impactos de gotas nos papéis hidrossensíveis, maior dispersão de tamanhos com elevação do coeficiente de variação. Com o afastamento do centro da faixa, houve redução do CV pelo menor impacto de gotas capturado em papéis hidrossensíveis.

2.7 FAIXA DE PULVERIZAÇÃO COM VANT

A faixa de pulverização, que representa a largura efetiva de aplicação em cada passagem do VANT, é um dos principais parâmetros operacionais que influenciam a uniformidade da deposição do produto. Essa faixa depende do tipo de bico, do tamanho das gotas, da altura e da velocidade de voo. Em aplicações com VANTs, faixas mais estreitas proporcionam maior precisão, mas exigem maior número de passadas, enquanto faixas mais largas, embora mais operacionais, podem comprometer a uniformidade da pulverização se não houver sobreposição adequada (Chen *et al.*, 2022; Cunha; Silva, 2023; Melo *et al.*, 2024).

Foram realizadas investigações por Wen *et al.* (2019) sobre a pulverização com VANT em várias velocidades de voo e altitudes de trabalho. As velocidades de voo empregadas foram 1, 3, 5 e 7 m s^{-1} , com variações de altitude na faixa de 2 a 4 m. As faixas de pulverização registradas ficaram entre 4,0 e 7,6 m.

Os efeitos dos parâmetros de pulverização na largura efetiva de aplicação com VANT foi verificado por Zhang *et al.* (2021). Os dados demonstraram que a largura efetiva de pulverização foi maior com 7,0 m, sob uma altura de voo de 6,0 m e velocidade de voo de 2,0 m s^{-1} .

O desempenho da pulverização, em termos de faixa e potencial risco de deriva, foi avaliado por Sinha *et al.* (2022), utilizando papéis hidrossensíveis e amostradores de fio de mylar. Foram testados os VANTs MG-1PTM e AG V6A+TM, operando em altitudes de voo de 1,5; 2,5 e 4,0 m e em velocidades de 2 e 3 m s^{-1} , com pontas de leque plano TeeJetTM XR11001 e XR8002, que produziram gotas muito finas (140 μm) e finas (196 μm). Os resultados mostraram que a faixa efetiva variou entre os modelos e configurações testadas. Para o AG V6A+TM com barra, observou-se faixa efetiva de 4 a 5 m quando operado a 4 m de altura e 2 m s^{-1} .

Ao estudar a deposição da pulverização com VANT em papéis hidrossensíveis, Ahmad *et al.* (2022) posicionaram os mesmos em até 25 m de distância do centro de aplicação. O experimento foi conduzido em uma fazenda na China, utilizando um VANT com rotor único,

equipado com nove pontas hidráulicas de jato plano TeeJet™ TT110015, espaçadas a cada 0,5 m na barra, operando sob pressão de 100 a 600 kPa, altura de voo de 2,0 a 5,0 m em relação ao alvo e velocidade de 2,0 a 3,0 m s⁻¹. As configurações definiram os DMV classificados como fino, médio e grosso. Os autores relataram que a maior concentração da deposição ocorreu na faixa de 12,8 m a partir do centro da pulverização.

A investigação das características de distribuição da deposição de gotas de um VANT foi conduzida por Liu *et al.* (2022). Utilizou-se o modelo DJI Agras T30™, equipado com pontas de jato plano que geraram gotas com DMV de até 300 µm. Os autores concluíram que houve deposição em uma faixa de até 13,2 m.

No estudo conduzido por Cunha e Silva (2023) se objetivou avaliar a deposição de calda na cultura do milho (*Zea mays*) com aplicação realizada pelo VANT da marca DJI™, modelo AGRAS-MG⁻¹, munido de pontas de jato plano, alturas de trabalho de 1,5 e 3,0 m e 10 L ha⁻¹ de calda. Os autores concluíram que a faixa de deposição efetiva foi de 5,7 e 7,6 m para alturas de voo de 1,5 e 3,0 m.

A deriva de pulverização com VANT na aplicação de herbicidas, foi mensurada por Huang *et al.* (2023b). O pulverizador possuía 06 rotores e 08 pontas hidráulicas de jato plano. Os pesquisadores variaram o modelo da ponta, o número de bicos, a pressão de trabalho e a altura de voo. Os autores observaram que quanto menor o tamanho da gota, maior a probabilidade de ser afetada pelo vento lateral. Também se registrou uma diminuição da deposição ao se afastar do centro de formação da gota. Gotas maiores reduzem a faixa de ação do herbicida pela restrição da deriva. A faixa de ação do herbicida foi de 10 m para gotas com maiores diâmetros para 20 m quando se optou por pulverizar gotas de menores diâmetros.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O delineamento experimental utilizado para a execução da pesquisa foi em blocos aleatorizados. Para verificar a qualidade da pulverização em papéis hidrossensíveis, foram testados quinze tratamentos com três repetições. Os tratamentos consistiram em 15 papéis hidrossensíveis espaçados em 1,0 m, ao longo de uma faixa de 14 m, dispostos em estruturas metálicas a 0,5 m do solo, para coletar os impactos de gotas geradas na pulverização. A área de cada repetição de tratamento foi de 1.500 m², com 50 m de comprimento e 30 m de largura. Cada papel hidrossensível foi considerado uma parcela experimental. As avaliações foram realizadas para os diâmetros medianos volumétricos das gotas (DMV) de 100, 200, 300, 400 e 500 micrômetros (μm). Os diferentes diâmetros de gotas foram definidos no controle do drone, por meio da variação da velocidade de rotação do bico rotativo. As repetições foram conduzidas em três áreas distintas.

Para a dessecação, foram utilizados cinco tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos corresponderam aos DMV de 100, 200, 300, 400 e 500 micrômetros (μm). As repetições consistiram nas medições das faixas pulverizadas. Os mesmos tratamentos foram aplicados em três áreas distintas.

O experimento foi realizado no mês de julho de 2025, período de inverno no Brasil, em três áreas localizadas no município de Palmeira (25°26'02'' S e 49°47'29'' W), caracterizado por clima temperado e altitude de 1.026 m. As plantas dessecadas eram destinadas à cobertura do solo, técnica inerente ao sistema de plantio direto, adotado na propriedade há mais de 40 anos. As principais espécies semeadas para esse sistema foram aveia-preta (*Avena strigosa*), aveia-branca (*Avena sativa*) e ervilhaca (*Vicia cracca*). As plantas cultivadas para a cobertura do solo encontravam-se no estágio fenológico de floração quando pulverizadas com herbicida pelo VANT.

As pulverizações foram realizadas com um veículo aéreo não tripulado (VANT) da marca DJI™, modelo AGRAS T40 (Figura 1), com capacidade máxima do tanque de 40 litros, equipado com oito rotores e dois bicos de pulverização rotativos LX8060 SZ™ (Figura 2), com sistema duplo de atomização. Utilizou-se volume de calda de 10 L ha⁻¹, velocidade de 5,6 m s⁻¹ e altura de voo de 4,0 m acima do alvo. Tais parâmetros foram definidos com base na calibração média para atividade utilizada na região dos Campos Gerais. A pulverização foi realizada sobre o oitavo amostrador. A trajetória de voo foi previamente configurada para ocorrer paralelamente à direção do vento.

A calibração do pulverizador foi realizada previamente, coletando-se o líquido de cada bico em uma proveta graduada de 1,0 L, da marca Petrolider™, e utilizando-se uma mesa de deposição horizontal da TeeJet™. Também foi verificada a velocidade de pulverização por meio da relação entre o tempo de voo durante a aplicação e a distância percorrida de 100 m.

Figura 1 – Veículo aéreo não tripulado (VANT) DJI AGRAS T40™, com capacidade de tanque de 40 litros, oito rotores e equipado com dois bicos de pulverização rotativos LX8060 SZ™, utilizado no experimento sobre faixa de pulverização com diferentes diâmetros de gotas, realizado em julho de 2025, em Palmeira – PR.

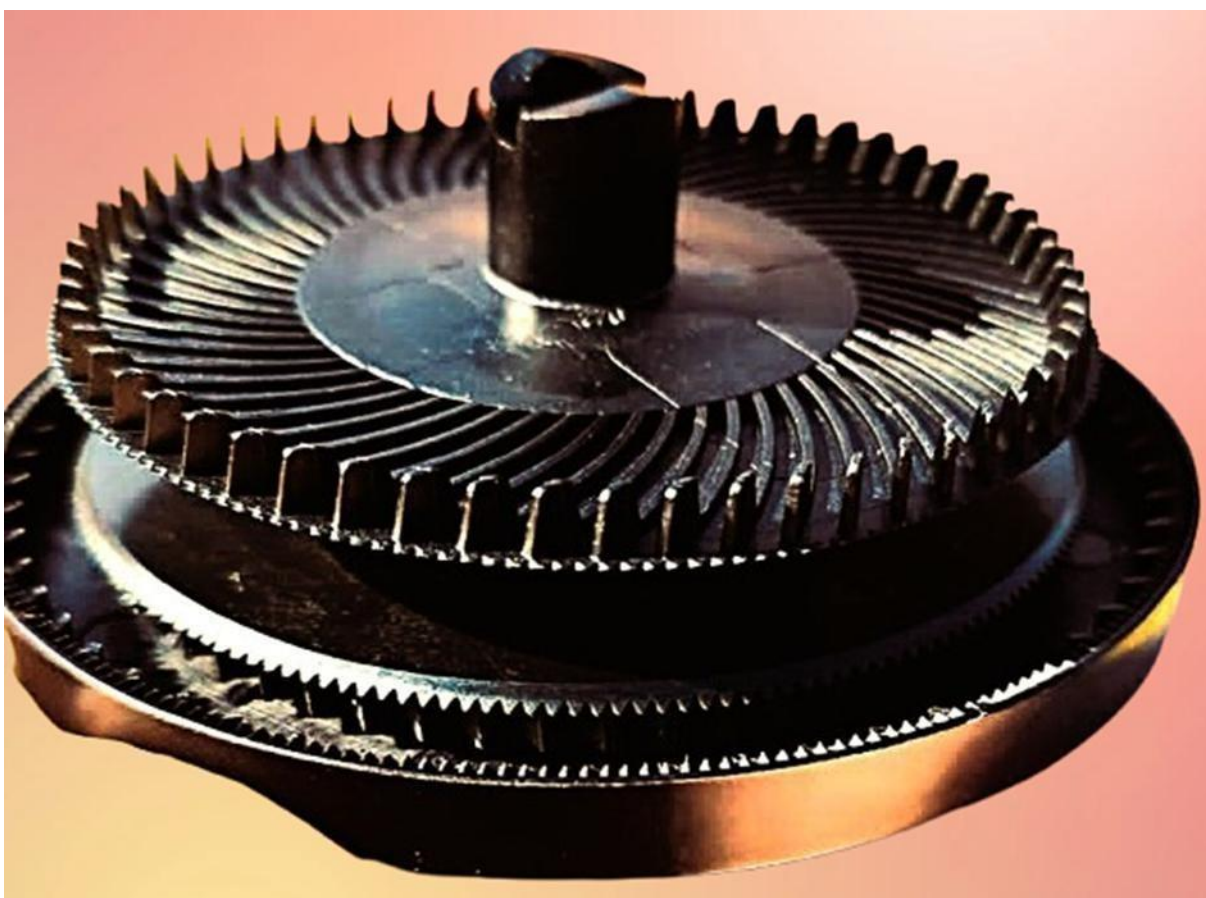


As condições meteorológicas foram monitoradas com o auxílio de um anemotermohigrômetro LM 8000™. Durante todo o período de pulverização, a temperatura permaneceu abaixo de 25 °C, a umidade relativa do ar acima de 55% e a velocidade do vento variou entre 3 e 10 km h⁻¹. O herbicida empregado foi o Helmoquat™ (0,20 kg L⁻¹ de diquat), na dose de 2,50 L ha⁻¹, aprovado pelos órgãos brasileiros para tal finalidade (ADAPAR, 2025) e com ação de contato, ressaltando sua eficácia específica nas áreas onde a pulverização atingiu o alvo.

As variáveis analisadas em papéis hidrossensível pelo aparelho DropScope™ foram: porcentagem de área coberta, volume recuperado (L ha⁻¹), densidade (número de impactos de

gotas cm^{-2}), potencial risco de deriva (% de gotas com diâmetro menor que $150 \mu\text{m}$), diâmetro da gota com 10% do volume acumulado ($DV_{0,1} \mu\text{m}$), diâmetro da gota com 50% do volume acumulado ($DV_{0,5} \mu\text{m}$), diâmetro da gota com 90% do volume acumulado ($DV_{0,9} \mu\text{m}$), amplitude relativa (SPAN) e coeficiente de variação (CV) dos diâmetros (%). A variável analisada em relação à ação do herbicida foi a faixa com mais de 90% de plantas mortas pela pulverização de herbicida, conforme escala proposta por Frans *et al.* (1986). A mensuração da faixa com plantas mortas foi realizada com auxílio de uma trena Vonder™ de 50 m.

Figura 2 – Bico rotativo LX8060 SZ™ com sistema duplo de pulverização atomizada, utilizado no experimento sobre faixa de pulverização com diferentes diâmetros de gotas para dessecação, realizado em 2025, em Palmeira – PR.



Os dados registrados foram submetidos ao teste de Bartlett, para verificação da homocedasticidade das variâncias; ao teste de Shapiro-Wilk, para avaliação da normalidade dos dados; e ao teste de Durbin-Watson, para análise da independência dos erros. As variáveis mensuradas foram analisadas por meio do teste Fisher-Snedecor e regressão polinomial. O nível de significância adotado na análise estatística foi de 5% (intervalo de confiança de 95%).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desde seu surgimento, a agricultura tem passado por diversas transformações para atender à crescente demanda por alimentos, almejando simultaneamente minimizar os impactos ambientais (Castanho; Teixeira, 2017; Mazoyer; Roudart, 2010). Entre as técnicas conservacionistas amplamente adotadas, destaca-se o sistema de plantio direto (Côrt *et al.*, 2025; Liu; Chen; Jiao, 2024; Saleem, 2024). Nessa abordagem, o solo permanece continuamente coberto por plantas em desenvolvimento e por resíduos vegetais (Cruz *et al.*, 2021; Possamai *et al.*, 2022). Nesse contexto, a rotação de culturas envolvendo diferentes espécies vegetais — especialmente aquelas utilizadas como plantas de cobertura — é fundamental para assegurar uma adequada proteção do solo e promover uma ciclagem eficiente de nutrientes (Alvarenga *et al.*, 2001; Silva *et al.*, 2022; Silveira *et al.*, 2020).

No sistema de plantio direto, o manejo das plantas daninhas envolve predominantemente o controle químico por meio de herbicidas (Nath *et al.*, 2024; Ofosu *et al.*, 2023; Pereira *et al.*, 2023; Schneider *et al.*, 2022). Os herbicidas de contato atuam apenas nas superfícies vegetais diretamente atingidas pelas gotas, promovendo danos rápidos e localizados, sem penetração profunda ou translocação para outras partes da planta (Marchi; Marchi; Guimarães, 2008). Dessa forma, o êxito da operação depende do rigor na adoção dos preceitos da tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários (Matthews, 2023; Matuo, 1990).

Dentre as tecnologias de aplicação, destaca-se a pulverização (Azevedo; Freire, 2006; Frare *et al.*, 2025; Garcia *et al.*, 2023; Hafeez *et al.*, 2022). Diversas máquinas são empregadas para pressurizar a calda em um circuito hidráulico até sua fragmentação em gotas, incluindo os veículos aéreos não tripulados (VANTs) (Chen *et al.*, 2022; Melo *et al.*, 2024). Um dos principais desafios associados a essa tecnologia emergente consiste em relacionar o tamanho das gotas com a faixa de deposição sobre a área alvo (Hafeez *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2025; Garcia *et al.*, 2024). Em função da relevância desse parâmetro, muitos VANTs têm sido equipados com bicos rotativos, que permitem ajustar o tamanho das gotas por meio da variação da rotação dos discos (Park; Park, 2022; Ru *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2022).

Dessa forma, destaca-se a importância da qualidade da pulverização (Garcia *et al.*, 2024; Matthews, 2018; Matthews, 2000; Matuo, 1990; Ramos, 2005), especialmente no que se refere à classificação dos tamanhos das gotas. Entre as classificações existentes, sobressai-se a proposta pela ASABE (2018), que organiza as categorias de gotas com base em faixas de diâmetro mediano volumétrico (DMV). A avaliação da pulverização pode ser realizada por

meio de papéis hidrossensíveis, analisada por softwares especializados em verificar os parâmetros espectrais das gotas (Garcia; Ramos; Justino, 2004; Garcia *et al.*, 2024).

Os testes estatísticos indicaram que todas as variáveis apresentaram homocedasticidade das variâncias, normalidade dos resíduos e independência dos erros, não sendo necessária a transformação dos dados. Entre as 48 variáveis analisadas, apenas 4% apresentaram efeitos significativos de blocos, evidenciando a homogeneidade das condições experimentais.

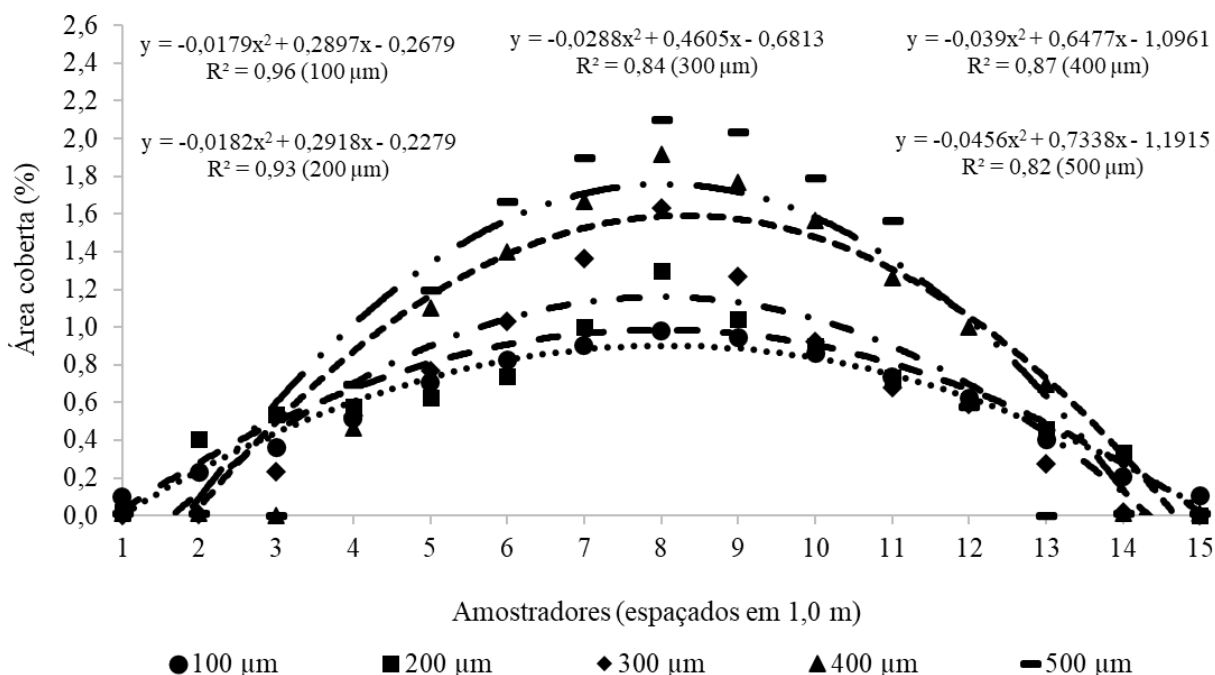
4.1 PORCENTAGEM DE ÁREA COBERTA

Ao analisar a área coberta nos papéis hidrossensíveis provenientes da pulverização com VANT, observa-se que as regressões polinomiais foram significativas para todos os diâmetros de gotas avaliados. O ajuste das curvas indicou comportamento quadrático em todas as classes de diâmetro, com maior área coberta na região central em comparação às extremidades da faixa (Gráfico 1). Verificou-se aumento progressivo da área coberta conforme o incremento do diâmetro das gotas. Os maiores valores ajustados variaram de 0,85% para gotas de 100 μm a 1,63% para gotas de 500 μm , diferença atribuída à maior massa das gotas muito grossas, que reduz a possibilidade de perdas por evaporação durante o percurso de 4,0 m entre a formação e o alvo.

Produtos de ação de contato exigem maior uniformidade e porcentagem de cobertura, uma vez que seu desempenho depende da interação direta entre a gota e a superfície atingida. Por essa razão, são tradicionalmente aplicados com gotas de menor tamanho, capazes de gerar maior densidade de impactos e maior área coberta, conforme relatado por Matthews e Thornhill (2019) e Matuo (1990). Contudo, tais recomendações, estabelecidas para a pulverização terrestre, não se confirmaram nas aplicações aéreas com VANT. Esse comportamento pode ser atribuído à perda de massa das gotas durante o trajeto entre a formação e o alvo, o que afeta de maneira mais acentuada as gotas de menor diâmetro.

Contudo, a maior faixa de pulverização foi observada com gotas muito finas, apresentando relação inversamente proporcional ao aumento do diâmetro das gotas. A área coberta registrada alcançou 14 m para gotas de 100 e 200 μm , enquanto para gotas acima de 300 μm a faixa reduziu-se para 12 m. Mesmo que esses valores estejam alinhados às recomendações para pulverização terrestre, é provável que as condições meteorológicas tenham influenciado a distribuição das gotas, já que partículas de menor diâmetro são mais suscetíveis ao transporte pelo vento.

Gráfico 1 - Porcentagem da área coberta dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha⁻¹, velocidade 5,6 m s⁻¹ munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (µm), 2025, Palmeira – PR (p < 0,05).



Ao comparar os valores absolutos de área coberta com aqueles apresentados por Garcia *et al.* (2023) em pulverizações terrestres, verifica-se que os percentuais obtidos neste experimento são até 32 vezes menores. Essa diferença era esperada, pois aplicações aéreas estão mais suscetíveis aos efeitos meteorológicos, utilizam menor volume de calda por área e sofrem influência direta da aerodinâmica do VANT. Enquanto na pulverização terrestre a área coberta diminui com o aumento do tamanho das gotas, esse comportamento não foi observado quando a aplicação foi realizada por via aérea.

A pesquisa desenvolvida por Guo *et al.* (2019), utilizando VANT para pulverização na cultura do arroz, registrou média de 7% de área coberta em papéis hidrossensíveis. Esse valor foi 4,3 vezes superior aos 1,63% observados para gotas de 500 µm no presente estudo. As diferenças podem ser atribuídas às particularidades operacionais e ambientais de cada experimento, incluindo condições meteorológicas, altura de voo, volume de calda, tipo de alvo e características do VANT utilizado.

Os valores registrados por Souza *et al.* (2022) na pulverização com VANT em cafeeiros também foram superiores. Segundo os autores, a área coberta variou de 3,5% a 14,1%. A comparação entre os ensaios evidencia que os valores obtidos diferem em um fator de 8,7.

Mesmo considerando as diferenças de calibração entre os equipamentos, essa discrepância ainda pode ser considerada elevada.

Em um experimento conduzido com o VANT E610P™, equipado com seis rotores e quatro pontas, Dengeru *et al.* (2022) empregaram gotas finas e um volume de calda de 54 L ha⁻¹. Os autores observaram maior área coberta no estrato superior das plantas, alcançando 15,7%. Quando o volume de calda foi aumentado em 5,4 vezes, verificou-se um incremento de 9,6 vezes na área coberta, ao se comparar os resultados obtidos.

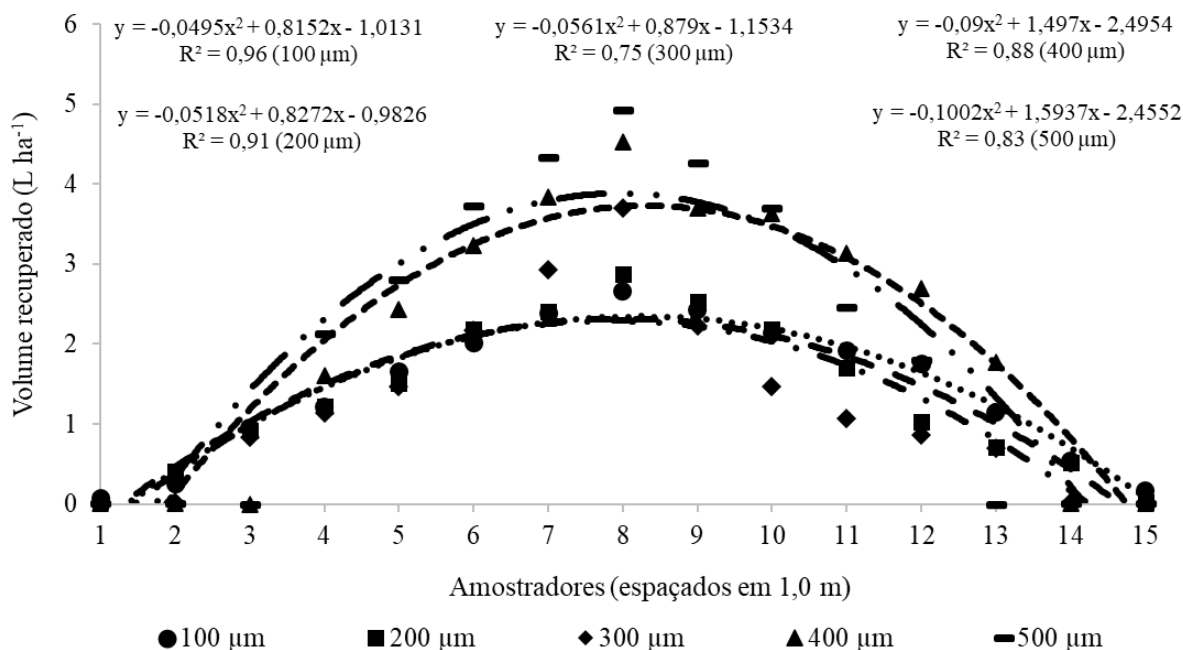
O estudo conduzido por Carneiro *et al.* (2024) teve como objetivo avaliar parâmetros de qualidade da pulverização e determinar o volume ideal para dessecação, utilizando o VANT AGRAS MG1-P, DJI™, com calda variando de 5 a 25 L ha⁻¹. Os autores concluíram que a porcentagem de área coberta aumentou de 2%, no volume de 5 L ha⁻¹, para 14% quando o volume foi elevado a 25 L ha⁻¹. Esses valores são superiores aos observados na presente pesquisa, o que pode ser atribuído às diferenças entre os aspersores utilizados nos dois experimentos.

Em relação à faixa pulverizada, os resultados obtidos foram semelhantes aos descritos por He *et al.* (2022), que observaram menor uniformidade de cobertura nas extremidades do arco de pulverização, atribuída ao aumento do diâmetro das gotas e à redução do fluxo de ar lateral. Estudos que investigaram diferentes tecnologias de aplicação também corroboram os padrões observados. Matthews e Thornhill (2019) ressaltam que gotas menores são essenciais para herbicidas de contato, devido à maior densidade de impactos; contudo, destacam que a cobertura pode ser reduzida em ambientes sujeitos à instabilidade aerodinâmica — condição intrínseca às aplicações realizadas com VANT.

4.2 VOLUME RECUPERADO

Os valores registrados para o volume recuperado foram ajustados por regressões quadráticas, com base na significância observada na análise de variância, para todos os diâmetros de gotas testados. As equações de segundo grau apresentaram parábolas com ponto máximo nos amostradores centrais, havendo decréscimo dos valores à medida que se afastavam do centro de formação das gotas (Gráfico 2). Quanto maior o diâmetro das gotas, maior foi o volume recuperado, comportamento semelhante ao observado para a variável área coberta. Esse resultado pode estar associado à interferência das condições meteorológicas no percurso de 4,0 m entre a formação das gotas e o papel hidrossensível. O volume máximo recuperado variou de 2,2 L ha⁻¹ para gotas de 100 µm a 3,9 L ha⁻¹ para gotas de 500 µm.

Gráfico 2 - Volume recuperado (L ha^{-1}) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT – drone), com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha^{-1} , velocidade de $5,6 \text{ m s}^{-1}$, equipado com dois bicos rotativos, variando o diâmetro das gotas em micrômetros (μm) Palmeira – PR, 2025 ($p < 0,05$).



O fato de gotas maiores apresentarem maiores volumes recuperados também encontra amplo suporte teórico. Segundo Matthews e Thornhill (2019), gotas de maior diâmetro possuem menor relação superfície-volume, tornando-se menos suscetíveis à evaporação durante o trajeto até o alvo e apresentando maior capacidade de manter trajetória estável. Neste experimento, o maior volume recuperado ocorreu com as gotas de maior diâmetro. Contudo, registrou-se, ainda assim, perdas de 60,1% da calda pulverizada que não atingiu o alvo.

O depósito de pulverização terrestre com diferentes padrões de gotas na cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum*) foi analisado por Souza, Castro e Palladini (2007). Os volumes pulverizados foram de 150 e 200 L ha^{-1} , sendo recuperados 7,0% e 20,5% do aplicado. Os autores concluíram que a pulverização com gotas grossas proporcionou maiores volumes de depósito nas folhas e maior uniformidade da distribuição da calda entre os diferentes estratos da planta. Os resultados são similares aos obtidos com o VANT, destacando-se uma maior porcentagem de volume recuperado na pulverização aérea.

Comparando métodos de qualificação da pulverização com VANT, Sarghini *et al.* (2019) trabalharam com volume de 10 L ha^{-1} . Os valores registrados indicaram volume recuperado variando de 4,8% a 30,8%. Os maiores depósitos foram obtidos diretamente sob o

VANT, com redução ao longo da faixa de aplicação. Os valores obtidos nos experimentos são similares, mesmo considerando as especificidades de cada trabalho.

A comparação da qualidade da pulverização utilizando VANTs foi realizada por Li *et al.* (2021), com volumes de calda aplicados entre 47 e 94 L ha⁻¹. O volume recuperado em papéis hidrossensíveis atingiu até 64% do aplicado, evidenciando elevada eficácia de deposição em comparação aos demais tratamentos confrontados. Este valor é mais que o dobro do obtido nesta pesquisa.

Pesquisando a relação entre a variação do volume de calda contendo glifosato na dessecação de plantas de cobertura do solo com drone, Carneiro *et al.* (2024) avaliaram o volume recuperado em papéis hidrossensíveis. Observou-se que essa variável aumentou proporcionalmente ao incremento do volume de calda aplicado, com os valores passando de 40,0% para 72,1% do volume recuperado, registros bem maiores que os obtidos com os bicos rotativos em diferentes tamanhos de gotas em mesmo volume de pulverização.

Trabalhando com volume recuperado de 10 L ha⁻¹ de calda pulverizada por VANT, Moura (2025) distribuiu papéis hidrossensíveis em uma faixa de 14 m. Os maiores volumes recuperados foram obtidos na região central da área amostrada, variando de 0,03 a 1,32 L ha⁻¹ para gotas de 100 µm; de 0,03 a 2,02 L ha⁻¹ para 200 µm; de 0,08 a 2,54 L ha⁻¹ para 300 µm; de 0,03 a 3,76 L ha⁻¹ para 400 µm; e de 0,19 a 4,53 L ha⁻¹ para gotas de 500 µm. Os valores foram próximos aos obtidos na presente pesquisa, utilizando o mesmo volume de calda e os mesmos tamanhos de gotas.

De forma inversa, com o aumento do diâmetro das gotas reduziu-se a faixa em que houve registro de impacto nos papéis hidrossensíveis. Os valores ajustados pelas curvas foram de 14 m para gotas de 100 e 200 µm e de 12 m para gotas maiores que 300 µm. Como a formação das gotas é proporcionada pela força centrífuga, seria esperado que as gotas de maior massa fossem lançadas a distâncias superiores, o que não ocorreu. A hipótese considerada é que houve maior influência do deslocamento de ar gerado pelo movimento das hélices do VANT do que da movimentação das gotas decorrente do giro do bico rotativo durante o trajeto até o alvo. Comportamento oposto foi observado para as gotas de menor massa, que apresentaram maior dispersão e amplitude de faixa, com variação na direção de deposição em relação ao centro de formação entre as três áreas testadas.

Os padrões observados para o volume recuperado refletem um comportamento amplamente documentado na literatura em aplicações aéreas com VANTs, em que a deposição tende a se concentrar na região central da faixa, diminuindo gradualmente em direção às extremidades. Esse comportamento, identificado nas parábolas ajustadas, demonstra a forte

interferência do ambiente aerodinâmico gerado pelas hélices, que direciona a maior parte da calda para o eixo de voo. De acordo com Guo *et al.* (2019), o vórtice descendente formado pelo movimento dos rotores gera uma aceleração do fluxo de ar imediatamente abaixo do equipamento, aumentando a deposição central e reduzindo a energia cinética das gotas que se deslocam lateralmente. Os resultados obtidos neste estudo, em que o volume recuperado é sempre maior no centro da faixa, confirmam o fenômeno descrito pelos autores.

As amplitudes laterais encontradas (14 m para gotas finas e 12 m para gotas acima de 300 μm) corroboram com os estudos de He *et al.* (2022), que registraram maior dispersão horizontal para gotas de menor massa. Esses autores explicam que gotas mais leves apresentam maior sensibilidade tanto à turbulência gerada pelo VANT quanto à influência do vento, ampliando a faixa lateral, embora com menor deposição volumétrica — exatamente o padrão registrado neste trabalho.

Quando contraposto com os registros de Dengeru *et al.* (2022), observam-se distinções. No experimento conduzido pelos autores, maiores valores de volume recuperado foram registrados devido ao uso de 54 L ha^{-1} , um volume de calda significativamente superior ao utilizado no presente estudo (10 L ha^{-1}). Dessa forma, embora o padrão de distribuição centralizada seja semelhante, os valores absolutos divergiram, justificadamente, em função das diferenças nas condições operacionais, culturais e volumétricas.

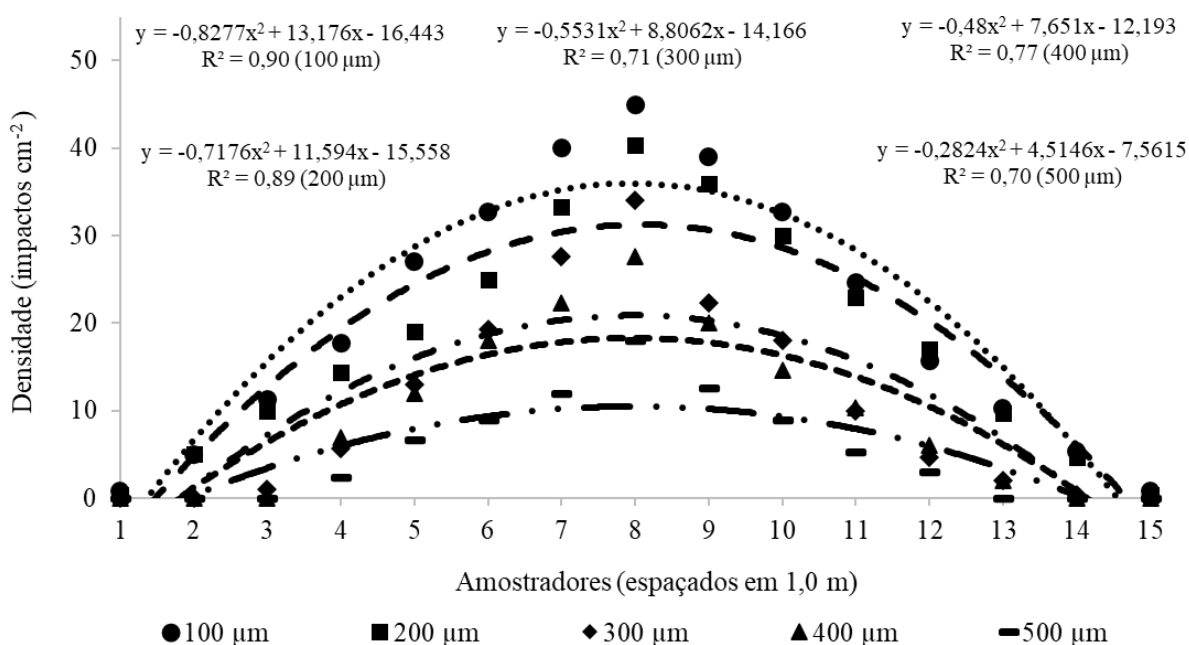
Valores ainda maiores foram documentados por Souza *et al.* (2022). Ao avaliarem a deposição em cafeeiros com diferentes alturas de voo, registraram volumes e cobertura superiores aos observados no presente estudo. As diferenças metodológicas justificam essa discrepância, incluindo o dossel mais denso da cultura do café, o uso de pontas hidráulicas e o microambiente aerodinâmico distinto em áreas de montanha. Ainda assim, o padrão de maior deposição central e redução lateral se manteve, reforçando a validade dos resultados obtidos nos Campos Gerais do Paraná.

4.3 DENSIDADE DE IMPACTO DE GOTAS

O número de impactos de gotas por área seguiu tendência de ajuste quadrático, conforme indicado pela análise estatística para explicar o fenômeno (Gráfico 3). As parábolas evidenciaram maior densidade de impactos nos coletores centrais, com decréscimo nas extremidades. Ao contrário das demais variáveis analisadas, os valores diminuíram com o aumento do DMV das gotas, tendência esperada, uma vez que gotas menores proporcionam maior cobertura para o mesmo volume de calda. A densidade variou de 10 impactos cm^{-2} para

gotas com DMV de 500 μm a 37 impactos cm^{-2} para gotas de 100 μm . Foram registrados impactos nos papéis hidrossensíveis em uma faixa de 14 m na pulverização com gotas de DMV inferior a 200 μm e de 12 m para DMV superiores a 300 μm . Novamente, observa-se a tendência de o vórtice gerado pelas hélices do VANT exercer maior influência sobre a trajetória das gotas de maior massa do que as condições meteorológicas, sendo o comportamento inverso para as gotas de menor massa.

Gráfico 3 - Densidade (impactos cm^{-2}) das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha^{-1} , velocidade 5,6 m s^{-1} , munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR ($p < 0,05$).



Os resultados obtidos para a densidade de impactos confirmam o padrão clássico de distribuição observado em aplicações aéreas com VANT, caracterizado pela maior concentração de gotas nos pontos centrais da faixa e pela redução progressiva da densidade nas extremidades. Esse comportamento é amplamente documentado na literatura e está diretamente relacionado à ação do fluxo de ar descendente gerado pelas hélices, que direciona as gotas para o eixo de deslocamento da aeronave. Conforme discutido por Guo *et al.* (2019), o vórtice formado embaixo do VANT intensifica a deposição central e reduz a energia das gotas para atingir áreas laterais, o que corrobora plenamente os resultados encontrados neste estudo.

A densidade de impactos de gotas corresponde ao número de gotas que atingem uma

área específica, sendo geralmente expressa em gotas por centímetro quadrado (Garcia; Ramos; Justino, 2004; Wu; Yang; Lin, 2025). A densidade estabelecida por Matthews (2000) como ideal é de 30 e 40 gotas cm^{-2} . Ao orientar tecnicamente o processo de pulverização, a Associação Nacional de Defesa Vegetal (ANDEF, 2004) sugere valores entre 20 e 30 gotas cm^{-2} . Neste experimento, a densidade variou de 10 impactos cm^{-2} para gotas com DMV de 500 μm a 37 impactos cm^{-2} para gotas de 100 μm , apresentando valores abaixo do considerado ideal para os maiores tamanhos de gotas.

A maior densidade de impactos registrada para gotas menores (até 37 gotas cm^{-2}) também está de acordo com os princípios descritos por Matthews e Thornhill (2019) e Matuo (1990), que afirmam que gotas finas proporcionam maior número de deposições por unidade de área devido à maior relação gota-volume e ao menor diâmetro individual, permitindo maior cobertura. No entanto, a amplitude de faixa observada, de 14 m para gotas finas, indica maior sensibilidade dessas gotas às condições aerodinâmicas e meteorológicas, ampliando a dispersão lateral sem necessariamente aumentar o volume recuperado.

Examinando diferentes tamanhos de gotas na aplicação de fungicidas com pulverizador terrestre em plantas de soja, Garcia *et al.* (2024) mantiveram o volume de calda constante em 130 L ha^{-1} . No terço superior das plantas, os valores de densidade (impactos de gotas por cm^2) foram: 785 para gotas muito finas, 1.045 para muito finas a finas, 744 para finas, 563 para médias a grossas e 376 para muito grossas. Com um volume de calda 13 vezes maior que o utilizado no experimento com VANT, a densidade chegou a ser 37,6 vezes superior. A maior eficácia na pulverização terrestre pode ser atribuída à menor distância entre a formação da gota e o alvo a ser atingido.

Em uma revisão sobre a pulverização de produtos fitossanitários com VANTs, Subramanian *et al.* (2021) destacaram que o volume de calda mais utilizado é de 15 L ha^{-1} . A densidade média de impactos reportada nos estudos analisados foi de 35 gotas cm^{-2} . Os autores afirmam que os resultados demonstram uma correlação direta entre o volume de pulverização e a densidade de impactos no alvo: à medida que o volume de calda aumenta, maior é o número de gotas que atingem a superfície aplicada. Tais afirmações foram corroboradas neste estudo.

Quando comparados aos resultados apresentados por Dengeru *et al.* (2022), verificam-se semelhanças no comportamento da deposição, com maior densidade na região superior do dossel e redução nas extremidades. No entanto, os valores absolutos daquele estudo foram superiores aos observados neste trabalho (47 a 53 gotas cm^{-2}), o que pode ser explicado pelo maior volume utilizado (54 L ha^{-1}), pela diferença no alvo (feijão-guandu, com dossel mais denso) e pela menor altura de voo. Tais fatores aumentam a interceptação foliar e favorecem

um maior número de impactos detectados.

Os resultados desta pesquisa também corroboram com He *et al.* (2022), que relataram menor uniformidade de deposição nas extremidades e influência do diâmetro das gotas sobre a densidade de impactos. Os autores destacam que a densidade de gotas diminui com o aumento do diâmetro, devido à menor quantidade de gotas geradas para um mesmo volume de calda e à menor suscetibilidade das gotas maiores ao transporte lateral pelas turbulências.

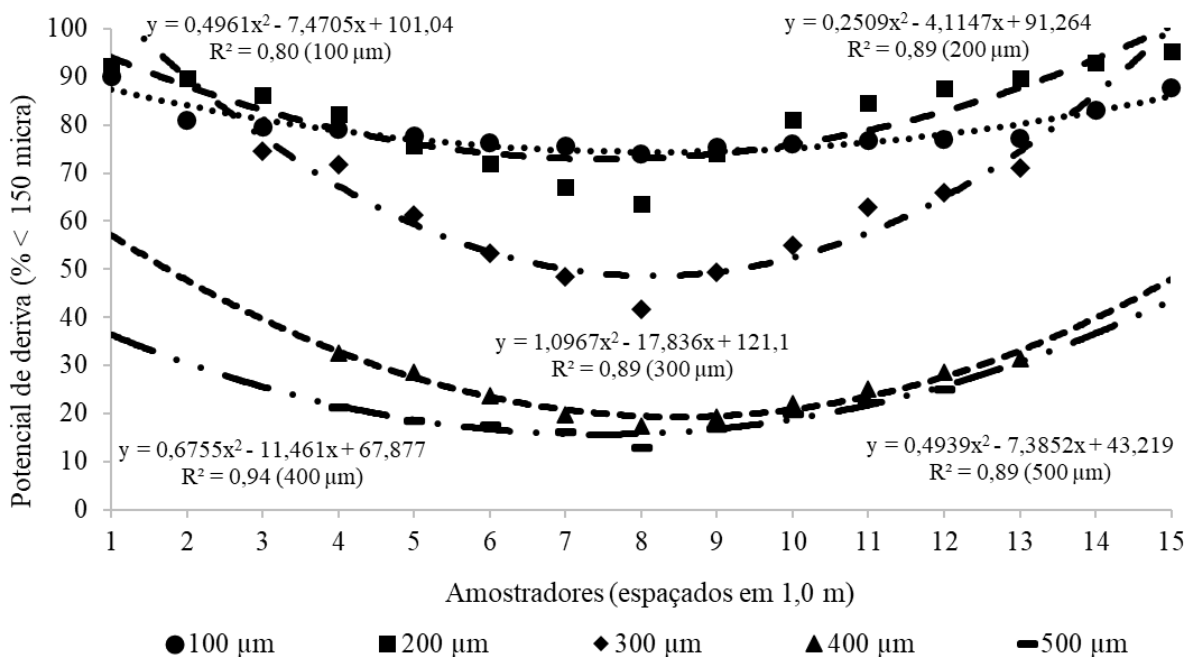
Em sua pesquisa sobre a faixa de pulverização com VANT, Moura (2025) avaliou a densidade de impactos de gotas em papéis hidrossensíveis distribuídos ao longo de 14 m de largura, utilizando volume de calda de 10 L ha⁻¹. A densidade de impactos (gotas cm⁻²) variou de 1 a 132 para gotas de 100 µm, de 1 a 105 para 200 µm, de 1 a 70 para 300 µm, de 1 a 63 para 400 µm e de 1 a 41 para 500 µm. A faixa efetiva de pulverização alcançou 14 m para gotas com DMV de 100 e 200 µm, enquanto para gotas acima de 300 µm a largura efetiva registrada foi de 13 m. Com VANT similar e a mesma calibração, os resultados para a faixa foram próximos em ambos os experimentos. Contudo, as diferenças entre densidades ressaltam a influência das condições meteorológicas em cada pulverização.

Os resultados dos experimentos destacam que a densidade de impactos é influenciada simultaneamente pela massa das gotas, pela aerodinâmica do VANT e pelas condições meteorológicas no momento da pulverização. Gotas menores proporcionam maior número de impactos, porém apresentam maior dispersão lateral, enquanto gotas maiores resultam em menor densidade e em uma faixa mais estreita, embora com deposição mais estável.

4.4 POTENCIAL RISCO DE DERIVA

A variável indicou significância na análise de variância, com melhor ajuste ao modelo de regressão polinomial quadrático para os cinco valores de DMV avaliados no experimento quanto à faixa de alcance (Gráfico 4). As curvas evidenciam a perda de massa das gotas à medida que se afastam do centro de formação, aumentando o potencial risco de deriva nas extremidades da faixa pulverizada. Essa tendência foi observada na área experimental, em que as gotas menores apresentaram risco de deriva variando entre 73% e 100%, enquanto os maiores valores de DMV apresentaram potenciais mínimos de aproximadamente 16% e máximos de 58%.

Gráfico 4 - Potencial risco de deriva (% de gotas com diâmetro menor que 150 micra) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha⁻¹, velocidade 5,6 m s⁻¹, munido dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR (p < 0,05).



O potencial risco de deriva na pulverização agrícola corresponde à fração do volume de calda que não atinge o alvo pretendido. Para reduzir a deriva, é essencial adequar a aplicação às condições meteorológicas vigentes, selecionar pontas e equipamentos que produzam gotas de maior diâmetro e minimizar a distância entre a geração da gota e o alvo (Fattahi; Abdollah, 2015; Madureira; Raetano; Cavalieri, 2015). Os resultados registrados neste ensaio corroboram as afirmações desses autores, evidenciando que a distância entre o VANT e o alvo constitui um dos principais desafios da pulverização aérea.

Uma revisão de artigos científicos sobre deriva na pulverização realizada por Perine *et al.* (2021) indica que entre 1% e 30% dos produtos aplicados por pulverizadores terrestres podem ser perdidos por deriva. Como consequência, a deriva apresenta implicações econômicas, ecológicas e de saúde, podendo comprometer a eficiência da aplicação, gerar impactos ambientais e expor organismos não alvo. No presente estudo, os registros obtidos com o VANT foram mais elevados, ressaltando a importância de considerar rigorosamente os preceitos da tecnologia de aplicação para minimizar o potencial risco de deriva.

Os dados registrados neste ensaio confirmam o comportamento amplamente descrito na literatura para aplicações aéreas com VANT, especialmente no que diz respeito à influência

determinante do diâmetro das gotas sobre o potencial risco de deriva. Assim como relatado por Wang *et al.* (2020), a presença de gotas menores que 150 μm está diretamente associada ao aumento da deriva, devido à menor massa e à maior sensibilidade ao vento e à turbulência aerodinâmica. Os altos valores obtidos para DMV de 100 e 200 μm , variando de 73% a 100%, reforçam essa relação, apresentando magnitude semelhante aos valores máximos reportados pelos autores, que variaram de 3% a 96% dependendo da proporção de gotas finas na pulverização.

A tendência observada no presente estudo também corrobora as conclusões de Grant *et al.* (2022), que destacaram que a deriva aumenta drasticamente quando há maior distância entre o VANT e o alvo e quando são utilizadas gotas de menor diâmetro. Embora, neste experimento, a altura de voo tenha sido fixada em 4,0 m, os padrões registrados de incremento da deriva nas extremidades indicam que, mesmo sob condições meteorológicas adequadas, a atuação das hélices e a dissipação da energia cinética das gotas continuam exercendo forte influência sobre o risco de deriva. Esse comportamento também foi descrito por Wongsuk *et al.* (2024), que relataram deriva variando entre 6,7% e 53,3% em VANTs operando com gotas finas a extremamente grossas, apresentando amplitude semelhante à observada neste estudo para os DMV maiores (300 a 500 μm).

Todavia, quando comparados aos resultados de Moura (2025), observa-se um padrão semelhante, embora os valores absolutos diverjam parcialmente. A pesquisadora verificou que o potencial de deriva para gotas pequenas (100 e 200 μm) foi superior a 80% ao longo dos 14 m, praticamente idêntico ao registrado nesta pesquisa. Para gotas maiores (300–500 μm), Moura registrou valores próximos de zero na região central e até 70% nas extremidades, enquanto o presente estudo observou valores mínimos de 16% e máximos de 58%. Essa diferença pode ser atribuída às particularidades de cada experimento, como altitude local e diferenças meteorológicas.

Os altos valores registrados nas extremidades da faixa, mesmo para gotas maiores, indicam que os vórtices descendentes formados pelas hélices têm papel significativo no transporte horizontal das gotas, fenômeno detalhado por Guo *et al.* (2019). Esses autores explicam que a turbulência gerada abaixo de VANTs multirrotores pode intensificar a variabilidade do fluxo de ar, contribuindo para a dispersão lateral das gotas.

4.5 DIÂMETRO DA GOTA COM 10% DO VOLUME ACUMULADO ($DV_{0,1}$ μm)

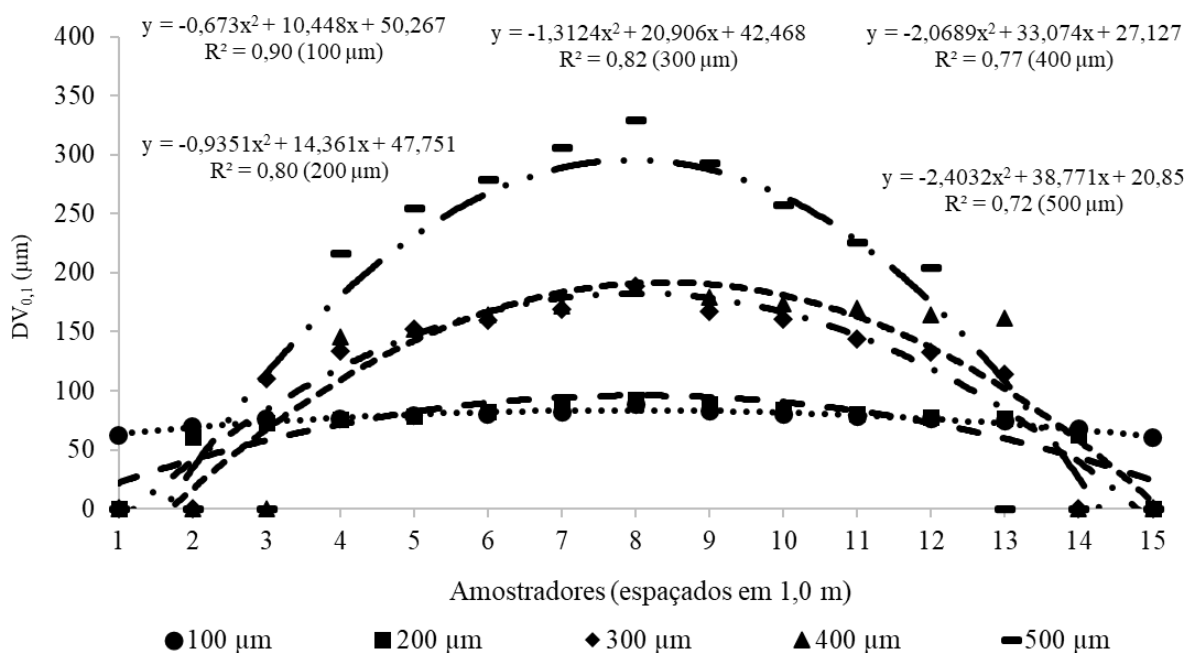
A análise da variável $DV_{0,1}$ indicou significância pelo teste de Fisher-Snedecor. Os ajustes quadráticos foram determinados como os mais adequados para representar os dados registrados (Gráfico 5). Observou-se coerência nas avaliações, evidenciada pelos valores crescentes à medida que os diâmetros das gotas estudadas aumentaram. As curvas menos acentuadas para diâmetros inferiores ao DMV de 200 μm podem ser atribuídas à limitação na deposição sobre os papéis hidrossensíveis e à capacidade de mensuração do equipamento para gotas menores que 50 μm . Como esperado, os diâmetros registrados foram maiores nos amostradores centrais em comparação com aqueles posicionados na periferia da faixa analisada. Os valores variaram de 60 a 330 μm , correspondendo a uma razão de aproximadamente 5,5 vezes entre o menor e o maior diâmetro, próximos aos DMV testados na pesquisa.

O $DV_{0,1}$ indica a fração de gotas muito pequenas, as quais apresentam maior suscetibilidade à deriva e à evaporação, fatores que podem comprometer a eficácia da aplicação. A determinação do $DV_{0,1}$ auxilia na escolha do espectro de gotas mais adequado para diferentes alvos, modos de ação dos produtos (sistêmicos ou de contato), distâncias entre a formação da gota e o alvo, além das condições meteorológicas vigentes (ASABE, 2018; Hoffmann; Hewitt, 2005). No caso específico da pulverização com VANT, essa variável torna-se ainda mais relevante.

Almejando avaliar os efeitos da pulverização de forma prática e precisa, Schamphelre *et al.* (2009) utilizaram papéis hidrossensíveis. Os autores aplicaram as caldas por meio de uma ponta hidráulica em ambiente controlado, a fim de analisar suas propriedades físico-químicas. Os valores de $DV_{0,1}$ determinados variaram entre 95 e 120 μm . No presente estudo, com tamanhos de gotas de 100 a 500 μm , utilizando bico rotativo montado em um VANT, os valores de $DV_{0,1}$ variaram 5,5 vezes, como esperado, de 60 a 330 μm .

O efeito da rotação de um bico centrífugo sobre o tamanho das gotas foi investigado por Wang *et al.* (2020). No estudo, o VANT P20 (XAG Company™) foi operado a uma altura de voo de 4,0 m e velocidade de 5,0 m s^{-1} . Os DMV selecionados para avaliação foram de 100, 150 e 200 μm . Os autores concluíram que os valores de $DV_{0,1}$ variaram de 59 a 251 μm . Com a avaliação de uma faixa mais ampla de tamanhos de gotas, a presente pesquisa também apresentou valores de $DV_{0,1}$ com maior amplitude.

Gráfico 5 – Diâmetro da gota com 10% do volume acumulado ($DV_{0,1}$ μm) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha^{-1} , velocidade $5,6 \text{ m s}^{-1}$, munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR ($p < 0,05$).



A capacidade de carga útil dos sistemas de aplicação aérea remotamente pilotados foi relacionada por Martin e Latheef (2022) ao padrão de pulverização e à faixa efetiva de deposição. Foram utilizadas pontas de jato plano e volumes de calda entre 5 e 20 L ha^{-1} . Os registros indicaram que o $DV_{0,1}$ variou de 103 a $134 \mu\text{m}$. Como neste estudo foram avaliados diferentes tamanhos de gotas, os resultados refletiram os tratamentos, destacando-se consistentemente os menores valores, mais suscetíveis ao potencial risco de deriva para gotas de menor diâmetro.

A comparação da qualidade de pulverização entre pulverizadores terrestres de barras e VANTs na cultura da soja foi conduzida por Gabriel *et al.* (2025). Os volumes de calda utilizados foram de 100 e 80 L ha^{-1} no pulverizador terrestre e de 20 L ha^{-1} no VANT. Os autores relataram que não houve diferenças significativas entre os tratamentos para a variável $DV_{0,1}$, sendo observado um valor médio de $126 \mu\text{m}$. Os resultados do referido estudo e os obtidos nesta pesquisa indicam que a ponta ou o bico de pulverização é o principal fator determinante do tamanho das gotas e da fração de gotas menores, tanto em pulverizadores terrestres quanto aéreos. A diferença quanto à ação dos fatores meteorológicos no processo está

relacionada à distância que a gota percorre entre sua formação e o alvo.

Comparando os resultados com os de Moura (2025), observa-se uma correlação consistente, uma vez que a autora também registrou valores de $DV_{0,1}$ mais elevados na região central e redução progressiva nas extremidades, atribuindo esse comportamento à ação dos vórtices formados pelas hélices do VANT. A concordância entre os estudos reforça que o ambiente aerodinâmico gerado pelo multirrotor afeta diretamente a distribuição das gotas mais finas, concentrando-as ao longo do eixo de voo.

Os valores obtidos para o $DV_{0,1}$ refletem a presença de gotas muito finas ao longo da faixa pulverizada, sendo diretamente influenciados pelo diâmetro médio volumétrico aplicado. O comportamento crescente do $DV_{0,1}$ do centro para as extremidades está alinhado ao padrão descrito por Matthews e Thornhill (2019), que afirmam que espectros de gotas com maior proporção de partículas finas tendem a apresentar maior variabilidade lateral, em razão da maior sensibilidade dessas gotas à turbulência aerodinâmica. No presente estudo, a amplitude registrada entre 60 e 330 μm indica que a pulverização com VANT promoveu uma faixa heterogênea de gotas finas, especialmente nos tratamentos com DMV reduzido.

A menor acentuação das curvas para gotas abaixo de 200 μm encontra suporte nos registros de Garcia *et al.* (2024), que relataram limitações importantes na quantificação de gotas menores que 50 μm em papéis hidrossensíveis, devido à coalescência e ao limite mínimo de detecção pelos softwares. Esses autores destacam que tais limitações podem subestimar a real quantidade de gotas finas presentes, o que contribui para valores menos acentuados de $DV_{0,1}$, comportamento semelhante ao observado neste experimento.

Os valores encontrados neste estudo divergem parcialmente daqueles relatados por Huang *et al.* (2023b), que observaram maior uniformidade do $DV_{0,1}$ ao longo da faixa quando utilizaram pontas hidráulicas. Essa diferença era esperada, uma vez que o bico rotativo empregado no presente experimento produz maior amplitude de tamanhos de gotas, aumentando a probabilidade de formação de frações finas. Além disso, a altura de voo de 4,0 m contribuiu para maior exposição das gotas às condições meteorológicas, fatores preponderantes para ampliar a variabilidade do $DV_{0,1}$ em condições reais de campo.

Os resultados são semelhantes às conclusões de Wongsuk *et al.* (2024), que notaram aumento progressivo do $DV_{0,1}$ nas bordas da faixa em razão da maior proporção de gotas finas e do distanciamento do fluxo descendente gerado pelo VANT. Esse efeito é coerente com o padrão obtido neste estudo e reforça que o comportamento lateral do $DV_{0,1}$ está diretamente relacionado à dissipação do jato de ar e à perda de energia cinética das gotas finas ao longo da trajetória.

Assim, o comportamento registrado neste experimento confirma que o $DV_{0,1}$ é fortemente condicionado por quatro fatores principais: o método de geração das gotas (bico rotativo), a atuação aerodinâmica do VANT, a influência das condições meteorológicas na pulverização aérea e a limitação física de detecção de gotas muito finas em papéis hidrossensíveis. A combinação desses elementos contribui para a compreensão tanto da coerência dos resultados com a literatura quanto das divergências pontuais observadas, consolidando o entendimento sobre a formação e a distribuição do espectro inferior de gotas na pulverização aérea com VANT.

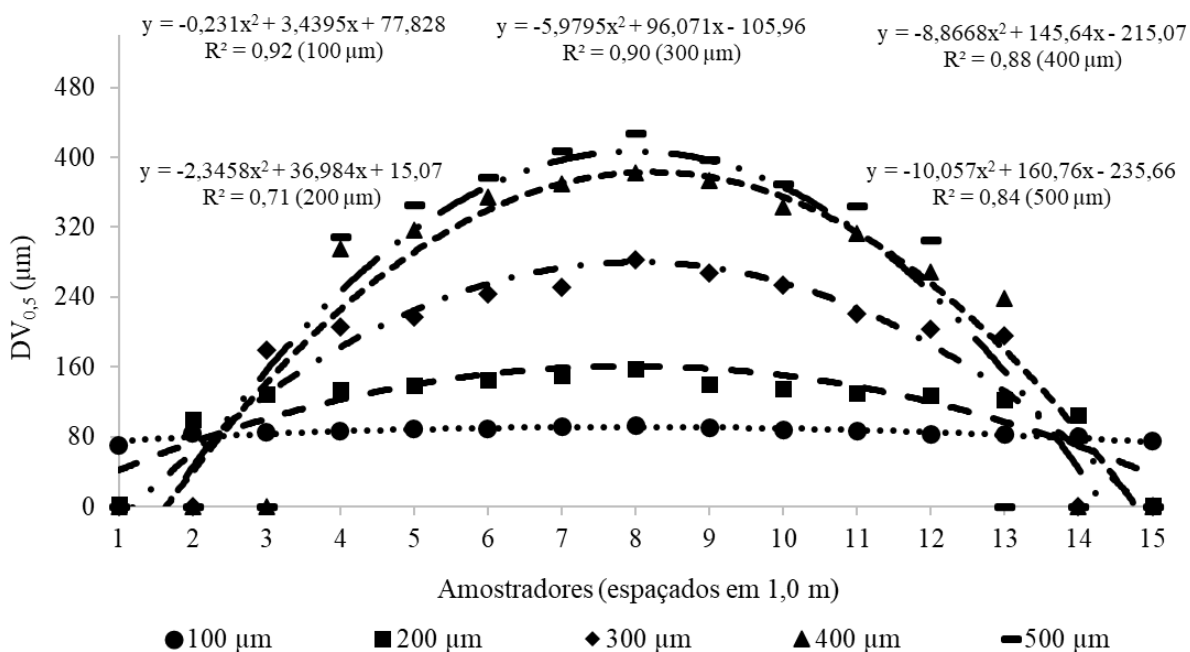
4.6 DIÂMETRO DA GOTA COM 50% DO VOLUME ACUMULADO ($DV_{0,5}$ μm)

Verificando o $DV_{0,5}$, concluiu-se com os testes estatísticos significativos determinaram regressão polinomial de segundo grau (Gráfico 6). As parábolas foram mais acentuadas para gotas de diâmetros mais elevados, indicando a maior dificuldade de deposição das gotas menores no alvo. Além disso, observou-se limitação na detecção de gotas com diâmetro inferior a 60 μm pelo equipamento DropScope™, pois foi o menor valor registrado nas avaliações.

Registrou-se a perda de massa das gotas ao longo dos 4,0 m entre a formação nos bicos rotativos e o alvo a 0,5 m do solo, evidenciada pela diferença de acentuação das curvas entre gotas de maiores e menores diâmetros. Os diâmetros das gotas variaram de 71 a 428 μm . Essa ampla faixa de valores reflete a diversidade de diâmetros de gotas planejados para estudo nesta pesquisa.

O diâmetro volumétrico mediano ($DV_{0,5}$) é amplamente utilizado para caracterizar o tamanho das gotas de pulverização, especialmente na agricultura, onde o diâmetro das gotas influencia diretamente a deposição no alvo e a eficácia do produto aplicado (ASABE, 2018; Silva *et al.*, 2009). A análise da distribuição do $DV_{0,5}$ ao longo da faixa de pulverização permite identificar alterações no espectro de gotas decorrentes do comportamento aerodinâmico do VANT e da interação entre as gotas e a turbulência local (ASABE, 2018; Matthews; Thornhill, 2019; Garcia *et al.*, 2024).

Gráfico 6 – Diâmetro da gota com 50% do volume acumulado ($DV_{0,5}$ μm) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha^{-1} , velocidade $5,6 \text{ m s}^{-1}$, munido dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR ($p < 0,05$).



A avaliação da atomização de líquidos e da redução da deriva em pontas hidráulicas, utilizando quatro soluções adjuvantes, foi conduzida por Liu *et al.* (2023). O experimento envolveu pontas formadoras de jatos de cone vazio, plano e plano com indução de ar. Os autores verificaram que o $DV_{0,5}$ foi de 167 μm para o jato cônico, 190 μm para o jato plano e 270 μm para o jato plano com indução de ar. No presente estudo, em que diferentes tamanhos de gotas foram gerados por um bico rotativo, os valores dessa variável apresentaram ampla variação, refletindo os objetivos distintos dos experimentos.

O impacto da altura de voo de VANT pulverizador sobre o espectro de gotas foi avaliado por Souza *et al.* (2022). Empregou-se a ponta de jato plano de grande ângulo, com qualidade da pulverização mensurada com papéis hidrossensíveis. Os autores observaram um $DV_{0,5}$ médio de 527 μm , sem variações significativas entre as diferentes alturas de voo. O maior $DV_{0,5}$ obtido na presente pesquisa foi menor, próximo do que foi programado pelo sistema computacional do VANT.

O potencial de risco de deriva associado a diferentes rotações de um bico centrífugo foi averiguado por Wang *et al.* (2020). O pulverizador utilizado foi VANT P20 (XAG

CompanyTM), sendo os diâmetros medianos volumétricos iniciais foram de 100, 150 e 200 μm . Os resultados evidenciaram que o $DV_{0,5}$ foi de 93 a 591 μm . A variação de tamanhos de gotas foi maior que neste experimento, mesmo se trabalhando com DMV de 100 a 500 μm . Os resultados evidenciam as diferenças pelas particularidades de cada pesquisa.

Em consonância com o estudo conduzido por Moura (2025), os resultados obtidos nesta pesquisa apresentaram comportamento semelhante. Além da equivalência dos valores, a autora observou que os menores diâmetros de gotas (100 e 200 μm) apresentaram valores relativamente mais baixos de $DV_{0,5}$ e curvaturas menos acentuadas ao longo da faixa de pulverização, quando comparados aos maiores diâmetros de gotas ($\geq 300 \mu\text{m}$). Observou-se, ainda, uma concentração expressiva dos valores de $DV_{0,5}$ nos coletores centrais para os maiores diâmetros, indicando maior concentração da pulverização na região central da faixa aplicada.

A regressão quadrática ajustada confirma que o espectro de gotas responde ao ambiente aerodinâmico gerado pelas hélices do equipamento, fenômeno amplamente discutido por Matthews e Thornhill (2019), os quais descrevem que alterações no fluxo de ar podem provocar a separação entre frações finas e grossas do espectro, modificando o $DV_{0,5}$ ao longo da faixa de pulverização. A maior acentuação das curvas observada nos tratamentos com gotas de maior diâmetro indica que o aumento do DMV promove maior contraste entre os valores centrais e laterais. Resultado semelhante foi relatado por Garcia *et al.* (2024), que verificaram maior variação do $DV_{0,5}$ em condições de pulverização com gotas grossas, especialmente quando a operação foi realizada a alturas superiores a 3 m, ampliando a exposição das gotas às forças aerodinâmicas.

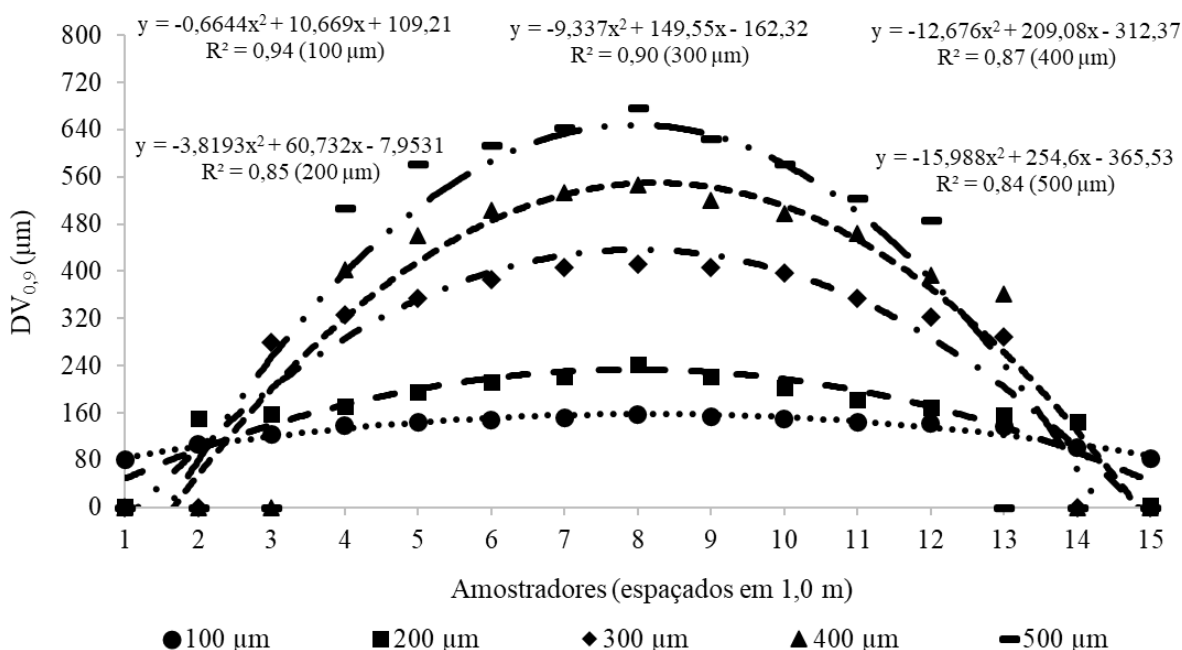
A limitação do DropScopeTM para detectar gotas menores que 60 μm também contribui para valores aparentemente menos acentuados nos tratamentos com DMV inferiores. Dengeru *et al.* (2022) e Souza *et al.* (2022) observaram limitações semelhantes ao utilizar papéis hidrossensíveis como coletores, relatando que gotas ultrafinas frequentemente deixam marcas subestimadas ou não detectáveis. Essa limitação constitui um dos fatores que influenciam a menor inflexão das curvas observada para gotas de menor diâmetro no presente estudo.

A pesquisa de Huang *et al.* (2023b) também apresenta paridade com os dados deste estudo. Os autores relataram que o $DV_{0,5}$ tende a diminuir nas extremidades da faixa de pulverização em razão da maior fração de gotas finas transportadas lateralmente pela turbulência gerada pelas hélices do VANT. Esse efeito foi igualmente observado no presente trabalho, reforçando que a dissipação do fluxo descendente na pulverização com VANT favorece a migração de gotas menores para regiões mais distantes do centro da aplicação.

4.7 DIÂMETRO DA GOTA COM 90% DO VOLUME ACUMULADO (DV_{0,9} µm)

Os dados coletados sobre DV_{0,9} foram analisados estatisticamente, com significância para a análise de variância e regressão polinomial. Com o ajuste quadrático, as curvas parabólicas evidenciaram maiores valores no centro da faixa, com perda de massa nas extremidades dos 14 m amostrados na pulverização (Gráfico 7). Os diâmetros das gotas variaram de 80 µm, para o espectro de DMV de 100 µm, até 677 µm, para gotas com DMV de 500 µm. As perdas de massa diminuíram de forma gradual até DMV de 300 µm, apresentando queda mais acentuada para gotas com DMV inferior a 200 µm.

Gráfico 7 – Diâmetro da gota com 90% do volume acumulado (DV_{0,9} µm) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 ha⁻¹, velocidade 5,6 m s⁻¹, munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (µm), 2025, Palmeira – PR (p < 0,05).



O DV_{0,9} representa o diâmetro para o qual 90% do volume pulverizado é composto por gotas de diâmetro igual ou menor, enquanto os 10% restantes correspondem a gotas maiores (ASABE, 2018; Basílio *et al.*, 2024). O DV_{0,9} é essencial para avaliar a uniformidade da aplicação, pois valores elevados podem indicar a predominância de gotas grandes que, embora menos suscetíveis à deriva, apresentam menor capacidade de cobertura e maior tendência ao

escorrimento. A variação do $DV_{0,9}$ ao longo da faixa também fornece informações sobre mudanças no comportamento aerodinâmico do VANT e sobre a estabilidade do padrão de deposição ao longo da aplicação (Matthews e Thornhill, 2019; Garcia *et al.*, 2024).

Os efeitos do diâmetro das gotas na eficácia de herbicidas aplicados em pré-emergência na cultura da soja (*Glycine max*) foram avaliados por Ferreira *et al.* (2020). Os autores utilizaram diversos herbicidas e pontas hidráulicas de jato plano, operando com um pulverizador terrestre de barras. Em um túnel de vento equipado com sistema a laser, registraram-se valores de $DV_{0,9}$ variando de 244 a 1.151 μm . No experimento com VANT, os dados coletados foram inferiores, denotando a perda de massa entre o bico e o alvo.

Buscando mensurar o diâmetro das gotas de pulverização por meio de análise de imagem, Cerruto *et al.* (2021) conduziram um estudo utilizando um sistema de pulverização terrestre. A ponta empregada foi do tipo indução de ar, posicionada a 0,6 m do alvo, operando à velocidade de 1,5 m s^{-1} e pressão de até 500 kPa. A análise dos impactos das gotas evidenciou que o $DV_{0,9}$ foi de 788 μm . Novamente, os valores da pulverização terrestre foram superiores aos registrados com o VANT, mesmo para a mesma categoria de gotas extremamente grossas, a qual a ponta de indução de ar geralmente produz.

Os efeitos dos parâmetros de aplicação na deposição da pulverização com VANT foram examinados por Huang *et al.* (2023a). O pulverizador utilizado possuía seis rotores e oito pontas hidráulicas de jato plano. Os tratamentos contemplaram diferentes alturas de voo, faixas de pulverização, velocidades de deslocamento, números de bicos e pressões de trabalho. Com essas configurações, o $DV_{0,9}$ variou de 195 a 245 μm . Os resultados foram inferiores quando comparados aos desta pesquisa, devido preponderantemente aos fatores de máquina e às condições meteorológicas.

A avaliação em campo da deriva de pulverização e dos danos à soja causados pela aplicação de herbicidas por um sistema de pulverização aérea não tripulado foi realizada por Huang *et al.* (2023b). O equipamento utilizado possuía seis rotores e oito pontas hidráulicas de jato plano. Os pesquisadores variaram o modelo da ponta, o número de bicos, a pressão de trabalho e a altura de voo. Os autores concluíram que os valores de $DV_{0,9}$ registrados variaram de 273 a 1.184 μm , apresentando maior amplitude de resultados do que a observada no experimento com bicos rotativos.

Na pesquisa conduzida por Moura (2025), a qualidade da pulverização foi avaliada por meio de papéis hidrossensíveis em um trabalho com VANT similar a este. O $DV_{0,9}$ variou de 23 a 513 μm . A maior deposição de gotas ocorreu nos papéis hidrossensíveis centrais da faixa pulverizada, diminuindo nas extremidades. Valores e maiores gotas na faixa central pulverizada

foram próximos aos observados na pulverização de herbicidas com VANT.

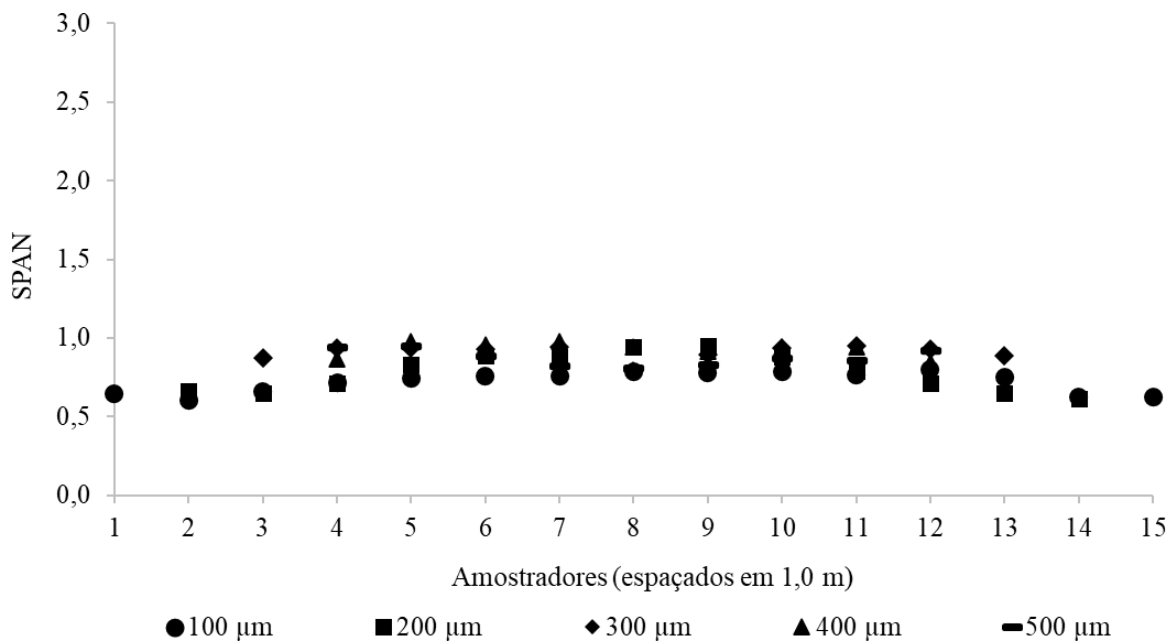
Os valores do $DV_{0,9}$ demonstram a presença de gotas muito grossas no centro da faixa de aplicação, comportamento esperado para pulverizações realizadas com bicos rotativos, que tendem a gerar maior amplitude espectral. Essa concentração central está alinhada ao que Matthews e Thornhill (2019) descrevem como o “efeito de estabilização aerodinâmica”, no qual as gotas de maior massa permanecem mais próximas do eixo de voo, devido à menor influência do fluxo turbulento lateral gerado pelas hélices. Assim, os valores máximos observados (até 677 μm) reforçam a tendência de que gotas grandes permaneçam concentradas na região imediatamente abaixo do VANT.

A redução progressiva do $DV_{0,9}$ em direção às extremidades da faixa também é coerente com as observações de Garcia *et al.* (2024), que verificaram diminuição no diâmetro das maiores gotas à medida que aumenta a distância lateral em relação ao centro, devido tanto ao aumento do percurso do jato quanto à dissipação do fluxo descendente das hélices. Essa perda de energia aerodinâmica explica por que os tratamentos com DMV menor apresentaram quedas mais acentuadas nos valores de $DV_{0,9}$, fato igualmente descrito por ASABE (2018) ao caracterizar espectros de gotas submetidos a campos turbulentos.

4.8 AMPLITUDE RELATIVA (SPAN)

Com base nos resultados dos diâmetros das gotas correspondentes a 10, 50 e 90% do volume acumulado, foi possível calcular o SPAN. Independentemente do DMV avaliado, os testes estatísticos não detectaram significância na análise de variância, dispensando o ajuste por regressão polinomial (Gráfico 8). Dessa forma, a diferença entre o maior e o menor valor de cada conjunto de dados manteve-se constante ao longo de toda a faixa amostrada na pulverização com VANT. Infere-se, a partir dos dados, que os fatores meteorológicos atuaram de maneira semelhante em todos os DMV avaliados, considerando que o cálculo não incluiu 20% dos valores extremos. Os valores registrados variaram entre 0,6 e 1,0.

Gráfico 8 – Amplitude relativa (SPAN) dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha⁻¹, velocidade 5,6 m s⁻¹, munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (µm), 2025, Palmeira – PR (p < 0,05).



O SPAN indica o grau de homogeneidade ou dispersão das gotas; quanto menor o valor, mais homogêneo é o espectro de gotas. Os resultados inferiores a 1,0 para todos os DMV avaliados ressaltam a homogeneidade das gotas formadas pelo bico rotativo acoplado ao VANT empregado no experimento (ASABE, 2018; Contiero; Biffe; Catapan, 2018).

A pulverização terrestre foi avaliada por Garcia *et al.* (2024). A calibração da pulverização permitiu determinar os diâmetros de gotas gerados, os quais foram classificados como: muito finos para pontas de jato cônico vazio; muito finos a finos para jato plano duplo; finos para jato plano de faixa ampliada; médios a grossos para jato plano de grande ângulo; e muito grossos para jato plano com indução de ar. Os valores de SPAN foram de 1,7 para pontas de jato cônico vazio, 2,0 para jato plano duplo, 1,7 para jato plano de faixa ampliada, 1,4 para jato plano de grande ângulo e 1,3 para jato plano com indução de ar. Esses resultados indicam maior amplitude do espectro de gotas geradas por pontas hidráulicas quando comparadas aos bicos rotativos.

O desempenho de 18 modelos de bicos na pulverização com VANT foi analisado por Yu *et al.* (2020). O SPAN do espectro de gotas variou de 0,2 a 1,2. Diante da diversidade de

modelos de bicos, é compreensível a obtenção de resultados com maior amplitude do que aqueles observados com os cinco DMV estudados nesta pesquisa.

A comparação entre a pulverização aérea realizada por VANTs e por aeronaves de asa fixa foi conduzida por Li *et al.* (2021), empregando pontas de jato plano, cujo SPAN do espectro de gotas foi de 1,2. Por sua vez, Cunha e Silva (2023) utilizaram um VANT equipado com pontas de jato plano, obtendo valores de SPAN entre 0,8 e 1,0. Os valores associados às pontas de jato plano foram superiores aos observados para os bicos rotativos, confirmando a maior homogeneidade das gotas produzidas pelo sistema centrífugo.

Os resultados corroboram os de Moura (2025), que avaliou os parâmetros de pulverização na faixa de distribuição com VANT, utilizando diferentes tamanhos de gotas formadas por bico rotativo. A autora concluiu que os diâmetros das gotas registrados foram maiores nos amostradores posicionados no centro da faixa, reduzindo-se progressivamente à medida que aumentava a distância em relação ao ponto de aplicação. Para gotas de menor diâmetro (100 e 200 μm), a faixa efetiva variou de 14 a 12 metros, enquanto, para gotas de maior diâmetro (acima de 300 μm), a faixa observada situou-se entre 13 e 12 metros. Quanto à amplitude relativa (SPAN), não foram constatadas diferenças significativas entre os tratamentos, mantendo-se os valores inferiores a 1,0. Esses resultados permitem afirmar que a aerodinâmica do VANT altera a distribuição espacial das gotas, mas não deforma substancialmente o espectro gerado.

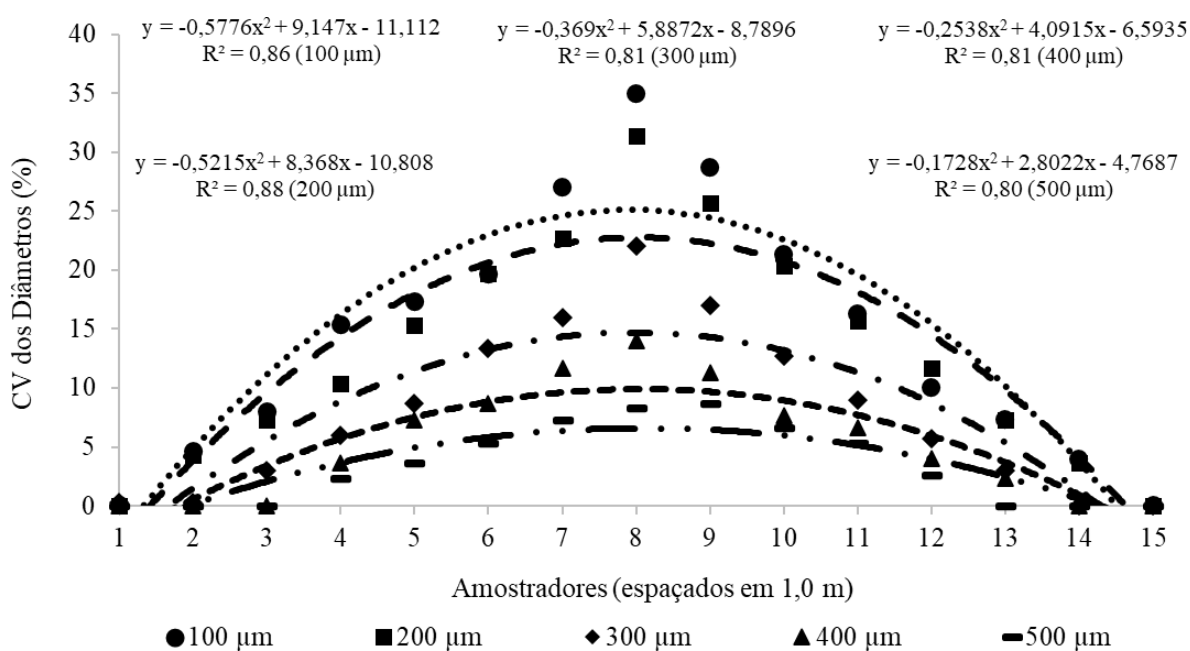
Em sistemas de pulverização aérea com VANT, o SPAN é influenciado pela estabilidade do jato, pela turbulência gerada pelas hélices e pelo tipo de ponta utilizada, podendo apresentar comportamento distinto daquele observado em pulverizadores hidráulicos (Garcia *et al.*, 2024; Guo *et al.*, 2019; Matthews e Thornhill, 2019). Mesmo diante desses fatores, o SPAN manteve-se abaixo de 1,0 ao longo da faixa pulverizada, indicando um espectro de gotas homogêneo em toda a área avaliada, independentemente do DMV utilizado.

4.9 COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV)

Os resultados referentes ao CV foram significativos para todos os diâmetros de gotas avaliados. Os ajustes quadráticos foram indicados para os DMV de 100, 200, 300, 400 e 500 μm (Gráfico 9). A dispersão, expressa pela relação entre desvio-padrão e média, variou de 2,3 a 35,1. Os menores valores ocorreram para gotas de maior DMV, e os maiores para gotas de menor DMV, seguindo a lógica de que, quanto maior o número de impactos de gotas, maior é o CV. Consequentemente, à medida que o DMV aumenta e o número de impactos nos papéis

hidrossensíveis diminui, observa-se redução do CV. Além do efeito do DMV, o CV também foi maior nos amostradores centrais da faixa, de acordo com a mesma lógica de aumento da variável em função do maior número de impactos registrados.

Gráfico 9 – Coeficiente de Variação (CV) dos diâmetros dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha⁻¹, velocidade 5,6 m s⁻¹, munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (µm), 2025, Palmeira – PR ($P < 0,05$).



O coeficiente de variação (CV) aceitável varia conforme o contexto da pulverização (cultura, tipo de produto e equipamento); no entanto, existem diretrizes gerais de valores ao longo da faixa de pulverização. Considera-se excelente uniformidade quando o CV é inferior a 10% e uniformidade aceitável quando o CV se situa entre 10% e 15%. Alguns padrões, como a norma PREN 12761-2, sugerem valores máximos entre 7% e 9% para condições ideais de altura e pressão, e 15% como limite máximo aceitável. Valores superiores a 15% – 20% indicam problemas significativos na distribuição e não devem ser utilizados, sendo frequentemente associados a pontas de pulverização desgastadas. Para pulverizações aéreas, um CV de até 30% já foi considerado aceitável em alguns contextos. De modo geral, valores elevados de CV resultam em subdosagem em determinadas áreas — levando a controle ineficaz de pragas,

doenças ou plantas daninhas — e em sobredosagem em outras, o que pode causar fitotoxicidade (danos à cultura), desperdício de produto e maior impacto ambiental (ASABE, 2018; Chen *et al.*, 2022; ESC, 2001).

Com os ajustes das curvas, o CV entre os amostradores variou entre 10% e 25% na maior parte da faixa, caracterizando valores elevados, com potencial de comprometer a qualidade do processo. Contudo, se o cálculo for realizado em relação à faixa, levando em consideração a área coberta, pode-se chegar aos valores organizados na Tabela 2. Com base neste método de cálculo, destaca-se que a elevação do diâmetro de gota aumentou o coeficiente de variação e reduziu a faixa pulverizada tida como aceitável. A recomendação seria uma faixa de pulverização de 10 m para diâmetros medianos de 100 μm , 9 m para 200 μm , 6 m para 300 μm , 5 m para 400 μm e 4 m para 500 μm .

Tabela 2 – Coeficiente de variação (%) com base nos valores da faixa de porcentagem da área coberta dos impactos das gotas pulverizadas sobre papéis hidrossensíveis por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do oitavo amostrador, volume de calda de 10 L ha⁻¹, velocidade 5,6 m s⁻¹ munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR.

Faixa (m)	Diâmetros medianos (μm)				
	100	200	300	400	500
4	10	12	14	7	10
5	8	14	9	8	17
6	6	10	5	15	15
7	7	7	11	16	8
8	7	8	21	18	19
9	4	10	30	25	36
10	8	15	40	34	50
11	17	21	51	43	61

Excelente (CV menor que 10%)
 Aceitável (CV entre 11 e 15%)
 Inaceitável (CV maior que 15%).

As características técnicas da pulverização em ambiente controlado foram avaliadas por Cunha e Teixeira (2001). Os coeficientes de variação (CVs) variaram de 5,4% a 22,0%, valores próximos aos observados na pulverização aérea com VANT a campo, o que ressalta as

condições ideais em que o experimento foi conduzido, em contraste com o ambiente de campo, sujeito a diversos fatores não controlados. Ainda assim, esses valores foram superiores aos reportados por Carvalho *et al.* (2020), que avaliaram 24 aeronaves equipadas com pontas hidráulicas e bicos rotativos, obtendo CV médio de 17%.

A especificidade das pulverizações aéreas se evidencia nas conclusões de cada experimento com VANT. Valores elevados foram registrados por Zhang *et al.* (2021) ao quantificar os efeitos dos parâmetros de pulverização na largura efetiva de aplicação em plantas de cana-de-açúcar. Os resultados demonstraram que o CV na densidade de deposição de gotas variou de 51% a 81%.

O desenvolvimento de um sistema autônomo de controle de pulverização por VANTs, baseado no coeficiente de variação da distribuição da pulverização, foi realizado por Wang *et al.* (2024). Em ambientes controlados, o CV da maioria dos 23 ensaios permaneceu abaixo de 30%. Essas conclusões corroboram os registros do experimento desenvolvido em Ponta Grossa, estado do Paraná.

Trabalhando com VANT equipado com bicos rotativos, Moura (2025) obteve os seguintes CVs para cada DMV: 100 μm , de 0 a 22,0%; 200 μm , de 0 a 13,1%; 300 μm , de 0,3 a 11,0%; 400 μm , de 0,7 a 7,4%; e 500 μm , de 0,8 a 6,8%. O menor DMV testado (100 μm) apresentou maior dispersão de dados em comparação aos demais, seguindo a lógica de que quanto maior o número de impactos de gotas nos papéis hidrossensíveis, maior a dispersão de tamanhos e, conseqüentemente, o coeficiente de variação. Com o afastamento do centro da faixa, observou-se redução do CV, devido ao menor impacto de gotas capturado pelos papéis hidrossensíveis. As conclusões da autora foram confirmadas na presente pesquisa, apresentando valores similares.

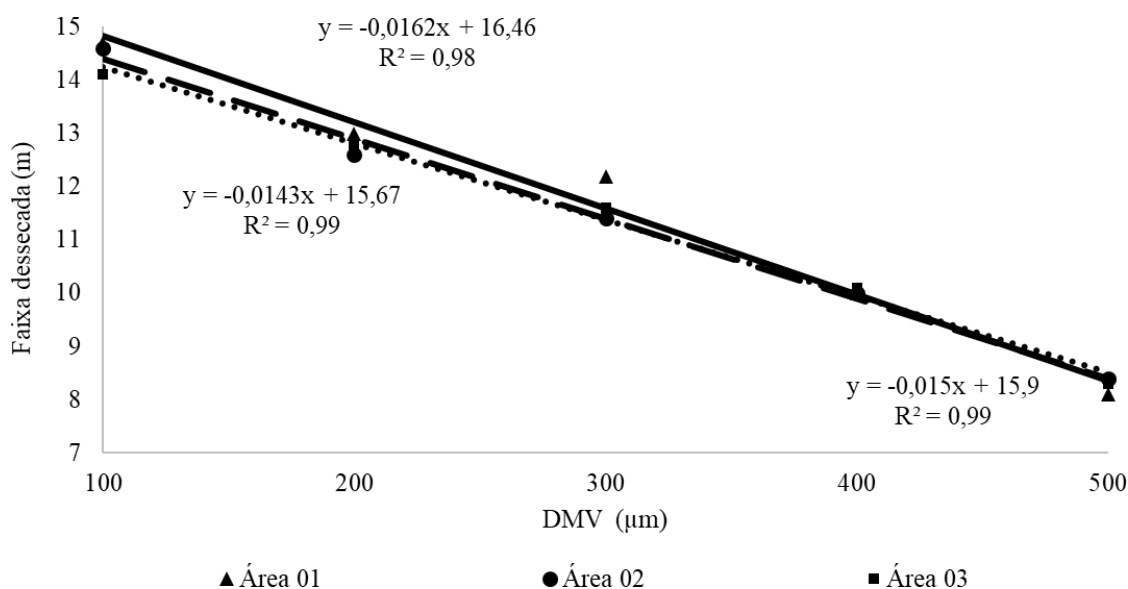
4.10 FAIXA DESSECADA

Após 15 dias da pulverização do herbicida, os dados referentes à faixa em que as plantas tinham sido dessecadas pelo VANT foram tabulados. O controle químico observado nas três áreas avaliadas no experimento apresentou comportamento semelhante. Diante da significância verificada na análise de variância, aplicou-se a regressão polinomial, sendo o ajuste linear o indicado para representar a faixa dessecada nas três áreas. Houve redução da largura da faixa dessecada entre todos os diâmetros de gotas aplicados nas áreas experimentais.

Para gotas com DMV de 100 μm , a faixa média entre repetições e áreas foi de 14,5 m (Gráfico 10). Ao se elevar o DMV para 200 μm , a faixa com mais de 90% de plantas dessecadas

pelo herbicida reduziu para 12,8 m, correspondendo a um decréscimo de 13,3%. A tendência manteve-se com o aumento do diâmetro das gotas: faixas de 11,7 m para 300 μm (redução de 9,4%), 10,0 m para 400 μm (redução de 17,0%) e 8,3 m para 500 μm (redução de 20,5%).

Gráfico 10 - Faixa (m) dessecada com herbicida de contato, pulverizado por veículo aéreo não tripulado (VANT - drone) com altura de voo de 4,0 m acima do alvo, volume de calda de 10 L ha⁻¹, velocidade 5,6 m s⁻¹, munido de dois bicos rotativos, variando o diâmetro de gotas em micra (μm), 2025, Palmeira – PR.



Tais resultados não indicam que seja recomendável trabalhar com gotas menores, mas sim que estas são mais suscetíveis à ação de ventos laterais, uma vez que não se observou padrão de deslocamento em relação ao posicionamento do VANT entre as áreas pulverizadas. Em alguns casos, a faixa dessecada deslocou-se mais à direita, e em outros, mais à esquerda do percurso da máquina.

Partindo do pressuposto de que gotas maiores possuem maior massa, esperava-se que a faixa de pulverização se ampliasse devido ao lançamento das gotas pela força centrífuga dos bicos rotativos. No entanto, tal hipótese não se concretizou, possivelmente em razão da força do ar deslocado pelas quatro hélices do VANT. Apesar de a faixa dessecada ser menor, esta apresentou maior uniformidade em relação ao centro de pulverização, entre repetições e áreas, quando comparada às faixas obtidas com gotas menores no controle químico.

Observa-se uma discrepância entre os valores obtidos nos papéis hidrossensíveis e a faixa efetivamente dessecada, com mais de 90% das plantas mortas pela ação do herbicida.

Houve registro de impacto de gotas em uma faixa de 14 m para DMV de 100 e 200 μm , e de 12 m para DMV acima de 300 μm . Para gotas de 100 μm , os resultados das análises entre papéis hidrossensíveis e área dessecada foram semelhantes. Nas demais avaliações, a faixa dessecada foi menor do que a registrada nos papéis hidrossensíveis, com reduções de 9,3% para 200 μm , 2,5% para 300 μm , 20,0% para 400 μm e 44,6% para 500 μm . Esses resultados indicam que os registros de impactos nos papéis hidrossensíveis não foram eficientes para que o herbicida de contato atingisse eficiência total na dessecação das plantas em antese plena.

Em pulverizações com VANTs, faixas mais estreitas proporcionam maior precisão, mas exigem um maior número de passadas, enquanto faixas mais largas, embora mais operacionais, podem comprometer a uniformidade da aplicação se não houver sobreposição adequada (Chen *et al.*, 2022; Cunha; Silva, 2023; Melo *et al.*, 2024). As recomendações dos autores foram corroboradas nesta pesquisa, pois gotas de menor diâmetro propiciaram faixas maiores, porém com elevada influência das condições meteorológicas sobre o potencial risco de deriva.

As investigações conduzidas por Wen *et al.* (2019) sobre pulverização com VANT em diferentes velocidades de voo e altitudes de trabalho resultaram em faixas de pulverização entre 4,0 e 7,6 m. Esses valores são inferiores aos obtidos no presente experimento, ressaltando as particularidades dos pulverizadores, as especificidades dos voos e as condições meteorológicas.

Os efeitos dos parâmetros de pulverização na largura efetiva de aplicação com VANT foram verificados por Zhang *et al.* (2021). Os dados demonstraram que a maior largura efetiva de pulverização foi de 7,0 m, obtida sob altura de voo de 6,0 m e velocidade de 2,0 m s^{-1} . No presente estudo, com alteração específica do tamanho das gotas, a faixa chegou a mais que o dobro, atingindo 14,7 m de largura dessecada.

O desempenho da pulverização, em termos de faixa e potencial risco de deriva, foi avaliado por Sinha *et al.* (2022), utilizando os VANTs MG-1PTM e AG V6A+TM, operando em diferentes altitudes, velocidades e com pontas de leque plano, que produziram gotas muito finas (140 μm) e finas (196 μm). A faixa efetiva variou de 4 a 5 m, valores inferiores aos obtidos nesta pesquisa, ressaltando as distinções entre as calibrações das máquinas estudadas.

Ao estudar a deposição da pulverização com VANT em papéis hidrossensíveis, Ahmad *et al.* (2022) posicionaram os amostradores a até 25 m de distância do centro de aplicação. O experimento foi conduzido em uma fazenda na China, utilizando um VANT com rotor único, equipado com nove pontas hidráulicas de jato plano TeeJetTM TT110015, sendo os DMV calibrados como fino, médio e grosso. Os autores relataram que a maior concentração da deposição ocorreu na faixa de 12,8 m a partir do centro da pulverização. As conclusões do

estudo realizado na China são próximas aos obtidos no experimento realizado no Brasil, mesmo com bicos de diferentes estruturas para formação de gotas.

A investigação das características de distribuição da deposição de gotas de um VANT foi conduzida por Liu *et al.* (2022). Utilizou-se o modelo DJI Agras T30™, equipado com pontas de jato plano que geraram gotas com DMV de até 300 µm. Os autores concluíram que houve deposição em uma faixa de até 13,2 m, próximas aos obtidos neste ensaio. Corrobora-se assim que, mais importante do que a ponta ou bico utilizado, é o tamanho da gota produzida.

No estudo conduzido por Cunha e Silva (2023), objetivou-se avaliar a deposição de calda na cultura do milho (*Zea mays*), com aplicação realizada pelo VANT da marca DJI™, modelo AGRAS-MG-1, equipado com pontas de jato plano. Os pesquisadores relataram que a faixa de deposição efetiva variou de 5,7 a 7,6 m. Na pesquisa realizada com bicos rotativos, as faixas de deposição efetivas foram maiores, evidenciando menor homogeneidade nos tamanhos de gotas geradas.

A deriva da pulverização com VANT na aplicação de herbicidas foi mensurada por Huang *et al.* (2023b). O pulverizador possuía seis rotores e oito pontas hidráulicas de jato plano. Os pesquisadores variaram o modelo da ponta, o número de bicos, a pressão de trabalho e a altura de voo. Os autores observaram que, quanto menor o tamanho da gota, maior a probabilidade de ser afetada pelo vento lateral. Também foi registrada uma diminuição da deposição à medida que se afastava do centro de formação da gota. Gotas maiores reduziram a faixa de ação do herbicida devido à restrição da deriva. A faixa de ação do herbicida variou de 10 m para gotas de maior diâmetro a 20 m para gotas de menor diâmetro. Os resultados do experimento com pulverização por bicos rotativos foram inferiores, com faixa dessecada de herbicida de contato entre 8 e 14 m.

5 CONCLUSÕES

Em relação à área coberta, volume recuperado, densidade de gotas e coeficiente de variação, observou-se a mesma tendência de aumento dos valores nos amostradores centrais, acentuada pelo crescimento do tamanho das gotas geradas pela ponta rotativa do VANT. Na média das coletas dessas variáveis, as faixas registradas foram de 14 m para gotas com DMV de 100 e 200 μm , e de 12 m para gotas de 300 a 500 μm .

O potencial risco de deriva evidenciou que as curvas mostram a perda de massa das gotas à medida que se afastam do centro de formação, aumentando o risco de deriva nas extremidades da faixa pulverizada. Essa tendência foi observada na área experimental, em que gotas menores apresentaram risco de deriva variando entre 73% e 100%, enquanto gotas de maior DMV apresentaram valores mínimos de aproximadamente 16% e máximos de 58%.

Os valores de $DV_{0,1}$ variaram de 60 a 330 μm , correspondendo a uma razão de aproximadamente 5,5 vezes entre o menor e o maior diâmetro. O $DV_{0,5}$ variou de 71 a 428 μm , enquanto para as maiores gotas o $DV_{0,9}$ esteve entre 80 e 677 μm . Em relação à amplitude relativa (SPAN), não foram observadas diferenças significativas, mantendo-se os valores abaixo de 1,0, o que indica pulverização homogênea.

A faixa média dessecada para gotas com DMV de 100 μm foi de 14,5 m. Ao se elevar o DMV para 200 μm , a faixa com mais de 90% de plantas dessecadas pelo herbicida reduziu para 12,8 m, correspondendo a um decréscimo de 13,3%. A tendência manteve-se com o aumento do diâmetro das gotas: 11,7 m para 300 μm (redução de 9,4%), 10,0 m para 400 μm (redução de 17,0%) e 8,3 m para 500 μm (redução de 20,5%).

REFERÊNCIAS

ADAPAR – Agência de Defesa Agropecuária do Paraná. **Helmoquat™**. Disponível em: <https://celepar07web.pr.gov.br/agrotoxicos/listar.asp?Cod=2280&descIngrediente=&CodIngredienteAtivo=null&CodFormulacao=null&IdRegistrante=null&CodFormaAcao=null&CodAlvo=null&CodGrupoQuimico=null&CodClassToxicologica=null&CodSituacao=null&CodClassificacao=null&CodEspecie=null&CodAgrotoxico=2280&NumeroRegistro=null&expurgo=null&aplica=null&tratam=null&ClassificacaoQuiBio=null&criterioAgrotoxico=HELMOQUAT&criterioIngredienteAtivo=&criterioRegistrante=&criterioClassificacaoToxicologica=&criterioPraga=&criterioSituacao=&criterioClasse=&criterioCulturaInfestada=&criterioExpurgo=&criterioAplicacaoAerea=&criterioTratamentoSementes=>. Acesso em: 30 de maio de 2025.

AGROCETE. **Produto Grap Tech™**. Disponível em: <https://agrocete.com.br/pt/produto/grap-tech>. Acesso em: 30 de setembro de 2025.

AHMAD, F.; ZHANG, S.; QIU, B.; MA, J.; XIN, H.; QIU, W.; AHMED, S.; CHANDIO, F.A.; KHALIQ, A. Comparison of water sensitive paper and glass strip sampling approaches to access spray deposit by UAV sprayers. **Agronomy**, v. 12, n. 6., p. 1302, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061302>. Acesso em: 29 de setembro de 2025.

ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, v. 22, n. 208, p. 25-36, 2001. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/45499527.pdf>. Acesso em: 30 de março de 2025.

ANDEF - Associação Nacional de Defesa Vegetal. **Manual de tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários**. Campinas: Linea Criativa, 2004, 52p.

ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. **Tecnologia de aplicação para culturas anuais**. 2. ed. Passo Fundo: Aldeia Norte – FEPAF, 2011. 373p.

ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers. **Droplet size classification of aerial application nozzles**. St. Joseph: ASABE S872.2, 2018, 5p.

AZEVEDO, F. R.; FREIRE, F. C. O. **Tecnologia de Aplicação de Defensivos Agrícolas**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2006. 48p. (Documentos, 102).

BASÍLIO, S.; FURTADO JÚNIOR, M.R.; DE ALVARENGA, C.B.; VITÓRIA, E.L.D.; VARGAS, B.C.; PRIVITERA, S.; CARUSO, L.; CERRUTO, E.; MANETTO, G. Effect of Adjuvants on Physical–Chemical Properties, Droplet Size, and Drift Reduction Potential. **Agriculture**, v. 14, 2271, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture1412271>. Acesso em: 10 de agosto de 2025.

BUTTS, T. R.; BARBER, L.T.; NORSWORTHY, J. K.; DAVIS, J. Survey of ground and aerial herbicide application practices in Arkansas agronomic crops. **Weed Technol**, v. 35, n.01, p. 01–11, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/wet.2020.81>. Acesso em: 10 de agosto de 2025.

CARNEIRO, R. P.; GARCIA, L. C.; DALAZEN, G.; GOMES, J. A.; RAETANO, C. G.; BOLLER, W. Variation of glyphosate spray volume in the drying of ground cover plants with an unmanned aerial vehicle. *Crop Protection*, v. 181, p. 106694, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106694>. Acesso em: 15 de agosto de 2025.

CARVALHO, F. K.; CHECHETTO, R. G.; MOTA, A. A. B.; ANTUNIASSI, U. R. Characteristics and challenges of pesticide spray applications in Mato Grosso, Brazil. *Outlooks on Pest Management*, v. 28, n. 1, p. 4–6, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1564/v28_feb_02. Acesso em: 14 de agosto de 2025.

CARVALHO, F. K.; CHECHETTO, R. G.; MOTA, A. A. B.; ANTUNIASSI, U. R. Challenges of aircraft and drone spray applications. *Outlooks on Pest Management*, v.31, n.6, p.83-88, abr. 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1564/v31_apr_07. Acesso em: 11 de agosto de 2025.

CASTANHO, R. B. E.; TEIXEIRA, M. E. S. A evolução da agricultura no mundo. *Brazilian Geographical Journal*, v. 8, n. 1, p. 136-146, 2017. Disponível em: <file:///D:/Arquivos%20Usu%C3%A1rio/Downloads/braziliangeojournal,+2017-1-artigo8-castanho.pdf>. Acesso em: 11 de agosto de 2025.

CERRUTO, E.; MANETTO, G.; LONGO D.; PAPA, E R. Spray Drop size measurement via image analysis. *IEEE Xplore*, p. 346-350, Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor52389.2021.9628876>. Acesso em: 15 de agosto de 2025.

CHEN, P.; DOUZALS, J.P.; LAN, Y.; COTTEUX, E.; DELPUECH, X.; POUXVIEL, G.; ZHAN, Y. Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: A review. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, p. 870956, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.870956>. Acesso em: 10 de setembro de 2025.

CONTIERO, R. L.; BIFFE, D. F.; CATAPAN, V. Tecnologia de Aplicação. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T.; FREITAS, P.S.L.; BERIAN, L.O.S.; GOTO, R. *Hortaliças-fruto*. Maringá: EDUEM, 2018.

CÔRT, A. S. D.; PACHECO, L. P.; GUEDES, T. R. M.; SILVA, L. S.; GRECO, T. M.; MACEDO, K. S.; BATISTA, E. R.; SOUZA, E. D.; SILVA, I. A. G.; CRUSCIOL, C A C. Crop rotation with species diversification during off-season impact the nutrient cycling in no-tillage system. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 25, p. 5427–5438, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02475-z>. Acesso em: 18 de agosto de 2025.

CRUZ J. C.; ALVARENGA R. C.; VIANA, J. H. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; SANTANA, D. P. *Plantio Direto*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/manejo-do-solo-e-adubacao/sistema-de-manejo-do-solo/plantio-direto>. Acesso em: 19 de agosto de 2025.

CUNHA, J. P. A. R.; SILVA, M. R. A. Spray deposition from a remotely piloted aircraft on the corn crop. *Revista Ciência Agronômica*, v. 54, p. 01-08, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230027>. Acesso em: 20 de agosto de 2025.

CUNHA, J. P. A. R.; TEIXEIRA, M. M. Technical characteristics of hydraulic fan spray nozzles. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 334-348, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000200028>. Acesso em: 10 de julho de 2025.

DENGERU, Y; RAMASAMY, K; ALIMUNTHU, S; BALAKRISHNAN, S; KUMAR, A. P. M.; KANNAN, B; KARUPPASAMI, K. M. Study on spray deposition and drift characteristics of UAV agricultural sprayer for application of insecticide in redgram crop (*Cajanus cajan* L. Millsp.). **Agronomy**, v. 12, n. 12, p. 3196, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12123196>. Acesso em: 05 de agosto de 2025.

ECS - European Committee for Standardization. Agricultural and forestry machinery - Sprayers and liquid fertilizer distributors - Environmental protection - Part 2: Field crop sprayers - EN 12761-2:2001. Brussels: CEN, 2001. 17p.

FATTAHI, S. H.; ABDOLLAH, S. P. Sensitivity analysis of variables affecting spray drift from pesticides for their environmental risk assessments on agricultural lands. **Environ Dev Sustain**, v. 27, p. 13023–13043, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04452-x>. Acesso em: 19 de setembro de 2025.

FERREIRA, P. H. U.; FERGUSON, J. C.; REYNOLDS, D. B.; KRUGER, G. R.; IRBY, J. T. Droplet size and physicochemical property effects on herbicide efficacy of pre-emergence herbicides in soybean (*Glycine max* (L.) Merr). **Pest Management Science**, v. 76, n. 2, p. 737-746, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ps.5573>. Acesso em: 03 de agosto de 2025.

FRANS, R.; TALBERT, R.; MARX, D.; CROWLEY, H. Experimental design and techniques for measuring and analysing plant responses to weed control practices: In: Camper ND editor. **Research methods in weed science**, 3rd. ed. Madison: USA Southern Weed Science Society; 1986. p.29-46.

FRARE, I. C.; GARCIA, L. C.; MARTINS, M. A.; MELO, M. H.; CARNEIRO, R. P.; INAGAKI, T. M. Efficacy of air-assist technology and auxiliary boom for fungicide application in soybean fields. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 47, n. 1, e72060, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v47i1.72060>. Acesso em: 15 de junho de 2025.

GABRIEL, L. G. S.; BARBOSA, T. M.; ARCOVERDE, S. N. S.; NASCIMENTO, J. M.; SECRETTI, M. L. Qualidade de aplicação de fungicida entre pulverizador terrestre e drone na cultura da soja. *Revista Ambientale*, v. 17, n. 1, p. 1-13, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.48180/ambientale.v17i1.616>. Acesso em: 21 de agosto de 2025.

GARCIA, L. C.; RAETANO, C. G.; JUSTINO, A.; PURÍSSIMO, C. Dessecação da aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb) com herbicida de contato, em presença ou não de assistência de ar junto à barra do pulverizador, em diferentes volumes de calda. **Engenharia Agrícola**, 24, 758-763, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162004000300029>. Acesso em: 20 de junho de 2025.

GARCIA, L. C.; RAMOS, H. H.; JUSTINO, A. Avaliação de softwares para análise de parâmetros da pulverização realizada sobre papéis hidrossensíveis. **Revista Brasileira de**

Agrocomputação, Ponta Grossa, v. 2, n. 1, p. 19-28, 2004. Disponível em: https://agrocomputacao.deinfo.uepg.br/junho_2004/Arquivos/RBAC_Artigo_03.pdf. Acesso em: 15 de setembro de 2025.

GARCIA, L. C.; GOMES, R. S.; ROCHINSKI, L. V.; COSMO, G.; SOUZA, N. M.; GOMES, J. A.; RAETANO, C. G.; HUZZAR-NOVAKOWISKI, J. Spray nozzles for application of fungicides in common bean. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 6, p. 3659-3676, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv21n6-032>. Acesso em: 14 de agosto de 2025.

GARCIA, L.C.; CHRISTMANN, P. E. T. P.; GOMES, R. S.; COSMO, G.; GONÇALVES, D. R. P.; RAMOS, H. H. Effect of nozzles on disease control with spraying fungicides in soybean crops, **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 53, n. 5, p. 1616–1627, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01140671.2024.2392674>. Acesso em: 10 de julho de 2025.

GOGOLÁK, L.; SIMON, J.; PLETIKOSITY, Á.; FÜRSTNER, I. Quantitative assessment of UAV assisted particle spraying distribution in agriculture: An image analysis approach using water-sensitive papers. **International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems**, v. 15, n. 7, p. 553–562, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.32985/ijeces.15.7.1>. Acesso em: 18 de junho de 2025.

GRANT, S.; PERINE, J.; ABI-AKAR, F.; LANE, T.; KENT, B.; MOHLER, C.; SCOTT, C.; RITTER, A. A wind-tunnel assessment of parameters that may impact spray drift during UAV pesticide application. **Drones**, v. 6, n. 8, 204, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones6080204>. Acesso em: 19 de agosto de 2025.

GUO S.; LI J.; YAO W.; ZHAN Y.; LI Y.; SHI Y. Distribution characteristics on droplet deposition of wind field vortex formed by multirotor UAV. **Plos one**, 14(7), 1-16, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220024>. Acesso em: 10 de agosto de 2025.

HAFEEZ, A.; HUSAIN, M. A.; SINGH, S. P.; CHAUHAN, A.; KHAN, M.T.; KUMAR, N. C.; CHAUHAN, A.; SONI, S. K. Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review. **Information Processing in Agriculture**, v. 10, n. 2, p. 192-203, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.02.002>. Acesso em: 12 de agosto de 2025.

HOFFMANN, W. C.; HEWITT, A. J. Comparison of three imaging systems for water-sensitive papers. **Applied engineering in agriculture**, v. 21, n. 6, p. 961-964, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.20026>. Acesso em: 17 de setembro de 2025.

HUANG, Z.; WANG, C.; WONGSUK, S.; QI, P.; LIU, L.; QIAO, B.; Zhong, L.; HE, X. Field evaluation of a six-rotor unmanned agricultural aerial sprayer: effects of application parameters on spray deposition and control efficacy against rice planthopper. **Pest Management Science**, p. 79, n. 11, p. 4664-4678, 2023a. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ps.7666>. Acesso em: 14 de agosto de 2025.

HUANG, Z.; WANG, C.; LI, Y.; ZHANG, H.; ZENG, A.; HE, X. Field evaluation of spray drift and nontargeted soybean injury from unmanned aerial spraying system herbicide

application under acceptable operation conditions. **Pest Management Science**, p. 79, n. 3, p. 1140-1153, 2023b. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ps.7285>. Acesso em: 14 de junho de 2025.

KNOCHE, M. Effect of droplet size and carrier volume on performance of foliage-applied herbicides. **Crop Protection**, v. 13, n. 13, p. 163-178, 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(94\)90075-2](https://doi.org/10.1016/0261-2194(94)90075-2). Acesso em: 16 de agosto de 2025.

KUMAR, J. S. J.; YUVARAJ, S.; GOTHAVARI, V.; ANANTHARAJ, R. Automatic pesticide spraying drone., **Electronics and Computer Science**, v. 1, p. 1-5, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SCECS64059.2025.10940194>. Acesso em: 08 de agosto de 2025.

LI, X.; GILES, D. K.; ANDALORO, J. T.; LONG, R.; LANG, E. B.; WATSON, L. J.; QANDAH, I. Comparison of UAV and fixed-wing aerial application for alfalfa insect pest control: evaluating efficacy, residues, and spray quality. **Pest Management Science**, v. 77, n. 11, p. 4980-4992, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ps.6540>. Acesso em: 18 de junho de 2025.

LIU, M.; CHEN, X.; JIAO, Y. Sustainable agriculture: theories, methods, practices and policies. **Agriculture**, v. 14, n. 3, p. 473, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14030473>. Acesso em: 14 de julho de 2025.

LIU, Y. H.; JIN, W. D.; GUO, S. A.; YAO, W. X.; YU, F. H.; CHEN, C. L. Droplet deposition distribution characteristics of variable spraying by plant protection drones for weed control in paddy fields. **Journal of Shenyang Agricultural University**, v. 53, n. 3, p. 337-345, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1700.2022.03.010>. Acesso em: 25 de agosto de 2025.

LIU, Q.; SHAN, C.; ZHANG, H.; SONG, C.; LAN, Y. Evaluation of liquid atomization and spray drift reduction of hydraulic nozzles with four spray adjuvant solutions. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 236, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020236>. Acesso em: 26 de junho de 2025.

MADUREIRA, R. P.; RAETANO, C. G.; CAVALIERI, J. D. Interaction spray nozzle-adjuvant to estimate potential risk of spray drift. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 180-185, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p180-185>. Acesso em: 14 de agosto de 2025.

MARCHI, G.; MARCHI, E. C. S.; GUIMARÃES, T. G. **Herbicidas: mecanismos de ação e uso**. Planaltina: Embrapa, 2008, 34p.

MARTIN, D. E.; LATHEEF, M. A. Payload capacities of remotely piloted aerial application systems affect spray pattern and effective swath. **Drones**, v. 6, n. 8, p. 205, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones6080205>. Acesso em: 14 de agosto de 2025.

MATTHEWS, G. A. **A history of pesticides**. Boston: CABI, 2018. 288p

MATTHEWS, G. A. **Pesticide application methods**. 3.ed. Oxford: Blackwell Science. 2000. 432p.

MATTHEWS, G. A. The need to use different ways of applying pesticides. **Outlooks on Pest Management**, v. 34, n. 5, p. 184-187, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1564/v34_oct_01 . Acesso em: 24 de julho de 2025.

MATTHEWS, G. A.; THORNHILL, E. W. **Pesticide application equipment for use in agriculture**. New Delhi: United Book Prints, 2019. 165p.

MATUO, T. **Técnicas de aplicação de defensivos agrícolas**. Jaboticabal: FUNEP, 1990. 139p.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. São Paulo: UNESP, 2010. 569p. Disponível em: <https://codeagro.agricultura.sp.gov.br/uploads/capacitacao/historia-das-agriculturas-no-mundo-mazoyer-e-roudart.pdf>. Acesso em: 24 de julho de 2025.

MELO, A. A.; MARTINI, A. T.; DALAZEN, G.; GARCIA, L. C.; BOLLER, W. Uso de drones para pulverização na agricultura. informações agrônômicas. **Proteção de plantas**, v. 5, p. 5-17, 2024. Disponível em: <https://www.npct.com.br/publication/IAPSite.nsf/pub/available/IAP-2024-5?OpenDocument&toc=2024>. Acesso em: 24 de julho de 2025.

MOURA, M. E. B. G. **Parâmetros da pulverização na faixa de distribuição com VANT utilizando diferentes tamanhos de gotas**. 2025. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Área de Concentração: Fitotecnia e Fitossanidade), Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2025.

NATH, C. P.; SINGH, R. G.; CHOUDHARY, V. K.; DATTA, D.; NANDAN, R.; SINGH, S. S. Challenges and alternatives of herbicide-based weed management. **Agronomy**, v. 14, n. 1, 126, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14010126>. Acesso em: 25 de julho de 2025.

OFOSU, R.; AGYEMANG, E. D.; MÁRTON, A.; PÁSZTOR, G.; TALLER, J.; KAZINCZI, G. Herbicide resistance: managing weeds in a changing world. **Agronomy**, v. 13, n. 6, 1595. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13061595>. Acesso em: 26 de julho de 2025.

PARK, S.; PARK, K. Principles and droplet size distributions of various spraying methods: A review. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 36, n. 8, p. 4033-4041, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0724-3>. Acesso em: 24 de julho de 2025.

PEREIRA, B. C. S.; BRAZ, G. B. P.; DE FREITAS SOUZA, M.; REGINALDO, L. T. R. T.; FERREIRA, C. J. B. Performance of glyphosate-based products applied alone and in combination with herbicides in burndown. **Revista Caatinga**, 36(4), 765-774, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n404rc>. Acesso em: 14 de julho de 2025.

PERINE, J.; ANDERSON, J. C.; KRUGER, G. R.; ABI-AKAR, F.; OVERMYER, J. Effect of nozzle selection on deposition of thiamethoxam in Actara™ spray drift and implications for off-field risk assessment. **Science of the Total Environment**, v. 772, 144808, 2021.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144808>. Acesso em: 04 de setembro de 2025.

POSSAMAI, E. J.; CONCEIÇÃO, P. C.; AMADORI, C.; BARTZ, M. L. C.; RALISCH, R., VICENSI, M.; MARX, E. F. Adoption of the no-tillage system in Paraná State: A (re)view. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, n. e0210104, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210104>. Acesso em: 20 de julho de 2025.

RAMOS, H. H. Interação do produto e alvo na pulverização. **Visão Agrícola**, v. 1, n. 2, p. 112–116, 2005.

RU, Y.; FANG, S.; XUE, J.; HU, C.; ZHOU, J. Experimental study of the influence factors of the droplet size of rotary nozzles during manned helicopter spraying operations. **Crop Protection**, v. 177, n. 106550, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106550>. Acesso em: 18 de julho de 2025.

SALEEM, A.; ANWAR, S.; NAWAZ, T.; FAHAD, S.; SAUD, S.; UR RAHMAN, T.; KHAN, M. N. R.; NAWAZ, T. Securing a sustainable future: the climate change threat to agriculture, food security, and sustainable development goals. **Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences**, v. 11, p. 595–611, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43994-024-00177-3>. Acesso em: 14 de junho de 2025.

SARGHINI, F., VISACKI, V., SEDLAR, A., CRIMALDI, M., CRISTIANO, V., VIVO, A.D. First measurements of spray deposition obtained from UAV spray application technique. **International Metrology for Agriculture and Forestry** p 58–61, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor.2019.8909233>. Acesso em: 24 de maio de 2025.

SCHAMPHELEIRE, M.; NUYTENS, D.; BAETENS, K.; CORNELIS, W.; GABRIELS, D.; SPANOGHE, P. Effects on pesticide spray drift of the physicochemical properties of the spray liquid. **Precision Agriculture**, v. 10, p. 409–420, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9089-6>. Acesso em: 29 de julho de 2025.

SCHNEIDER, T.; MICHELON, F.; BORTOLOTO, R. P.; CAMERA, J. N.; MACHADO, J. M.; KOEFENDER, J. Horseweed chemical control in pre-plant burndown in soybean. **Weed Control Journal**, 21, e202200766, 2022. <https://doi.org/10.7824/wcj.2022;21:00766>. Acesso em: 08 de abril de 2025.

SILVA, M. A.; NASCENTE, A. S.; LANNA, A. C.; REZENDE, C. C.; CRUZ, D. R. C.; FRASCA, L. L. M.; FERREIRA, A. L.; FERREIRA, I. V. L.; DUARTE, J. R. M.; FILIPPI, M. C. C. Sistema de plantio direto e rotação de culturas no Cerrado. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e376111335568, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35568>. Acesso em: 24 de abril de 2025.

SILVA, A. R.; LEITE, M. T.; FERREIRA, M. C.; TAMBELLINI, M. V. Characterization of droplet diameter of household insecticide aerosols. **Arquivos do Instituto Biológico**, 76, 437–442. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1808-1657v76p4372009>. Acesso em: 24 de abril de 2025.

SILVEIRA, D. C.; FONTANELI, R. S.; FONTANELI, R. S.; REBESQUINI, R.; DALL'AGNOL, E.; PANISSON, F. T.; BOMBONATTO, M. C. P.; CEOLIN, M. E. Plantas

de cobertura de solo de inverno em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Revista Plantio Direto & Tecnologia Agrícola**, v. 29, n. 173, p. 18-23, 2020. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1121117>. Acesso em: 23 de julho de 2025.

SINHA, R.; JOHNSON, J.; POWER, K.; MOODIE, A.; WARHURST, E.; BARBOSA, R. Understanding spray attributes of commercial UAAS as impacted by operational and design parameters. **Drones**, v. 6, n. 10, p. 01-20, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones6100281>. Acesso em: 11 de julho de 2025.

SOUZA, R. T.; CASTRO R. D.; PALLADINI, L. A. Depósito de pulverização com diferentes padrões de gotas em aplicações na cultura do algodoeiro. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, p.75-82. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000200011>. Acesso em: 22 de maio de 2025.

SOUZA, F. G.; PORTES, M. F.; SILVA, M. V.; TEIXEIRA, M. M.; FURTADO, M. R. Impact of sprayer drone flight height on droplet spectrum in mountainous coffee plantation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 12, p. 901-906, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n12p901-906>. Acesso em: 12 de abril de 2025.

SUBRAMANIAN, K. S.; PAZHANIVELAN, S.; SRINIVASAN, G.; SANTHI, R.; SATHIAH, N. Drones in insect pest management. **Frontiers in Agronomy**, v. 03, 640885, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.640885>. Acesso em: 15 de abril de 2025.

WANG G, HAN Y, LI X, ANDALORO J, CHEN P, HOFFMANN WC, HAN X, CHEN S, LAN Y. Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer. **Science of The Total Environment**, v. 737, 139793, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139793>. Acesso em: 07 de julho de 2025.

WANG, P.; HANIF, A. S.; YU, S. H.; LEE, C. G.; KANG, Y. H.; LEE, D. H.; HAN, X. Development of an autonomous drone spraying control system based on the coefficient of variation of spray distribution. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 227, p. 109529, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109529>. Acesso em: 07 de julho de 2025.

WANG, J.; SONG, Z.; CHEN, R.; YANG, T.; TIAN, Z. Experimental study on droplet characteristics of rotating sprinklers with circular nozzles and diffuser. **Agriculture**, v. 12, n. 7, p. 987, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture12070987>. Acesso em: 16 de maio de 2025.

WEN, S.; ZHANG, Q.; YIN, X.; LAN, Y.; ZHANG, J.; GE, Y. Design of plant protection UAV variable spray system based on neural networks. **Sensors**, v. 19, n. 5, p. 1112, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s19051112>. Acesso em: 16 de maio de 2025.

WONGSUK, S.; QI, P.; WANG, C.; ZENG, A.; SUN, F.; YU, F.; et al. Spray performance and control efficacy against pests in paddy rice by UAV-based pesticide application: effects of atomization, UAV configuration and flight velocity. *Pest Management Science*, v. 80, n. 4,

p. 2072–2084, 2024. DOI: Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ps.7942>. Acesso em: 20 de julho de 2025.

WU, C. L.; YANG, C. K.; LIN, J. Y. Water-sensitive paper detection and spray analysis. **Multimed Tools Appl**, v. 84, p. 38797–38851, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11042-025-20697-2>. Acesso em: 20 de julho de 2025.

YU, S. H.; KIM, Y. K.; JUN, H. J.; CHOI, I. S.; WOO, J. K.; KIM, Y. H.; YUN, Y. T.; CHOI, Y.; ALIDOOST, R.; LEE, J. Evaluation of spray characteristics of pesticide injection system in agricultural drones. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 45, n. 4, p. 272-280, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42853-020-00067-6>. Acesso em: 18 de agosto de 2025.

ZHANG, P.; ZHANG, W.; SUN, H.; HE, F.; FU, H.; QI, L.; YU, L.; JIN, L.; ZHANG, B.; LIU, J. Effects of spray parameters on the effective spray width of single-rotor drone in sugarcane plant protection. **Sugar Tech**, v. 23, p. 308–315, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00890-3>. Acesso em: 18 de agosto de 2025.