

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FELIPE SOUZA DIAS

**EFEITOS DE ADJUVANTES NA FORMAÇÃO DE DIFERENTES TAMANHOS DE
GOTAS**

**MONTE CARMELO
2025**

FELIPE SOUZA DIAS

EFEITOS DE ADJUVANTES NA FORMAÇÃO DE DIFERENTES TAMANHOS DE GOTA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Monte Carmelo, como requisito necessário para a obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Cleyton Batista de Alvarenga

Monte Carmelo
2025

FELIPE SOUZA DIAS

EFEITOS DE ADJUVANTES NA FORMAÇÃO DE DIFERENTES TAMANHOS DE GOTAS

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, como requisito necessário para a obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Monte Carmelo, 18 de dezembro de 2025

Banca Examinadora

Cleyton Batista de Alvarenga
Orientador

Renan Zampiroli
Membro da Banca

Odair José Marques
Membro da Banca

Monte Carmelo
2025

SUMÁRIO

RESUMO	4
1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVOS	6
3 REFERENCIAL TEÓRICO	6
4 MATERIAL E MÉTODOS	7
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
6 CONCLUSÃO	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

RESUMO

A otimização do espectro de gotas via uso de adjuvantes é determinante para a redução da deriva e melhoria da cobertura em pulverizações agrícolas. Este trabalho objetivou analisar o efeito de três classes de adjuvantes em cinco doses na formação do espectro de gotas utilizando pontas com indução de ar. O experimento foi conduzido em condições controladas (Câmara TE9000), utilizando analisador de partículas a laser em tempo real. O delineamento foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3x5+1 (três adjuvantes x cinco doses + testemunha água), com quatro repetições. Os adjuvantes avaliados foram: óleo mineral, fosfatidilcolina com ácido propiônico (Lecitina) e terpenos/polifenóis, nas doses de 100, 200, 300, 400 e 500 mL 100 L⁻¹, pulverizados através da ponta AI 100-02 a 280 kPa. Foram avaliados o Diâmetro da Mediana Volumétrica (DVM), Amplitude Relativa (Span), percentual de gotas <100 e 200 µm (potencial de deriva) e velocidade das gotas. A adição de adjuvantes alterou significativamente a física da pulverização em relação à água pura. O adjuvante à base de fosfatidilcolina (Lecitina) proporcionou a maior uniformidade de gotas, reduzindo o Span para valores entre 0,90 e 0,97, significativamente inferiores à testemunha (1,39) e ao óleo mineral. O óleo mineral promoveu gotas de maior diâmetro (DVM de 451 µm), porém com menor uniformidade. Conclui-se que o adjuvante à base de fosfatidilcolina é a ferramenta mais eficiente para homogeneização do espectro de gotas em pontas de indução de ar, mitigando a variabilidade da aplicação sem comprometer o potencial de redução de deriva.

PALAVRAS-CHAVE: Tecnologia de aplicação; Deriva; Amplitude relativa; Pontas com indução de ar.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários desempenha um papel central na sustentabilidade e na rentabilidade da agricultura moderna. A pulverização é uma das práticas mais recorrentes no manejo agrônômico, sendo determinante para o controle eficiente de insetos-praga, doenças e plantas daninhas. No entanto, a agricultura brasileira ainda enfrenta desafios quanto ao uso racional desses insumos, muitas vezes devido à calibração inadequada dos equipamentos e à seleção incorreta dos parâmetros de aplicação, o que resulta em desperdício financeiro e riscos ambientais.

A qualidade da deposição dos produtos fitossanitários sobre o alvo biológico é dependente de uma interação complexa de variáveis, tais como: pressão de trabalho, vazão, ângulo de descarga das pontas, propriedades físico-químicas da calda (como viscosidade e tensão superficial) e condições meteorológicas no momento da aplicação. A negligência no monitoramento desses fatores compromete a eficácia do controle e potencializa perdas, sendo a deriva, o movimento das gotas para fora da área alvo, um dos problemas mais críticos da pulverização agrícola.

A deriva não apenas reduz a dose efetiva que atinge o alvo, mas também pode ocasionar fitotoxidez em culturas vizinhas sensíveis, gerar conflitos entre propriedades e promover a contaminação de recursos hídricos e do solo. Nesse contexto, a redução da deriva e a otimização do volume de calda aplicado consolidam-se como estratégias essenciais para a viabilidade técnica e ambiental do manejo fitossanitário.

Para mitigar esses riscos, o estudo do comportamento de diferentes adjuvantes e sua influência na formação do espectro de gotas é fundamental. O entendimento de como essas substâncias alteram a física da pulverização permite o desenvolvimento de técnicas que maximizem a cobertura do alvo e minimizem as perdas, atendendo às exigências de uma agricultura de baixo impacto ambiental.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo analisar o efeito de diferentes classes de adjuvantes (óleo mineral, fosfatidilcolina e terpenos) e suas respectivas doses na dinâmica de formação do espectro de gotas, visando identificar estratégias para a homogeneização da pulverização e redução do potencial de deriva.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A eficiência da pulverização reside no equilíbrio entre cobertura e redução de perdas. O impacto visual ou econômico que herbicidas causam em culturas vizinhas e a preocupação pública com a contaminação ambiental são amplamente relatados na literatura como consequências da deriva (CHAIM, 1999). Tecnicamente, o emprego de gotas menores tem demonstrado resultados mais satisfatórios de controle fitossanitário devido à maior densidade de gotas por área. Contudo, em razão de suas pequenas massas, gotículas finas possuem baixa energia cinética, tornando-se mais suscetíveis ao carregamento pelo vento e dificultando o acerto no alvo (CHAIM, 1999).

Em regra, gotas finas proporcionam excelente uniformidade de distribuição e cobertura superficial, mas apresentam alto risco de evaporação em condições de baixa umidade relativa e deriva por correntes de ar (CUNHA; TEIXEIRA; FERNANDES, 2007). Especificamente, gotas com diâmetro inferior a 100 μm são consideradas as mais vulneráveis aos fenômenos meteorológicos e ao transporte pelo vento (CUNHA; TEIXEIRA; FERNANDES, 2007). No estudo de espectro de gotas, esse risco é quantificado pelo parâmetro %VGD<100 μm , que indica a porcentagem do volume pulverizado contido em gotas com diâmetro menor que 100 micrômetros (THEBALDI et al., 2009).

Por outro lado, aumentar o tamanho da gota é uma estratégia para otimizar a eficiência sob condições meteorológicas adversas. Entretanto, o uso de gotas excessivamente grossas pode ser prejudicial, pois, devido à maior massa, essas gotas tendem a não aderir à superfície foliar, resultando em escorrimento para o solo e falhas na cobertura, mesmo com volumes de calda

elevados (SOUZA; CASTRO; PALLADINI, 2007). Portanto, a finalidade da tecnologia de aplicação é depositar a quantidade correta de ingrediente ativo no alvo, de modo econômico e com mínima interferência no ambiente (CUNHA; TEIXEIRA; FERNANDES, 2007).

A adição de adjuvantes à calda de pulverização é uma ferramenta decisiva para modular o espectro de gotas. Essas substâncias modificam as características físico-químicas da solução, sobretudo a viscosidade e a tensão superficial, interferindo diretamente no processo de formação da gota na saída do orifício da ponta (BUENO; CUNHA; ROMAN, 2013). O objetivo do uso de adjuvantes é potencializar a penetração, a aderência e o espalhamento da calda sobre o alvo.

Ressalta-se que a eficiência das aplicações está intrinsecamente ligada à escolha correta do equipamento. Apenas quando se dispõe de pontas de pulverização que promovem distribuição transversal homogênea e espectro de gotas adequado é executável uma correta aplicação de produtos fitossanitários (BUENO; CUNHA; ROMAN, 2013).

A determinação precisa do tamanho de gotas é essencial para o ajuste técnico da pulverização. Atualmente, o uso de analisadores em tempo real baseados na difração de raios laser ou imagens constitui algumas das metodologias mais avançadas para essa finalidade (MIYAGAWA; SOUSA, 2021). O princípio baseia-se na difração sofrida por um feixe de laser ao atravessar as partículas de pulverização na região de amostragem ou em um conjunto de imagens das gotas que são processadas para determinação do seu tamanho.

Para a interpretação dos dados gerados por esses equipamentos, utilizam-se parâmetros estatísticos como o $Dv_{0,1}$, $Dv_{0,5}$ e $Dv_{0,9}$. Estes índices representam o diâmetro da gota tal que 10%, 50% e 90% do volume pulverizado, respectivamente, esteja contido em gotas de tamanho igual ou menor a esse valor (CREECH et al., 2024). A análise conjunta desses parâmetros permite caracterizar a uniformidade do espectro e prever o comportamento da calda em campo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em condições controladas no Centro de Excelência em Mecanização Agrícola (CEMA), pertencente à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Monte Carmelo.

O delineamento experimental utilizado foi o Inteiramente Casualizado (DIC), arranjado em esquema fatorial $3 \times 5 + 1$, constituído por três classes de adjuvantes e cinco doses, acrescido de um tratamento adicional (testemunha composta apenas por água). O experimento totalizou 16 tratamentos com 4 repetições cada.

Os tratamentos consistiram na adição de três adjuvantes comerciais com diferentes composições químicas à calda de pulverização:

1. Adjuvante 1: Óleo mineral (Spread Oil);
2. Adjuvante 2: Formulação composta por fosfatidilcolina, ácido propiônico e álcool etoxilado (LI 700);
3. Adjuvante 3: Composto à base de terpenos e polifenóis.

Cada adjuvante foi avaliado nas doses de 100, 200, 300, 400 e 500 mL para cada 100 L de calda (0,1% a 0,5% v/v). Para a realização das repetições, foram preparados 19 litros de calda para cada tratamento. A mistura foi realizada garantindo a completa homogeneização dos produtos antes da aplicação. Entre as trocas de tratamentos, o sistema de pulverização foi submetido a um período de limpeza com água limpa e, posteriormente, a um tempo de estabilização com a nova calda para eliminar resíduos da dosagem anterior.

A análise do espectro de gotas foi realizada dentro de uma câmara de pulverização modelo TE-9000 (Tecnal Equipamentos Científicos, Piracicaba, SP), onde foi colocado um analisador de partículas em tempo real modelo P-15 (Oxford Lasers), que utiliza imagens das gotas para determinar se tamanho.

Para a geração das gotas, utilizou-se uma ponta de pulverização de jato plano com indução de ar, modelo AI 100-02 (TeeJet Technologies), equipada com filtro de malha 50 (*mesh*). A pressão de trabalho foi fixada em 280 kPa, monitorada por manômetro de precisão instalado na barra de pulverização. A distância vertical entre o orifício da ponta e o feixe óptico do laser foi padronizada em 35 cm.

As condições meteorológicas foram controladas para minimizar a interferência de fatores externos, utilizando-se um sistema de climatização e umidificação (Ventisol Clin 125), mantendo a estabilidade necessária para a leitura do laser.

O espectro de gotas foi caracterizado pelos seguintes parâmetros volumétricos:

- $Dv_{0,1}$, $Dv_{0,5}$ (DVM) e $Dv_{0,9}$: Diâmetros de gota tais que 10%, 50% e 90% do volume do líquido pulverizado, respectivamente, são constituídos por gotas de diâmetro menor que o valor indicado.
- Span (Amplitude Relativa): Índice que indica a uniformidade do espectro de gotas, calculado pela equação: $Span = (Dv_{0,9} - Dv_{0,1}) / Dv_{0,5}$. Quanto menor o valor, mais homogêneo é o tamanho das gotas.
- Porcentagem de gotas finas $v_{100} < 100 \mu m$ e $v_{200} < 200 \mu m$: Volume da calda constituído por gotas com diâmetro inferior a 100 e 200 micrômetros, respectivamente, indicativo do potencial de risco de deriva.
- Velocidade das gotas: Mensurada no momento da passagem pelo feixe do laser.

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e homocedasticidade de Levene (Bartlett). Para as variáveis que não atenderam aos pressupostos da análise de variância, procedeu-se à transformação dos dados (logarítmica ou raiz quadrada).

Após a verificação dos pressupostos, os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA). As médias dos tratamentos (fatorial) foram comparadas pelo teste de Tukey, e a comparação com a testemunha (adicional) foi realizada pelo teste de Dunnett. Todas as análises consideraram o nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$) e foram processadas no software estatístico R, versão 4.3.2 (R Core Team, 2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de variância demonstrou que a adição de adjuvantes alterou significativamente a física da pulverização. O fator adjuvante influenciou todas as variáveis de diâmetro ($Dv_{0,1}$, $Dv_{0,5}$, $Dv_{0,9}$), uniformidade (Span) e velocidade ($p < 0,05$). Já o fator dose isolado mostrou-se pouco determinante para o tamanho das gotas, sendo significativo apenas para a velocidade. A interação entre adjuvante e dose foi significativa para o Span e velocidade, indicando que, para estes parâmetros, o comportamento do produto depende da concentração utilizada (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo da análise de variância para as variáveis físicas da calda de pulverização submetidas a diferentes adjuvantes e doses.

FV	Dv0,1	Dv0,5	Dv0,9	Span	Vel	v100	v200
Adjuvante (A)	0,04*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,04*	0,49 ^{ns}
Dose (D)	0,89 ^{ns}	0,73 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,77 ^{ns}	0,04*	0,85 ^{ns}	0,71 ^{ns}
A x D	0,23 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,03*	0,00*	0,44 ^{ns}	0,52 ^{ns}
Adicional x fatorial	0,00*	0,02*	0,00*	0,00*	0,00*	1,54*	0,04*
ρ Shapiro-Wilk	0,39	0,22	0,12	0,59	0,01	0,29	0,45
ρ Bartlett	0,75	0,25	0,68	0,82	0,95	0,97	0,99
CV (%)	8,55	6,18	5,32	4,21	2,93	13,59	10,12

*Significativa pelo teste F ($\alpha \leq 0,05$), ^{ns}Não significativo.

Um dado de grande relevância agrônômica observado é a não significância do fator isolado dose para os parâmetros de diâmetro (Dv0,1, Dv0,5, Dv0,9) e potencial de deriva (v100, v200). Esse resultado sugere uma estabilidade físico-química dos adjuvantes testados, dentro do intervalo de 100 a 500 mL 100 L⁻¹, o efeito na formação da gota já se estabelece nas menores doses, não havendo ganho ou alteração proporcional no tamanho da gota com o aumento da concentração. Para o produtor rural, isso indica que a dose mínima recomendada já é suficiente para entregar o benefício físico de alteração do espectro, permitindo economia de insumos.

A precisão experimental foi alta, evidenciada pelos baixos Coeficientes de Variação (CV%), que variaram de 2,93% (velocidade) a 8,55% (Dv0,1), demonstrando a confiabilidade das leituras obtidas pelo analisador a laser em ambiente controlado. O contraste adicional x fatorial foi significativo para todas as variáveis, reforçando que a adição de qualquer um dos adjuvantes testados altera drasticamente a física da pulverização em comparação à água pura (testemunha). Já a interação adjuvante x dose foi significativa apenas para o Span e a velocidade, indicando que, embora o tamanho da gota (Dv0,5) seja estável nas diferentes doses, a uniformidade (Span) e a cinética (velocidade) podem ser refinadas através do ajuste da dosagem.

A análise do desdobramento da interação para a variável Span evidenciou que os adjuvantes desempenham papel crucial na homogeneização das gotas. Os adjuvantes 2 e 3, nas doses de 100 a 500 mL 100 L⁻¹, não diferiram estatisticamente entre si, proporcionando um espectro de gotas mais homogêneo (menores valores de Span). O adjuvante 2 destacou-se pela estabilidade, com valores variando entre 0,90 e 0,97. Já o Adjuvante 1 apresentou comportamento distinto, com valores de Span superiores aos demais adjuvantes em diversas doses. Na dose de 100 mL, por exemplo, o Adjuvante 1 apresentou valor de 1,11, sendo estatisticamente superior ao adjuvante 2. Na dose de 400 mL, essa diferença se manteve, com o adjuvante 1 apresentando média superior à

do Adjuvante 2. A testemunha (água) apresentou o maior valor de Span, diferindo significativamente de todos os tratamentos com adjuvantes, o que indica uma pulverização com alta variabilidade de tamanhos de gotas (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios da Amplitude Relativa (Span) do espectro de gotas em função da interação entre adjuvantes e doses.

Adjuvante	Dose (mL 100 L ⁻¹)				
	100	200	300	400	500
Adjuvante 1	1,11B β	1,08B β	1,09B β	1,04B β	1,02B β
Adjuvante 2	0,91A β	0,94A β	0,90A β	0,96A β	0,97A β
Adjuvante 3	0,99A β	0,98A β	0,96A β	0,98AB β	0,99A β
Água	1,39 α				

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados demonstram que a adição de adjuvantes à calda de pulverização interfere diretamente no espectro de gotas, melhorando a uniformidade da aplicação. A redução significativa do Span observada com o uso dos adjuvantes em relação à água confirma que essas substâncias modificam as características físico-químicas da calda, sobretudo viscosidade e tensão superficial, interferindo no processo de formação da gota (BUENO; CUNHA; ROMAN, 2013).

A superioridade dos Adjuvantes 2 e 3 na redução do Span sugere que suas formulações são mais eficientes em estabilizar a quebra do jato na ponta de pulverização. Deseja-se potencializar a penetração, a aderência e o espalhamento da calda aplicando estes produtos (BUENO; CUNHA; ROMAN, 2013), e a obtenção de um espectro homogêneo é o primeiro passo para atingir esse objetivo, evitando tanto a deriva de gotas finas quanto o escorrimento de gotas excessivamente grossas.

A análise de regressão polinomial foi realizada para verificar o comportamento das doses dentro de cada adjuvante. Observou-se que apenas o adjuvante 1 (Óleo Mineral) apresentou ajuste significativo de modelo para a variável Span. Os adjuvantes 2 e 3 não apresentaram ajuste de regressão significativo, indicando que seu efeito na uniformidade é estável e independente da dose testada (Figura 1).

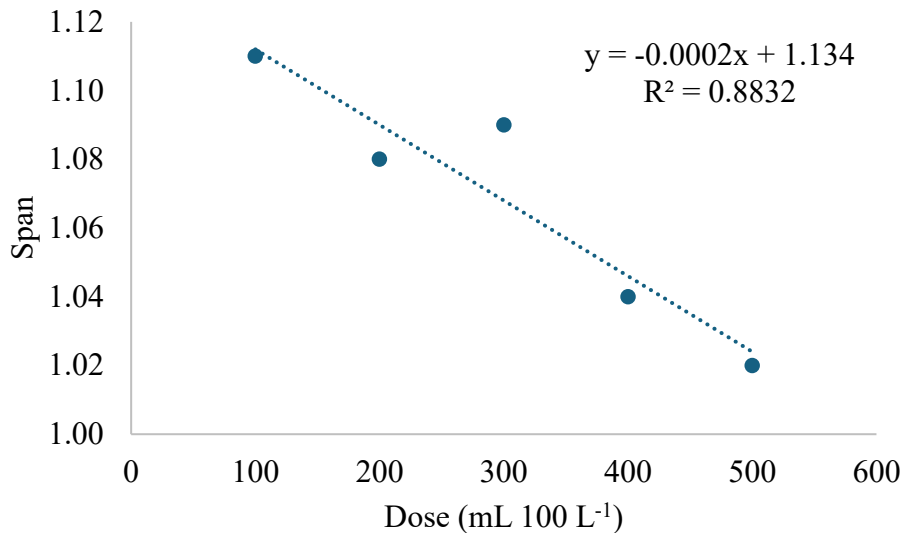


Figura 1. Análise de regressão para a Amplitude Relativa do espectro de gotas em função das doses do Adjuvante 1 (Óleo Mineral).

A análise da curva de regressão do adjuvante 1 revela uma tendência de redução dos valores de Span com o incremento da dose. Nota-se que, nas doses iniciais (100 mL), o Span é mais elevado, indicando maior heterogeneidade. À medida que a concentração do óleo aumenta para 400 e 500 mL 100 L⁻¹, observa-se uma melhoria na uniformidade do espectro.

Esse comportamento sugere que, para adjuvantes à base de óleo mineral, a concentração é um fator limitante para a estabilização da emulsão e da formação da gota. Em baixas doses, a quantidade de óleo pode não ser suficiente para alterar a tensão superficial dinâmica e a viscosidade de todo o volume de calda na velocidade exigida pela ponta de indução de ar, resultando em quebra irregular do jato. Com o aumento da dose, as propriedades físicas da calda se estabilizam, permitindo a formação de gotas mais uniformes.

Portanto, para o adjuvante 1, recomenda-se o uso de doses superiores (400-500 mL) se o objetivo for maximizar a uniformidade (menor Span), aproximando-se do desempenho obtido pelos adjuvantes 2 e 3.

A análise dos parâmetros volumétricos (Dv0,1, Dv0,5, Dv0,9) e das frações de gotas finas (v100, v200) revelou que a natureza química do adjuvante altera a estrutura do espectro de gotas, independentemente da dose utilizada. O adjuvante 1 promoveu um aumento generalizado no diâmetro das gotas. Para o parâmetro Dv0,1, este adjuvante proporcionou o maior valor absoluto, diferindo significativamente do adjuvante 3 e da testemunha. Em relação ao Diâmetro da Mediana Volumétrica (Dv0,5), o Adjuvante 1 e a Água apresentaram médias estatisticamente iguais,

superiores aos demais tratamentos. Já para o segmento de gotas grossas (Dv0,9), a água apresentou o maior valor, seguida pelo adjuvante 1, ambos diferindo dos adjuvantes 2 e 3. Quanto ao potencial de deriva, representado pelo percentual de volume em gotas menores que 100 μm (v100), o adjuvante 1 mostrou-se o mais eficiente na redução dessa fração, registrando valor significativamente inferior ao do adjuvante 3 e inferior à água. Para o parâmetro v200, a testemunha apresentou o maior volume de gotas finas, diferindo significativamente dos demais adjuvantes, que apresentaram menor fração nesta categoria (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios dos diâmetros volumétricos de gotas e porcentagem de gotas finas da calda de pulverização em função dos diferentes classes de adjuvantes.

Adjuvante	Dv0,1	Dv0,5	Dv0,9	v100	v200
Adjuvante 1	203a β	451a α	684a β	1,38a β	3,63a β
Adjuvante 2	194ab β	403b β	569b β	1,43ab β	3,56a β
Adjuvante 3	190b β	408b β	588b β	1,54ba	3,70a β
Água	154 α	454 α	786 α	1,54 α	4,03 α

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si, pelo teste Tukey ($\alpha \leq 0,05$) e, gregas com o adicional pelo teste Dunnet ($\alpha \leq 0,05$).

A interpretação conjunta dos parâmetros Dv0,1, Dv0,5 e Dv0,9 permite compreender a qualidade da pulverização para além da média. Segundo Creech et al. (2024), esses parâmetros representam o tamanho da gota de maneira que 10%, 50% e 90% do volume pulverizado esteja inserido em gotas de valores iguais ou menores.

Embora a água e o adjuvante 1 tenham apresentado valores de Dv0,5 estatisticamente semelhantes ($\sim 450 \mu\text{m}$), a estrutura de seus espectros é distinta. A água apresentou o maior Dv0,9 e um v100 elevado, caracterizando um espectro heterogêneo com presença simultânea de gotas passíveis de escorrimento e de deriva. Já o adjuvante 1, ao aumentar a viscosidade da calda, eliminou os extremos, reduziu o Dv0,9 em relação à água (evitando gotas gigantes) e aumentou o Dv0,1 (reduzindo gotas muito finas).

O resultado de v100 é crítico para a segurança ambiental. No estudo de espectro de gotas, a porcentagem do volume com diâmetro menor que 100 μm é o indicador onde estão inseridas as gotas mais susceptíveis à deriva (THEBALDI et al., 2009). A capacidade do adjuvante 1 em reduzir essa fração demonstra seu potencial como ferramenta antideriva, protegendo a aplicação contra a

ação de ventos e fenômenos meteorológicos, conforme alertado por Cunha, Teixeira e Fernandes (2007).

Por outro lado, os adjuvantes 2 e 3 produziram gotas com $Dv_{0,5}$ menor, mas com menor v_{200} que a água. Isso sugere um espectro mais fino e uniforme, ideal para alvos que exigem maior cobertura. O desafio da tecnologia de aplicação é justamente encontrar esse equilíbrio, gotas não podem ser tão pequenas a ponto de derivar, nem tão grandes a ponto de não aderirem à superfície e escorrerem para o solo (CUNHA; TEIXEIRA; FERNANDES, 2007). Nesse sentido, o adjuvante 2 oferece uma alternativa interessante, reduz o risco de escorrimento (menor $Dv_{0,9}$ que a água) e reduz o risco de deriva (menor v_{200} que a água), otimizando a deposição.

A velocidade das gotas no momento do impacto é um parâmetro decisivo para a penetração no dossel e para a redução do tempo de exposição à deriva. A análise da interação entre adjuvantes e doses revelou que a adição de qualquer adjuvante incrementou significativamente a velocidade das gotas em comparação à água pura. O adjuvante 2 destacou-se por manter velocidades elevadas e estáveis. Na dose de 100 mL, por exemplo, proporcionou velocidade, superior ao adjuvante 1 e drasticamente superior à testemunha. Em doses intermediárias (300 mL), o adjuvante 2 manteve a superioridade sobre os demais. Já o adjuvante 1 apresentou um comportamento ascendente, atingindo sua maior velocidade apenas na dose máxima de 500 mL. A água apresentou a menor velocidade média do experimento, diferindo estatisticamente de todos os tratamentos com adjuvantes em todas as doses testadas (Tabela 4).

Tabela 4. Valores médios da velocidade das gotas pulverizadas através de ponta com indução de ar, em função de diferentes adjuvantes e doses.

Adjuvante	Dose (mL 100 L ⁻¹)				
	100	200	300	400	500
Adjuvante 1	3,75b β	3,88a β	3,89b β	3,96a α	4,21a β
Adjuvante 2	4,16a β	4,04a α	4,15a β	3,95a β	4,00b α
Adjuvante 3	3,99a α	3,90a β	3,88b β	4,07a α	4,02ab α
Água	3,06 α				

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e, gregas com o adicional pelo teste Dunnet ($p \leq 0,05$).

A diferença expressiva de velocidade entre a água e as caldas com adjuvantes pode ser explicada pelo princípio de funcionamento da ponta utilizada (AI 100-02). Pontas com indução de ar utilizam o efeito Venturi para inserir bolhas de ar no interior da gota. A água pura, possuindo menor viscosidade e alta tensão superficial, tende a formar gotas com maior inclusão de ar (menor densidade aparente) ou gotas que sofrem maior resistência aerodinâmica (arrasto) devido à sua instabilidade de forma durante a trajetória.

A adição de adjuvantes altera as propriedades reológicas do fluido, resultando em gotas com maior densidade ou estabilidade morfológica, o que lhes confere maior inércia. Gotas com maior energia cinética conseguem vencer a resistência do ar e as barreiras físicas das folhas superiores, atingindo alvos no interior do dossel com maior eficiência. Como ressaltado por Souza, Castro e Palladini (2007), gotas com pequena massa e pouca energia cinética têm dificuldade de acerto no alvo e são facilmente desviadas por correntes de ar. Portanto, o incremento de velocidade promovido pelos adjuvantes (cerca de 30% superior à água) é um fator positivo para a mitigação da deriva e melhoria da deposição.

A análise de regressão para a variável velocidade demonstrou comportamento significativo apenas para o adjuvante 1, demonstrando a resposta cinética das gotas em função do aumento da concentração deste adjuvante (Figura 2).

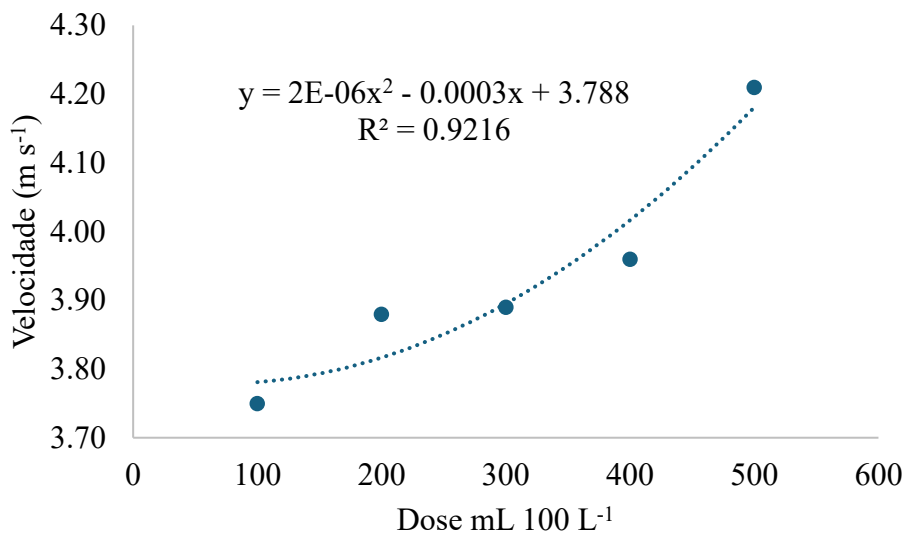


Figura 2. Análise de regressão para a velocidade das gotas (m s⁻¹) em função das doses do Adjuvante 1 (Óleo Mineral).

O gráfico evidencia uma correlação positiva entre a dose de óleo mineral e a velocidade da gota. O ajuste polinomial indica que, à medida que se aumenta a concentração de óleo de 100 para 500 mL, a velocidade sobe de 3,75 para 4,21 m s⁻¹.

Esse fenômeno reforça a hipótese da alteração de densidade e viscosidade. Em doses baixas, a emulsão de óleo pode não ser suficiente para alterar significativamente a massa específica da gota formada na ponta de indução de ar. Com o aumento da concentração, a calda torna-se mais viscosa e densa, gerando gotas com maior momentum (quantidade de movimento). Para o adjuvante 2, a ausência de significância na regressão (dados estáveis em patamar alto) sugere que ele atinge sua eficiência cinética máxima já nas menores doses, sendo uma opção mais versátil para o produtor que deseja flexibilidade de dosagem sem perda de performance.

6 CONCLUSÃO

A adição de adjuvantes altera significativamente a física da pulverização, sendo superior à água pura em todos os parâmetros de qualidade (uniformidade, redução de deriva e energia cinética).

O adjuvante à base de Fosfatidilcolina (adjuvante 2) é a estratégia mais eficiente para a homogeneização do espectro, proporcionando os menores valores de Amplitude Relativa (Span) e mantendo alta velocidade de gotas já nas menores doses (100 mL 100 L⁻¹), o que indica alta eficiência técnica e econômica.

O adjuvante à base de óleo mineral (adjuvante 1) é a ferramenta mais eficaz para a redução do potencial de deriva, apresentando os menores percentuais de gotas finas (v100), embora dependa de doses mais elevadas (400-500 mL 100 L⁻¹) para atingir uniformidade satisfatória.

A dose do adjuvante influencia a uniformidade e a velocidade das gotas, mas não altera significativamente o Diâmetro da Mediana Volumétrica (Dv0,5), demonstrando que a classe química do produto é mais determinante para o tamanho da gota do que a sua concentração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUENO M. R., CUNHA J. P. A. R, ROMAN R. A. A. Tamanho de gotas de pontas de pulverização em diferentes condições operacionais por meio da técnica de difração do raio laser. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 5, p. 976-985, 2013.

CHAIM. A, **História da pulverização**, Jaguariuna, Embrapa Meio Ambiente, 1999

CREECH *et al.*, Reduced adsorption of dicamba spray droplets on leaves as droplet size increases. **Weed Technology**. 38(e58) p.01-11, 2024.

CUNHA J. P. A. R, TEIXERA M. M., FERNANDES H. C., Avaliação do espectro de gotas de pontas de pulverização hidráulicas utilizando a técnica da difração do raio laser, **Engenharia Agrícola**, v.27, p.10-15, 2007.

MIYAGAWA E. M. S, SOUSA L. L. F, Pontas de pulverização e adjuvante no espectro de gotas de pulverização na Cultura da pitaya (*Hylocereus costaricensis*), **Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural da Amazônia**, 2021.

SOUZA R.T, CASTRO R. D, PALLADINI L. P., Depósito de pulverização com diferentes padrões de gotas em aplicações na cultura do algodoeiro, **Engenharia. Agrícola**, v.27, p.75-82, 2007.

THEBALDI M. S. *et al.* Efeito da adição de adjuvante na redução de deriva em pontas de pulverização tipo cone vazio. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, v. 18, n. 2, p.1-6, 2009.