

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**APLICAÇÃO DE HERBICIDA COM ADJUVANTES NO
CONTROLE DE *Alternanthera tenella* E DIFERENCIAÇÃO
FUNCIONAL DE ADJUVANTES COM BASE NA REDUÇÃO DE
DERIVA E NO ESPALHAMENTO DE GOTAS**

Gabriela Pelegrini
Engenheira Agrônoma

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**APLICAÇÃO DE HERBICIDA COM ADJUVANTES NO
CONTROLE DE *Alternanthera tenella* E DIFERENCIAÇÃO
FUNCIONAL DE ADJUVANTES COM BASE NA REDUÇÃO DE
DERIVA E NO ESPALHAMENTO DE GOTAS**

Gabriela Pelegrini

Orientador: Prof. Dr. Marcelo da Costa Ferreira

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus
de Jaboticabal, como parte das exigências
para a obtenção do título de Doutora em
Agronomia (Produção Vegetal).

2025

P381a	Pelegriini, Gabriela Aplicação de herbicida com adjuvantes no controle de <i>Alternanthera tenella</i> e diferenciação funcional de adjuvantes com base na redução de deriva e no espalhamento de gotas / Gabriela Pelegriini. -- Jaboticabal, 2025 169 p. : il., tabs., fotos Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Marcelo da Costa Ferreira 1. Agronomia. 2. Aplicação de produtos químicos agrícolas. 3. Tecnologia de aplicação. 4. Adjuvante. 5. Herbicida. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: APLICAÇÃO DE HERBICIDA COM ADJUVANTES NO CONTROLE DE *Alternanthera tenella* E DIFERENCIAÇÃO FUNCIONAL DE ADJUVANTES COM BASE NA REDUÇÃO DE DERIVA E NO ESPALHAMENTO DE GOTAS

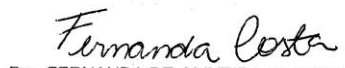
AUTORA: GABRIELA PELEGRINI

ORIENTADOR: MARCELO DA COSTA FERREIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:



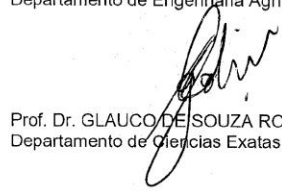
Prof. Dr. MARCELO DA COSTA FERREIRA (Participação Presencial)
Departamento de Fitossanidade / FCAV UNESP Jaboticabal



Dra. FERNANDA DE OLIVEIRA BARRETO COSTA (Participação Presencial)
Indorama Ventures Fibras Brasil Ltda / São Paulo/SP



Prof. Dr. MARCONI RIBEIRO FURTADO JÚNIOR (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Agrícola / Universidade Federal de Viçosa (UFV) - Viçosa/MG



Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM (Participação Presencial)
Departamento de Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



Prof. Dr. PEDRO LUÍS DA COSTA AGUIAR ALVES (Participação Presencial)
Departamento de Biologia / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 28 de julho de 2025

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

GABRIELA PELEGRINI, nasceu em Jaboticabal, São Paulo (SP). Possui graduação em Engenharia Agrônômica, habilitação Engenheira Agrônoma, pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Campus de Jaboticabal - SP, obtendo o título em fevereiro de 2018. Durante a graduação foi bolsista de Iniciação Científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), no período de 2014 a 2015, auxiliando nas avaliações de alocação de biomassa na parte aérea e eficiência de utilização de nutrientes em clones de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*, para fins de melhoramento genético. Desenvolveu Iniciação Científica sem bolsa pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), no período de 2016 a 2017, auxiliando nas avaliações de estimativas de correlação e análise de trilha entre caracteres do grão de milho pipoca, atuando na área de melhoramento genético vegetal. Em 2017 realizou estágio curricular na Dupont Pioneer Itumbiara – GO, com atividades na produção de semente matriz de milho na região de Avaré – SP. Em 2018 realizou intercâmbio agrícola pelo programa Brazil – International Exchange Program (BRAZIL – IEP), onde realizou atividade em casa de vegetação com horticulturas, no Estado de Minnesota, Estados Unidos. Em agosto de 2021, finalizou curso de Mestrado Acadêmico no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), intitulado de “Controle de mosca branca na cultura da soja com pulverização assistida de ar e gotas carregadas eletricamente”, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Campus de Jaboticabal, sob orientação do Prof. Dr. Marcelo da Costa Ferreira, sendo membro do grupo Núcleo de Estudos e Desenvolvimento em Tecnologia de Aplicação (NEDTA), localizado no Departamento de Fitossanidade desta instituição. Em julho de 2025, submete-se à banca examinadora para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal).

“A agricultura é a base da civilização e a arte mais nobre para o desenvolvimento humano”

GEORGE WASHINGTON

“A persistência é o caminho do êxito”

CHARLES CHAPLIN

Aos meus pais *Angela Maria Vitale Pelegrini* e *Gilberto Pelegrini* por sempre terem me apoiado e incentivado em todos os momentos de vida. Por nunca duvidarem da minha capacidade e por todo amor, carinho e compreensão que me proporcionam. Vocês são a minha inspiração!

DEDICO

Aos meus avôs *Manuel Vitale* e *Salvador Pelegrini*, *in memoriam*, e a minha avó *Nair Loreano Pelegrini*, por terem acompanhado e tornado a minha infância muito mais colorida, bonita e alegre. Vocês sempre estarão na minha memória e coração!

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço primeiramente à Deus pelo dom da vida, por ter me dado saúde para percorrer essa caminhada e por ter tornado meus sonhos em objetivos alcançáveis.

À minha família por sempre se fazer presente, pelos conselhos, incentivo, suporte e todo carinho nessa etapa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo da Costa Ferreira, por ter confiado no meu potencial em realizar este trabalho, por ter me orientado durante esse tempo com dedicação e companheirismo, pelos ensinamentos e conselhos e por ter me concedido a oportunidade de fazer parte da equipe do Núcleo de Estudos e Desenvolvimento em Tecnologia de Aplicação (NEDTA).

Ao grupo de pesquisa NEDTA, o qual tenho orgulho e sou feliz de fazer parte, representado pelos membros que já passaram e aos que fazem parte atualmente, em especial Anderson Vieira Rodrigues, Mariele de Souza Penteado Nascimento, Jaymes Alves Pereira, Hilario Camarena De La Cruz, Edimar Pertelini, Karina Petri dos Santos, Nagilla Moraes Ribeiro. A participação de vocês foi fundamental para a realização deste trabalho.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/FCAV), Campus de Jaboticabal por ter me proporcionado tanto conhecimento e evolução profissional e pessoal por tanto tempo, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), coordenado pelo Prof. Dr. Leonardo Bianco de Carvalho e ao Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho pelo ótimo trabalho realizado juntamente com os demais professores do programa.

Agradeço especialmente a Gilberto Pelegrini, Angela Maria Vitale Pelegrini, Maria Isabel Vitale, Ana Carolina Aparecida Alves, Ana Beatriz Dilena Spadoni e Maria Thalia Lacerda Siqueira por terem participado efetivamente e de forma contributiva na condução dos experimentos. Obrigada por serem pessoas tão especiais que sempre me

ajudaram sem esperar nada em troca, pela amizade verdadeira. Vocês tornaram essa caminhada mais leve e prazerosa.

A todos, que direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação, aprendizado e realização deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. A planta daninha apaga-fogo.....	2
2.2. Controle químico de apaga-fogo.....	5
2.3. Tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários	7
2.3.1. Uso de adjuvantes com foco em espalhantes e redutores de deriva ...	7
3. REFERÊNCIAS.....	10
CAPÍTULO 2 - CONTROLE DE APAGA-FOGO (<i>Alternanthera tenella</i>) POR HERBICIDA ASSOCIADO A ADJUVANTES	15
RESUMO.....	15
1. INTRODUÇÃO	17
2. MATERIAL E MÉTODOS	18
2.1. Caracterização físico-química das caldas herbicida com e sem adjuvantes utilizadas no controle de apaga-fogo (<i>Alternanthera tenella</i>).....	18
2.2. Avaliação da aplicação das caldas herbicida com e sem adjuvantes utilizadas no controle de apaga-fogo (<i>Alternanthera tenella</i>).....	21
2.3. Análise estatística.....	23
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
3.1. Caracterização físico-química das caldas herbicida com e sem adjuvantes utilizadas no controle de apaga-fogo (<i>Alternanthera tenella</i>).....	23
3.2. Avaliação da aplicação das caldas herbicida com e sem adjuvante utilizadas no controle de apaga-fogo (<i>Alternanthera tenella</i>)	31
4. CONCLUSÃO	46

5. REFERÊNCIAS.....	46
CAPÍTULO 3 - ESPALHAMENTO DE GOTAS FITOSSANITÁRIAS SOBRE SUPERFÍCIE E DIFERENCIAÇÃO FUNCIONAL DE ADJUVANTES.....	54
RESUMO.....	54
1. INTRODUÇÃO	56
2. MATERIAL E MÉTODOS	57
2.1. Tensão superficial e ângulo de contato em superfície artificial das caldas fitossanitárias.....	58
2.2. Espalhamento de gotas fitossanitárias e diferenciação funcional de adjuvantes	59
2.3. Análise estatística.....	61
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4. CONCLUSÃO	80
5. REFERÊNCIAS.....	81
CAPÍTULO 4 - REDUÇÃO DE DERIVA DE GOTAS FITOSSANITÁRIAS E AGRUPAMENTO FUNCIONAL DE ADJUVANTES	86
RESUMO.....	86
1. INTRODUÇÃO	88
2. MATERIAL E MÉTODOS	89
2.1. Tamanho de gotas das caldas fitossanitárias.....	90
2.2. Redução de deriva de gotas fitossanitárias e diferenciação funcional de adjuvantes	91
2.3. Análise estatística.....	94
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
4. CONCLUSÃO	146
5. REFERÊNCIAS	146
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	151

**APLICAÇÃO DE HERBICIDA COM ADJUVANTES NO CONTROLE DE
Alternanthera tenella E DIFERENCIAÇÃO FUNCIONAL DE ADJUVANTES COM
BASE NA REDUÇÃO DE DERIVA E NO ESPALHAMENTO DE GOTAS**

RESUMO: A planta daninha *Alternanthera tenella* é recorrente em áreas agrícolas, como em ambientes manejados com herbicidas pós-emergentes. Sua morfologia, com hábito prostrado e folhas pubescentes, dificulta a interceptação das gotas com ingredientes ativos. O herbicida fomesafen é uma opção no controle de folhas largas, mas sua eficácia sobre *A. tenella* pode ser limitada quando a cobertura da calda é insuficiente ou distribuída de forma irregular. Nesse contexto, os adjuvantes podem melhorar a qualidade da aplicação, mas, apesar do seu uso crescente, ainda não há uma forma padronizada de avaliar e classificar sua eficiência funcional, como em relação ao espalhamento das gotas e à redução da deriva. Assim, os objetivos foram avaliar os efeitos da associação entre fomesafen e diferentes adjuvantes sobre a qualidade da aplicação e o controle da *A. tenella*, além de propor critérios de diferenciação funcional entre adjuvantes. Foram conduzidos experimentos em casa de vegetação com análise de pH, tensão superficial, ângulo de contato, espectro de gotas, cobertura e depósito superficial, controle da planta daninha ao longo do tempo e redução da massa seca. Foram avaliados 28 adjuvantes comerciais em diferentes dosagens para caracterizar o grau de espalhamento com base na tensão superficial e no ângulo de contato, permitindo a definição de oito classes funcionais, variando de hidrofóbico a espalhamento extremamente alto. Para a avaliação do potencial de redução de deriva, utilizou-se o percentual de gotas menores que 100 µm como parâmetro principal, considerando diferentes modelos de pontas hidráulicas sob pressão constante. As análises estatísticas multivariadas, como análise de componentes principais (PCA) e agrupamento hierárquico (cluster), possibilitaram a identificação de padrões de desempenho entre os adjuvantes e a construção de faixas classificatórias para as variáveis de interesse. Os resultados demonstraram que os adjuvantes modificam as propriedades físico-químicas das caldas, aumentam a cobertura superficial, o depósito sobre o alvo e o controle de *A. tenella* e apresentam variabilidade funcional quanto ao espalhamento e à redução da deriva.

Palavras-chave: espectro de gotas, fomesafen, cobertura superficial, depósito.

**HERBICIDE APPLICATION WITH ADJUVANTS FOR THE CONTROL OF
Alternanthera tenella AND FUNCTIONAL DIFFERENTIATION OF ADJUVANTS
BASED ON DRIFT REDUCTION AND DROPLET SPREADING**

ABSTRACT: The weed *Alternanthera tenella* is recurrent in agricultural areas, particularly in environments managed with post-emergence herbicides. Its morphology, characterized by a prostrate growth habit and pubescent leaves, hinders droplet interception and the absorption of active ingredients. The herbicide fomesafen is an option for broadleaf weed control, but its efficacy on *A. tenella* may be limited when spray coverage is insufficient or unevenly distributed. In this context, adjuvants can improve application quality; however, despite their increasing use, there is still no standardized method to evaluate and classify their functional efficiency, especially regarding droplet spreading and drift reduction. Therefore, the objectives were to assess the effects of combining fomesafen with different adjuvants on spray quality and *A. tenella* control, as well as to propose functional differentiation criteria for adjuvants. Greenhouse experiments were conducted to analyze pH, surface tension, contact angle, droplet spectrum, surface coverage and deposition, weed control over time, and dry mass reduction. Twenty-eight commercial adjuvants at different doses were evaluated to characterize droplet spreading based on surface tension and contact angle, allowing the definition of eight functional classes ranging from hydrophobic to extremely high spreading. For drift reduction assessment, the percentage of droplets smaller than 100 μm was used as the main parameter, considering different flat-fan nozzle models under constant pressure. Multivariate statistical analyses, such as principal component analysis (PCA) and hierarchical clustering, enabled the identification of performance patterns among adjuvants and the construction of classification ranges for the key variables. The results showed that adjuvants altered the physicochemical properties of the spray solutions, increased surface coverage, target deposition, and control of *A. tenella*, and exhibited functional variability regarding droplet spreading and drift reduction.

Keywords: droplet spectrum, fomesafen, surface coverage, deposition.

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1. INTRODUÇÃO

As plantas daninhas representam um dos entraves à produtividade agrícola, competindo com as culturas por recursos essenciais como luz, água e nutrientes, além de interferirem na colheita e na qualidade dos produtos. Entre os métodos de controle, o uso de herbicidas é amplamente adotado por sua praticidade e eficácia, embora o uso intensivo e, por vezes, inadequado desses produtos possa comprometer o sucesso das aplicações. Esse cenário tem impulsionado a busca por estratégias mais sustentáveis, como o Manejo Integrado de Plantas Daninhas (MIPD), que combina métodos químicos, culturais e mecânicos com o objetivo de reduzir os impactos ambientais e econômicos do manejo convencional (Riemens et al., 2022; Santos et al., 2023).

Dentre as espécies, a *Alternanthera tenella* Colla, conhecida como apaga-fogo, é amplamente distribuída em regiões tropicais e subtropicais e com capacidade adaptativa. Sua morfologia, com hábito prostrado, folhas pubescentes e sistema radicular vigoroso, dificulta a interceptação e a absorção dos herbicidas, especialmente os de contato, comprometendo o controle químico (Canossa et al., 2007; Sousa et al., 2022). Estudos mostram que sua presença em áreas agrícolas pode reduzir significativamente a produtividade das culturas e inviabilizar operações mecanizadas (Nepomuceno et al., 2007), além de apresentar potencial alelopático (Pallavi et al., 2023), o que reforça a necessidade de estratégias eficazes de manejo.

O herbicida fomesafen, pertencente ao grupo dos inibidores da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX), é uma alternativa para o controle de espécies de folhas largas, apresentando seletividade para culturas como soja e feijão (Rojas-Sandoval, 2022). No entanto, sua eficiência sobre *A. tenella* tem se mostrado limitada, principalmente em estádios avançados de desenvolvimento da planta daninha ou sob cobertura foliar densa (Canossa et al., 2007). Diante disso, a associação do fomesafen

com adjuvantes é proposta como estratégia para melhorar sua eficácia, promovendo melhor cobertura, espalhamento das gotas e absorção foliar do ingrediente ativo (Macedo et al., 2020; Sousa et al., 2022).

Os adjuvantes são substâncias adicionadas à calda ou à formulação dos produtos fitossanitários com o objetivo de modificar suas propriedades físico-químicas e favorecer a eficácia da aplicação (Ferreira e Matuo, 2024). Eles podem atuar como espalhantes, penetrantes, redutores de deriva, adesivos e compatibilizantes, influenciando parâmetros como tensão superficial, ângulo de contato e tamanho de gotas (Ferreira et al., 2013; Santos et al., 2021). Tais alterações são particularmente relevantes no controle da apaga-fogo, cuja superfície foliar dificulta o espalhamento da calda. Estudos demonstram que adjuvantes à base de organosilicones e óleos vegetais podem melhorar a deposição, a cobertura foliar e a absorção do ingrediente ativo (Zhao et al., 2023; Basílio et al., 2024), aumentando a eficiência do controle.

Apesar do uso crescente de adjuvantes, ainda não existe uma classificação funcional padronizada que permita avaliar de forma objetiva sua eficiência em diferentes funções, como espalhamento ou redução da deriva. Essa ausência dificulta a escolha adequada dos produtos disponíveis no mercado, pois os adjuvantes variam amplamente em composição, formulação, modo de ação e desempenho (Santos et al., 2021; Xu et al., 2023).

Além disso, muitas recomendações são baseadas sem considerar as particularidades do ingrediente ativo, do alvo biológico ou das condições de aplicação (Paap et al., 2022). Essa lacuna compromete a racionalidade no uso dos adjuvantes e a correta recomendação do produto. Nesse sentido, torna-se essencial desenvolver abordagens que integrem dados físico-químicos e agronômicos, capazes de orientar tecnicamente a escolha dos adjuvantes mais adequados às diferentes demandas do campo.

Nesse contexto, o uso de adjuvantes pode colaborar no ajuste do tamanho e da uniformidade das gotas, reduzir perdas por evaporação e melhorar a interação entre os produtos e o tecido vegetal, contribuindo para a qualidade da distribuição e a eficiência da aplicação no controle da planta daninha apaga-fogo. Além disso, a avaliação do grau

desses efeitos permite identificar diferenças funcionais entre os adjuvantes disponíveis no mercado, o que representa uma ferramenta estratégica para orientar tecnicamente sua escolha e direcionar os resultados das aplicações em diferentes condições de manejo.

Assim, os objetivos foram avaliar fatores relacionados à qualidade da aplicação e ao controle da planta daninha apaga-fogo com o herbicida fomesafen, aplicado isoladamente e em mistura com adjuvantes; avaliar o grau de espalhamento de gotas fitossanitárias com base na tensão superficial e no ângulo de contato sobre superfície; e avaliar o grau de redução de deriva com base no tamanho de gotas, como ação e diferenciação funcional de adjuvantes.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A planta daninha apaga-fogo

As plantas daninhas são geralmente definidas como espécies vegetais que crescem em locais onde não são desejadas, interferindo direta ou indiretamente nas atividades humanas, inclusive na agricultura. De acordo com Pitelli (1985), planta daninha é toda e qualquer planta que interfere de forma negativa nas atividades humanas. No contexto agrícola, essas espécies competem com as culturas por luz, água, nutrientes e espaço, podendo ainda liberar substâncias alelopáticas, abrigar pragas e patógenos e dificultar operações mecanizadas. Essas interferências afetam a produtividade e a qualidade das lavouras, exigindo ações de manejo (Pitelli, 1985; El-Enin e Abdel-Ghffa, 2017).

As plantas daninhas constituem um dos fatores limitantes da produção agrícola em diferentes sistemas de cultivo. Estima-se que, na ausência de controle, as perdas médias de rendimento causadas por essas espécies possam chegar a 34%, podendo ultrapassar esse valor dependendo da cultura, do estágio de desenvolvimento das plantas daninhas e das condições ambientais (Soltani et al., 2016; Radicetti e Mancinelli,

2021; Gao e Su, 2024). O controle eficiente dessas espécies é, portanto, indispensável para o sucesso produtivo e a sustentabilidade econômica das áreas agrícolas.

A maioria das regiões de produção agrícola brasileiras apresenta clima tropical e subtropical, com condições específicas que favorecem a alta variabilidade dos solos, bem como a diversidade de pragas, doenças e plantas daninhas. Nesse contexto, é prática comum o uso de aplicações de herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes, frequentemente em mistura no mesmo tanque de pulverização. Para o controle de plantas daninhas, essa prática foi e continua sendo a alternativa mais acessível e eficiente no manejo de diferentes espécies e, especialmente, daquelas resistentes, um dos maiores desafios enfrentados pela agricultura brasileira (Santos et al., 2023).

O controle de plantas daninhas é baseado no uso intensivo de herbicidas, devido à sua eficácia e praticidade. No entanto, o uso contínuo e, muitas vezes, inadequado desses produtos tem levado à seleção de biótipos resistentes, seleção de espécies tolerantes e à degradação ambiental. Esse cenário impulsiona a adoção de práticas mais sustentáveis, como o Manejo Integrado de Plantas Daninhas (MIPD). Essa estratégia combina métodos químicos, mecânicos, culturais e, em alguns casos, biológicos, visando uma abordagem mais racional, eficiente e ambientalmente responsável para o controle de plantas daninhas (Riemens et al., 2022; Santos et al., 2023).

Dentre as espécies de plantas daninhas de importância agronômica, *Alternanthera tenella* Colla é popularmente conhecida como apaga-fogo. Pertencente à família Amaranthaceae, trata-se de uma planta herbácea, de hábito prostrado ou ascendente, principalmente em caso de alta população, distribuída em regiões tropicais e subtropicais. É frequentemente encontrada em áreas cultivadas, beiras de estradas, terrenos baldios e pomares, demonstrando elevada capacidade de adaptação a diferentes ambientes (Canossa et al., 2007; Rojas-Sandoval, 2022; Sousa et al., 2022).

A espécie apresenta comportamento oportunista, sendo frequente em manejo inadequado, onde estabelece populações densas e persistentes. Trata-se de uma planta anual, dependendo as condições de desenvolvimento, apresenta caráter perene, que se reproduz principalmente por sementes. Sua morfologia, caracterizada por porte predominantemente prostrado, sistema radicular vigoroso e folhas pubescentes, favorece

a sobrevivência mesmo sob condições adversas de manejo. Esses atributos conferem capacidade competitiva em relação às culturas agrícolas (Canossa et al., 2007; Sousa et al., 2022). Estudos recentes mostram que extratos de *A. tenella* podem exercer efeito alelopático sobre espécies cultivadas, como o trigo, cuja germinação foi reduzida a apenas 6%, inibindo significativamente o estabelecimento inicial das plântulas (Pallavi et al., 2023), o que reforça seu potencial de interferência sobre a produtividade agrícola.

Em estudo conduzido por Nepomuceno et al. (2007), a presença da espécie reduziu em média 46% a produtividade de grãos da soja em sistema de semeadura direta e 32% em sistema convencional, quando a infestação persistiu durante todo o ciclo da cultura, com períodos críticos de interferência identificados como 34 a 76 dias após a emergência para o plantio convencional e 33 a 66 dias para o plantio direto. Além da expressiva redução na produtividade, a infestação dificultou a colheita mecanizada, aumentou a impureza e a umidade dos grãos colhidos, comprometendo a qualidade final da produção. Esses impactos reforçam a necessidade de estratégias de manejo eficazes para o controle da espécie em diferentes sistemas de cultivo.

Sob outra abordagem, Canossa et al. (2007) evidenciaram o potencial competitivo de *A. tenella*, sobretudo em culturas do tipo C3. Segundo os autores, além de competir por recursos com as espécies cultivadas, a infestação por essa planta daninha pode inviabilizar a colheita mecanizada e aumentar os níveis de umidade e impurezas nos grãos, o que compromete diretamente a eficiência operacional e a qualidade da produção agrícola.

Um estudo conduzido por Vivian et al. (2009) avaliou a competição entre soja e *Alternanthera tenella* em condições controladas, com foco no crescimento das plantas, área foliar, consumo de água e eficiência fisiológica. Os resultados mostraram que, embora a soja tenha apresentado crescimento inicial mais rápido e maior acúmulo de biomassa, a planta daninha retomou seu desenvolvimento no final do ciclo da cultura. Nesse período, *A. tenella* aumentou sua taxa de crescimento e de assimilação líquida, aproveitando a senescência da soja para continuar se desenvolvendo. Esse comportamento pode favorecer a produção de sementes e a permanência da espécie na área, dificultando o manejo nas safras seguintes. Além disso, observou-se que a soja

apresentou maior competição com outras plantas da própria espécie do que com *A. tenella*, indicando que, em baixas densidades, a planta daninha pode não comprometer diretamente a produtividade, mas ainda representa risco agrônomo se não for controlada adequadamente.

Apesar dos impactos negativos nos sistemas de cultivo agrícola, a espécie apresenta potenciais aplicações benéficas no campo medicinal, sendo reconhecida por sua composição rica em metabólitos bioativos e pelo uso tradicional no tratamento de diversas afecções. Estudos fitoquímicos revelaram a presença de compostos como flavonoides, saponinas e triterpenos, com propriedades anti-inflamatórias, antioxidantes e antimicrobianas (Singla et al., 2022). Ainda que seja valorizada na medicina popular, sua classificação como planta daninha persiste em função dos prejuízos agrônômicos que pode causar, exigindo a adoção de estratégias de manejo que controlem sua infestação.

2.2. Controle químico de apaga-fogo

O controle químico é o método mais utilizado no manejo de *Alternanthera tenella* em áreas agrícolas, devido à praticidade e à eficácia dos herbicidas pós-emergentes sobre espécies de folhas largas. No entanto, o manejo da apaga-fogo pode apresentar limitações em sistemas de produção, especialmente devido à sua boa capacidade de adaptação e a aspectos morfológicos que dificultam a interceptação e absorção dos produtos aplicados. A espécie apresenta folhas pubescentes, hábito prostrado e rápido crescimento, o que contribui para a redução da eficiência de controle. Nesse contexto, o fomesafen pode ser uma opção no controle químico da espécie (Canossa et al., 2007; Sousa et al., 2022).

O fomesafen é um herbicida pertencente ao grupo dos inibidores da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX), com ação de contato e seletividade para culturas como soja e feijão (Canossa et al., 2007; Rojas-Sandoval, 2022). Sua eficiência depende de uma cobertura uniforme da planta daninha e da aplicação em estádios iniciais de desenvolvimento, sendo mais eficiente quando utilizado em plântulas com até quatro

folhas verdadeiras. Tabatabaiepour et al. (2023) observaram que o uso isolado de fomesafen proporcionou controle satisfatório de *Alternanthera tenella* quando aplicado nesses estádios iniciais, tanto na cultura da soja quanto na do feijão. No caso do feijão, além da seletividade, o herbicida demonstrou boa performance no controle de folhas largas, contribuindo para a redução da interferência das plantas daninhas.

A eficiência dos herbicidas inibidores da enzima protoporfirinogênio oxidase (PPO), como o fomesafen, pode ser significativamente afetada pelas condições ambientais no momento da aplicação, especialmente pela disponibilidade de luz solar. A ação desses produtos está associada à geração de espécies reativas de oxigênio, responsáveis por provocar a peroxidação de lipídios e, conseqüentemente, a necrose celular nas plantas daninhas. Esse processo depende da ativação por fotossensibilização, sendo, portanto, favorecido em ambientes com maior intensidade luminosa (Ferreira et al., 1998; Franca et al., 2020; Jakubek et al., 2021; Mendes et al., 2022). Em situações de baixa radiação, como em dias nublados, pode haver redução da eficiência do controle, mesmo quando há adequada deposição da calda sobre o alvo. Esses aspectos destacam a importância de considerar a interação entre os fatores físico-químicos da calda e as condições ambientais e fisiológicas das plantas no planejamento das aplicações, a fim de proporcionar o efeito do herbicida.

Em condições de campo, Nepomuceno et al. (2007) relataram que infestações de *A. tenella* sem controle químico resultaram em perdas de produtividade de até 46% em sistema de semeadura direta, e 32% no sistema convencional. Esses dados evidenciam a importância de um controle eficaz, especialmente nas fases iniciais do ciclo da cultura. Vivian et al. (2009) complementam esse entendimento ao observar que, mesmo após a senescência da soja, *A. tenella* apresenta capacidade de retomar o crescimento, o que favorece sua perpetuação por meio da produção de sementes, reforçando a necessidade de controle.

Entretanto, nem sempre o uso isolado de fomesafen proporciona controle satisfatório de *Alternanthera tenella*. Em estudo conduzido por Canossa et al. (2007), verificou-se que aplicações de fomesafen em pós-emergência resultaram em controle inferior a 50% da espécie, especialmente quando realizadas em estádios mais avançados

de desenvolvimento, ao passo que herbicidas aplicados em pré-emergência alcançaram mais de 98% de controle aos 28 dias após a aplicação. Esses dados evidenciam que a eficiência do fomesafen pode ser significativamente reduzida em condições de alta densidade populacional ou em plantas com cobertura foliar densa, características típicas da espécie. Por isso, torna-se fundamental a adoção de estratégias complementares, como rotação de herbicidas, integração com práticas culturais e monitoramento constante da infestação, para garantir um controle mais eficaz e sustentável da apaga-fogo.

Diante desses resultados, o fomesafen não deve ser a única estratégia adotada no manejo de *A. tenella*. A integração com práticas culturais, como a rotação de culturas e o monitoramento populacional, além da escolha adequada do momento de aplicação, são medidas fundamentais para o controle (Sousa et al., 2022; Soltani et al., 2016). A adoção de estratégias integradas de manejo químico e não químico é indispensável para reduzir os impactos agronômicos da espécie (Radicetti e Mancinelli, 2021).

2.3. Tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários

A tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários é uma ferramenta essencial no manejo das culturas agrícolas, incluindo o controle de plantas daninhas. Ela se baseia em conhecimentos científicos para a correta colocação do produto no alvo, em quantidade necessária, quando e se necessário, de forma econômica e com o mínimo de contaminação possível de áreas não alvo (Matuo, 1990).

A qualidade da pulverização está relacionada com a quantidade adequada do produto fitossanitário que atinge o alvo desejado, com número e tamanho de gotas ideais, distribuídas de forma homogênea e com o mínimo de perdas, fatores importantes para o controle da planta daninha apaga-fogo (Privitera et al., 2023). Para a obtenção de sucesso nas aplicações é necessário considerar uma série de fatores que influenciam o processo de aplicação, incluindo as características da cultura e da planta daninha, as propriedades físico-químicas da calda, o tipo de ponta de pulverização e equipamento utilizados, além das condições meteorológicas no momento da aplicação. (Ferreira e Matuo, 2024).

2.3.1. Uso de adjuvantes com foco em espalhantes e redutores de deriva

O uso de adjuvantes é uma alternativa que pode contribuir com o controle químico de plantas daninhas. Esse efeito é especialmente relevante em espécies como a apaga-fogo (*Alternanthera tenella*), em que a eficiência de herbicidas de contato, como o fomesafen, depende de uma cobertura adequada da superfície foliar para que haja ação efetiva do ingrediente ativo (Santos et al., 2021; Tabatabaiepour et al., 2023).

Nessa espécie, a associação com adjuvantes pode favorecer a qualidade da distribuição da calda e o efeito do herbicida, colaborando no ajuste do tamanho e da uniformidade das gotas, na redução de perdas por deriva e evaporação e na melhoria da interação entre os produtos e o tecido vegetal. Esses efeitos resultam em boa cobertura foliar, aumento do depósito sobre o alvo e da absorção do ingrediente ativo, contribuindo diretamente para o controle (Sousa et al., 2022; Macedo et al., 2020; Basílio et al., 2024).

Para o setor de fitossanidade, os adjuvantes são definidos como substâncias que não possuem ação biocida, sendo adicionadas à formulação ou à calda de produtos fitossanitários com o objetivo de modificar propriedades físico-químicas da solução. Essas alterações visam adequar a calda às condições de aplicação e colaborar para a eficácia fitossanitária do tratamento, mesmo em situações adversas (Ferreira e Matuo, 2024). Os adjuvantes podem estar presentes nas formulações comerciais ou ser incorporados separadamente no momento da aplicação, e atuam principalmente no aumento da absorção do ingrediente ativo ao melhorar características como espalhamento, retenção e estabilidade da pulverização (Ferreira et al., 2013; Santos et al., 2021).

Dentre suas múltiplas funcionalidades, destacam-se a capacidade de atuar como espalhantes, penetrantes, adesivos, redutores de deriva, antiespumantes e compatibilizantes. Esses efeitos favorecem a formação de gotas de tamanho adequado, reduzem perdas por evaporação e escorrimento e aumentam a interação do produto com o tecido vegetal. Dessa forma, os adjuvantes contribuem para uma deposição mais

eficiente e para o controle de problemas fitossanitários, como *A. tenella* (Santos et al., 2021; Zhao et al., 2023; Jiang et al., 2024).

Estudos têm demonstrado que a associação entre herbicidas e adjuvantes pode resultar em melhorias no controle de plantas daninhas. Tabatabaiepour et al. (2023) observaram que o uso de fomesafen em mistura com adjuvantes aumentou a eficácia do controle de espécies de folhas largas, especialmente em estádios iniciais de desenvolvimento. Em complemento, foi relatado que a adição de adjuvantes do grupo dos espalhantes e redutores de deriva favoreceu parâmetros como deposição foliar, cobertura da calda e redução do ângulo de contato, fatores que influenciam a absorção do ingrediente ativo e a eficácia do controle (Basílio et al., 2024; Pelegrini et al., 2022).

Os adjuvantes com ação espalhante exercem melhoria da interação entre a calda pulverizada e a superfície vegetal. Entre eles, os organosilicones promovem uma expressiva redução da tensão superficial da solução, permitindo que a gota se espalhe de maneira mais eficiente sobre a superfície foliar, especialmente considerando que a água, diluente mais utilizado nas aplicações, possui naturalmente alta tensão superficial. Essa propriedade é importante em folhas cerosas, hidrofóbicas ou pubescentes, nas quais o contato inicial da gota é limitado. Ao aumentar a área de cobertura da calda, os espalhantes favorecem a adesão e o recobrimento do tecido vegetal, o que pode resultar em maior uniformidade de distribuição do ingrediente ativo (Paap et al., 2022; Zhao et al., 2023).

Além disso, os espalhantes podem influenciar a velocidade de absorção do produto, uma vez que promovem melhor contato com a cutícula e facilitam a penetração do ingrediente ativo. Organosilicones, por exemplo, apresentam alto poder de espalhamento mesmo em baixas concentrações e são capazes de formar filmes finos e contínuos sobre a superfície das folhas, otimizando o uso de produtos fitossanitários (Xu et al., 2023). Essa ação pode ser particularmente relevante em condições ambientais adversas, como baixa umidade relativa, quando a absorção é dificultada. Assim, o uso de adjuvantes com essa funcionalidade representa uma estratégia para adequar a qualidade das aplicações.

Já os adjuvantes redutores de deriva, como os que contêm agentes espessantes ou polímeros para adequação do espectro de gotas, atuam aumentando a viscosidade da calda e promovendo a formação de gotas maiores e mais uniformes. Essa alteração contribui para a redução da formação de gotas muito finas, menores que 100 μm , que são mais suscetíveis à deriva, especialmente em condições de vento ou baixa umidade relativa do ar (Zeeshan et al., 2024). Além dos adjuvantes, fatores como o modelo de ponta de pulverização e a pressão de trabalho exercem influência direta e consistente sobre o tamanho das gotas formadas, afetando a qualidade da aplicação (Oliveira et al., 2016). Como destacado por Santos et al. (2021), o uso adequado de adjuvantes redutores de deriva, aliado à seleção correta de bicos e pressão, pode reduzir as perdas por deriva e melhorar a deposição da calda no alvo, favorecendo a eficiência da aplicação e a segurança ambiental.

Entretanto, para o uso racional e eficiente dos adjuvantes, é necessário conhecer o grau de ação de cada produto disponível no mercado. Os adjuvantes variam em composição, formulação, modo de ação e desempenho, sendo essencial avaliar seu efeito em função do produto fitossanitário, do alvo biológico e das técnicas de aplicação utilizadas. Entre essas, destaca-se a escolha da ponta de pulverização, que exerce influência direta na formação do espectro de gotas, afetando o tamanho, a uniformidade e a proporção de gotas com diâmetro suscetível à deriva, além de interagir com as condições ambientais no momento da aplicação (Santos et al., 2021; Polli et al., 2022).

Apesar do uso em larga escala, ainda não existe uma classificação padronizada que indique, de forma objetiva, o nível de eficiência dos adjuvantes para cada funcionalidade específica, como espalhamento e redução de deriva. Essa ausência não permite a comparação entre produtos e a tomada de decisão por parte dos técnicos e produtores rurais (Paap et al., 2022; Xu et al., 2023).

Uma classificação funcional baseada em parâmetros físico-químicos e agrônômicos permitiria identificar os adjuvantes mais eficientes para cada finalidade, orientando o uso conforme as demandas específicas de cada cultura, tipo de problema fitossanitário ou condição de aplicação. Tal abordagem beneficiaria não apenas os

produtores, mas também os formuladores e pesquisadores, promovendo o uso mais racional e direcionado dessas tecnologias no campo.

3. REFERÊNCIAS

Abou El-Enin MM, Abdel-Ghffa MAF (2017) Allelopathic effect of peanut, sunflower and corn crops on germination and growth of some winter weeds. **Archives of Agriculture and Environmental Science** 2:257-263.

<https://doi.org/10.26832/24566632.2017.020402>

Basílio S, Furtado Júnior MR, Alvarenga CB de, Vitória EL da; Vargas BC, Privitera S, Caruso L, Cerruto E, Manetto G (2024) Effect of adjuvants on physical–chemical properties, droplet size, and drift reduction potential. **Agriculture** (Basel) 14:2271-2283.

<https://doi.org/10.3390/agriculture14122271>

Canossa RS, Velini ED, Pacheco LP, Turra AM, Carbonari CA (2007) Controle de *Alternanthera tenella* com herbicidas aplicados em pré e pós-emergência. **Planta Daninha** 25:417-423.

<https://doi.org/10.1590/S0100-83582007000200025>

Ferreira MC, Matuo T (2024) **Tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários: fundamentos**. São Paulo: Editora Cultura, 296 p.

Gao WT, Su WH. Weed management methods for herbaceous field crops: a review. **Agronomy** 14:e486.

<https://doi.org/10.3390/agronomy14030486>

Jiang Y, Yang Z, Xu X, Xie B, Duan J (2024) Spreading model of single droplet impacting the banana leaf surface and computational fluid dynamics simulation analysis. **Computers and Electronics in Agriculture** 223:e109113.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109113>

Macedo MV, Alves PLC, Rodrigues ACC, Fernandes EG, Boldrin PF, Souza MV (2020) Association between fomesafen and surfactants for the pre-emergence control of *Euphorbia heterophylla* L. **Journal of Agricultural Studies** 8:435-444.

<https://doi.org/10.5296/jas.v8i4.17582>

Matuo T (1990) **Técnicas de aplicação de defensivos agrícolas**. Jaboticabal: FUNEP, 139 f.

Nepomuceno M, Alves PLCA, Dias TCS, Pavani MCMD (2007) Períodos de interferência de plantas daninhas na cultura da soja nos sistemas de semeadura direta e convencional. **Planta Daninha** 25:87-98.

<https://doi.org/10.1590/S0100-83582007000100005>

Oliveira GM, Canteri MG, Saab OJGA (2026) Meta-analysis of scientific studies related to pesticide application techniques-air assistance and adjuvant addition. **Ciência Rural** 46:2122-2128.

<https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20151067>

Paap U, Krebs B, Steinruck H, Maier F (2022) Probing surface and interfacial tension of ionic liquids in vacuum with the pendant drop and sessile drop method. **International Journal of Molecular Sciences** 23:1-16.

<https://doi.org/10.3390/ijms232113158>

Pallavi G, Nivedita G, Vaishali B (2023). Comparative studies of allelopathic effect of composite plant extracts of *Alternanthera tenella* Colla. and *Euphorbia heterophylla* L. on *Triticum aestivum* L. **South Asian Journal of Experimental Biology** 13:366-372.

<https://doi.org/10.38150/sajeb>

Pelegri G, Souza AM, Ferreira PHU, Monteiro GG, Ferreira MC (2022) Air-assisted spraying and electrically charged droplets for Bemisia tabaci control in soybeans. **Pest Management Science** 78:4618-4627.

<https://doi.org/10.1002/ps.7082>

Pitelli RA (1987) Competição e controle das plantas daninhas em áreas agrícolas. Série Privitera S, Manetto G, Pascuzzi S, Pessina D, Cerruto E (2023) Drop Size Measurement Techniques for Agricultural Sprays: A State-of-The-Art Review. **Agronomy** 13:e678.

<https://doi.org/10.3390/agronomy13030678>

Polli EG, Alves GS, Moraes JG, Kruger GR (2022) Influence of surfactant-humectant adjuvants on physical properties, droplets size, and efficacy of glufosinate formulations. **Agrosystems, Geosciences & Environment** 2:1-14.

<https://doi.org/10.1002/agg2.20230>

Radicetti E, Mancinelli R. (2021) Sustainable weed control in the agro-ecosystems. **Sustainability** 13:e8639.

<https://doi.org/10.3390/SU13158639>

Riemens M, Sønderskov M, Moonen AC, Kudsk P (2022) An integrated weed management framework: a pan-European perspective. **European Journal of Agronomy** 133:e126443.

<https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126443>

Rojas-Sandoval J. (2022) ***Alternanthera philoxeroides* (alligator weed)**. CABI Compendium.

Santos EA, Fortini RM, Cardoso LCB, Zanuncio JC (2023) Climate change in brazilian agriculture: vulnerability and adaptation assessment. **International Journal of Environmental Science and Technology** 20:10713-10730.
<https://doi.org/10.1007/s13762-022-04730-7>

Singla RK, Dhir V, Madaan R, Kumar D, Bola SS, Bansal M, Kumar S, Dubey AK, Singla S, Shen B (2022) The genus *Alternanthera*: phytochemical and ethnopharmacological perspectives. **Frontiers in Pharmacology** 13:e769111.
<https://doi.org/13:769111.10.3389/fphar.2022.769111>

Soltani N, Dille JA, Burke IC, Burke IC, Everman WJ, VanGessel MJ, Davis VM, Sikkema PH (2016) Potential corn yield losses from weeds in North America. **Weed Technology** 30:979-984.
<https://doi:10.1614/WT-D-16-00046.1>

Sousa BT, Pereira AES, Fraceto LF, Oliveira HC, Dalazen G (2022) Post-emergence herbicidal activity of nanoatrazine against *Alternanthera tenella* Colla plants compared to other weed species. **Heliyon** 8:e09902.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09902>.

Tabatabaiepour SZ, Tahmasebi Z, Taab A, Rashidi-Monfared S (2023) Effect of redroot pigweed interference on antioxidant enzyme and light response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) depends on cultivars and growth stages. **Scientific Reports** 13:e4289.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-31466-2>

Vivian R (2009). **Competição intra e interespecífica no cultivo de soja e *Alternanthera tenella***. Tese (Doutorado em Agronomia - Fitotecnia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-15042009075649/publico/Rafael_Vivian.pdf.

Xue S, Xi X, Lan Z, Wen R, Ma X (2021) Longitudinal drift behaviors and spatial transport efficiency for spraying pesticide droplets. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 177:e121516.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121516>

Zeeshan M, Li H, Yousaf G, Ren H, Liu Y, Arshad M, Dou Z, Han X (2024) Effect of formulations and adjuvants on the properties of acetamiprid solution and droplet deposition characteristics sprayed by UAV. **Frontiers in Plant Science** 15:e1441193.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1441193>

Zhao R, Yu M, Sun Z, Li LJ, Guo XY, Xu Y, Wu XM (2023) Regulating droplet impact and wetting behaviors on hydrophobic leaves using a nonionic surfactant. **Journal of Colloid and Interface Science** 629:926-937.

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.08.179>

CÁPITULO 2 - CONTROLE DE APAGA-FOGO (*Alternanthera tenella*) POR HERBICIDA ASSOCIADO A ADJUVANTES

RESUMO: A planta daninha *Alternanthera tenella* é recorrente em áreas agrícolas, como em ambientes manejados com herbicidas pós-emergentes. Sua morfologia, com hábito prostrado e folhas pubescentes, dificulta a distribuição das gotas e o controle com esta modalidade de aplicação, resultando em baixa absorção foliar dos ingredientes ativos. O herbicida fomesafen é uma opção no controle de folhas largas, mas sua eficácia sobre *A. tenella* pode ser limitada se a cobertura não for suficiente e a distribuição for irregular. Nesse contexto, o uso de adjuvantes pode favorecer a qualidade de distribuição e o efeito do herbicida pois pode colaborar no ajuste do tamanho e da uniformidade das gotas, reduzir perdas por deriva e evaporação, melhorar a interação entre os produtos e o tecido vegetal e com aumento da absorção foliar. Assim, objetivou-se avaliar fatores relativos à qualidade da aplicação e o controle de apaga-fogo com o herbicida fomesafen, aplicado isoladamente e em mistura com adjuvantes. Foram conduzidos três experimentos em casa de vegetação, em delineamento inteiramente ao acaso para a caracterização das caldas e em blocos ao acaso para as avaliações biológicas. Foram analisadas variáveis físico-químicas das caldas (pH, tensão superficial, ângulo de contato), tamanho de gotas, cobertura e depósito superficial, controle da planta daninha aos 3, 7, 14, 21, 28 e 35 dias após a aplicação e redução da massa seca. Observou-se que a associação do herbicida fomesafen a adjuvantes modificou as propriedades físico-químicas das caldas fitossanitárias, refletindo em aumento da cobertura e do depósito de caldas, e no controle da apaga-fogo. Os adjuvantes reduziram a tensão superficial e o ângulo de contato das caldas, promoveram espalhamento das gotas e aumentaram a depósito sobre o alvo. Como consequência, as misturas proporcionaram maior controle e redução da massa seca da planta daninha em comparação ao herbicida aplicado sem adjuvantes.

Palavras-chave: espalhamento, caldas fitossanitárias, depósito, cobertura superficial.

CONTROL OF PARROT-LEAF (*Alternanthera tenella*) BY HERBICIDE ASSOCIATED WITH ADJUVANTS

ABSTRACT: The weed *Alternanthera tenella* is recurrent in agricultural areas, particularly in environments managed with post-emergence herbicides. Its morphology, characterized by a prostrate growth habit and pubescent leaves, hinders droplet distribution and impairs control using this type of application, resulting in poor foliar absorption of active ingredients. Fomesafen is a herbicide option for broadleaf weed control; however, its efficacy against *A. tenella* may be limited when spray coverage is insufficient or uneven. In this context, the use of adjuvants can enhance droplet distribution and herbicide performance by improving droplet size and uniformity, reducing losses due to drift and evaporation, and increasing interaction between the spray solution and plant tissue, thereby improving foliar absorption. This study aimed to evaluate application quality parameters and the control of *A. tenella* with fomesafen applied alone or in combination with adjuvants. Three greenhouse experiments were conducted: a completely randomized design was used for spray solution characterization, and a randomized block design was used for biological evaluations. Physicochemical properties of the spray mixtures (pH, surface tension, contact angle), droplet size, surface coverage and deposition, weed control at 3, 7, 14, 21, 28, and 35 days after application, and dry mass reduction were analyzed. The addition of adjuvants to fomesafen altered the physicochemical properties of the tank-mixtures, increasing coverage, deposition, and control of *A. tenella*. The adjuvants reduced surface tension and contact angle, enhanced droplet spreading, and increased deposition on the target. As a result, the mixtures provided greater weed control and dry mass reduction compared to fomesafen applied without adjuvants.

Keywords: spreading, tank-mixtures, deposition, surface coverage.

1. INTRODUÇÃO

O manejo de plantas daninhas é indispensável, pois essas plantas podem competir por água, luz, nutrientes e espaço, causando prejuízos à produção dos cultivos. A infestação por plantas daninhas pode comprometer significativamente o desenvolvimento das plantas cultivadas, aumentando os custos de produção e reduzindo a produtividade. O controle químico com herbicidas é amplamente adotado pela sua eficácia e praticidade. No entanto, a dependência de moléculas como o glifosato tem contribuído para a seleção de espécies tolerantes e o surgimento de biótipos resistentes, o que compromete o sucesso das aplicações (Mennan et al., 2021; Kumar e Rana, 2022).

Dentre as espécies de difícil controle, destaca-se a planta daninha conhecida como apaga-fogo (*Alternanthera tenella* Colla), amplamente distribuída em regiões tropicais e subtropicais, sendo comum em terrenos baldios, margens de estrada e áreas agrícolas (Sousa et al., 2022). Trata-se de uma espécie de crescimento vigoroso, adaptável a diferentes ambientes, que pode se comportar como planta daninha em diversas culturas, especialmente durante os períodos mais quentes e úmidos. A morfologia da apaga-fogo, com folhas pubescentes e hábito prostrado, dificulta a distribuição das gotas e a penetração e absorção de herbicidas, o que reduz a eficiência do controle químico (Canossa et al., 2007; Rojas-Sandoval, 2022). Essa espécie tem se tornado recorrente em áreas agrícolas manejadas com herbicidas pós-emergentes, exigindo abordagens mais eficientes de controle.

O fomesafen, herbicida inibidor da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX), pode ser uma alternativa ao glifosato para o controle de plantas daninhas de folhas largas. No entanto, resultados anteriores demonstraram que, quando aplicado isoladamente, o fomesafen apresenta baixa eficiência no controle da apaga-fogo, o que limita sua recomendação para essa espécie (Canossa et al., 2007; Rojas-Sandoval, 2022). Diante disso, a associação com adjuvantes tem sido proposta como estratégia para auxiliar na sua eficácia. Estudos já indicaram que misturas com adjuvantes podem

melhorar a absorção foliar, a cobertura da calda e, conseqüentemente, o efeito no controle de *A. tenella* (Macedo et al. 2020; Sousa et al., 2022).

Os adjuvantes possuem diversas funções quando adicionados à calda fitossanitária ou incorporados à formulação do produto fitossanitário, como a modificação das propriedades físico-químicas da calda aplicada, a redução da tensão superficial e do ângulo de contato, a alteração do tamanho de gotas e aumento do depósito sobre a superfície foliar (Ferreira et al., 2013; Santos et al., 2021; Zhao et al., 2023, Basílio et al., 2024). Tais características podem favorecer o espalhamento e a absorção do ingrediente ativo pela planta daninha, além de contribuir para a redução da deriva durante a aplicação (Santos et al., 2021; Jiang et al., 2024). A escolha adequada do adjuvante pode, portanto, ser uma ferramenta estratégica para colaborar com o controle, especialmente em situações em que a morfologia da planta e as condições ambientais desfavorecem a ação do herbicida.

Nesse contexto, o uso de adjuvantes pode favorecer a qualidade de distribuição e o efeito do herbicida, pois pode colaborar no ajuste do tamanho e da uniformidade das gotas, reduzir perdas por deriva e evaporação, melhorar a interação entre os produtos e o tecido vegetal e com aumento da absorção foliar, colaborando com o controle da planta daninha. Diante da importância do manejo eficaz da apaga-fogo e das evidências de que a associação entre herbicidas e adjuvantes pode melhorar a eficiência das aplicações, o objetivo foi avaliar fatores relativos à qualidade da aplicação e o controle de *Alternanthera tenella* com o herbicida fomesafen, aplicado isoladamente e em mistura com adjuvantes.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Departamento de Fitossanidade da UNESP, Campus de Jaboticabal, no Laboratório de Análise do Tamanho de Partículas (LAPAR) e Laboratório de Técnicas de Aplicação de Produtos Fitossanitários. Foram realizados três experimentos em casa de vegetação, como repetições, nos períodos de 2022 - 1º Semestre, 2022 – 2º Semestre e 2023 – 1º Semestre. As avaliações

compreenderam o controle da planta daninha apaga-fogo (*Alternanthera tenella*) em função da aplicação de herbicidas em associação com adjuvantes, além da caracterização físico-química das caldas herbicidas com e sem adjuvantes

2.1. Caracterização físico-química das caldas herbicida com e sem adjuvantes utilizadas no controle de apaga-fogo (*Alternanthera tenella*)

A caracterização das caldas fitossanitárias foi realizada com avaliações de pH, tensão superficial, ângulo de contato em superfície artificial e tamanho de gotas. Para essas avaliações as caldas foram preparadas com água destilada, sendo realizadas quatro repetições por tratamento com delineamento inteiramente ao acaso. As caldas herbicidas mais adjuvantes estão descritas a seguir: 1. herbicida fomesafen (Flex®, Syngenta Proteção de Cultivos Ltda); 2. fomesafen mais adjuvante polioxietileno alquilfenol éter (PAT), (Iharaguen S, Iharabras S.A. Indústrias Químicas); 3. fomesafen mais organosilicone (ORG), (Silwet L-77, Nomentive Performance Materials Indústria de silicones Ltda); 4. fomesafen mais óleo casca de laranja (OCL), (Wetcit Gold, Oro Agri Brasil Produtos para Agricultura Ltda); 5. fomesafen mais lecitina de soja e ácido propiônico (LSA), (LI 700, De Sangosse Agroquímica Ltda), 6. fomesafen mais óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio (OCP), (Oran, Valett Grow Agro Produtos Agrícolas Ltda) e 7. fomesafen mais organosilicone e ácido fosfórico (OAF), (Poliflex, Grupo Vittia Insumos e Tecnologia para Agricultura Ltda) (Tabela 1).

O fomesafen é um herbicida seletivo de ação de contato, indicado para o controle das plantas daninhas de folhas largas, em pré-emergência para a cultura do algodão e pós-emergência para as culturas de feijão e soja. Os adjuvantes utilizados foram selecionados no mercado a partir de suas utilizações com herbicidas pós-emergentes e dosados conforme solicitação na bula do herbicida, no qual pede uso na dosagem de 0,2% v v⁻¹ (200 mL para cada 100 L de calda). Além disso, foi utilizada a dosagem máxima recomendada para o herbicida (1 L ha⁻¹ de fomesafen). O volume de calda utilizado no experimento foi de 100 L ha⁻¹.

Tabela 1. Descrição das caldas fitossanitárias em função da associação de herbicidas e adjuvantes.

Caldas fitossanitárias			
Herbicida	Dosagem	Adjuvante	Dosagem
Fomesafen	1 L ha ⁻¹ (100 L ha ⁻¹)	1. Sem adjuvante	200 mL ha ⁻¹ (100 L ha ⁻¹)
		2. Polioxietileno alquilfenol éter (PAT)	
		3. Organosilicone (ORG)	
		4. Óleo de casca de laranja (OCL)	
		5. Lecitina de soja e ácido propiônico (LSA)	
		6. Óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio (OCP)	
		7. Organosilicone e ácido fosfórico (OAF)	

Para a caracterização química das caldas fitossanitárias, foi realizada a avaliação do potencial hidrogeniônico (pH) com o auxílio de um peagâmetro de bancada (Quimis® Q400RS). A medição foi conduzida por meio da inserção direta do eletrodo nas caldas previamente preparadas em provetas de 250 mL após serem pulverizadas com o sistema que foi utilizado para aplicação do experimento, com sistema de CO₂ para pressurização.

Para as avaliações físicas de tensão superficial e ângulo de contato foi utilizado um tensiômetro automático, modelo OCA-15Plus da Dataphysics Germany, equipado com câmera digital de alta velocidade e software SCA20® para automatização e processamento das imagens obtidas em um computador de mesa. Neste equipamento, a tensão é determinada pelo método da gota pendente, no qual o cálculo é realizado com base na equação de Yang-Laplace, em função da deformação das gotas emitidas em cada amostra (Ferreira et al., 2013), sendo registrada a tensão superficial da gota a cada segundo no decorrer de 60 segundos.

Para a avaliação do ângulo de contato as gotas provenientes das caldas fitossanitárias foram depositadas sobre uma superfície artificial padrão (Parafilm®). Lâminas com dimensões de 1 x 10 cm da superfície artificial foram fixadas em um suporte e, a partir do momento do depósito da gota no Parafilm® o ângulo de contato foi registrado a cada segundo no decorrer de 60 segundos. Para efeito de utilização dos dados obtidos das caldas e comparação entre os tratamentos foi padronizado como valor útil de tensão

e ângulo aos 10 segundos, uma vez que, a partir desse tempo os valores se comportaram de maneira estável.

A determinação do tamanho de gotas foi realizada com avaliações de diâmetro mediano volumétrico (DMV), coeficiente de uniformidade de gotas (Span) e porcentagem do volume de gotas menores que 100 µm (V100). A ponta de pulverização utilizada para a análise foi a modelo ST 135025 da MagnoJet feita de cerâmica com pré-orifício, além disso, com produção de jato plano com ângulo de abertura de 135° com jato inclinado em 30°. Esta ponta é recomendada para aplicações de herbicidas pós-emergentes sistêmicos e de contato, como é caso do fomesafen, por isso foi utilizada neste experimento.

O diâmetro de gotas produzidas pelas caldas fitossanitárias foi determinado em analisador de tamanho de partículas Mastersizer S® (Malvern Panalytical Ltda, Malvern, Reino Unido), versão 2.19, pelo método de difração à laser. Neste equipamento, uma unidade óptica determina o diâmetro das gotas dentro do espectro pulverizado, por meio do desvio de trajetória sofrido pelo laser ao atingi-las (Calore et al., 2015). O acionamento e manutenção da pressão constante de 43,51 PSI (3 bar) para a pulverização foram obtidos via ar comprimido. O jato pulverizado atravessa o feixe de luz laser e é movido transversalmente por um motor realizando uma amostragem completa de todo o jato pulverizado.

O diâmetro mediano de gotas em que 50% do volume pulverizado está abaixo do valor medido foi analisado e representado por valores de DMV, que é o tamanho da gota dentro do espectro pulverizado que divide o volume em duas partes iguais. As gotas com maiores potenciais de deriva foram analisadas considerando a porcentagem do volume de gotas menores que 100 µm (V100). Além disso, foi analisado o coeficiente de uniformidade do espectro de gotas (Span), que é um valor que representa a uniformidade do espectro de gotas e foi analisado considerando a seguinte fórmula:

$$SPAN = (DV09 - DV01)/DV05,$$

onde DV05 é o DMV, DV09 é o diâmetro de gotas em que 90% do volume pulverizado está abaixo do valor e DV01 é o diâmetro de gotas em que 10% do volume pulverizado está abaixo do valor. Além disso, foi realizada a correlação entre os valores

de uniformidade gotas (Span) e de porcentual do volume de gotas sujeitas à deriva (V100).

2.2. Avaliação da aplicação das caldas herbicida com e sem adjuvantes utilizadas no controle de apaga-fogo (*Alternanthera tenella*)

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, localizada a 21°14'23" de latitude Sul, 48°17'20" de longitude Oeste e 583 m de altitude, com o objetivo de avaliar o controle da planta daninha apaga-fogo em função da associação de herbicidas com adjuvantes. O primeiro experimento foi realizado no 1º semestre de 2022, nos meses de março e abril; o segundo, no 2º semestre de 2022, em outubro e novembro; e o terceiro, no 1º semestre de 2023, durante os meses de janeiro e fevereiro.

Para obtenção das plantas de apaga-fogo, foram utilizadas sementes de *Alternanthera tenella*, providas da empresa Agro Cosmos Ltda., Mogi Mirim/SP. Foram utilizados vasos de polietileno com 1,5 L de capacidade e como substrato a mistura de terra, composto orgânico e areia na proporção de 3:1:1, respectivamente. Para cada vaso de plantas daninhas foram semeadas 8 sementes e após 20 dias de emergência foi realizado desbaste, mantendo-se 3 plantas por vaso. O delineamento experimental foi em blocos ao caso contendo os mesmos 7 tratamentos descritos para caracterização das caldas fitossanitárias, incluindo um tratamento sem aplicação (testemunha não tratada). Cada tratamento foi constituído de 6 blocos, sendo 1 vaso por bloco.

As pulverizações das caldas para controle de apaga-fogo foram realizadas quando as plantas tinham de 2 a 4 folhas, portanto, em pós emergência inicial das plantas daninhas. Para isso foi utilizado um pulverizador montado (quadriciclo Honda® 4x4 Fourtrax Fuel Injection), pressurizado com CO₂, equipado com barra contendo quatro pontas de pulverização. O volume de aplicação foi de 100 L ha⁻¹, proporcionado por ponta de pulverização modelo ST-135025 da Magnojet com pressão de 43,51 PSI e velocidade de 12 km h⁻¹. As aplicações foram realizadas entre 8 e 9 horas da manhã, sob as seguintes condições meteorológicas: na primeira época, temperatura de 27 °C ± 1,

umidade relativa de $70\% \pm 2$ e velocidade do vento de $2 \text{ km h}^{-1} \pm 1$; na segunda, $27^\circ\text{C} \pm 1$, $71\% \pm 2$ e $2 \text{ km h}^{-1} \pm 1$; e na terceira, $25^\circ\text{C} \pm 1$, $76\% \pm 2$ e $2 \text{ km h}^{-1} \pm 1$, respectivamente.

Durante a condução dos experimentos em casa de vegetação, foram realizadas avaliações de cobertura superficial e depósito da calda fitossanitária, imediatamente após a aplicação dos tratamentos. Adicionalmente, efetuaram-se avaliações do controle da planta daninha apaga-fogo e da massa seca das plantas.

Papéis hidrossensíveis (76 x 26 mm Syngenta, SYN7626) para determinação da cobertura superficial, e folhas de acetato (50 x 25 mm, PV CRISTAL – 0,15 μm) para determinação do depósito de calda, foram predispostos nos vasos de apaga-fogo, sendo fixados em dois pontos de cada parcela experimental, um de cada lado do vaso. Logo após as aplicações, os papéis hidrossensíveis foram levados ao laboratório para serem digitalizados por escâner de mesa, possibilitando a quantificação do percentual de área coberta pelas gotas em relação a área total do papel com auxílio do software Gotas (Chaim et al., 2006).

Os acetatos coletores representaram o que ocorreu com o depósito de calda nas folhas. Para isso foi adicionado o marcador sulfato de manganês (31% Mn) às caldas de pulverização na concentração de $6,0 \text{ g L}^{-1}$. A quantificação de produto depositado foi realizada pelo método descrito por Oliveira e Machado-Neto (2003), sendo utilizado um espectrofotômetro de absorção atômica (Thermo científico, iCE 3000 Series). As concentrações obtidas nas leituras do espectrofotômetro foram correlacionadas às áreas do acetato, resultando na quantidade de Mn^{+2} expressa em $\mu\text{L cm}^{-2}$.

Com o objetivo de quantificar exatamente o quanto foi recuperado de Mn^{2+} depositado sobre a folha de acetato transparente, foi realizado um teste de recuperação do íon previamente à aplicação nos vasos. Os percentuais de recuperação observados em laboratório foram de 72% (fomesafen), 87% (fomesafen + PAT), 76% (fomesafen + ORG), 87% (fomesafen + OCL), 88% (fomesafen + LSA), 86% (fomesafen + OCP) e 90% (fomesafen + OAF). Portanto, os valores de depósito da calda fitossanitária foram corrigidos para 100%, com o intuito de permitir a comparação entre os tratamentos.

As avaliações dos tratamentos no controle das plantas daninhas foram realizadas aos 3, 7, 14, 21, 28, e 35 dias após a aplicação (DAA) dos tratamentos. As notas de

controle das plantas foram atribuídas com base na escala em porcentagem de intoxicação proposta por Frans (1986), na qual zero representa ausência total de intoxicação e 100% a morte total das plantas daninhas, com base na testemunha. A massa seca da apaga-fogo foi determinada aos 35 dias após a aplicação, onde as plantas restantes foram cortadas rente ao substrato do vaso, embaladas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por 72 horas. Após esse processo foi determinada a massa seca da parte aérea por pesagem em balança de precisão (Marchi et al., 2013).

2.3. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de normalidade dos erros (Shapiro-Wilk) e de homogeneidade das variâncias (Levene), ambos com nível de significância de 5%. As variáveis relacionadas à caracterização das caldas fitossanitárias (tensão superficial, ângulo de contato e tamanho de gotas) foram analisadas em delineamento inteiramente ao acaso. Os dados de cobertura superficial, depósito da calda, controle e massa seca da planta daninha apaga-fogo foram avaliados em delineamento em blocos ao acaso. Para todas as variáveis, foi realizada análise de variância (teste F) e, quando significativo, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As análises estatísticas foram conduzidas por meio da linguagem de programação Python, com o auxílio dos pacotes `scipy`, `statsmodels` e `pingouin` (Python Software Foundation, 2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização físico-química das caldas herbicida com e sem adjuvantes utilizadas no controle de apaga-fogo (*Alternanthera tenella*)

Os valores de pH da calda herbicida contendo fomesafen variaram entre os tratamentos com adjuvantes de levemente à moderadamente ácidos (Figura 1). Dentre os tratamentos avaliados, o adjuvante OCL resultou no maior valor de pH, atingindo 6,01. Em contraste, os adjuvantes LSA e OAF resultaram nos menores valores de pH, sendo 4,59 e 4,44, respectivamente, com o adjuvante LSA promovendo pH maior do que o OAF. Os adjuvantes ORG e OCP proporcionaram valores de pH em torno de 5,5, sem diferenças entre si. O tratamento contendo apenas o herbicida, sem a adição de adjuvante, e aquele com o adjuvante PAT resultaram em pH menor que os tratamentos com ORG e OCP, com valores de 5,09 e 5,31, respectivamente. Ainda assim, o uso do adjuvante PAT resultou em pH maior em relação ao herbicida isolado, embora menos pronunciado que os demais adjuvantes.

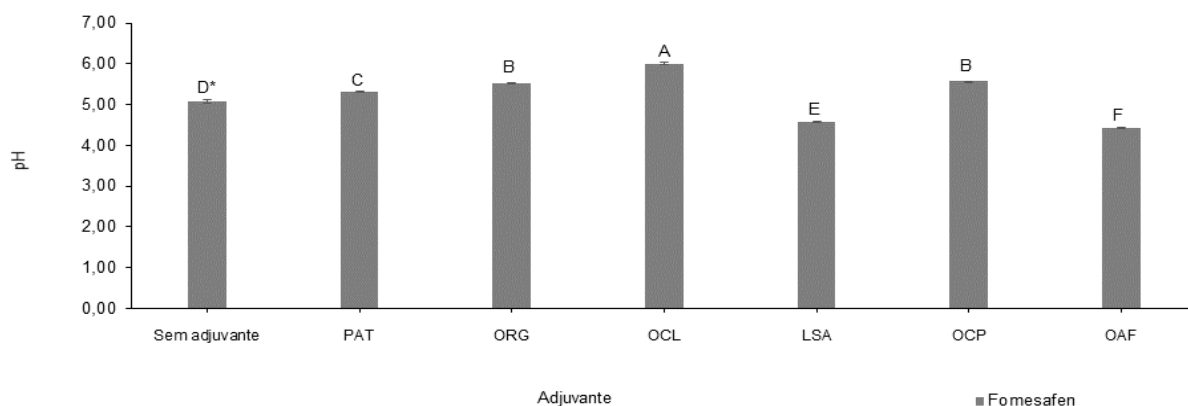


Figura 1. pH das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes.

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

O valor de pH observado para o tratamento com fomesafen isolado (5,09) indica o caráter levemente ácido da formulação do herbicida, embora menos acentuado do que seu pKa. O fomesafen, segundo a Pesticide Properties DataBase (PPDB) (2025), possui pKa em torno de 2,83, o que caracteriza o composto como um ácido fraco com tendência à liberação de prótons que, em soluções com pH acima do pKa tende a perder prótons, ficando predominantemente na forma ionizada (Das et al., 2020). No entanto, o pH final de uma calda não depende apenas do pKa do ingrediente ativo, mas também da composição da formulação comercial. O produto à base de fomesafen contém proporção de ingredientes inertes de 87% da composição, que podem incluir substâncias tamponantes, adequando o pH final da calda para a faixa ideal do produto. Esses componentes inertes, ao estabilizarem a solução, limitam a acidificação que seria esperada para um composto com esse pKa, resultando em um pH moderado em torno de 5 (Silva et al., 2022; Lin e Wang 2025).

Além disso, o uso de dióxido de carbono (CO_2) como agente de pressurização durante a pressurização das caldas pode ter contribuído para a proximidade em alguns valores obtidos entre os tratamentos. A dissolução do CO_2 na água leva à formação de

ácido carbônico (H_2CO_3), que se dissocia e libera íons H^+ , promovendo acidificação. No entanto, esse efeito é autorregulado e tende a estabilizar o pH da solução entre 4,8 e 5,2, conforme descrito por Xue et al. (2024), principalmente quando os adjuvantes não apresentam forte caráter ácido ou alcalino. Assim, a combinação da formulação comercial do herbicida com componentes inertes e o efeito estabilizador do CO_2 contribui para que o pH da calda contendo apenas fomesafen não seja tão baixo quanto o pKa isolado sugeriria, e para que parte das variações entre alguns tratamentos com adjuvantes seja reduzida.

Além disso, as variações entre os tratamentos podem ser explicadas pelas diferenças na composição química dos adjuvantes utilizados. Adjuvantes contendo ácidos orgânicos, como o ácido fosfórico (presente no OAF) e o ácido propiônico (presente no LSA), possuem capacidade acidificante, justificando os pHs mais baixos observados (Gruppi et al., 2023). A elevação observada no tratamento com OCL pode estar relacionada à presença de componentes inertes na formulação comercial, já que os principais compostos do óleo cítrico, como os monoterpenos oxigenados limoneno e linalol, não promovem liberação de prótons nem possuem atividade tampão, não havendo evidências de que participem ativamente da regulação do pH (Pagliaro et al., 2023).

Adjuvantes à base de tensoativos, como o PAT (polioxietileno alquilfenol éter) e o ORG (organosilicone), promoveram um aumento de aproximadamente 0,6 unidades no pH da calda em comparação ao fomesafen isolado, cujo pH foi 4,8. Esse incremento indica que ambos os adjuvantes contribuíram para aumentar o pH da mistura, sem alterar seu caráter ácido. Tensoativos não iônicos, como o PAT, são amplamente utilizados por sua capacidade de reduzir a tensão superficial sem modificar significativamente o pH das soluções (Zhao et al., 2023). Isso também se aplica aos organosiliconados, como o ORG, que geralmente não contêm agentes acidificantes em suas formulações.

O pH da calda contendo o adjuvante OCP foi superior ao da calda com fomesafen isolado. Esse comportamento pode ser atribuído ao saponáceo de potássio presente no OCP, que é conhecido por apresentar pH mais elevado em solução, contribuindo para o aumento do pH final da calda (Ma et al., 2025). Por outro lado, os óleos essenciais cítricos, presentes na formulação, não possuem características que influenciem

diretamente o pH, uma vez que seus principais compostos são quimicamente neutros em solução aquosa (Pagliaro et al., 2023).

O efeito do dióxido de carbono, portanto, nas caldas analisadas organizou os valores dentro de uma faixa considerada mais propícia para o funcionamento do herbicida fomesafen, implicando numa padronização do pH dos tratamentos avaliados. Sendo assim, a variação observada relativamente pequena e dentro da faixa de calda leve a moderadamente ácida é uma combinação da ação das formulações e da reação de acidificação resultante da interação da água na calda e do CO₂ (Matuo e Matuo, 1995). No caso de experimentação específica para a avaliação do efeito do pH, verifica-se que o uso do CO₂ para a pressurização da calda não é a opção mais adequada.

Para a tensão superficial, o tratamento com fomesafen sem adjuvante proporcionou o maior valor de 71,07 mN m⁻¹. Os adjuvantes em mistura com o fomesafen foram capazes de reduzir a tensão superficial do herbicida. O tratamento com OAF proporcionou o maior valor entre os adjuvantes (45,21 mN m⁻¹), seguido por LSA (37,87 mN m⁻¹). Os adjuvantes PAT, OCL e OCP produziram valores semelhantes entre si (33,74, 34,08 e 34,47 mN m⁻¹, respectivamente). O menor valor foi observado no tratamento com ORG, com 22,20 mN m⁻¹ (Figura 2 A).

O maior ângulo de contato analisado em superfície artificial foi no tratamento com fomesafen sem adjuvante, com valor de 111,63°. Os adjuvantes reduziram o ângulo de contato em relação ao herbicida isolado, indicando aumento da espalhabilidade da gota. Entre os adjuvantes, o OAF proporcionou o maior ângulo (88,10°), seguido por LSA (79,94°), comportamento semelhante ao observado para a tensão superficial. Os tratamentos com os adjuvantes OCP (68,11°) e OCL (67,30°) demonstraram valores semelhantes entre si. O adjuvante OCL também foi estatisticamente semelhante a PAT (65,67°), embora OCP e PAT tenham diferença entre si. O menor ângulo foi observado com o ORG, com 1,00° (Figura 2 B).

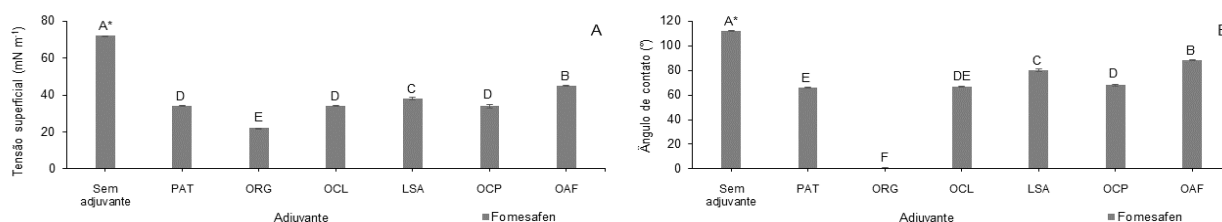


Figura 2. Tensão superficial (A) e ângulo de contato (B) das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes.

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

A água é o principal componente de diluição dos produtos fitossanitários em um tanque de pulverização e da calda fitossanitária aplicada, chegando a representar mais de 90% do volume total do tanque nas aplicações em campo. No entanto, a água possui elevada tensão superficial, uma característica física que resulta em um ângulo de contato elevado da com calda com o alvo. Isso implica em um espalhamento reduzido das gotas que carregam os ingredientes ativos quando depositadas sobre a planta daninha de interesse de controle fitossanitário (Paap et al., 2022).

Os valores de tensão superficial e ângulo de contato da água sobre superfície artificial de Parafilm são, aproximadamente, 70 mN m^{-1} e 115° , respectivamente (Pelegriani et al., 2022). De forma semelhante, o fomesafen sem adjuvantes resultou em $71,07 \text{ mN m}^{-1}$ de tensão superficial e $111,63^\circ$ de ângulo de contato, evidenciando sua limitada capacidade de espalhamento sobre superfícies hidrofóbicas. A adição de adjuvantes à calda contendo o herbicida, no entanto, resultou em reduções significativas desses parâmetros, comprovando a eficácia dos produtos na modificação das propriedades físico-químicas da solução.

O organosiliconado (ORG) resultou no melhor desempenho entre os tratamentos, reduzindo a tensão para $22,20 \text{ mN m}^{-1}$ e o ângulo para $1,00^\circ$, o que indica praticamente completo espalhamento da gota sobre a superfície. Esse comportamento é característico de adjuvantes super espalhantes à base de organosiliconados, cuja formulação contém

alta concentração de surfactantes com elevada capacidade de redução da tensão superficial da água (Zhao et al., 2023). Como consequência, o uso desses adjuvantes em mistura com fomesafen pode melhorar o espalhamento das gotas sobre a superfície foliar e favorecer a absorção dos ingredientes ativos (Paap et al., 2022).

Além do ORG, outros adjuvantes promoveram reduções na tensão superficial e no ângulo de contato quando em mistura com o fomesafen. O PAT, por exemplo, contém surfactantes espalhantes não iônicos em sua formulação, o que contribui para melhorar o espalhamento da calda, ainda que sua principal função esteja relacionada à emulsificação (Zhao et al., 2023; An et al., 2024). Essa característica como emulsificante pode ter contribuído para seu efeito mais moderado no espalhamento, quando comparado ao ORG.

O OCL, derivado de óleo essencial de casca de laranja, proporcionou desempenho semelhante ao do PAT. Embora seja uma formulação à base de óleo, estudos demonstraram que adjuvantes cítricos comerciais, compostos por óleo de laranja e surfactantes, podem reduzir a tensão superficial em mais de 50% em comparação com a mesma calda fitossanitária sem adjuvante. Por exemplo, o estudo de Xu et al. (2023) mostrou diminuição de 55,7%, reduzindo a tensão de $67,4 \text{ mN m}^{-1}$ para $29,8 \text{ mN m}^{-1}$ em calda inseticida contendo acetamiprido. Esses resultados mostram que os surfactantes incluídos na formulação do OCL são eficazes na quebra da tensão superficial, mesmo em composições que apresentem óleo.

A tensão superficial do fomesafen em mistura com água foi registrada em $59,35 \text{ mN m}^{-1}$, conforme dados de Cunha et al. (2017), valor inferior ao observado neste experimento. Essa diferença pode estar relacionada a variações na formulação comercial ou nos lotes utilizados. A lecitina, reconhecida na literatura por sua capacidade de alterar a tensão superficial e favorecer o espalhamento sobre superfícies hidrofóbicas, compõe o adjuvante LSA junto ao ácido propiônico (Flores et al., 2021; Xia et al., 2024). Quando utilizados em conjunto com o fomesafen, observou-se redução na tensão superficial, atingindo $36,72 \text{ mN m}^{-1}$ (Cunha et al., 2017). Resultado semelhante foi obtido neste estudo, com valor de $37,29 \text{ mN m}^{-1}$, o que reforça a eficácia do adjuvante na modificação das propriedades físico-químicas da calda fitossanitária.

Por outro lado, o OAF resultou em desempenho menos expressivo em comparação aos demais adjuvantes. Embora contenha compostos organosiliconados em sua formulação, a presença de agentes antiespumantes e de ácido fosfórico pode ter interferido na atuação dos surfactantes, reduzindo sua eficácia na diminuição da tensão superficial e, conseqüentemente, no espalhamento da calda (Raykundaliya et al., 2024). Ainda assim, o OAF promoveu redução significativa da tensão e do ângulo de contato em relação ao herbicida isolado, evidenciando que mesmo os adjuvantes com menor efeito comparativo contribuem para a modificação das propriedades físico-químicas da calda.

Esses resultados demonstram que a escolha do adjuvante influencia diretamente o comportamento físico da calda fitossanitária. Adjuvantes com maior eficiência na redução da tensão superficial e do ângulo de contato tendem a promover maior espalhamento da calda sobre as folhas, favorecendo a cobertura do alvo. Esse efeito pode contribuir para melhorar a absorção do ingrediente ativo pelas plantas daninhas, favorecendo seu potencial efeito e eficácia do controle químico (Santos et al., 2021). A aplicação desses dados na seleção de adjuvantes pode auxiliar no desempenho de herbicidas pós-emergentes como o fomesafen.

A análise do tamanho de gotas, com base no diâmetro mediano volumétrico (DMV), coeficiente de uniformidade (Span) e porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) evidenciou diferenças entre os tratamentos (Figura 3). Os valores de DMV variaram de 250,5 a 366,1 μm (Figura 3 A). Os tratamentos que resultaram nos maiores valores e não diferiram entre si foram aqueles com os adjuvantes OAF (366,1 μm), OCP (360,7 μm), PAT (336,2 μm), LSA (329,1 μm) e fomesafen sem adjuvante (330,1 μm). Esses resultados indicam a formação de gotas maiores nessas formulações. Por outro lado, os menores valores de DMV foram observados nos tratamentos com ORG (261,8 μm) e OCL (250,5 μm), os quais diferiram dos demais e foram caracterizados pela predominância de gotas menores.

Os valores do coeficiente de uniformidade (Span) variaram de 1,66 a 2,26 entre os tratamentos (Figura 3 B). O maior valor foi observado no tratamento com ORG (2,26), indicando maior heterogeneidade no espectro de gotas. Os menores valores foram nas misturas com LSA (1,66) e OAF (1,66), caracterizando uma distribuição mais uniforme

do tamanho de gotas. Os demais tratamentos resultaram em valores intermediários, não diferindo nem dos tratamentos com maiores valores e nem daqueles com menores valores. Esses tratamentos intermediários foram o fomesafen sem adjuvante (2,19), PAT (1,93), OCL (1,81) e OCP (2,16).

Os valores da porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) variaram de 9,14% a 15,5% (Figura 3 C). O maior valor foi observado no tratamento com ORG (15,5%, indicando maior porcentagem de gotas com potencial de deriva. Os menores valores foram observados nas misturas com LSA (9,14%), OCP (9,73%), PAT (9,96%) e OAF (10,10%), que resultam em menor suscetibilidade à deriva. Já os tratamentos com fomesafen isolado (12,02%) e OCL (12,00%) não diferiram nem do tratamento com maior valor, nem dos tratamentos com os menores valores, ocupando assim uma posição intermediária.

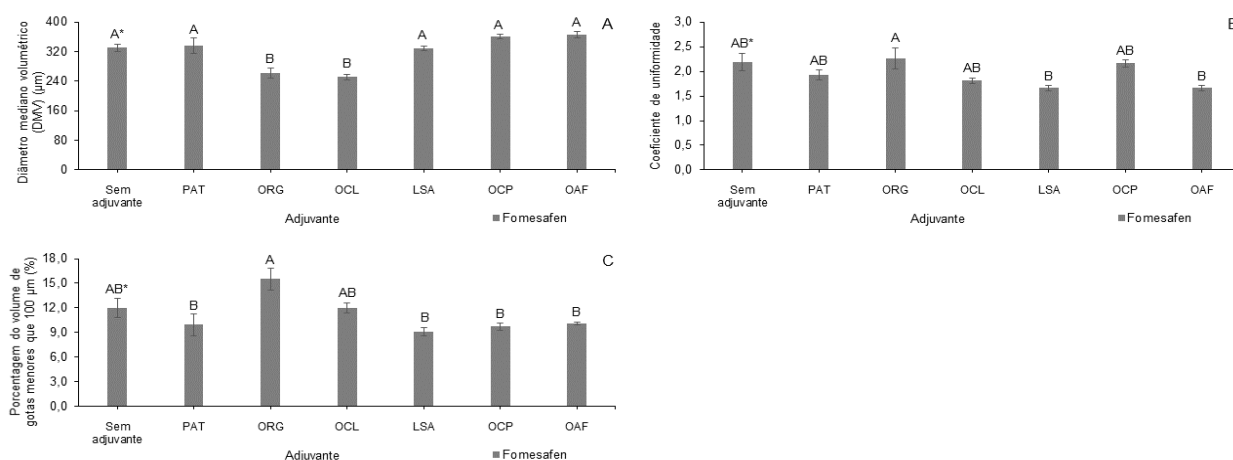


Figura 3. Diâmetro mediano volumétrico (A), coeficiente de uniformidade de gotas (B) e porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (C) das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes.

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

A adição de adjuvantes aos herbicidas é uma prática amplamente adotada para auxiliar a eficácia das aplicações, podendo modificar parâmetros físico-químicos das caldas e influenciar diretamente na dinâmica das gotas durante a pulverização (Abdollahdokht et al., 2022). No presente estudo, a avaliação do diâmetro mediano volumétrico, da uniformidade das gotas e da porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm permitiu observar efeitos variados da adição dos adjuvantes ao herbicida fomesafen.

O tamanho de gotas é um dos principais fatores que influenciam a eficiência de aplicações fitossanitárias, principalmente para herbicidas de contato, como o fomesafen, que demandam boa cobertura foliar para atuação eficaz. As misturas avaliadas produziram gotas com DMV entre 250,5 e 366,1 μm , o que, correspondentes às faixas de gotas médias a grossas, compatíveis com as exigências técnicas para herbicidas de contato (ASABE, 2009; Abdollahdokht et al., 2022; Mendes et al., 2022).

Os adjuvantes OCP (óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio) e OAF (organosilicone e ácido fosfórico) proporcionaram os maiores valores de DMV, superando inclusive o herbicida isolado, resultados atribuídos às suas formulações e interações com o herbicida. O OCP, por conter óleo em sua composição, atua na redução da turbulência na câmara da ponta de pulverização durante a formação das gotas, o que aumenta a espessura da lâmina líquida e, conseqüentemente, o tamanho das gotas. Já o OAF possui agente espessante, que eleva a viscosidade da calda fitossanitária; quanto mais viscosa a calda, maior tende a ser o tamanho das gotas formadas (Yi et al., 2022). Por outro lado, os tratamentos com os adjuvantes ORG (organosilicone) e OCL (óleo de casca de laranja) resultaram em menores valores de DMV, estando associados à formação de gotas menores.

A uniformidade do espectro de gotas, avaliada por meio do Span, foi influenciada pelos adjuvantes, sendo que valores menores indicam caldas mais homogêneas em relação ao tamanho das gotas (Abdollahdokht et al., 2022). Os menores valores de Span foram observados com os adjuvantes LSA (lecitina de soja e ácido propiônico) e OAF, indicando maior uniformidade no espectro de gotas, o que é desejável para garantir uma aplicação mais precisa e eficiente. Por outro lado, o adjuvante ORG proporcionou o maior

valor de Span, refletindo maior heterogeneidade, ou seja, um maior volume de gotas com tamanhos variados na pulverização.

Quanto à porcentagem de gotas menores que 100 μm (V100), parâmetro diretamente ligado ao potencial de deriva, os menores valores foram observados com LSA, OCP, PAT e OAF, demonstrando a capacidade desses adjuvantes de reduzir a porcentagem de gotas suscetíveis à deriva, em comparação com o herbicida sem o uso de adjuvantes (Szwajaczak et al., 2023). O maior valor foi verificado no tratamento com ORG, indicando maior risco de deriva, fato coerente com seu menor DMV e maior Span.

Esses resultados estão em consonância com estudos anteriores que demonstram que os parâmetros de pulverização, como tamanho de gotas, podem responder de forma distinta à adição de adjuvantes, dependendo não apenas do tipo de adjuvante, mas da formulação comercial do herbicida (Santos et al., 2021; Xu et al., 2023; Zhao et al., 2023). Em um estudo conduzido com o herbicida glufosinato de amônio, verificou-se que a adição de um mesmo surfactante resultou em efeitos contrários quando combinado com diferentes marcas comerciais do herbicida. Com o produto Liberty®, o adjuvante reduziu o DMV e aumentou a proporção de gotas finas, elevando o risco de deriva; já com o Interline®, o mesmo surfactante promoveu o aumento do DMV, maior uniformidade e redução das gotas menores que 100 μm (Polli et al., 2022). Isso evidencia que as respostas da calda não dependem exclusivamente do adjuvante isolado, mas da interação específica entre os componentes da formulação do herbicida e do adjuvante, o que pode alterar propriedades como tensão superficial, viscosidade e estabilidade da mistura.

Em um estudo voltado para o controle de *Amaranthus palmeri*, foi avaliado o uso do herbicida acifluorfen e o impacto do tamanho de gotas na eficácia da aplicação. Os autores concluíram que gotas finas, com aproximadamente 150 μm , proporcionaram o controle máximo da planta daninha, enquanto gotas médias (cerca de 340 μm) ainda mantiveram uma eficácia de controle de 90%, sugerindo que tamanhos de gotas maiores podem ser eficazes sem comprometer o controle, além de contribuírem para a redução do risco de deriva (Franca et al., 2020). De forma semelhante, no presente estudo, observou-se que as misturas de fomesafen com os adjuvantes LSA e OAF promoveram

maior uniformidade no espectro de gotas e redução de gotas sujeitas à deriva mantendo, contudo, o tamanho de gotas compatível com as exigências de aplicação para herbicidas de contato (Mendes et al., 2022).

3.2. Avaliação da aplicação das caldas herbicida com e sem adjuvantes utilizadas no controle de apaga-fogo (*Alternanthera tenella*)

A avaliação da cobertura superficial em papel hidrossensível resultou em diferenças entre os tratamentos ao longo das três épocas de aplicação (Figura 4). Na primeira época de aplicação (Figura 4 A), os valores de cobertura variaram de 26,26% (fomesafen isolado) a 53,95% (ORG). O tratamento com ORG se destacou dos demais, com a maior cobertura. Os adjuvantes OCP (35,30%), PAT (32,99%), OCL (32,65%) e OAF (32,56%) formaram um grupo intermediário, enquanto LSA (30,83%) e o fomesafen isolado proporcionaram os menores valores, sendo que o LSA não diferiu dos adjuvantes do grupo intermediário.

Na segunda época de aplicação (Figura 4 B), os maiores valores de cobertura superficial foram observados com os adjuvantes ORG (47,66%) e PAT (39,86%). A mistura com OCL (36,16%) resultou em cobertura inferior à de ORG, mas não diferiu de PAT. Os tratamentos com LSA (30,21%) e fomesafen isolado (30,21%) resultaram em valores mais baixos de cobertura, sem diferença em relação a OCL, OAF (27,31%) e OCP (24,29%). Esses últimos dois adjuvantes, por sua vez, compartilharam os menores valores de cobertura superficial, juntamente com LSA e o herbicida isolado.

Na terceira época de aplicação (Figura 4 C), os maiores valores de cobertura superficial foram observados com os adjuvantes OCL (33,98%) e ORG (33,88%), que não diferiram entre si e proporcionaram desempenho superior aos demais. O tratamento com LSA (28,25%) não diferiu em relação aos tratamentos com OCL e ORG. As misturas com PAT (26,79%), OAF (25,55%) e OCP (22,70%) não diferiram de LSA. Já o fomesafen isolado (19,34%) não diferiu dos tratamentos com OAF e OCP.

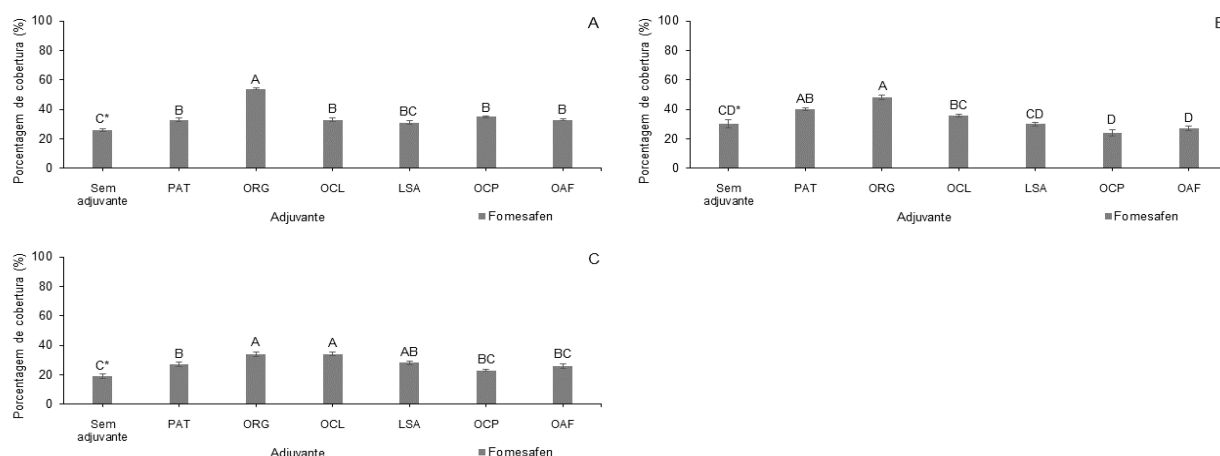


Figura 4. Porcentagem de cobertura superficial em função das aplicações das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes, avaliadas na primeira (A), segunda (B) e terceira época (C).

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

Para compreender os fatores associados às diferenças de cobertura superficial observadas entre os tratamentos, foi realizada a análise do ângulo de contato das caldas sobre papel hidrossensível. Os resultados demonstraram diferenças entre os tratamentos (Figura 5).

O maior valor foi observado no fomesafen isolado ($76,56^\circ$), indicando menor espalhamento da gota sobre a superfície. Em seguida, o adjuvante LSA ($67,14^\circ$) resultou em valor inferior ao do herbicida isolado. OAF ($65,40^\circ$) não diferiu de LSA e de PAT ($63,17^\circ$). Este, por sua vez, foi igual a OCP ($60,84^\circ$). O adjuvante OCL ($51,56^\circ$) resultou em menor valor em relação aos anteriores. Por fim, o menor ângulo de contato foi registrado com o adjuvante ORG ($17,89^\circ$), refletindo o maior espalhamento entre os tratamentos.

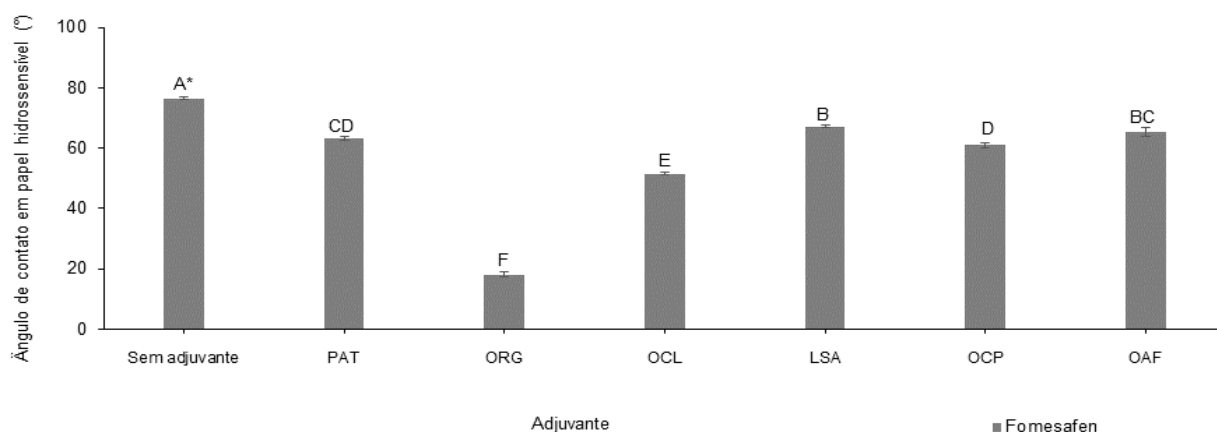


Figura 5. Ângulo de contato das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes, em papel hidrossensível.

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

A avaliação da cobertura superficial com papéis hidrossensíveis, associada às características físico-químicas das caldas, demonstrou que os adjuvantes influenciam o comportamento das gotas sobre o alvo pulverizado. O adjuvante organosiliconado (ORG) destacou-se por promover os maiores valores de cobertura em duas das três épocas de aplicação, resultado consistente com seu menor ângulo de contato, baixa tensão superficial e valor reduzido de DMV. Essas características favoreceram o espalhamento das gotas e a formação de gotas menores, aumentando o número de gotas por centímetro quadrado e, consequentemente, a cobertura da superfície (Santos et al., 2021; Xu et al., 2023). Além disso, o ORG foi responsável pelo menor ângulo de contato com o papel hidrossensível, favorecendo o espalhamento da gota sobre a superfície e, consequentemente, aumentando a cobertura. Esse comportamento pode auxiliar o contato do herbicida com o alvo, especialmente a superfície foliar das plantas daninhas (Mendes et al., 2022).

O adjuvante à base de óleo de casca de laranja também proporcionou boa cobertura nas aplicações, resultado atribuído à combinação entre seu baixo DMV e o

segundo menor ângulo de contato observado com o papel hidrossensível. Em contraste, o fomesafen aplicado sem adjuvante proporcionou uma das menores coberturas, associado a DMV elevado, alto ângulo de contato e maior tensão superficial, características que restringem o espalhamento da gota e aumentam o risco de escorrimento ou rebote ao atingir as folhas das plantas (Li et al., 2022; Jiang et al., 2024). Isso está de acordo com estudos que demonstram que a aplicação de herbicidas sem adjuvantes pode comprometer a eficiência da deposição das gotas e da cobertura, especialmente no caso de produtos com ação de contato (Santos et al., 2021; Paap et al., 2022; An et al., 2024).

A avaliação do depósito das caldas revelou diferenças entre os tratamentos ao longo das três épocas de aplicação (Figura 6). Na primeira época, os tratamentos com adjuvantes proporcionaram maior depósito em comparação ao herbicida isolado, com valores variando de 0,86 a 1,10 $\mu\text{L cm}^{-2}$. O fomesafen aplicado isoladamente resultou no menor valor, com 0,25 $\mu\text{L cm}^{-2}$ (Figura 6 A). Na segunda época, observou-se padrão semelhante, os tratamentos contendo adjuvantes resultaram em depósitos entre 0,93 e 1,12 $\mu\text{L cm}^{-2}$, todos superiores ao fomesafen isolado (0,31 $\mu\text{L cm}^{-2}$) (Figura 6 B). Na terceira época, os adjuvantes também promoveram aumento no depósito, variando de 0,88 a 1,16 $\mu\text{L cm}^{-2}$, enquanto o fomesafen isolado novamente proporcionou o menor valor (0,37 $\mu\text{L cm}^{-2}$), mantendo o padrão de desempenho inferior observado nas demais avaliações (Figura 6 C).

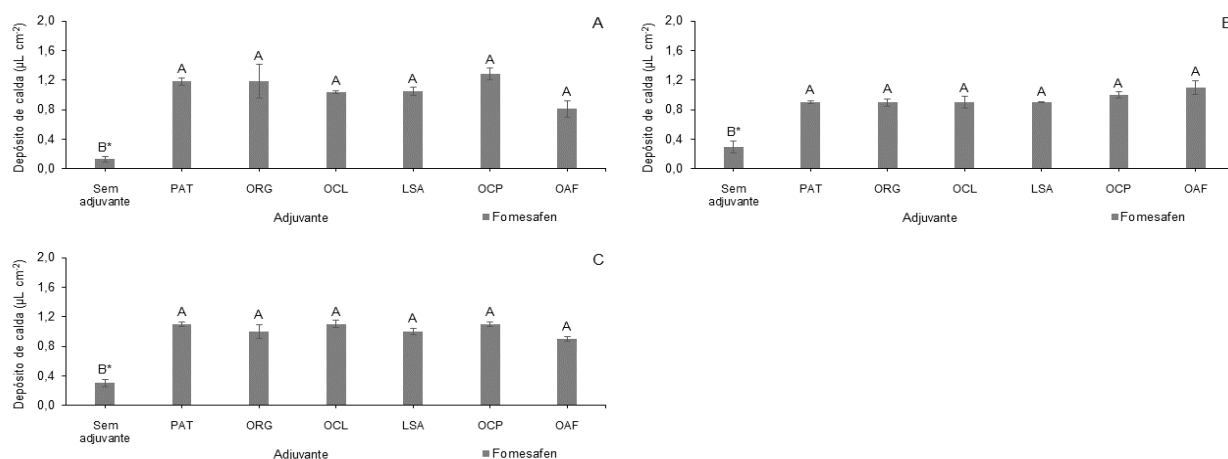


Figura 6. Depósito em função das aplicações das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes, avaliadas na primeira (A), segunda (B) e terceira época (C).

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

A análise do depósito evidenciou diferenças entre os tratamentos, refletindo a influência dos adjuvantes na quantidade de produto efetivamente depositado sobre a superfície das folhas da planta daninha apaga-fogo. Em todas as épocas avaliadas, o tratamento com fomesafen isolado resultou nos menores valores de depósito. Esse comportamento pode estar alinhado às suas propriedades físico-químicas, como maior tensão superficial, maior ângulo de contato e formação de gotas maiores, que restringem o espalhamento da calda e reduzem a eficiência da deposição (Santos et al., 2021; Jiang et al., 2024).

Por outro lado, os tratamentos contendo adjuvantes proporcionaram maior depósito ao longo de todas as épocas, indicando que a presença desses produtos colabora para a deposição do herbicida sobre a superfície foliar. O aumento do depósito pode ser atribuído à combinação de características como menor ângulo de contato, menor tensão superficial e, em alguns casos, menor diâmetro mediano volumétrico (DMV), que favoreceram o espalhamento das gotas e aumentaram a área de contato com o alvo (Li et al., 2022; Xu et al., 2023).

Adjuvantes como OAF, OCP e OCL resultaram em maiores valores de depósito ao longo das épocas de aplicação em comparação com o herbicida isolado, comportamento que pode ser atribuído às características específicas de suas formulações. O adjuvante OAF, composto por organosilicone e ácido fosfórico, pode conter ainda em sua composição agentes espessantes que aumentam a viscosidade da calda. Esse aumento de viscosidade contribui para a formação de gotas mais estáveis e com menor tendência ao escorrimento, favorecendo a permanência da calda sobre a superfície foliar após o impacto (Raykundaliya et al., 2024).

O OCP, por sua vez, é formulado com óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio. O óleo essencial atua como um componente de base oleosa que reduz a volatilização e pode melhorar a adesividade da calda, enquanto o saponáceo pode exercer ação surfactante, promovendo melhor espalhamento da gota e estabilização da calda na superfície. Essa combinação favorece a formação de um depósito uniforme sobre a folha, contribuindo para maior acúmulo de ingrediente ativo (Li et al., 2022).

Já o OCL, à base de óleo de casca de laranja, é composto por monoterpenos como limoneno e linalol associados a surfactantes, que juntos reduzem a tensão superficial da calda e aumentam a espalhabilidade das gotas na superfície foliar. Formulações contendo óleo cítrico podem reduzir significativamente a tensão superficial da calda, promovendo maior espalhamento e favorecendo o contato da gota com a folha, o que resulta em maior depósito (Xu et al., 2023).

O desempenho do adjuvante ORG, foi consistente e expressivo, especialmente na terceira aplicação, em que alcançou um depósito de $1,07 \mu\text{L cm}^{-2}$. Essa eficiência está associada ao seu forte efeito sobre a redução da tensão superficial e do ângulo de contato, o que proporciona maior espalhamento das gotas e favorece seu depósito à superfície foliar, mesmo com a formação da maior porcentagem de gotas sujeitas à deriva (Paap et al., 2022; Mendes et al., 2022).

Adjuvantes como PAT e LSA também contribuíram para o aumento do depósito, em comparação com o herbicida aplicado sem adjuvantes. O desempenho consistente desses produtos evidencia a importância de suas formulações na interação com o herbicida e na adaptação às condições ambientais ao longo do tempo. A presença de

componentes como surfactantes, lecitinas e óleos essenciais pode ter desempenhado papel essencial na melhoria do espalhamento e do depósito da calda sobre a superfície da planta daninha.

A utilização de adjuvantes não apenas modifica os parâmetros físico-químicos da calda, mas também tem efeito direto sobre a eficiência da deposição foliar, aspecto determinante para o sucesso de herbicidas de contato como o fomesafen. O maior depósito observada com adjuvantes pode aumentar a concentração de ingrediente ativo sobre o alvo, ampliando o potencial de controle das plantas daninhas e a eficácia agronômica da aplicação.

Na primeira época de aplicação aos 3 DAA, os maiores valores de controle da planta daninha apaga-fogo foram observados com o adjuvante ORG (87%), seguido por PAT (79%) e OCL (75%). A mistura com OCL proporcionou controle menor ao de ORG, mas semelhante ao valor obtido com PAT. Os tratamentos com LSA (70%) e OCP (71%) resultaram em níveis intermediários de controle, maior que o do herbicida isolado. Porém, menor ao obtido com o ORG. O tratamento com OAF (62%) resultou em controle menor, semelhante ao de LSA e OCP. O fomesafen aplicado isoladamente resultou no menor controle (4,75%) (Figura 7 A).

Na segunda época de aplicação aos 3 DAA, os maiores valores de controle da planta daninha apaga-fogo foram observados com os adjuvantes LSA (58%), ORG (58%) e OCL (56%). Os tratamentos com OAF (50%), PAT (49%) e OCP (47%) resultaram em níveis intermediários de controle, semelhantes aos obtidos com os demais adjuvantes e ao valor registrado para o herbicida isolado. O fomesafen aplicado sem adjuvante resultou em controle de 43% (Figura 7 B).

Na terceira época de aplicação, aos 3 dias após a aplicação (DAA), todos os tratamentos contendo adjuvantes proporcionaram maior controle da planta daninha em comparação ao fomesafen isolado. Os percentuais de controle observados nos tratamentos com adjuvantes variaram de 61 a 74%. Por outro lado, o fomesafen aplicado sem adjuvante proporcionou o menor valor de controle (42%) (Figura 7 C).

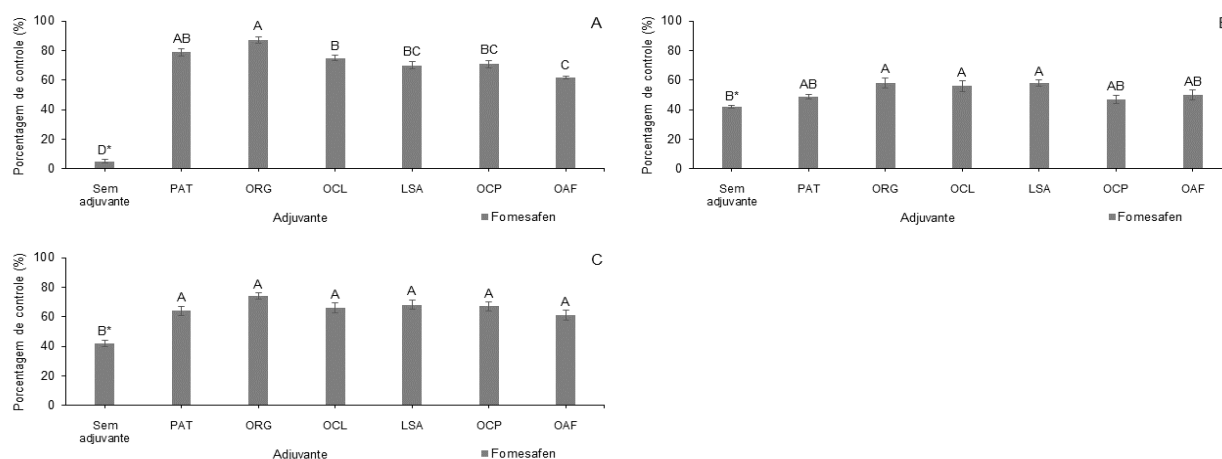


Figura 7. Porcentagem de controle de apaga-fogo aos 3 DAA, em função das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes, avaliadas na primeira (A), segunda (B) e terceira época (C).

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

Na primeira época de avaliação, aos 7 dias após a aplicação (DAA), os maiores valores de controle da planta daninha foram obtidos com os adjuvantes ORG (92%) e PAT (86%). Os tratamentos com OCL (82%), OCP (80%) e LSA (78%) resultaram em controle menor que o de ORG, mas semelhante ao de PAT. O tratamento com OAF (74%) resultou em controle maior que o do fomesafen isolado e semelhante aos obtidos com OCL, OCP e LSA. Já o fomesafen aplicado sem adjuvante resultou no menor controle (7%) (Figura 8 A).

Na segunda época de avaliação aos 7 DAA, os adjuvantes proporcionaram os maiores valores de controle, variando entre 82 e 94%, porém o OAF foi semelhante ao fomesafen isolado (69%) (Figura 8 B). Na terceira época, os adjuvantes PAT (85%), ORG (82%), OCL (76%), LSA (73%) e OCP (71%) resultaram nos maiores níveis de controle da planta daninha apaga-fogo. Os tratamentos com OCL, LSA e OCP mostraram desempenhos próximos ao do OAF (64%). Os tratamentos com OAF e OCP

proporcionaram controles semelhantes ao do herbicida sem adjuvante (56%) (Figura 8 C).

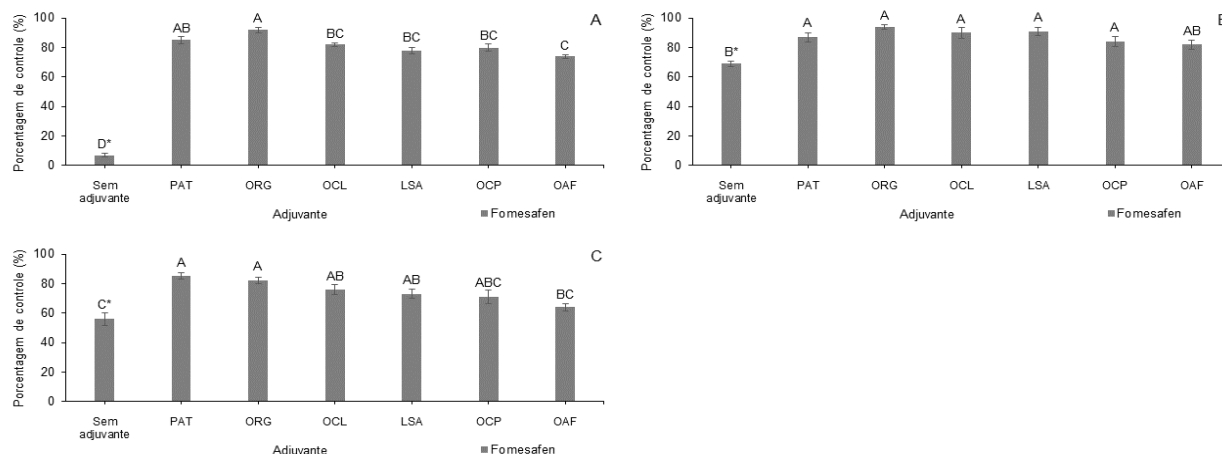


Figura 8. Porcentagem de controle de apaga-fogo aos 7 DAA, em função das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes, avaliadas na primeira (A), segunda (B) e terceira época (C).

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

Na primeira época de avaliação aos 14 DAA, os maiores valores de controle foram observados com os adjuvantes ORG (95%), PAT (85%) e OCP (84%). Os tratamentos com OCL (81%) e LSA (81%) resultaram em controle menor ao de ORG, mas semelhantes aos obtidos com PAT, OCP e OAF (73%). O menor valor de controle foi observado com o herbicida aplicado sem adjuvante (8%) (Figura 9 A).

Na segunda época aos 14 DAA, os maiores valores foram observados com os adjuvantes LSA (93%), ORG (91%), OCL (88%) e OCP (86%), enquanto o menor controle foi com o herbicida isolado (60%). O tratamento com OAF (81%) proporcionou controle menor que o de ORG e LSA, mas não diferiu dos demais adjuvantes (Figura 9 B). O adjuvante PAT proporcionou controle de (82%), diferindo de LSA e do herbicida isolado. Na terceira época, todos os tratamentos com adjuvantes resultaram em controles maiores

ao do herbicida isolado, com valores variando de 79% até 87%. O menor controle foi observado com o fomesafen sem adjuvante (60%) (Figura 9 C).

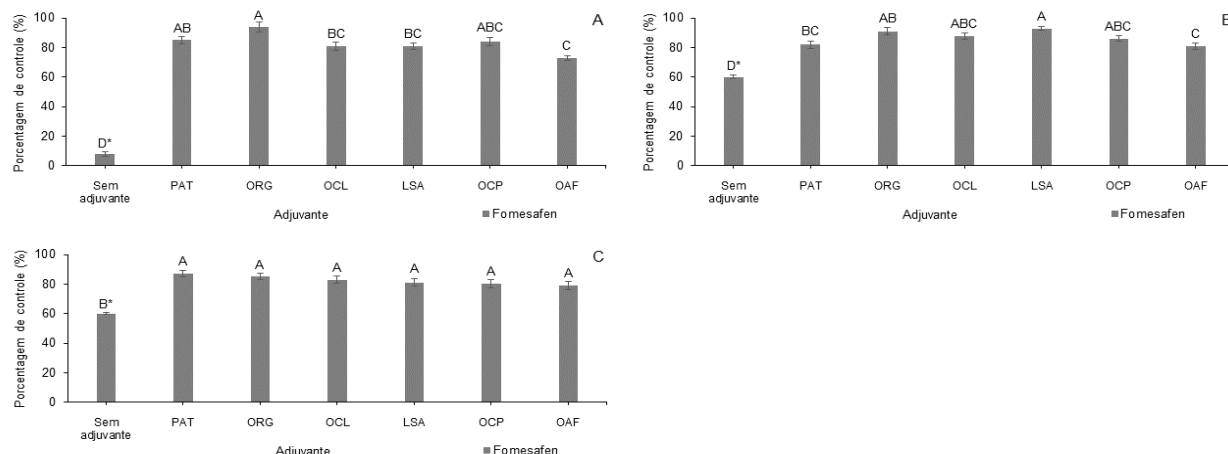


Figura 9. Porcentagem de controle de apaga-fogo aos 14 DAA, em função das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes, avaliadas na primeira (A), segunda (B) e terceira época (C).

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

Na primeira época de avaliação aos 21 DAA, os maiores valores de controle foram obtidos com os adjuvantes ORG (95%), PAT (86%), OCP (84%) e OCL (83%). O LSA (80%) e o OAF (75%) resultaram em menor controle em relação ao ORG, mas semelhantes aos demais adjuvantes. O fomesafen aplicado sem adjuvante proporcionou o menor controle (14%) (Figura 10 A).

Na segunda época de avaliação, os adjuvantes resultaram em maior controle em relação ao herbicida isolado (65%), com valores variando de 83% a 89% (Figura 10 B). Na terceira época, todos os tratamentos com adjuvantes resultaram em controle semelhante entre si, com valores variando de 74% a 83%. O menor valor de controle foi registrado no tratamento com fomesafen isolado (40%) (Figura 10 C).

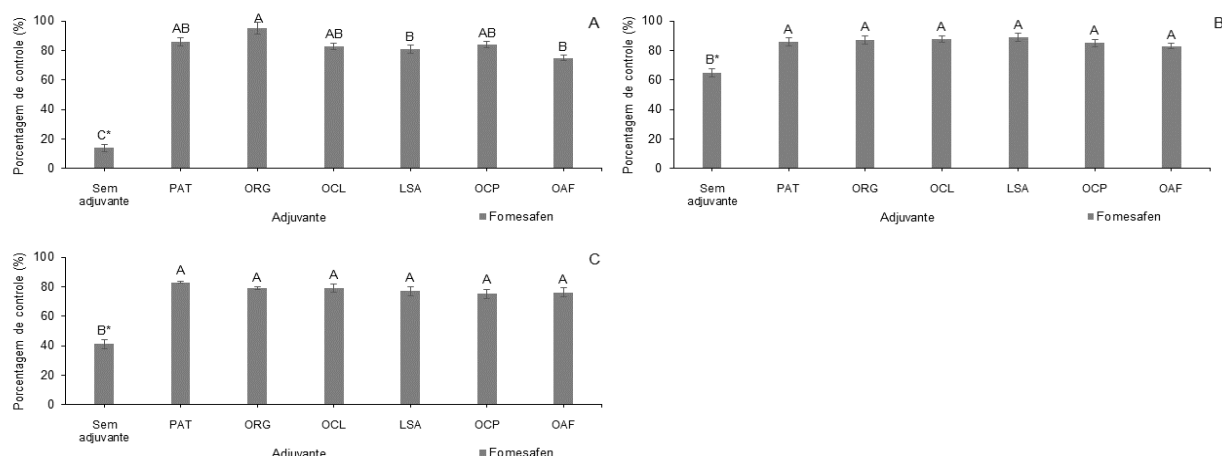


Figura 10. Porcentagem de controle de apaga-fogo aos 21 DAA, em função das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes, avaliadas na primeira (A), segunda (B) e terceira época (C).

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

Na primeira época de avaliação aos 28 DAA, os maiores valores de controle foram obtidos com os adjuvantes ORG (91%) e PAT (83%). Os adjuvantes OCL (78%), LSA (77%), OAF (77%) e OCP (70%) resultaram em controle semelhante entre si e ao PAT. O menor valor de controle foi registrado com o fomesafen aplicado sem adjuvante (10%) (Figura 11 A)

Na segunda época de avaliação aos 28 DAA, os maiores valores de controle da planta daninha apaga-fogo foram observados com os adjuvantes LSA (81%), ORG (68%), OAF (65%), PAT (63%), OCL (63%) e OCP (63%) com controles semelhantes entre si. O fomesafen aplicado isoladamente resultou em controle de 48%, sendo menor apenas que o tratamento com LSA (Figura 11 B). Na terceira época, todos os tratamentos com adjuvantes resultaram em controle semelhante entre si, com valores variando entre 68% e 75%. O fomesafen aplicado sem adjuvante resultou no menor valor de controle (37%) (Figura 11 C).

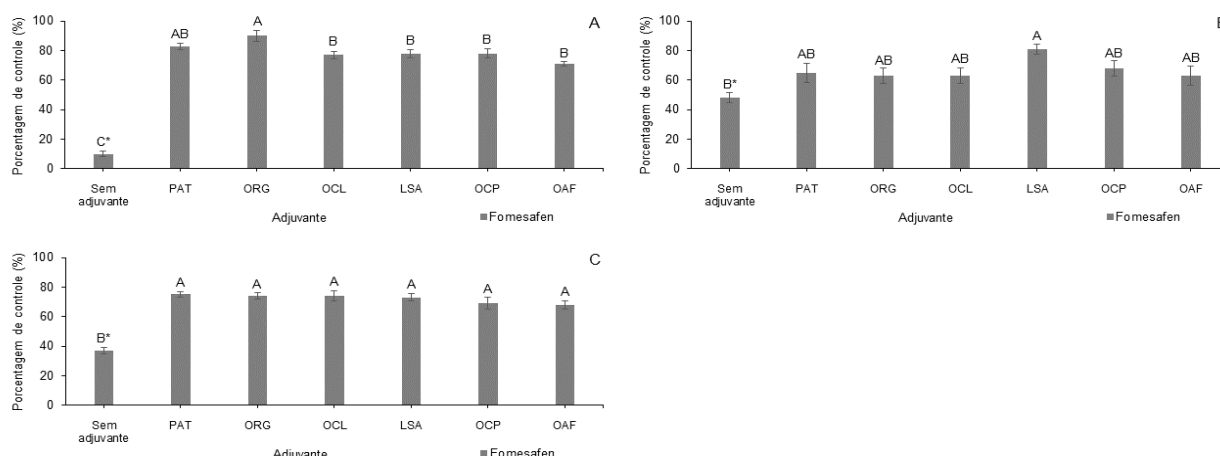


Figura 11. Porcentagem de controle de apaga-fogo aos 28 DAA, em função das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes, avaliadas na primeira (A), segunda (B) e terceira época (C).

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

Na primeira época de avaliação aos 35 DAA, os maiores valores de controle foram observados com os adjuvantes ORG (89%) e PAT (81%). Os tratamentos com OCL (77%), LSA (76%), OAF (77%) e OCP (69%) resultaram em valores de controle semelhantes entre si e ao PAT. O fomesafen aplicado isoladamente resultou no menor controle (9%) (Figura 12 A).

Na segunda época de avaliação aos 35 DAA, os tratamentos com adjuvantes resultaram em valores de controle variando de 61% a 67%. O fomesafen aplicado isoladamente resultou em controle de 45%, sendo inferior aos tratamentos com LSA e PAT (Figura 12 B). Na terceira época, o menor valor de controle foi registrado com o fomesafen aplicado sem adjuvante (26%). Os tratamentos com adjuvantes resultaram em valores de controle variando de 56% a 72% (Figura 12 C).

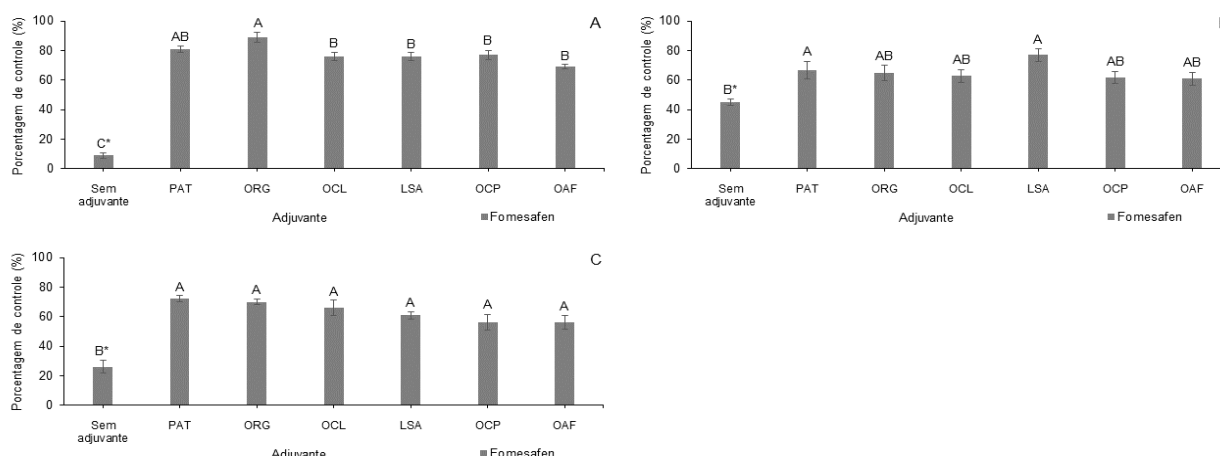


Figura 12. Porcentagem de controle de apaga-fogo aos 35 DAA, em função das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes, avaliadas na primeira (A), segunda (B) e terceira época (C).

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

Todas as misturas com adjuvantes proporcionaram maior redução da massa seca da planta daninha apaga-fogo em comparação ao herbicida fomesafen aplicado isoladamente, independentemente da época de avaliação (Figura 13). Essa superioridade foi consistente ao longo das três épocas, evidenciando a importância do uso de adjuvantes para potencializar a eficácia do controle químico.

Na primeira época de avaliação, os valores de redução de massa seca com adjuvantes variaram de 68% a 88%. O menor valor foi registrado com o fomesafen isolado (19%) (Figura 13 A). Na segunda época, todos os adjuvantes reduziram a massa seca das plantas daninhas em comparação com o herbicida isolado (58%), com valores variando de 79% a 89% (Figura 13 B). Na terceira época de avaliação, os valores de redução de massa seca com os adjuvantes foram variaram de 60% a 75%. O menor valor foi registrado com o fomesafen isolado (22%) (Figura 13 C).

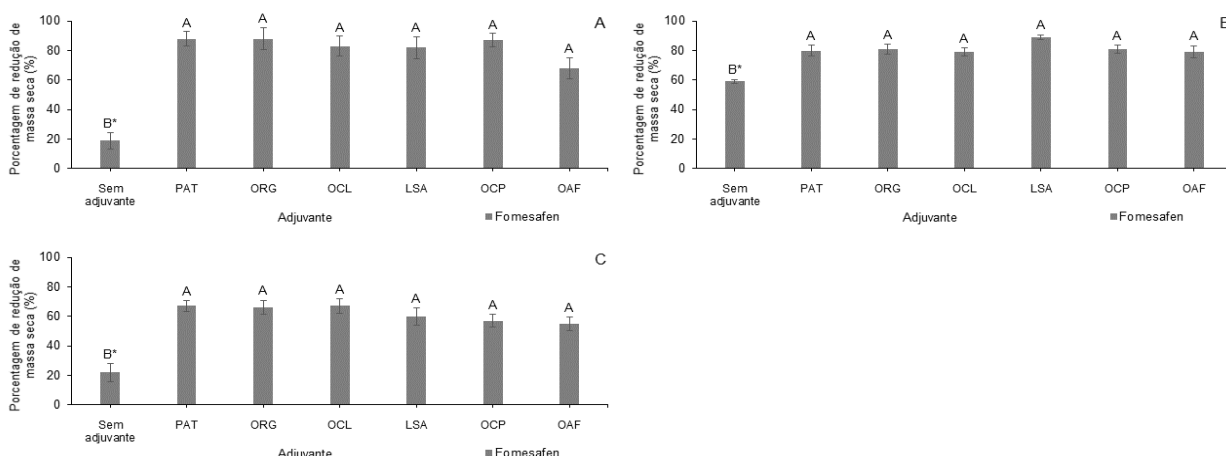


Figura 13. Porcentagem de redução de massa seca de apaga-fogo, em função das caldas contendo fomesafen em mistura com adjuvantes, avaliadas na primeira (A), segunda (B) e terceira época (C).

*Letras maiúsculas iguais não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

*PAT = polioxietileno alquilfenol éter; ORG = organosilicone; OCL = óleo casca de laranja; LSA = lecitina de soja e ácido propiônico; OCP = óleo essencial cítrico e saponáceo de potássio e OAF = organosilicone e ácido fosfórico.

O controle da planta daninha apaga-fogo com o herbicida fomesafen foi mais eficaz quando associado a adjuvantes, conforme evidenciado ao longo das seis avaliações realizadas em diferentes épocas de aplicação. O desempenho superior das misturas em comparação ao herbicida isolado foi consistente, ainda que com variações entre as épocas, indicando interação entre as propriedades físico-químicas da calda, a dinâmica de deposição foliar e o próprio comportamento fisiológico da planta daninha.

O fomesafen é um herbicida inibidor da enzima protoporfirinogênio oxidase (PPO), com ação essencialmente de contato, causando danos rápidos às plantas sensíveis. A inibição da PPO leva ao acúmulo de compostos tóxicos que destroem as células vegetais, especialmente sob exposição à luz (Jakubek et al., 2021). Esse modo de ação requer boa cobertura da superfície foliar e permanência da calda sobre a planta, de modo a garantir a absorção do ingrediente ativo. Diante disso, parâmetros como tensão superficial, ângulo de contato, tamanho de gotas, cobertura superficial e depósito

foliar tornam-se importantes para o sucesso da aplicação (Santos et al., 2021; Paap et al., 2022).

Nas três épocas de aplicação, observou-se que os tratamentos contendo fomesafen associado a adjuvantes promoveram ação rápida sobre a planta daninha apaga-fogo, com aumentos nos percentuais de controle entre 3 e 14 dias após a aplicação. Esse padrão foi mais evidente nas primeiras e terceiras épocas, nas quais os tratamentos proporcionaram incrementos contínuos até 21 DAA, atingindo os maiores valores nesse período. Esse comportamento é típico de herbicidas como o fomesafen, que atuam de forma rápida ao induzirem a formação de espécies reativas de oxigênio em tecidos fotossintéticos expostos à luz (Du et al., 2021; Jakubek et al., 2021). A severidade inicial dos sintomas pode estar associada à absorção localizada do herbicida nas folhas e à eficiência de deposição proporcionada especialmente pelos adjuvantes.

No entanto, após o aumento de controle até os 21 DAA, houve uma redução dos valores em alguns tratamentos, especialmente na segunda época de aplicação. Entre os fatores que podem ter contribuído para essa queda, destaca-se o potencial de rebrota da planta daninha apaga-fogo, espécie perene com capacidade de regeneração a partir de gemas axilares e estruturas subterrâneas (Jakubek et al., 2021). Ainda assim, esse período inicial com maiores níveis de controle, especialmente quando o fomesafen foi aplicado em associação com adjuvantes, é agronomicamente importante, sobretudo em culturas como a soja (*Glycine max* (L) Merrill) e o feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.), que são sensíveis à matocompetição nas fases iniciais de desenvolvimento. A redução precoce da competição pode ser decisiva para o estabelecimento e o rendimento final da lavoura (Kumar e Rana, 2022; Tabatabaiepour et al., 2023).

No caso do adjuvante organosiliconado os valores de controle, tanto nas avaliações iniciais quanto finais da planta daninha, podem-se dever à alta redução da tensão superficial e do ângulo de contato, conforme verificado em superfície artificial e no papel hidrossensível. Essas propriedades favoreceram o espalhamento praticamente completo das gotas e o contato com a superfície foliar, condição interessante para a eficiência de herbicidas de contato como o fomesafen. Além disso, mesmo produzindo maior porcentagem de gotas sujeitas à deriva, o ORG resultou em alta cobertura

superficial e depósito. Esses achados corroboram estudos prévios que demonstram que adjuvantes superespalhantes podem aumentar a absorção foliar de inibidores da PPO (Zhao et al., 2023; Xu et al., 2023).

O adjuvante PAT (polioxietileno alquilfenol éter) também resultou em bom controle de *Alternanthera tenella*, ao longo das avaliações. Esse efeito pode estar associado à presença de tensoativos não iônicos, capazes de reduzir a tensão superficial e o ângulo de contato, favorecendo o espalhamento da calda e boa cobertura foliar, sem diminuir o tamanho das gotas. Além disso, o menor percentual de gotas suscetíveis à deriva pode ter contribuído para a efetividade da deposição, indicando um bom equilíbrio entre cobertura e potencial risco à deriva. Esse comportamento reforça a importância da modificação físico-química da calda para herbicidas de contato como o fomesafen, cuja eficácia depende diretamente da cobertura e da permanência sobre a superfície foliar (Santos et al., 2021; Paap et al., 2022).

O adjuvante à base de lecitina de soja e ácido propiônico (LSA) demonstrou bom desempenho no controle, especialmente na segunda época de aplicação, em que proporcionou um dos maiores percentuais de controle final. Esse resultado pode estar relacionado à sua capacidade de formar gotas mais uniformes, além de promover boa deposição foliar, mesmo apresentando efeito moderado sobre a tensão superficial. A presença de ácido orgânico em sua formulação contribuiu para a redução do pH da calda em comparação ao fomesafen isolado, o que pode ter favorecido a absorção foliar do herbicida, já que sua forma não dissociada é predominante em meios mais ácidos (Gruppi et al., 2023). Esses efeitos estão de acordo com os princípios da tecnologia de aplicação, que destacam a importância da modulação físico-química da calda para herbicidas de contato (Yi et al., 2022; Raykundaliya et al., 2024).

Os resultados de controle também foram influenciados pelas condições ambientais. Na segunda época de aplicação, observou-se menor desempenho geral em comparação com as demais, o que é compatível com um cenário de baixa radiação solar, uma vez que o dia permaneceu encoberto por nuvens. A luz é um fator crítico para a eficácia de herbicidas inibidores da PPO, como o fomesafen, pois a formação de espécies reativas de oxigênio, responsáveis pela necrose celular, depende da ativação por

fotosensibilização (Ferreira et al., 1998; Franca et al., 2020; Jakubek et al., 2021; Mendes et al., 2022). Assim, a menor luminosidade pode ter limitado a ação do herbicida, mesmo diante de boa deposição foliar, o que reforça a importância da integração entre os aspectos físico-químicos da calda e as condições fisiológicas e ambientais na avaliação da eficácia.

A redução da massa seca da *Alternanthera tenella* foi significativamente maior nas misturas de fomesafen com adjuvantes, em comparação ao herbicida aplicado isoladamente, independentemente da época de aplicação. Essa redução com o uso de adjuvantes evidencia o efeito prolongado da injúria causada pelos tratamentos, refletindo não apenas na severidade inicial, mas na limitação do crescimento da planta daninha ao longo do tempo. Essa resposta reforça a eficácia biológica das misturas, uma vez que o acúmulo de biomassa está diretamente relacionado à capacidade competitiva da planta daninha apaga-fogo no sistema produtivo (Santos et al., 2021).

Além disso, a consistência dessa resposta nas três épocas avaliadas demonstra que o uso de adjuvantes contribui para a estabilidade do controle, mesmo diante de variações ambientais. Em culturas como a soja e o feijão, nas quais o fomesafen apresenta seletividade, essa supressão inicial do crescimento das plantas daninhas é estratégica para manter o potencial produtivo, reduzindo a interferência nos estádios críticos do desenvolvimento (Tabatabaiepour et al., 2023).

O fomesafen apresenta limitações no controle pós-emergente da *Alternanthera tenella*, conforme demonstrado por Canossa et al. (2007), que relataram baixa eficácia do produto resultados inferiores aos obtidos com herbicidas aplicados em pré-emergência. No entanto, estudos mais recentes indicam que a associação com adjuvantes adequados pode superar essas limitações. Macedo et al. (2020), por exemplo, observaram que a aplicação de fomesafen em combinação com surfactantes etoxilados resultou em controle superior a 90% de *Euphorbia heterophylla*, além de promover redução da massa seca. Esses efeitos foram atribuídos à maior absorção foliar proporcionada pela modificação físico-química da calda, especialmente no que se refere à interação entre o tipo de surfactante e o comportamento do ingrediente ativo

Os resultados obtidos sustentam a recomendação do uso de adjuvantes para herbicidas de contato como o fomesafen, especialmente em condições de campo onde variações ambientais e características da superfície foliar podem comprometer a eficácia. A seleção racional de adjuvantes baseada em propriedades físico-químicas, espalhamento e tamanho de gotas, é uma das ferramentas para otimizar o desempenho agrônomo das aplicações fitossanitárias.

4. CONCLUSÃO

A associação do herbicida fomesafen a adjuvantes aumentou a cobertura superficial, o depósito de calda e o controle da planta daninha, com a redução da tensão superficial e o ângulo de contato das caldas, obtendo como consequência o maior controle da planta daninha e maior redução da massa seca em comparação ao herbicida aplicado sem adjuvantes. Sendo assim, a utilização dos adjuvantes é recomendável para incrementar a qualidade da aplicação e o controle da apaga-fogo.

5. REFERÊNCIA

Abdollahdokht D, Gao Y, Faramarz S, Poustforoosh A, Abbasi M, Asadikaram G, Nematollahi MH (2022) Conventional agrochemicals towards nano-biopesticides: an overview on recent advances. **Chemical and Biological Technologies Agriculture** 9:1-13.

<https://doi.org/10.1186/s40538-021-00281-0>

ASABE (2009) American Society of Agricultural and Biological Engineers. ANSI/ASABE S572.1: **Spray nozzle classification by droplet spectra**. St. Joseph.

<https://cdn2.hubspot.net/hub/95784/file-32015844-pdf>

An K, Feng X, Ji J, Wang X, Pang M, Liu T, Wang S, Shi H, Dong J, Liu Y (2024) Synergistic mechanism and environmental behavior of tank-mix adjuvants to topramezone and atrazine. **Environmental Science and Pollution Research** 31:20246-20257.

<https://doi.org/10.1007/s11356-024-32389-9>

Basílio S, Furtado Júnior MR, Alvarenga CB de, Vitória EL da; Vargas BC, Privitera S, Caruso L, Cerruto E, Manetto G (2024) Effect of adjuvants on physical–chemical properties, droplet size, and drift reduction potential. **Agriculture** 14:2271-2283.

<https://doi.org/10.3390/agriculture14122271>

Calore RA, Ferreira MC, Rodrigues NEL, Otuka AK (2015) Distribution pattern, surface tension and contact angle of herbicides associated to adjuvants on spraying and control of *Ipomea hederifolia* under rainfall incidence. **Engenharia Agrícola** 35:756-768.

<https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n4p756-768/2015>

Canossa RS, Velini ED, Pacheco LP, Turra AM, Carbonari CA (2007) Controle de *Alternanthera tenella* com herbicidas aplicados em pré e pós-emergência. **Planta Daninha** 25:417-423.

<https://doi.org/10.1590/S0100-83582007000200025>

Chaim A, Neto JC, Pessoa MCPY (2006) **Uso do programa computacional Gotas para avaliação da deposição de pulverização aérea sob diferentes condições climáticas.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 39, 23 p. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/15921>

Cunha JPAR, Alves GS, Marques RS (2017) Tensão superficial, potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica de caldas de produtos fitossanitários e adjuvantes. **Revista Ciência Agronômica** 48:261-270.

<https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170030>

Das S, Singha D, Kundu A, Saha S, Bhattacharyya A, Roy S (2020) Effect of pH on the hydrolytic transformation of a new mixture formulation of fomesafen and quizalofop-ethyl in water. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology** 104:471-476.
<https://doi.org/10.1007/s00128-020-02808-x>.

Du L, Xiao L, Xiaojing J, Qian J, Guo W, Li L, Qu Q, Mingjing Q (2021) Target-site basis for fomesafen resistance in redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) from China. **Weed Science** 69:290-299.
<https://doi.org/10.1017/WSC.2021.14>

Ferreira MC, Lasmar O, Decaro Junior ST, Neves SS, Azevedo LH (2013) Qualidade da aplicação de inseticida em amendoim (*Arachis hypogaea* L.), com e sem adjuvantes na calda, sob chuva simulada. **Bioscience Journal** 29:1431-1440.
<https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/15082>

Ferreira MC, Machado Neto JG, Matuo T (1998) Redução da dose e do volume de calda nas aplicações noturnas de herbicidas em pós-emergência na cultura da soja. **Planta Daninha** 16:25-36.
<https://doi.org/10.1590/S0100-83581998000100003>

Flores AE, Allende BZ, Sandoval GPE, Jiménez FM, Beristain CI, Pascual PLA (2021) Carotenoid nanoemulsions stabilized by natural emulsifiers: Whey protein, gum Arabic, and soy lecithin. **Journal of Food Engineering** 290:e110208.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110208>

Franca LX, Dodds DM, Butts TR, Kruger GR, Reynolds DB, Mills A (2020) Evaluation of optimal droplet size for control of Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) with acifluorfen. **Weed Technol** 34:511-519.
<https://doi.org/10.1017/wet.2020.11>

Frans R, Talbert R, Marx D, Crowley H (1986) **Experimental design and techniques for measuring and analyzing plant responses to weed control practices**. In: CAMPER, N. D. (Ed.). Research methods in weed science (3. ed. Champaign: Southern Weed Science Society) pp 29-46.

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1219549>

Gruppi A, Romanini E, Bassani A, Lambri M, Chinnici F, Gabrielli M (2023) Adsorption capabilities of fungoid chitosan toward organic acids in model solutions and white wine. **Food and Bioprocess Technology** 17:384-395.

<https://doi.org/10.1007/s11947-023-03135-9>

Jakubek M, Masařík M, Bříza T, Kaplánek Robert, Veselá K, Abramenko N, Martásek P (2021) PPO-inhibiting herbicides and structurally relevant Schiff bases: evaluation of inhibitory activities against human protoporphyrinogen oxidase. **Processes** 9:e383.

<https://doi.org/10.3390/pr9030383>

Jiang Y, Yang Z, Xu X, Xie B, Duan J (2024) Spreading model of single droplet impacting the banana leaf surface and computational fluid dynamics simulation analysis. **Computers and Electronics in Agriculture** 223:e109113.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109113>

Kumar S, Rana S (2022). Weed management strategies in soybean (*Glycine max*) - A review. **Indian Journal of Agricultural Sciences** 92:438-444.

<https://doi.org/10.56093/ijas.v92i4.123868>

Li Z, Zhao K, Wang Y, Zheng Z, Zhang C, Gao Y, Du F (2022) Droplet splash and spread on superhydrophobic lotus leaves: Direct regulation by tuning the chain length of surfactant. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 648:e129178.

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129178>

Lin S, Wang Y (2025) Enhancing therapeutic antibody production through amino acid-induced pH shift in Protein A affinity chromatography. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology** 13:e1567923.

<https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1567923>

Ma M, Ma X, Ma Z, Wang T, Li Y, Mao J, Chen B (2025) Effects of foliar fertilizer additives on grape fruit quality and endogenous hormones in leaves. **BMC Plant Biology** 25:e516. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06522-w>

Macedo MV, Alves PLC, Rodrigues ACC, Fernandes EG, Boldrin PF, Souza MV (2020) Association between fomesafen and surfactants for the pre-emergence control of *Euphorbia heterophylla* L. **Journal of Agricultural Studies** 8:435-444.

<https://doi.org/10.5296/jas.v8i4.17582>

Marchi SR, Bogorni D, Biazzi L, Bellé JR (2013) Glyphosate and post emergence herbicides associations for controlling *Commelina benghalensis* on soybean RR[®]. **Revista Brasileira de Herbicidas** 12:23-30.

<https://doi.org/10.7824/rbh.v12i1.173>

Matuo TK, Matuo T (1995) Efeito da pressurização com CO₂ sobre o pH da água. **Planta Daninha** 13:22-25.

<https://doi.org/10.1590/S0100-83581995000100004>

Mendes KF, Mielke KC, D'Antonino L, Silva AA (2022) **Retention, absorption, translocation, and metabolism of herbicides in plants**. In: Mendes KF, Silva AA, editors. Applied Weed and Herbicide Science. Springer, Cham; pp. 157-86.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-01938-8_5

Mennan H, Kaya-Altop E, Belvaux X, Brants I, Zandstra BH, Jabran K, Uysal MS (2021) Investigating glyphosate resistance in *Amaranthus palmeri* biotypes from Turkey. **Phytoparasitica** 49:1043-1052.

<https://doi.org/10.1007/s12600-021-00910-2>

Paap U, Krieb B, Steinruck H, Maier F (2022) Probing surface and interfacial tension of ionic liquids in vacuum with the pendant drop and sessile drop method. **International Journal of Molecular Sciences** 23:1-16.

<https://doi.org/10.3390/ijms232113158>

Pagliaro M, Cirmino A, Cravotta V, Palmisano G (2023) Limonene as a natural product extraction solvent. **Green Chemistry** 25:1265-1277.

<https://doi.org/10.1039/D3GC02068A>

Pelegri G, Souza AM, Ferreira PHU, Monteiro GG, Ferreira MC (2022) Air-assisted spraying and electrically charged droplets for Bemisia tabaci control in soybeans. **Pest Management Science** 78:4618-4627.

<https://doi.org/10.1002/ps.7082>

Polli EG, Alves GS, Moraes JG, Kruger GR (2022) Influence of surfactant-humectant adjuvants on physical properties, droplets size, and efficacy of glufosinate formulations. **Agrosystems, Geosciences & Environment** 2:1-14.

<https://doi.org/10.1002/agg2.20230>

Python Software Foundation (2024) **Python** (Version 3.12.7).

Raykundaliya N, Karakashev SI, Parsana VM, Grozev NA, Mircheva K, Ivanova SD (2024) Inorganic salts as chemical foam suppressors. **Coatings** 14:e1358.

<https://doi.org/10.3390/coatings14111358>

Rojas-Sandoval J. (2022) *Alternanthera philoxeroides* (alligator weed). **CABI Compendium**.

<https://doi.org/10.1079/cpc.4403.20210099959>

Santos RTS, Vechia JFD, Santos CAM, Almeida DP, Ferreira MC (2021) Relationship of contact angle of spray solution on leaf surfaces with weed control. **Scientific Reports** 11:1-10.

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-89382-2>

Silva LLG, Bastos RA, Lima GVS, Soares LS, Coimbra JSR, Martins MA, Santana RC (2022) Stabilizing properties of chia seed mucilage on dispersions and emulsions at different pHs. **Food Biophysics** 17:568-574.

<https://doi.org/10.1007/s11483-022-09742-x>

Sousa BT, Pereira AES, Fraceto LF, Oliveira HC, Dalazen G (2022) Post-emergence herbicidal activity of nanoatrazine against *Alternanthera tenella* Colla plants compared to other weed species. **Heliyon** 8:e09902.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09902>.

Szwajaczak E, Sierka E, Ludynia M (2023) Potential role of low-molecular-weight dioxolanes as adjuvants for glyphosate-based herbicides using photosystem II as an early post-treatment determinant. **Cells** 12:e777.

<https://doi.org/10.3390/cells12050777>

Tabatabaiepour SZ, Tahmasebi Z, Taab A, Rashidi-Monfared S (2023) Effect of redroot pigweed interference on antioxidant enzyme and light response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) depends on cultivars and growth stages. **Scientific Reports** 13:e4289.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-31466-2>

University of hertfordshire. Fomesafen (Ref. PP 021) (2025) **Pesticide Properties DataBase** (PPDB).

<https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/355.htm>

Xia B, Shen Y, Zhao R, Deng J, Wang C (2024) Interactions with soy lecithin regulate the emulsification capacity of pea protein: Effects of soy lecithin concentration. **Food Hydrocolloids** 155:e110168.

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110168>

Xu G, Yan D, Fang W, Xu D, Xu L, Wang Q, Cao A (2023) Synergistic effect of orange oil adjuvant on acetamiprid in the control of *Edentatipsylla shanghaiensis*. **Sustainability** 15:e10113.

<https://doi.org/10.3390/su151310113>

Xue Q, Mutailipu M, Yang Y, Xue F, Wang Q (2024) The estimation of the pH of CO₂ saturated water/brine binary systems under CO₂ saline aquifer storage conditions. **Environmental Earth Sciences** 83:e836.

<https://doi.org/10.1007/s12665-024-11836-3>.

Yi L, Wang C, Van VTPA, Lohse D, Risso F, Toschi F, Sun C (2022) Physical mechanisms for droplet size and effective viscosity asymmetries in turbulent emulsions. **Journal of Fluid Mechanics** 951:e39.

<https://doi.org/10.1017/jfm.2022.881>

Zhao R, Yu M, Sun Z, Li LJ, Guo XY, Xu Y, Wu XM (2023) Regulating droplet impact and wetting behaviors on hydrophobic leaves using a nonionic surfactant. **Journal of Colloid and Interface Science** 629:926-937.

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.08.179>

CAPÍTULO 3 – ESPALHAMENTO DE GOTAS FITOSSANITÁRIAS SOBRE SUPERFÍCIE E DIFERENCIAÇÃO FUNCIONAL DE ADJUVANTES

RESUMO: Um dos fatores determinantes para a eficácia das aplicações fitossanitárias é o comportamento físico-químico das caldas, sendo o espalhamento das gotas sobre a superfície-alvo um dos principais atributos envolvidos. Adjuvantes desempenham papel fundamental na modificação dessas propriedades, mas, apesar do seu amplo uso, ainda não existe uma classificação padronizada que reflita sua variabilidade funcional, particularmente no que se refere ao espalhamento. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o grau de espalhamento de gotas fitossanitárias, com base na tensão superficial e no ângulo de contato sobre superfície, como ação e diferenciação funcional de adjuvantes. Foram avaliados 28 adjuvantes comerciais em suas dosagens mínima e máxima recomendadas mais água, totalizando 51 tratamentos. A tensão superficial e o ângulo de contato foram determinados por meio de tensiômetro e analisados estatisticamente por estatísticas exploratórias, análise de componentes principais (PCA) e análise de agrupamento hierárquico (cluster). O ângulo de contato foi identificado como a variável mais representativa para classificar a capacidade de espalhamento. A partir disso, foram definidas oito classes funcionais, variando de hidrofóbico ($>100^\circ$) até espalhamento extremamente alto ($0-15,9^\circ$). A avaliação do grau de espalhamento baseada no ângulo de contato demonstrou ser uma estratégia eficaz para diferenciar o desempenho dos adjuvantes quanto à capacidade de espalhamento das caldas fitossanitárias. A utilização das ferramentas estatísticas exploratórias, incluindo gráficos de dispersão, análise de componentes principais e análise de cluster para diferenciação e agrupamento de resultados permitiu a construção de faixas capazes de representar o comportamento do ângulo de contato como parâmetro de classificação.

Palavras-chave: caldas fitossanitárias, ângulo de contato, PCA, análise de cluster, classes.

PESTICIDE DROPLET SPREADING ON TARGET SURFACES AND FUNCTIONAL DIFFERENTIATION OF ADJUVANTS

ABSTRACT: The effectiveness of pesticide applications is closely linked to the physicochemical behavior of spray solutions, with droplet spreading on the target surface being one of the most critical attributes. Adjuvants play a key role in modifying these properties; however, despite their widespread use, there is still no standardized classification that reflects their functional variability, particularly in relation to spreading. Thus, the objective of this study was to evaluate the spreading capacity of agrochemical droplets based on surface tension and contact angle as a measure of adjuvant functional performance and differentiation. A total of 28 commercial adjuvants were evaluated at their minimum and maximum recommended doses plus water, resulting in 51 treatments. Surface tension and contact angle were determined using a tensiometer and statistically analyzed through exploratory statistics, principal component analysis (PCA), and hierarchical analysis (cluster). The contact angle was identified as the most representative variable for classifying spreading capacity. Based on this, eight functional classes were defined, ranging from hydrophobic ($>100^\circ$) to extremely high spreading ($0\text{--}15.9^\circ$). The assessment of spreading capacity based on contact angle proved to be an effective strategy for differentiating the performance of adjuvants regarding the spreading ability of spray solutions. The use of exploratory statistical tools, including scatter plots, principal component analysis, and cluster analysis for result differentiation and grouping, enabled the development of classification ranges capable of representing contact angle behavior as a classification parameter.

Keywords: tank-mixture, contact angle, PCA, cluster analysis, classes.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação eficiente de produtos fitossanitários é essencial para o controle químico adequado de insetos fitófagos, fitopatógenos e plantas invasoras na agricultura. Nesse contexto, os adjuvantes vêm sendo amplamente utilizados como ferramenta capaz de otimizar o desempenho dos produtos fitossanitários. Os adjuvantes, adicionados às formulações comerciais ou às caldas de pulverização, modificam propriedades da aplicação, visando contribuir para o aumento da eficácia do controle fitossanitário, a redução de perdas por deriva ou evaporação, além de favorecerem a deposição, o depósito e a absorção dos ingredientes ativos na superfície-alvo (Basílio et al., 2024; Brankov et al., 2025).

Entre as diversas funcionalidades atribuídas aos adjuvantes, o espalhamento das gotas sobre a superfície vegetal é um fator crítico para a eficácia da aplicação. A redução da tensão superficial e do ângulo de contato influencia diretamente a cobertura da calda nos tecidos foliares, afetando a absorção dos ingredientes ativos (Hartzler, 2023; Oliveira et al., 2025). No entanto, adjuvantes com comportamentos distintos quanto ao espalhamento ainda são agrupados sob o mesmo termo “espalhantes”. Alguns promovem ângulos de contato próximos de 0° , indicando alto poder de espalhamento, enquanto outros resultam em ângulos acima de 80° , revelando baixa capacidade de cobertura (Nairn e Forster, 2022; Basílio et al., 2024), o que revela a necessidade de uma classificação mais precisa dentro dessa funcionalidade, permitindo a diferenciação entre os adjuvantes e a indicação do grau de espalhamento.

Nesse cenário, com o avanço das tecnologias de aplicação e a crescente diversidade de produtos disponíveis no mercado, torna-se cada vez mais necessário estabelecer critérios de classificação técnica para os adjuvantes. Classificações funcionais auxiliam na organização, recomendação e regulamentação desses insumos, oferecendo suporte para a escolha correta em função da necessidade agrônômica e das condições de aplicação (Hewitt, 2024). Classificações desse tipo já foram consolidadas em outras áreas da pulverização, como a proposta por Johnstone. (1978) para o tamanho

de gotas, que define, por exemplo, gotas com diâmetro superior a 500 μm como grossas, recomendadas especialmente para aplicações de herbicidas em situações nas quais a deriva representa um risco elevado.

Diante da ausência de critérios de padronização que delimitem os limites da funcionalidade de espalhamento, torna-se necessário estabelecer faixas classificatórias com base em parâmetros práticos mensuráveis. O ângulo de contato é um indicador direto da capacidade de uma calda fitossanitária se espalhar sobre a superfície vegetal, possibilitando a distinção entre produtos com alta, média ou baixa eficiência de espalhamento (Santos et al., 2021; Oliveira et al., 2025). Essa variável mensurável pode permitir uma categorização mais prática, funcional e tecnicamente fundamentada, facilitando a recomendação e o uso racional de adjuvantes em diferentes contextos agrônômicos em tratamentos fitossanitários.

Além de auxiliar na tomada de decisão por parte de técnicos e produtores, uma classificação em faixas para o espalhamento pode servir de base para ações de registro, regulamentação e desenvolvimento de novos produtos (Valieva et al., 2022; Hewitt, 2024). A organização dos adjuvantes, das caldas fitossanitárias e dos componentes de calda em classes funcionais com base em critérios científicos oferece maior segurança, padronização e transparência ao processo de escolha e aplicação, além de favorecer a comunicação técnica entre fabricantes, pesquisadores e usuários. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o grau de espalhamento de gotas fitossanitárias, com base na tensão superficial e no ângulo de contato sobre superfície, como ação e diferenciação funcional de adjuvantes.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Departamento de Fitossanidade do Campus de Jaboticabal da UNESP, no Laboratório de Análise do Tamanho de Partículas (LAPAR) e Técnicas de Aplicação de Produtos Fitossanitários, com o objetivo de avaliar o grau de

espalhamento de gotas fitossanitárias, com base na tensão superficial e ângulo de contato sobre superfície.

Para isso, foram selecionados e utilizados 28 adjuvantes, aplicados em suas dosagens mínima e máxima recomendadas pelos fabricantes, diluídos em água na proporção $v \ v^{-1}$. A escolha dos adjuvantes considerou sua ampla utilização no mercado, tanto por fabricantes quanto por produtores agrícolas. Seis desses adjuvantes possuíam apenas uma recomendação de uso, enquanto os demais (22 adjuvantes) apresentavam recomendações para duas doses, resultando em um total de 51 tratamentos avaliados (28 adjuvantes combinados + apenas água), sendo os tratamentos apresentados por números sequenciais com máxima ou mínima dosagem.

Os adjuvantes foram diluídos apenas em água representando as caldas fitossanitárias. Os nomes comerciais dos produtos não foram identificados no texto do experimento, uma vez que o foco do trabalho está nos dados gerados. Assim, o grau de espalhamento foi baseado exclusivamente nos resultados obtidos a partir das análises realizadas.

2.1. Tensão superficial e ângulo de contato em superfície artificial das caldas fitossanitárias

A tensão superficial e o ângulo de contato foram utilizados como parâmetros físicos para avaliar o espalhamento das caldas fitossanitárias. Essas variáveis influenciam diretamente a interação da gota com a superfície foliar, sendo determinantes para a eficiência do espalhamento dos produtos aplicados (Scholz e Simutis, 2022).

Para as avaliações de tensão superficial e ângulo de contato foi utilizado um tensiômetro automático, modelo OCA-15Plus da Dataphysics Germany, equipado com câmera digital de alta velocidade e software SCA20® para automatização e processamento das imagens obtidas em um computador de mesa. Neste equipamento, a tensão é determinada pelo método da gota pendente, no qual o cálculo é realizado com base na equação de Yang-Laplace, em função da deformação das gotas emitidas em

cada amostra (Ferreira et al., 2013), sendo registrada a tensão superficial da gota a cada segundo no decorrer de 60 segundos (Figura 1A).

Para a avaliação do ângulo de contato as gotas provenientes das caldas fitossanitárias foram depositadas sobre uma superfície artificial padrão (Parafilm®). Lâminas com dimensões de 1 x 10 cm da superfície artificial foram fixadas em um suporte e, a partir do momento do depósito da gota no Parafilm® o ângulo de contato foi registrado a cada segundo no decorrer de 60 segundos (Figura 1B). Para efeito de utilização dos dados obtidos das caldas e comparação entre os tratamentos foi padronizado como valor útil de tensão e ângulo aos 10 segundos, uma vez que, a partir desse tempo os valores se comportaram de maneira estável, sem muitas variações, sendo utilizadas 5 repetições por tratamento.

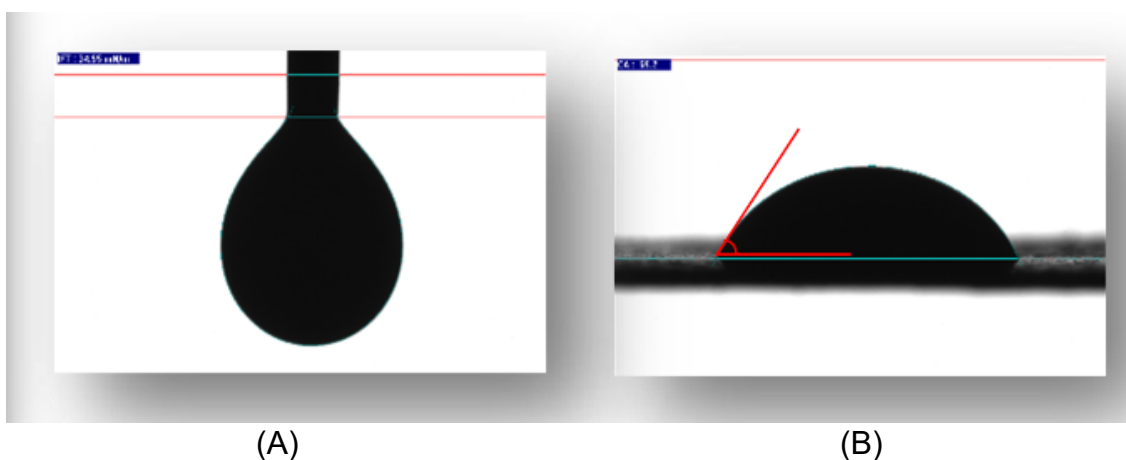


Figura 1. Gota analisada de forma pendente (A) e ângulo de contato com a superfície, por assimétrica de eixos (B).

2.2. Espalhamento de gotas fitossanitárias e diferenciação funcional de adjuvantes

O espalhamento e a diferenciação funcional de adjuvantes foram baseados em análises estatísticas exploratórias, incluindo gráficos de dispersão entre pares de variáveis, análise de componentes principais (PCA) e análise de cluster, com base nos dados de tensão superficial e ângulo de contato. Além disso, foram realizados ajustes agronômicos nas classes funcionais estabelecidas, garantindo coerência com a realidade

prática. Dessa forma, a proposta de classificação resultante apresentada no decorrer do texto foi embasada estatisticamente e tecnicamente, se tornando viável e adequada às demandas práticas de recomendação no campo.

A escolha da tensão superficial e do ângulo de contato como as variáveis para avaliar o grau de espalhamento dos adjuvantes baseia-se na relevância físico-química e prática dessas propriedades para aplicações agrícolas. A tensão superficial influencia diretamente o comportamento das gotas ao serem formadas e depositadas, afetando o escoamento e a estabilidade sobre superfícies. Já o ângulo de contato representa a interação da calda com a superfície-alvo, sendo uma medida direta do espalhamento da gota. Essas variáveis são amplamente reconhecidas na literatura como determinantes da eficiência de espalhamento, cobertura e adesão dos produtos aplicados (Scholz e Simutis, 2022). Por esse motivo, suas análises combinadas permitem uma avaliação robusta, objetiva e funcional para a classificação e recomendação técnica de adjuvantes em caldas fitossanitárias utilizadas em pulverizações agrícolas.

Além disso, a escolha dos adjuvantes comerciais e de suas respectivas dosagens recomendadas como base para a proposta se justifica pelo fato de esses produtos estarem diretamente presentes nas caldas fitossanitárias utilizadas no campo. Como componentes que influenciam as propriedades físico-químicas da calda, os adjuvantes têm papel determinante na modulação da tensão superficial e do ângulo de contato, promovendo variações expressivas nessas variáveis conforme sua formulação e concentração (Hartzler, 2023). A inclusão das dosagens recomendadas pelos fabricantes amplia a aplicabilidade da proposta, pois permite avaliar o efeito da concentração no comportamento das gotas. Além disso, a classificação resultante poderá servir como referência para a indústria, permitindo que fabricantes de adjuvantes desenvolvam e enquadrem seus produtos em faixas de funcionalidade de espalhamento, favorecendo a comunicação técnica e a recomendação agrônômica.

Gráficos de dispersão entre pares das variáveis tensão superficial e ângulo de contato (pairplots) foram elaborados com o objetivo de explorar visualmente os padrões de correlação, distribuição dos dados e estruturas de agrupamento entre os adjuvantes e dosagens utilizados. Essa abordagem permitiu a identificação de relações lineares ou

não lineares, bem como tendências, contribuindo para uma compreensão inicial do comportamento físico de espalhamento das caldas fitossanitárias avaliadas. Além disso, essa análise exploratória serviu como etapa preliminar para análises multivariadas subsequentes, como análise de componentes principais e análise de agrupamento.

A análise de componentes principais (PCA) foi realizada com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar padrões de variação entre os tratamentos avaliados, com base nas variáveis físicas de tensão superficial e ângulo de contato. A PCA permitiu a transformação das variáveis originais em componentes principais ortogonais (PCs), ordenados conforme a variância explicada por cada um. A variância explicada pelos componentes principais 1 (PC1) e 2 (PC2) foi utilizada como critério para validação da redução de dimensionalidade.

Além de facilitar a visualização da distribuição dos tratamentos no espaço multivariado, essa análise possibilitou a identificação da variável com maior contribuição (peso) para a formação dos componentes. Com isso, foi avaliada a viabilidade de representar a funcionalidade de espalhamento das caldas por meio de uma única variável, desde que essa apresentou representatividade estatística e aplicabilidade prática.

Para a PCA, foram gerados três tipos de visualizações: um gráfico de dispersão dos scores nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), com codificação de cores para os tratamentos e respectivas dosagens (mínima e máxima); um gráfico de dispersão com elipses de agrupamento, com nível de confiança de 95%, utilizado para avaliar a proximidade e separação entre os grupos de tratamentos; e um biplot dos componentes principais, contendo os vetores das variáveis originais, indicando sua direção e a magnitude de contribuição de cada variável para a formação dos componentes extraídos.

E a análise de agrupamento hierárquico (cluster) foi realizada com o objetivo de identificar similaridades entre os tratamentos avaliados. A análise foi conduzida com base na variável selecionada na análise de componentes principais, que demonstrou maior representatividade para a descrição do comportamento de espalhamento das caldas fitossanitárias. Os dados foram previamente normalizados (média zero e desvio padrão

um) e a matriz de distâncias foi construída com base na métrica euclidiana. A ligação entre os agrupamentos foi feita pelo método de Ward, o qual minimiza a variância dentro dos grupos formados. Os resultados foram representados por meio de um dendrograma, permitindo a visualização da estrutura hierárquica entre os tratamentos e a identificação de grupos com comportamento semelhante.

Juntas, essas abordagens permitiram a identificação de padrões, seleção de variáveis representativas e organização dos tratamentos em grupos funcionalmente distintos, subsidiando a proposta de grau de espalhamento baseada na variável mais relevante.

2.3. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas na linguagem Python (versão 3.12.7), com o auxílio das bibliotecas Pandas, NumPy, Seaborn, Matplotlib, SciPy, Scikit-learn e Pingouin (Python Software Foundation, 2024). Foram elaborados gráficos de dispersão entre pares das variáveis (pairplots), utilizando a biblioteca Seaborn. Para a análise de componentes principais (PCA), os dados foram previamente padronizados (média zero e desvio padrão um), e a adequação dos dados à análise fatorial foi verificada por meio do teste de esfericidade de Bartlett e da medida de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), ambos realizados com a biblioteca Pingouin e a análise do coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis. A PCA foi conduzida com a biblioteca Scikit-learn e as visualizações gráficas foram geradas com o auxílio das bibliotecas Matplotlib e Seaborn. A variância explicada pelos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) foi utilizada como critério para validação da redução de dimensionalidade.

A análise de agrupamento hierárquico (cluster), foi realizada com base na variável selecionada pela PCA. Antes da análise, os dados foram padronizados e a normalidade da variável foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk, por meio da função normality da biblioteca Pingouin, com nível de significância de 5%. A matriz de distâncias foi calculada com a métrica euclidiana e a ligação entre os agrupamentos foi feita pelo

método de Ward. O resultado foi representado por meio de um dendrograma, permitindo a visualização das similaridades entre os tratamentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados de densidade da tensão superficial de adjuvantes agrícolas utilizados pelos produtores rurais e recomendados pelos fabricantes. É possível observar que os adjuvantes apresentam comportamentos distintos, com variações na tensão superficial ao longo do intervalo analisado (Figura 2^a). Alguns produtos reduziram expressivamente a tensão, enquanto outros apresentaram menor eficiência nesse parâmetro. Além disso, é possível observar que os valores de tensão se concentraram entre 30 e 50 mN m⁻¹, e variaram entre 20 e 80 mN m⁻¹, aproximadamente. Essas diferenças sugerem que os produtos têm comportamentos distintos dependendo da composição e formulação, o que pode impactar sua funcionalidade em aplicações agrícolas.

Os resultados de densidade do ângulo de contato de adjuvantes agrícolas utilizados pelos produtores rurais e recomendados pelos fabricantes são apresentados a seguir (Figura 2C). É possível observar uma ampla variação nos valores de ângulo entre os tratamentos, indicando diferenças na capacidade de espalhamento dos produtos sobre a superfície artificial, essa variação foi de próximo a 0 até 120°, aproximadamente. Enquanto alguns adjuvantes resultaram em menores ângulo de contato, outros apresentaram valores mais elevados, indicando menor eficiência no espalhamento da gota sobre o alvo.

Esses resultados reforçam que há comportamentos distintos existentes dos adjuvantes em relação ao espalhamento, dependendo da composição e formulação, o que pode impactar na escolha de qual será usado para determinada aplicação fitossanitária. Além disso, mostra que para a funcionalidade espalhamento existem níveis que mudam conforme a composição, formulação e afinidade do produto com a superfície de interesse.

O gráfico de dispersão (Figura 2B) mostra a relação entre a tensão superficial e o ângulo de contato de diferentes formulações e dosagens de adjuvantes. Observa-se uma relação crescente entre as variáveis, com correlação positiva ($r = 0,89$; $p < 0,0001$). Essa relação indica que o espalhamento da gota na superfície alvo diminui conforme aumenta a tensão superficial, uma vez que ângulos de contato mais altos estão associados a menor espalhamento da calda fitossanitária sobre a superfície (Zhang et al., 2023). Além da tendência geral, observa-se que, em valores mais baixos de tensão superficial, essa variável tende a se estabilizar, atingindo um patamar mínimo. No entanto, o ângulo de contato continua a diminuir, chegando a valores próximos de zero. Esse comportamento sugere que outros fatores além da tensão superficial podem estar contribuindo para o aumento do efeito espalhante.

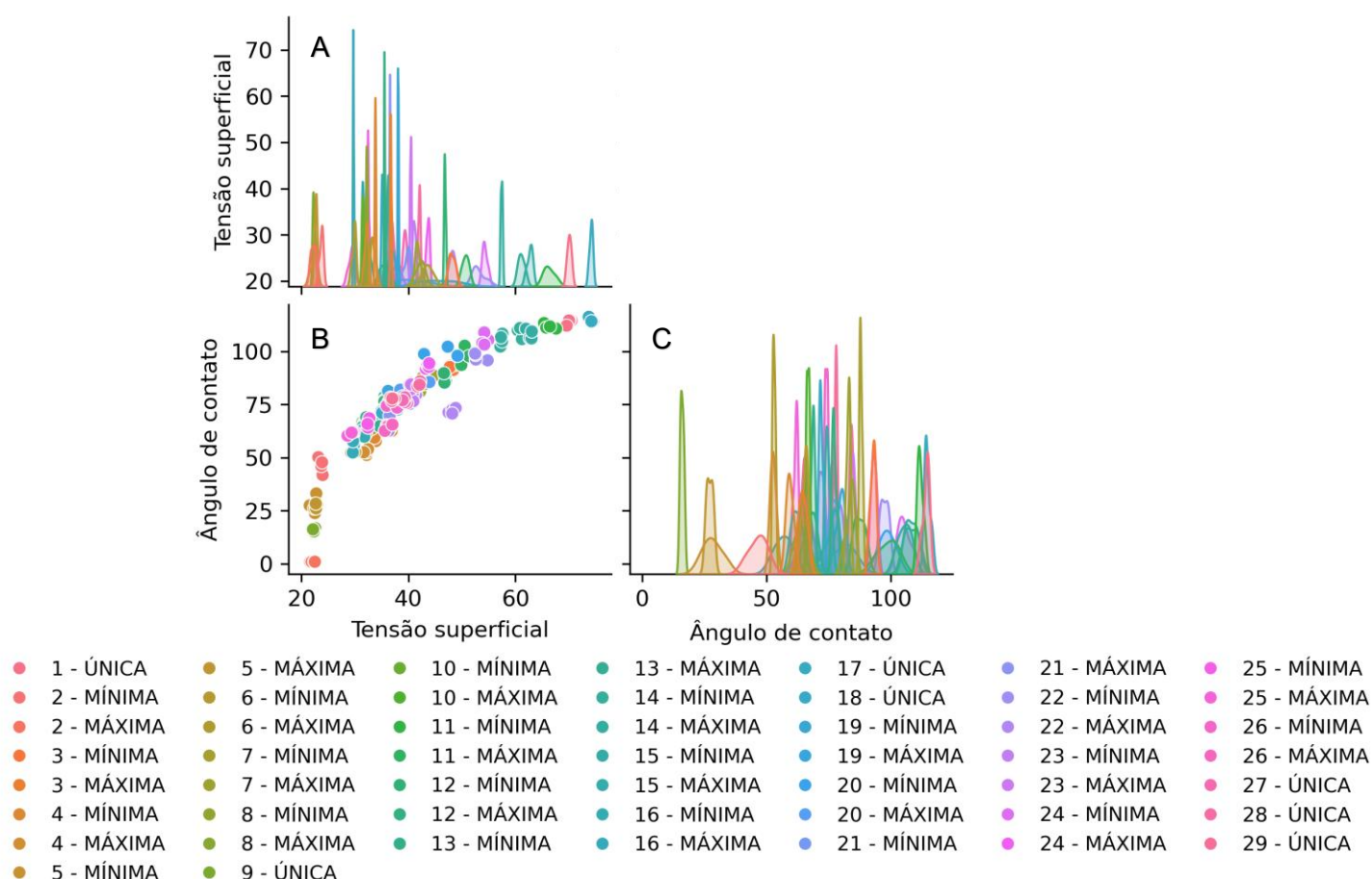


Figura 2. Densidade de distribuição da tensão superficial (mN m^{-1}) entre os tratamentos com adjuvantes (A); dispersão entre ângulo de contato e tensão superficial (B); densidade de distribuição do ângulo de contato (C).

*As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas dosagens mínima e máxima.

Observa-se nos resultados de dispersão e distribuição que houve variações significativas na tensão superficial e no ângulo de contato entre adjuvantes agrícolas nas caldas fitossanitárias. Essas variações indicam que a composição e a formulação dos adjuvantes influenciam diretamente na capacidade de espalhamento das caldas sobre as superfícies alvo.

A adição de adjuvantes nas caldas tem como um dos objetivos principais e mais utilizados a redução da tensão superficial, podendo promover maior contato da gota com a superfície foliar, o que pode melhorar a cobertura do produto aplicado no tratamento

fitossanitário (Hartzler, 2023). Os adjuvantes podem reduzir a tensão superficial da água de aproximadamente 72 mN m^{-1} para valores entre 25 e 35 mN m^{-1} , otimizando a capacidade de espalhamento das gotas sobre as folhas das culturas, levando em consideração que a água é o diluente universal mais utilizado nas caldas fitossanitárias (Gaion et al., 2015; Santos et al., 2021; Cao et al., 2023).

O ângulo de contato é uma das variáveis fundamentais na avaliação da espalhabilidade sobre a superfície, sendo que menores valores indicam maior espalhamento da gota (Hartzler, 2023). Caldas fitossanitárias que promovem maior redução no ângulo de contato são consideradas mais eficazes nesse aspecto. De acordo com Zhang et al., (2023), adjuvantes à base de polímeros foram capazes de reduzir o ângulo de contato em até 54,96% em relação à água, enquanto adjuvantes siliconados alcançaram reduções próximas a 100%, evidenciando superioridade destes em termos de capacidade de espalhamento.

Os adjuvantes podem atuar de maneira distinta sobre a tensão superficial e o ângulo de contato das gotas, sendo capazes de reduzir a tensão até valores próximos de 20 mN m^{-1} e o ângulo de contato para praticamente 0° (Figura 2). Essa ação se deve à presença de determinados tipos de moléculas na composição dos adjuvantes, como as anfifílicas, que atuam na interface ar-líquido, rompendo as forças coesivas da água e promovendo a redução da tensão superficial, o que favorece o espalhamento da gota sobre a superfície foliar (Phan, 2023).

Dentre os adjuvantes disponíveis, os à base de silicone, especialmente os 74rganosiliconados como o polidimetilsiloxano e o polidimetilsiloxano etoxilado, estão entre os mais eficazes nesse processo (Owen, 2021). Esses compostos são capazes de reduzir a tensão superficial da água, que naturalmente é de aproximadamente 72 mN m^{-1} , para valores inferiores a 25 mN m^{-1} (Gaion et al., 2015; Santos et al., 2021; Cao et al., 2023). Como consequência, o ângulo de contato da gota com superfícies cerosas ou hidrofóbicas, que normalmente excede 100° quando se utiliza apenas água, pode ser reduzido para menos de 10° , favorecendo um espalhamento quase instantâneo e completo (Santos et al., 2021).

Além dos adjuvantes siliconados, os não iônicos, compostos por álcoois graxos etoxilados, também são amplamente empregados, promovendo a redução da tensão superficial para valores entre 30 e 40 mN m⁻¹, o que pode melhorar significativamente a espalhabilidade e a cobertura foliar dos produtos aplicados (Abbott et al., 2021; Cao et al., 2023). Esses efeitos podem contribuir diretamente para o aumento da eficácia do controle fitossanitário, a redução de perdas por deriva ou evaporação, além de favorecerem a deposição, o depósito e a absorção dos ingredientes ativos na superfície-alvo (Basílio et al., 2024; Brankov et al., 2025).

A relação entre a tensão superficial e o ângulo de contato foi positiva, com valores mais elevados de tensão associados a ângulos de contato maiores. No entanto, em níveis mais baixos de tensão superficial, observa-se uma estabilização dessa variável, que atinge um patamar mínimo, enquanto o ângulo de contato continua a diminuir, chegando a valores próximos de zero. Nessa faixa, diferentes adjuvantes podem apresentar valores semelhantes de tensão superficial, mas ainda assim gerar ângulos de contato distintos. Esse comportamento pode estar relacionado à velocidade com que o surfactante migra para a extremidade da gota. Quanto mais rápida essa migração, menor tende a ser o ângulo de contato e, conseqüentemente, maior o espalhamento da gota sobre a superfície. Essa dinâmica depende mais da natureza química do surfactante do que de sua concentração na solução (Varghese et al., 2024).

O comportamento de espalhamento das caldas fitossanitárias sobre as superfícies não depende apenas da tensão superficial, mas também de variáveis como a viscosidade da calda, o tipo de surfactante presente na formulação, a rugosidade da superfície, pilosidade, quantidade de cera, composição da cutícula e da interação entre esses fatores (Saxena e Chen, 2023; Zhang et al., 2023). Esses elementos afetam diretamente os valores dos ângulos de contato, alterando a espalhabilidade e a cobertura da gota sobre o alvo. Nesse contexto, o tipo de adjuvante utilizado exerce papel fundamental, uma vez que diferentes compostos promovem diferentes graus de redução da tensão superficial, do ângulo de contato e da afinidade com a superfície.

Os resultados da análise de componentes principais (PCA), realizada para identificar padrões de agrupamento e diferenças entre os tratamentos compostos pelos

adjuvantes em dosagens mínimas e máximas recomendadas, com base nas variáveis de tensão superficial e ângulo de contato são apresentados a seguir. A distribuição dos adjuvantes ao longo dos dois primeiros componentes principais é apresentada na análise de componentes principais (Figura 3). O componente principal 1 (PC1) é responsável por 94,8% da variância total explicada dos tratamentos e obtém a maior parte das informações do conjunto de dados. Enquanto, o componente principal 2 (PC2) representa 5,19% da variância. Esses dois componentes explicam 100% da variância observada dos dados, o que indica que toda a variação entre os tratamentos pode ser visualizada nesse plano bidimensional, sendo o PC1 o que explica a maior parte das diferenças entre os tratamentos.

Ainda é possível observar que existem diferenças entre os adjuvantes e até mesmo diferenças entre as dosagens mínimas e máximas recomendadas para o mesmo adjuvante (Figura 3). Por exemplo, os tratamentos 22 – máxima e mínima são o mesmo adjuvante e devido a dosagem apresentam comportamentos distintos, o mesmo ocorreu para os tratamentos 12 – máxima e mínima. Além disso, é possível observar a alta concentração dos tratamentos próximos à origem indicando similaridade entre eles. No entanto, é observado a presença de tratamentos com comportamentos bem distintos, como o 17 – máxima e o 2 – máxima, que se distanciam ao longo do PC1 (Figuras 3 e 4).

O biplot bidimensional resultante da análise de componentes principais (PCA), com as variáveis (tensão superficial e ângulo de contato) projetadas sobre o espaço PCA, é apresentado a seguir (Figura 5). As setas vetoriais representam as direções dos carregamentos (loadings) das variáveis nos componentes principais. A variável tensão superficial está fortemente associada a ambos os componentes, com carga de 0,707 em PC1 e PC2, posicionando-se no primeiro quadrante, o que indica que esta variável contribui positivamente tanto para PC1 quanto para PC2. Por outro lado, a variável ângulo de contato apresenta uma carga positiva em PC1 e negativa em PC2 (0,707), estando localizada no quarto quadrante. A disposição das setas no gráfico mostra que ambas as variáveis estão equidistantes da origem, o que reflete uma magnitude igual dos

carregamentos e, portanto, influência equivalente sobre a formação do componente PC1, que representa a maior parte da variabilidade dos dados.

Considerando a natureza das variáveis analisadas, o PC1 por ser o componente com maior explicação para a variação entre os tratamentos, pode ser interpretado como um eixo representativo da capacidade de espalhamento das caldas fitossanitárias, uma vez que tanto a tensão superficial quanto o ângulo de contato estão diretamente associados a esse fenômeno, influenciando a forma como um líquido interage com uma superfície sólida. De modo geral, líquidos que apresentam baixa tensão superficial e baixo ângulo de contato tendem a se espalhar mais facilmente, indicando maior afinidade com a superfície (Zhang et al., 2023). Assim, o PC1 reflete um gradiente físico relacionado ao comportamento de espalhamento das soluções avaliadas.

Apesar de tanto a tensão superficial quanto o ângulo de contato estarem diretamente relacionados ao espalhamento e ao componente principal 1 (PC1), o grau de espalhamento dos adjuvantes foi determinado com base no ângulo de contato. Isso porque o ângulo de contato representa, de forma mais direta, o comportamento da calda fitossanitária sobre a superfície de interesse, permitindo avaliar o grau de espalhamento efetivo. Enquanto a tensão superficial é uma propriedade inerente ao líquido, o ângulo de contato reflete a interação entre o líquido e a superfície, sendo influenciado por ambos (Scholz e Simutis, 2022). Por essa razão, o ângulo de contato foi adotado como parâmetro para a análise de agrupamento hierárquico.

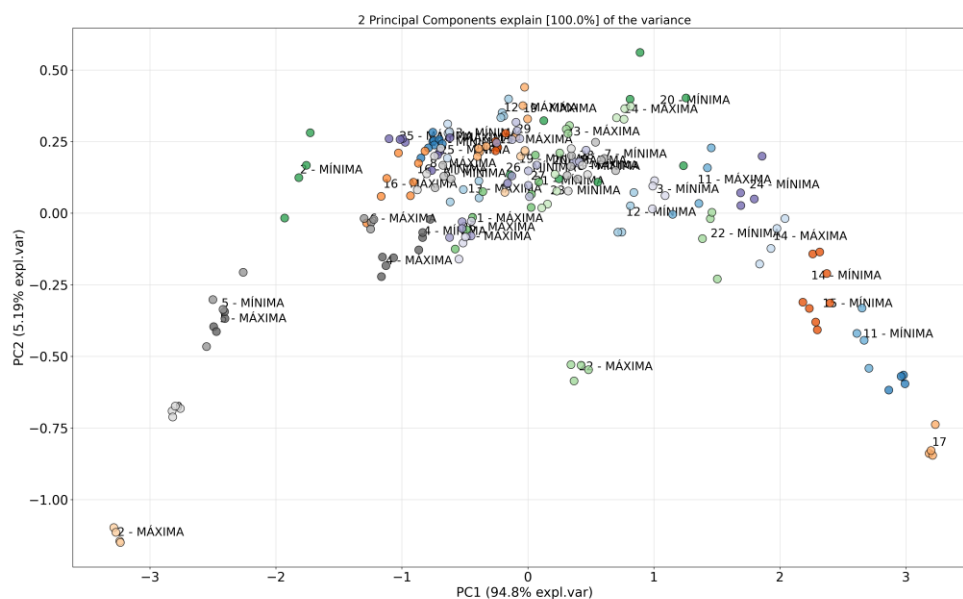


Figura 3. Dispersão dos tratamentos com adjuvantes nas doses mínima e máxima, conforme análise de componentes principais (PCA).

*As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas dosagens mínima e máxima.

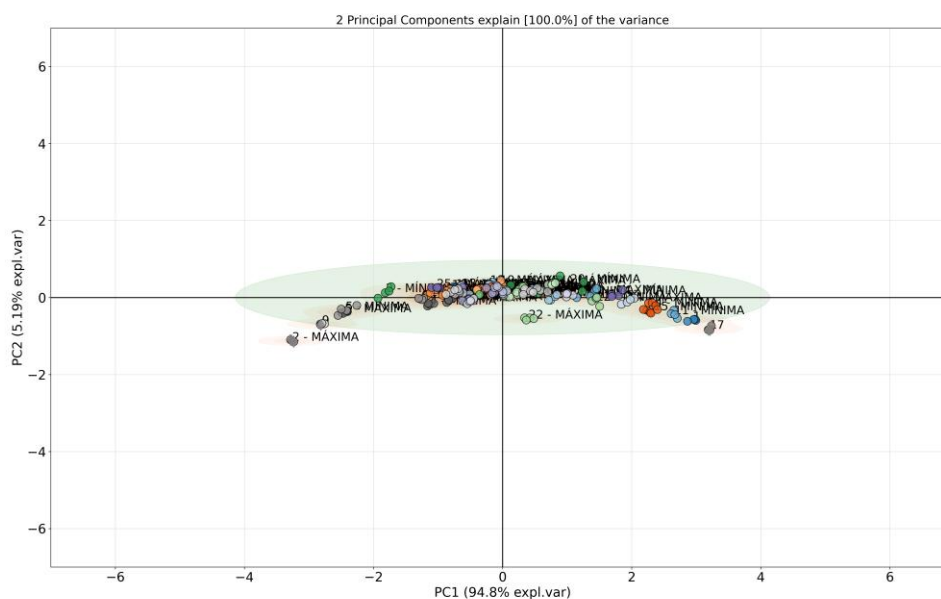


Figura 4. Dispersão dos tratamentos com adjuvantes nas doses mínima e máxima, conforme análise de componentes principais (PCA), com sobreposição das elipses de agrupamento.

*As elipses representam agrupamentos com base na similaridade entre os tratamentos. As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas dosagens mínima e máxima.

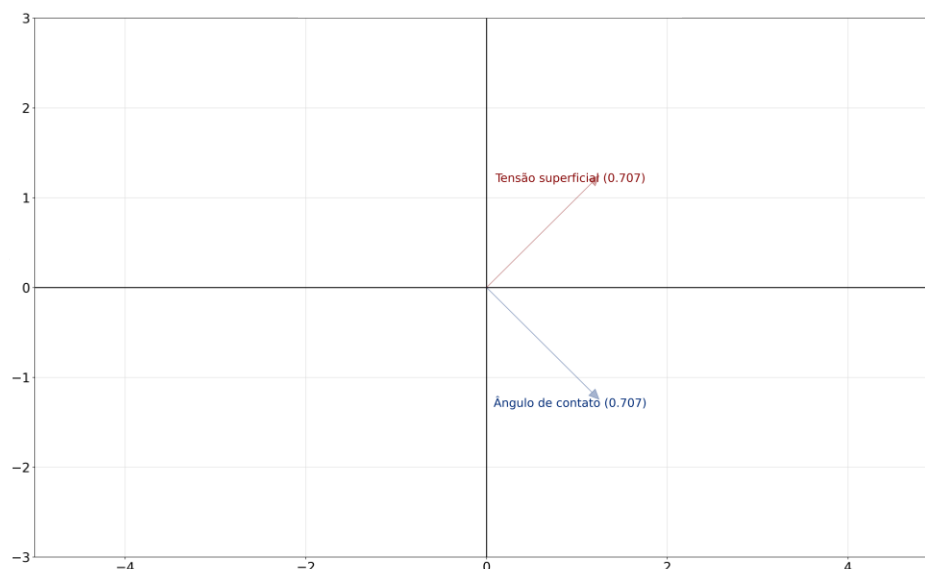


Figura 5. Projeção das variáveis tensão superficial (mN m^{-1}) e ângulo de contato ($^{\circ}$) nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), conforme análise de componentes principais (PCA).

A análise de componentes principais (PCA) indicou que o componente PC1, responsável por 94,8% da variância, está fortemente relacionado tanto ao ângulo de contato quanto à tensão superficial, refletindo um gradiente contínuo de espalhamento das caldas. Esse resultado permitiu interpretar o PC1 como um eixo de espalhamento, conceito também adotado por autores que relacionam variáveis físico-químicas a propriedades funcionais das pulverizações agrícolas, como no trabalho de Cryer e Raymond (2024), que identificou o PC1 como eixo de dispersão para tamanho de gotas.

A PCA ainda permitiu identificar que a mesma formulação pode ter comportamentos distintos conforme a dosagem utilizada, fato observado para vários tratamentos no presente estudo e já relatado em pesquisas anteriores sobre dependência dose-efeito na ação de adjuvantes (Milanowski et al., 2022; Saxena e Chen, 2023). As dosagens podem potencializar ou limitar o efeito do adjuvante sobre determinada variável analisada, como tensão superficial e ângulo de contato. Assim, a eficiência do

espalhamento está diretamente relacionada tanto à natureza do adjuvante quanto à concentração utilizada, o que reforça a necessidade de uma avaliação técnica na escolha e recomendação desses insumos.

Apesar de as variáveis tensão e ângulo estarem associadas ao comportamento da gota sobre a superfície, optou-se por utilizar o ângulo de contato como variável principal para a análise de cluster e diferenciação dos adjuvantes. Essa decisão se justifica pelo fato de o ângulo de contato refletir diretamente a interação entre o líquido e a superfície sólida, sendo sensível a fatores como composição da folha, tipo de tensoativo e presença de ceras (Hartzler, 2023). Em contrapartida, a tensão superficial é uma propriedade inerente à calda, que não considera a natureza do alvo. Portanto, os resultados da PCA fornecem suporte estatístico robusto e fundamentos pela literatura para a adoção do ângulo de contato como critério de agrupamento.

O dendrograma apresentado a seguir permite visualizar a estrutura de agrupamentos dos tratamentos em função dos adjuvantes e as dosagens mínimas e máximas recomendadas pelos fabricantes. A representação gráfica mostra a similaridade entre os tratamentos, onde aqueles com maior proximidade são mais semelhantes em relação ao ângulo de contato (Figura 6).

Os adjuvantes que compartilham a mesma coloração no dendrograma pertencem a um mesmo grupo, indicando semelhança entre si com base na variável analisada. Esses adjuvantes foram, portanto, agrupados dentro da mesma classe. Por outro lado, os adjuvantes representados por cores diferentes formam grupos distintos, totalizando 8 agrupamentos. Esses agrupamentos refletem padrões de resposta semelhantes em relação ao ângulo de contato, permitindo a definição de classes de níveis para esse parâmetro. Esse resultado é coerente com a análise de componentes principais (PCA), na qual o componente principal 1 (PC1) foi fortemente associado ao ângulo de contato, sendo interpretado como uma medida de espalhamento. Assim, o agrupamento gerado pela análise de cluster com base no ângulo de contato serviu como base para a diferenciação dos adjuvantes em relação ao espalhamento.

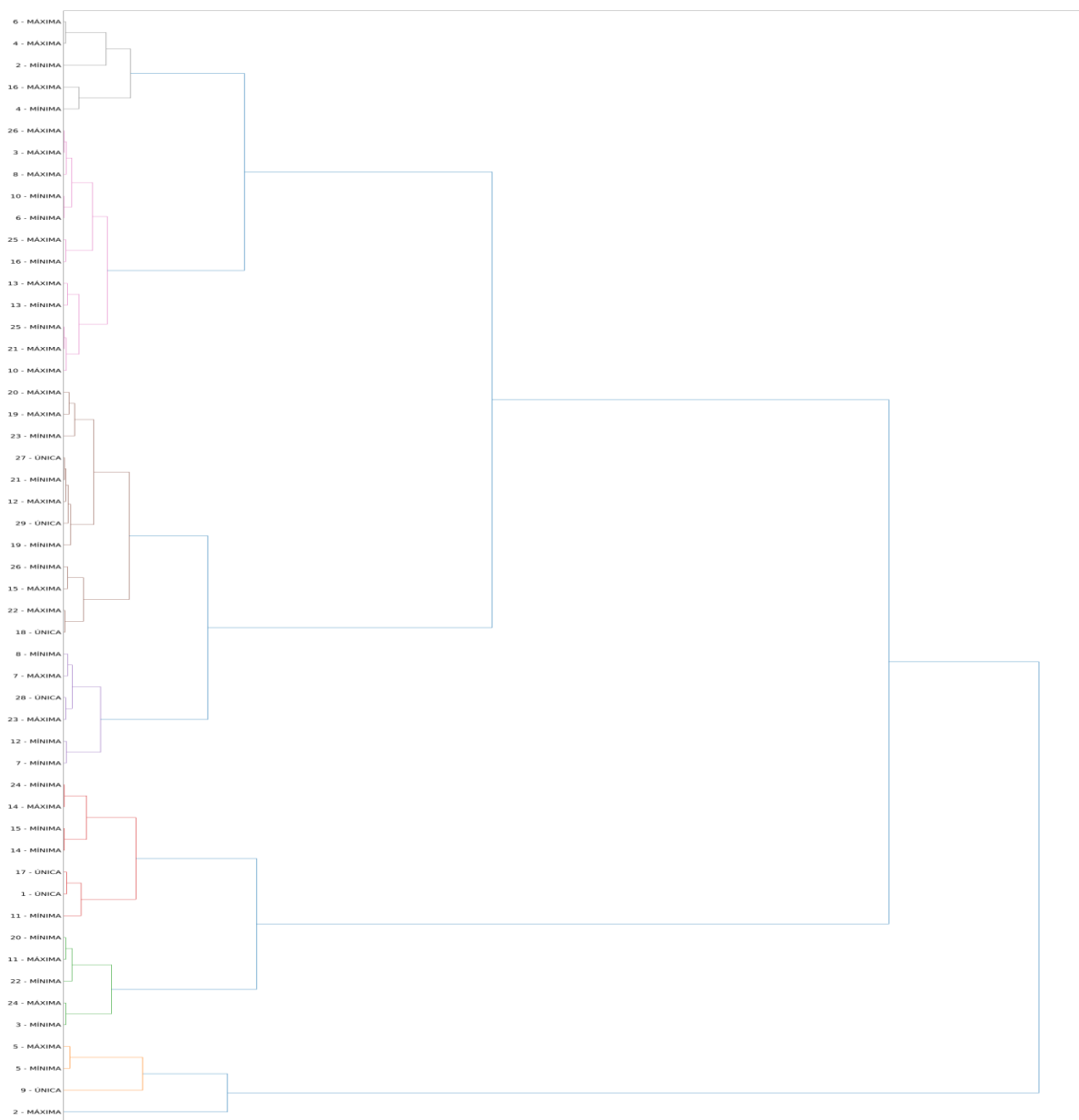


Figura 6. Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico dos tratamentos com adjuvantes nas dosagens mínima e máxima, com base na variável ângulo de contato ($^{\circ}$).

* As cores indicam os diferentes grupos formados, sendo que tratamentos com a mesma cor pertencem ao mesmo grupo.

Os agrupamentos observados no dendrograma da Figura 6 foram reorganizados na Tabela 1, em ordem decrescente com base nos intervalos de ângulo de contato. Dessa forma, o Grupo 1 reúne os adjuvantes com os maiores valores de ângulo de contato, enquanto o Grupo 8, aquele com o menor valor, refletindo, respectivamente, os extremos superior e inferior dos dados obtidos com os tratamentos utilizados. A tabela apresenta todos os adjuvantes avaliados, acompanhados de seus valores individuais de ângulo de contato.

Os adjuvantes foram distribuídos de acordo com seus respectivos níveis de espalhamento agrupados na análise de Cluster, sendo o Grupo 1 composto por caldas com ângulos de contato superiores a 105° . À medida que se avança para os demais grupos, observa-se uma redução gradual nos valores de ângulo de contato, o que reflete aumentos progressivos na capacidade de espalhamento da calda sobre a superfície. O Grupo 8, por sua vez, reuniu os adjuvantes com os menores ângulos de contato (entre 1° e 0°).

A organização da Tabela 1 em faixas de ângulo de contato facilitou a visualização dos limites numéricos que separam os grupos. Por exemplo, o Grupo 1 compreende adjuvantes com ângulo de contato entre 115° e 105° , o Grupo 2 entre 99° e 93° , o Grupo 3 entre 88° e 83° , e assim sucessivamente, até o Grupo 8, que abrange os valores mais baixos. Essa segmentação contribui para evidenciar a transição entre os níveis de espalhamento.

Ainda na Tabela 1 é possível observar que os valores de ângulo de contato dos adjuvantes avaliados se concentram majoritariamente nos Grupos 4 e 5, que abrangem as faixas de 81° a 72° e 68° a 62° , respectivamente. Esses dois grupos reúnem o maior número de composições avaliadas nesse experimento, indicando que a maioria apresenta comportamento intermediário de espalhamento. Além disso, é notável que um mesmo adjuvante pode ser classificado em grupos distintos, a depender da dosagem utilizada. Por exemplo, o adjuvante 2 foi classificado no Grupo 6 quando avaliado na dosagem mínima, enquanto sua dosagem máxima o posicionou no Grupo 8, evidenciando um comportamento de espalhamento mais acentuado nesta condição. Esses resultados encontrados na análise de componentes principais (PCA) e na análise

de agrupamento (cluster), evidenciam que o desempenho em espalhamento varia não apenas entre os produtos, mas também em função da dosagem recomendada.

Tabela 1. Agrupamento dos tratamentos com adjuvantes, com base nos valores de ângulo de contato ($^{\circ}$), conforme análise de agrupamento hierárquico (dendrograma).

Adjuvantes	Ângulo de contato ($^{\circ}$)	Faixa de ângulo de contato ($^{\circ}$)	Grupo
17 – ÚNICA	115	115 – 105	1
1 – ÚNICA	114		
11 – MÍNIMA	112		
14 – MÍNIMA	108		
15 – MÍNIMA	108		
24 – MÍNIMA	105		
14 – MÁXIMA	105		
11 – MÁXIMA	99	99 – 93	2
20 – MÍNIMA	98		
22 – MÍNIMA	97		
3 – MÍNIMA	93		
24 – MÁXIMA	93		
7 – MÍNIMA	88	88 – 83	3
12 – MÍNIMA	87		
8 – MÍNIMA	84		
23 – MÁXIMA	84		
28 – ÚNICA	84		
7 – MÁXIMA	83		
20 – MÁXIMA	81	81 – 72	4
19 – MÁXIMA	80		
23 – MÍNIMA	79		
29 – ÚNICA	78		
12 – MÁXIMA	77		
21 – MÍNIMA	77		
27 – ÚNICA	77		

19 – MÍNIMA	76		
15 – MÁXIMA	75		
26 – MÍNIMA	74		
18 – ÚNICA	72		
22 – MÁXIMA	72		
13 – MÍNIMA	68	68 – 62	5
13 – MÁXIMA	68		
10 – MÁXIMA	67		
21 – MÁXIMA	66		
25 – MÍNIMA	66		
6 – MÍNIMA	65		
10 – MÍNIMA	65		
26 – MÁXIMA	65		
3 – MÁXIMA	64		
8 – MÁXIMA	64		
16 – MÍNIMA	62		
25 – MÁXIMA	62		
4 – MÍNIMA	59	59 – 46	6
16 – MÁXIMA	57		
4 – MÁXIMA	53		
6 – MÁXIMA	53		
2 – MÍNIMA	46		
5 – MÍNIMA	28	28 – 16	7
5 – MÁXIMA	27		
9 – ÚNICA	16		
2 – MÁXIMA	1	1 – 0	8

A abordagem estatística por meio da análise de cluster possibilitou a identificação de faixas distintas de espalhamento entre os tratamentos, com base na similaridade dos valores observados. Os grupos foram delimitados conforme a distribuição dos dados, diferenciando os adjuvantes quanto aos seus graus de espalhamento, sendo os grupos

iniciais associados aos menores níveis. Essa análise permitiu agrupar os adjuvantes em faixas de ângulo de contato, o que viabiliza a visualização inicial de classes funcionais relacionadas ao espalhamento.

Assim, com base nos resultados obtidos, foi possível propor uma classificação de faixas para a funcionalidade espalhamento dos adjuvantes nas caldas fitossanitárias. A análise de agrupamento foi fundamental para a criação inicial das classes, com base na estatística, permitindo a definição das faixas de classificação ajustadas para composição de classes subdivididas e sequenciais entre os intervalos gerados para os grupos, como no caso da Classe 1, que abrange valores de 115 a 105°, e da Classe 2, que vai de 99 a 93°, estabelecendo-se uma classe existente entre os valores de 105 e 99°.

Diante disso, houve um refinamento das faixas estabelecidas, de modo a garantir uma classificação contínua, coerente e que abrange todos os valores observados (Tabela 2). Esse ajuste considerou critérios agronômicos, funcionais e práticos, a fim de tornar a classificação aplicável em contextos reais de recomendação e uso técnico.

As novas faixas foram definidas com base na amplitude dos dados observados, respeitando a distribuição dos grupos originais (Tabela 2), mas com ajustes para eliminar lacunas e garantir uma categorização mais robusta e funcional. Em complemento, para embasar os ajustes na proposta de classificação, foram utilizadas imagens dos ângulos de contato, com valores decrescentes, obtidas 10 segundos após a deposição das gotas (Figura 7). As alterações visuais significativas nos ângulos, associadas ao impacto no espalhamento sobre a superfície, foram consideradas como critério complementar na definição das faixas. Além disso, foram atribuídas nomenclaturas às classes com base no comportamento de espalhamento, permitindo uma interpretação prática e direta dos resultados.

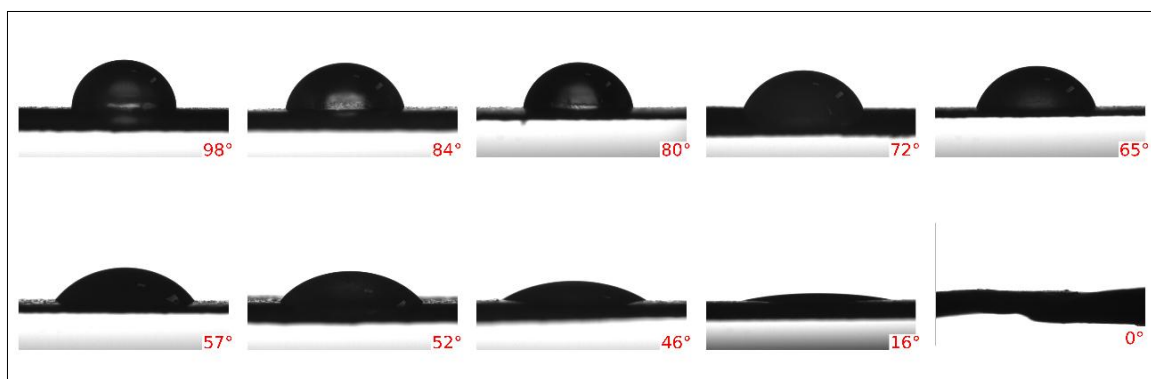


Figura 7. Ângulo de contato de caldas fitossanitárias com valores decrescentes da esquerda para direita e de cima para baixo.

Tabela 2. Proposta de classificação de faixas para a funcionalidade espalhamento dos componentes nas caldas fitossanitárias.

Classificação	Faixa de ângulo de contato (ac) (°)	Funcionalidade
1	$ac > 90$	SEM CONTATO
2	$ac = 90$	SEM ESPALHAMENTO
3	$65 \leq ac < 90$	ESPALHAMENTO BAIXO
4	$50 \leq ac < 65$	ESPALHAMENTO MODERADO
5	$38 \leq ac < 50$	ESPALHAMENTO INTERMEDIÁRIO
6	$27 \leq ac < 38$	ESPALHAMENTO ALTO
7	$16 \leq ac < 27$	ESPALHAMENTO MUITO ALTO
8	$ac < 16$	ESPALHAMENTO EXTREMAMENTE ALTO

A Classe 1 da classificação inclui caldas fitossanitárias com ângulo de contato superior a 90° , caracterizadas por uma funcionalidade hidrofóbica, indicando baixa afinidade com a superfície alvo. Na Classe 2 estão os produtos com o valor de 90° , cujo comportamento pode ser descrito como sem espalhamento, havendo uma pequena redução na hidrofobicidade em relação à Classe 1, embora ainda com limitação significativa na capacidade de espalhamento na superfície. A Classe 1 recebeu a denominação de hidrofóbica, considerando que o ângulo de 90° representa o ponto de inflexão entre as classificações de hidrofobicidade e hidrofilicidade, onde valores

superiores a 90° indicam superfícies hidrofóbicas, enquanto valores inferiores indicam superfícies hidrofílicas (Law, 2015). Para contemplar adequadamente o valor de 90° , foi criada uma classe específica (Classe 2), denominada sem espalhamento.

As Classes 1 e 2 englobam caldas fitossanitárias com ângulos de contato iguais ou superiores a 90° , o que indica baixa ou nenhuma capacidade de espalhamento sobre a superfície vegetal. Essa limitação pode comprometer a cobertura superficial, reduzindo o potencial de deposição do produto fitossanitário no alvo biológico. Nessas condições, as gotas pulverizadas podem ricochetejar ou escorrer pela superfície, atingindo áreas não alvo diminuindo a eficiência do tratamento fitossanitário (Dorr et al., 2014; Damak et al., 2022).

Além disso, a Classe 1 definida como hidrofóbica, inclui, por exemplo, o tratamento contendo apenas água, sem adição de produtos, que apresentou um ângulo de contato de 114° . Esse valor justifica a nomenclatura atribuída à classe, uma vez que expressa a baixa afinidade da água com a superfície foliar, reforçando seu comportamento hidrofóbico e limitação de espalhamento sobre o alvo de interesse (Chen et al., 2025).

A Classe 3 abrange a faixa de ângulo de contato entre $89,9$ e 65° e tem como funcionalidade espalhamento baixo. O intervalo definido para essa classe é mais amplo em comparação com as demais classes, uma vez que as reduções progressivas dos valores dentro dessa faixa não resultaram em alterações visivelmente significativas no comportamento de espalhamento das gotas sobre a superfície artificial (Figura 7). Conforme os valores de ângulo decaem, as diferenças de espalhamento são maiores e mais impactantes visualmente e agronomicamente, com efeitos maiores no contato com os alvos, mas também na evaporação e na absorção do líquido (Jing et al., 2023).

As classes subsequentes foram definidas com intervalos decrescentes de ângulos de contato, variando aproximadamente entre 10 e 15 unidades, de forma a manter uma distribuição contínua. A Classe 4 abrange os valores entre $64,9$ e 50° , sendo correspondente à funcionalidade de espalhamento moderado. A Classe 5 compreende a faixa de $49,9^\circ$ a 38° , reunindo caldas fitossanitárias classificadas como de espalhamento intermediário. Já a Classe 6, com intervalo entre $37,9^\circ$ e 27° , inclui caldas com

espalhamento alto. A Classe 7 abrange os valores de $26,9^\circ$ a 16° , sendo associada à funcionalidade de espalhamento muito alto. E a Classe 8, correspondente à funcionalidade de espalhamento extremamente alto, abrange caldas fitossanitárias com ângulos de contato entre $15,9^\circ$ e 0° , representando o nível máximo de espalhamento na classificação proposta.

Embora os valores de ângulo de contato utilizados na análise de cluster tenham sido tratados como inteiros, a proposta de classificação final adotou a inclusão de casas decimais nos limites das faixas, como, por exemplo, $89,9^\circ$ ou $15,9^\circ$. Essa forma de uso tem caráter estratégico e funcional, com o objetivo de abranger de forma contínua todos os valores possíveis obtidos experimentalmente e que serão classificados, inclusive aqueles que se situam entre dois números inteiros consecutivos.

A fim de reforçar a consistência técnica e a aplicabilidade prática da proposta desenvolvida neste estudo, é pertinente destacar exemplos de abordagens semelhantes na literatura, que também utilizaram análises estatísticas para estabelecer classificações funcionais em contextos agrícolas. Esses estudos demonstram como a segmentação baseada em variáveis-chave pode contribuir para decisões mais precisas e sustentáveis, oferecendo suporte à construção de categorias técnicas com valor operacional, como a classificação funcional do espalhamento aqui apresentada.

A análise de agrupamento utilizada por Friedrich et al. (2020) teve como objetivo identificar e caracterizar os sistemas de produção de fumo no município de Paraíso do Sul. A partir de 177 questionários aplicados a produtores, foram formados quatro grupos distintos com base em características como área cultivada, tipo de fumo, nível de mecanização, cultivos associados e uso de mão de obra. A técnica mostrou-se eficiente para evidenciar a heterogeneidade produtiva e subsidiar ações de pesquisa, extensão rural e planejamento. De modo semelhante, neste estudo, a análise de agrupamento também foi empregada com sucesso para distinguir grupos de tratamentos com comportamentos semelhantes quanto ao ângulo de contato, permitindo estruturar uma proposta de classificação funcional para o espalhamento de caldas fitossanitárias. Essa aplicação reforça o potencial da técnica para identificar padrões úteis na organização de classes aplicáveis tecnicamente.

A tipologia proposta por Fridman et al. (2021), que classifica terras agrícolas globais em doze grupos com base em atributos de funcionalidade, como requisitos de produção, necessidade de irrigação e condições ambientais (por exemplo, aridez, perda de solo e biodiversidade), reforça a importância das classificações funcionais como instrumento de apoio à tomada de decisão. Fundamentada em mapas auto-organizados (SOM), essa abordagem permitiu distinguir regiões mais favoráveis à produção agrícola e aquelas com limitações ambientais críticas. No contexto do presente estudo, esse princípio foi adaptado para o comportamento físico-químico de caldas, demonstrando que a construção de classificações funcionais, mesmo diante de variabilidade experimental, contribui para organizar tecnicamente os tratamentos e oferecer suporte à recomendação agrônômica, tal como foi feito na definição de faixas de ângulo de contato para diferentes níveis de espalhamento.

As nomenclaturas atribuídas às classes nesta proposta, como “hidrofóbico”, “espalhamento alto” ou “espalhamento extremamente alto”, foram intencionalmente elaboradas para traduzir o comportamento das caldas em termos técnicos de fácil aplicação no campo. Essa prática é respaldada por Brankov et al. (2025) e Magor et al. (2023), que destacam a importância de categorias funcionais bem definidas para orientar o uso racional de adjuvantes em aplicações agrícolas. Ao adotar esse tipo de classificação descritiva e funcional, o presente trabalho busca não apenas sistematizar a interpretação dos resultados, mas também fornecer uma ferramenta útil para fabricantes, técnicos e produtores, ampliando a aplicabilidade prática das análises realizadas.

A identificação de que um mesmo produto pode se enquadrar em diferentes classes conforme a dosagem utilizada indica que um adjuvante formulado pode, com base nesta proposta de classificação, apresentar mais de uma funcionalidade descrita em sua bula de recomendação. Isso permitiria ao fabricante orientar de forma mais precisa o usuário final quanto à dosagem mais adequada para cada situação de aplicação. Além de ser uma ferramenta útil para os fabricantes de adjuvantes, a proposta de classificação funcional baseada no espalhamento também pode ser aplicada à categorização das caldas fitossanitárias e de seus componentes. Dessa forma, o usuário

passa a dispor de uma referência para avaliar se o espalhamento promovido pela calda está alinhado às exigências específicas do tratamento fitossanitário.

O levantamento realizado por Hewitt (2024) indica que, uma vez certificados quanto às suas funcionalidades, os adjuvantes agrícolas podem ser incorporados nos rótulos dos produtos fitossanitários e em programas de boas práticas agrícolas. Essa certificação pode auxiliar na padronização do uso desses produtos, prevenindo aplicações equivocadas e promovendo o uso mais consciente e direcionado dos adjuvantes conforme a necessidade agronômica.

A proposta de classificação para a funcionalidade de espalhamento foi construída com base em análises estatísticas exploratórias, incluindo gráficos de dispersão entre pares de variáveis, análise de componentes principais e análise de cluster, que, embora envolvam certo grau de arbitrariedade, conferiram solidez à segmentação dos dados utilizados. Além disso, sua definição considerou uma descrição racional do uso atual das caldas fitossanitárias em aplicações agrícolas, assegurando equilíbrio entre fundamentação analítica e aplicabilidade prática, o que torna a classificação uma ferramenta promissora para subsidiar decisões mais eficientes e orientadas no manejo fitossanitário.

Essa abordagem pode contribuir para a melhoria das recomendações agronômicas, facilitando a escolha do adjuvante mais adequado às condições específicas de aplicação. Além disso, pode auxiliar fabricantes, pesquisadores e profissionais do campo na padronização e comunicação técnica sobre as funcionalidades dos adjuvantes. Recomenda-se que estudos futuros explorem outras variáveis a fim de propor mais classificações em diferentes contextos.

4. CONCLUSÃO

A avaliação do grau de espalhamento baseada no ângulo de contato demonstrou ser uma estratégia eficaz para diferenciar o desempenho dos adjuvantes quanto à capacidade de espalhamento das caldas fitossanitárias. A utilização das ferramentas

estatísticas exploratórias, incluindo gráficos de dispersão, análise de componentes principais e análise de cluster para diferenciação e agrupamento de resultados permitiu a construção de faixas capazes de representar o comportamento do ângulo de contato como parâmetro de classificação.

5. REFERÊNCIA

Abbott JR, Zhu H, Jeon H (2021) Retention and spread capability of impacted droplets with surfactant and hydrocolloid-based adjuvants. **Transactions of the ASABE** 64:1883-1894.

<https://doi.org/10.13031/trans.14461>

Basílio S, Furtado Júnior MR, Alvarenga CB de, Vitória EL da; Vargas BC, Privitera S, Caruso L, Cerruto E, Manetto G (2024) Effect of adjuvants on physical–chemical properties, droplet size, and drift reduction potential. **Agriculture** 14:2271-2283.

<https://doi.org/10.3390/agriculture14122271>

Brankov M, Simić M, Vukadinović J, Zarić M, Tataridas A, Božinović S, Dragičević V (2025) Could adjuvants serve as an agroecological tool? **Frontiers in Agronomy** 6:e1523208.

<https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1523208>

Cao C, Liu M, Ma X, Chen Y, Huang Q (2023) Enhancing droplets deposition on superhydrophobic plant leaves by bio-based surfactant: experimental characterization and molecular dynamics simulations. **Journal of Molecular Liquids** 392:e122696.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122696>

Chen X, Wen R, Qi G, Xu H, Yuan Z (2025) A general strategy to enhance surface hydrophobicity through modifying a rough-textured surface with weakly hydrophilic element-sulfur. **Journal of Colloid and Interface Science** 642:123-131.

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.01.050>

Cryer S, Raymond J (2024) Interpreting image patterns for agricultural sprays using statistics and machine learning techniques. **Fluids** 9:e9020040.

<https://doi.org/10.3390/fluids9020040>

Damak M, Ruiter J, Panat S, Varanasi KK (2022) Dynamics of an impacting emulsion droplets. **Science Advance** 8:1-9.

<https://doi.org/10.1126/sciadv.abl7160>

Dorr GJ, Kempthorne DM, Mayo LC, Forster WA, Zabkiewicz JA, Mccue SW, Belward JA, Turner IW, Hanan J (2014) Towards a model of spray-canopy interactions: Interceptions, shatter, bounce and retention of droplets on horizontal leaves. **Ecological Modelling** 290:94-101.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.002>

Ferreira MC, Lasmar O, Decaro Junior ST, Neves SS, Azevedo LH (2013) Qualidade da aplicação de inseticida em amendoim (*Arachis hypogaea* L.), com e sem adjuvantes na calda, sob chuva simulada. **Bioscience Journal** 29:1431-1440

<https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/15082>

Fridman D, Koellner T, Kissinger M (2021) Developing the functional regions typology for exploring the interregional food system's sustainability. **Zenodo** 1:e4453518.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.4453518>

Friedrich GN, Müller I, Moreira Junior FJ, Ansuji AP, Fabris JP (2020) Análise de agrupamento para a identificação e caracterização das propriedades fumageiras de Paraíso do Sul. **Ciência e Natura** 42:e21.

<https://doi.org/10.5902/2179460X40493>

Gaion LA, Lasmar O, Ferreira MC (2015) Efeito da adição de adjuvantes à calda com fungicida em plantas de citros sob chuva artificial. **Citrus Research & Technology** 36:59-67.

<http://dx.doi.org/10.4322/crt08816>

Hartzler B (2023) **Role of spray adjuvants with postemergence herbicides**. Integrated Crop Management. Iowa State University Extension and Outreach.

<https://crops.extension.iastate.edu/role-spray-adjuvants-postemergence-herbicides>

Hewitt AJ (2024) Adjuvant use for the management of pesticide drift, leaching and runoff. **Pest Management Science** (Hoboken) 80:4819-4827.

<https://doi.org/10.1002/ps.8255>

Jing J, Zhou Y, Zhang Z, Wu L, Bao F, Zhang H (2023) Uptake, translocation, and terminal residue of chlorantraniliprole and difenoconazole in rice: Effect of the mixed-application with adjuvant. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 71:6838-6845.

<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c00166>

Johnstone DR (1978) **Statistical description of spray drop size for controlled drop application**. In: British Crop Protection Council. Proceedings of the Symposium on Controlled Drop Application p. 35-42.

<https://www.bcpcc.org/wp-content/uploads/2022/05/Controlled-Drop-Application-p35-42.pdf>

Law KY (2015) Water-surface interactions and definitions for hydrophilicity, hydrophobicity and superhydrophobicity. **Pure and Applied Chemistry** 87:759-765.

<https://doi.org/10.1515/pac-2014-1206>.

Magor E, Wilson MD, Wong H, Cresswell T, Sánchez-Palacios JT, Bell RW, Penrose B (2023) Selected adjuvants increase the efficacy of foliar biofortification of iodine in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) grain. **Frontiers in Plant Science** 14:e1246945.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1246945>

Milanowski M, Subr A, Parafiniuk S, Róžańska-Boczula M (2022) The effect of adjuvant concentration on changes of spray characteristics and spraying parameters for selected types of nozzles. **Agricultural Engineering** 26:119-132.

<https://doi.org/10.2478/agriceng-2022-0010>

Nairn JJ, Forster, WA (2022) Importance of adjuvant formulation properties in predicting wetting on leaf surfaces. **Pest Management Science** 78:4621-4633.

<https://doi.org/10.1002/ps.7315>

Oliveira RB de, Assunção MC, Theodoro JGC, Paduan NA, Tonchi R, Ferreira SD (2025) Spreading and evaporation of 95angmuir95to solution with adjuvants on different weed species. **Ciência e Agrotecnologia** 49:e021124.

<https://doi.org/10.1590/1413-7054202549021124>

Owen MJ (2021) Silicone surface fundamentals. **Macromolecular Rapid Communications** 42:e2000360.

<https://doi.org/10.1002/marc.202000360>

Phan C (2023) **The affinity of amphiphilic molecules to air/water surface**. ChemRxiv.

<https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-4m365>

Python Software Foundation (2024) **Python** (Version 3.12.7).

Santos RTS, Vecchia JFD, Santos CAM dos, Almeida DP, Ferreira MC (2021) Relationship of contact angle of spray solution on leaf surfaces with weed control. **Scientific Reports** 11:e9886.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-89382-2>

Saxena K, Chen Y (2023) Effect of surfactants on surface wettability via measurement of droplet contact angle and interfacial tension. **Proceedings of the ASME 2023 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Fluids Engineering** (New Orleans, Louisiana, USA. V009T10A036. ASME) 9:e112217.
<https://doi.org/10.1115/IMECE2023-112217>

Scholz D, Simutis P (2022) Understanding interfaces: Using contact angle measurements to determine surface tension, interfacial tension, and kinetic properties from contact angle hysteresis. **Journal of Surface Science** 15:123-135.
<https://doi.org/10.21748/tjyy3220>

Valieva I, Shashidhar B, Björkman M, Akerberg J, Ekström M, Voitenko I (2022) **Machine learning-based frequency bands classification for efficient frequency hopping spread spectrum applications**. MILCOM 2022 – 2022 IEEE Military Communications Conference (MILCOM) (Rockville, MD, USA) pp. 72-77.
<https://doi.org/10.1109/MILCOM55135.2022.10017912>

Varghese N, Sykes TC, Quetzeri-Santiago MA, Castrejón-Pita AA, Castrejón-Pita JR (2024) Effect of surfactants on the splashing dynamics of drops impacting smooth substrates. **Langmuir** 40:8781-8790.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03248>

Zhang P, Wang K, He L, Fan R, Liu Z, Yang J, Guo R, Gao Y (2023) Surfactants improving the wetting behavior and adhesion mechanism of pesticide dilution droplets on jujube leaf surfaces. **ACS Omega** 8:22121-22131.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02317>

CAPÍTULO 4 – REDUÇÃO DE DERIVA DE GOTAS FITOSSANITÁRIAS E AGRUPAMENTO FUNCIONAL DE ADJUVANTES

RESUMO: Os adjuvantes podem contribuir com a tecnologia de aplicação, ao promoverem a modulação do tamanho de gotas e, conseqüentemente, a redução da deriva em pulverizações agrícolas. No entanto, apesar do amplo uso, ainda não há uma forma padronizada de expressar as diferenças funcionais entre os adjuvantes quanto à sua capacidade de mitigar a deriva. Assim, o objetivo foi avaliar o grau de redução de deriva de gotas fitossanitárias, com base no tamanho de gotas, como ação e diferenciação funcional de adjuvantes. Foram testados 28 adjuvantes em duas dosagens (mínima e máxima) com cinco modelos de pontas hidráulicas sob pressão constante. As variáveis analisadas incluíram diâmetro mediano volumétrico (DMV), coeficiente de uniformidade (Span) e as porcentagens de volume de gotas menores que 100 μm (V100) e 150 μm (V150). Análises estatísticas multivariadas, como análise de componentes principais (PCA) e agrupamento hierárquico (cluster), permitiram identificar padrões de desempenho entre os tratamentos. Os resultados demonstraram ampla variabilidade na formação de gotas finas, influenciada também pela dosagem e pelo modelo de ponta utilizado. A avaliação do grau de redução de deriva com base na porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm demonstrou ser uma estratégia eficaz para diferenciar o desempenho dos adjuvantes quanto à capacidade de reduzir a deriva das caldas fitossanitárias, possibilitando o estabelecimento de classes funcionais variando de baixa a alta eficiência. O uso de ferramentas estatísticas exploratórias, como gráficos de dispersão, análise de componentes principais e análise de cluster, possibilitou a definição de faixas representativas do comportamento da variável porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm , servindo como parâmetro de classificação funcional.

Palavras-chave: tamanho de gotas, tecnologia de aplicação, gotas finas, dosagem, classes.

REDUCTION OF PESTICIDE DROPLET DRIFT AND FUNCTIONAL GROUPING OF ADJUVANTS

ABSTRACT: Adjuvants can play a key role in spray application technology by contributing to droplet size modulation and, consequently, to drift reduction in agricultural spraying. However, despite their widespread use, there is still no standardized classification that reflects their functional variability regarding drift mitigation capacity. Thus, the objective of this study was to evaluate the degree of drift reduction in pesticide spray droplets, based on droplet size, as a functional action and differentiation criterion for adjuvants. A total of 28 adjuvants were tested at two dosage levels (minimum and maximum) using five models of hydraulic nozzles under constant pressure. The variables analyzed included volume median diameter (VMD), uniformity coefficient (Span), and the percentage of spray volume composed of droplets smaller than 100 μm (V100) and 150 μm (V150). Multivariate statistical analyses, such as principal component analysis (PCA) and hierarchical clustering, were used to identify performance patterns among treatments. The results showed wide variability in the formation of fine droplets, also influenced by dosage and nozzle model. The evaluation of drift reduction based on the percentage of droplets smaller than 100 μm proved to be an effective strategy to distinguish the performance of adjuvants regarding their ability to reduce spray drift, enabling the establishment of functional classes ranging from low to high efficiency. The use of exploratory statistical tools, such as scatter plots, principal component analysis, and cluster analysis, allowed the definition of representative ranges for the behavior of the V100 variable, serving as a functional classification parameter.

Keywords: droplet size, spray application technology, fine droplets, dosage, classes.

1. INTRODUÇÃO

Os adjuvantes podem favorecer a qualidade de distribuição e o efeito dos produtos fitossanitários nas aplicações, sendo incorporados às formulações ou às caldas fitossanitárias com o intuito de modificar características físico-químicas e contribuir para o desempenho da pulverização (Zeeshan et al., 2024). A adição dessas substâncias pode alterar a tensão superficial, a viscosidade, a formação e o espalhamento das gotas, influenciando diretamente a deposição, o depósito, a retenção e a absorção dos ingredientes ativos sobre os alvos biológicos (Basílio et al., 2024; Brankov et al., 2025). Em um cenário de crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis, o uso adequado de adjuvantes torna-se uma das estratégias para auxiliar na qualidade das aplicações e reduzir os impactos ambientais.

Entre as principais funcionalidades associadas aos adjuvantes, destaca-se a capacidade de reduzir o potencial de deriva, definido como a quantidade de calda pulverizada que não atinge o alvo em função da suscetibilidade das gotas finas, geralmente com diâmetro inferior a 100 μm , à ação de fatores ambientais como vento (ASABE, 2009; Xue et al., 2021). A deriva compromete a eficiência agrônômica da aplicação, ao reduzir a quantidade de ingrediente ativo que atinge o alvo, e representa risco ambiental, ao aumentar a possibilidade de contaminação de áreas não-alvo (Sun et al., 2025). Assim, adjuvantes que promovem a formação de gotas menos propensas a deriva e mais uniformes, quando associados a tecnologias adequadas de pulverização, são ferramentas para reduzir esse tipo de perda.

Embora a redução da deriva seja uma funcionalidade frequentemente atribuída aos adjuvantes, variações na composição química, nas concentrações utilizadas e nas interações com os parâmetros operacionais, como tipo de ponta de pulverização, pressão e volume de aplicação, influenciam diretamente o espectro de gotas formado (Khan et al., 2024; Wang et al., 2025), resultando em diferenças na ação dos produtos quanto a função. Ainda assim, produtos com desempenhos bastante distintos continuam sendo denominados como redutores de deriva, o que compromete a precisão das

recomendações técnicas (Tanious et al. 2022). Essa heterogeneidade evidencia a necessidade de uma abordagem funcional mais precisa, que permita a avaliação comparativa dos adjuvantes com base em seu grau de desempenho sob diferentes condições de uso.

Frente a essa variabilidade de desempenho, a simples designação de um produto como redutor de deriva torna-se insuficiente para orientar decisões técnicas no campo. Dessa forma, é essencial o desenvolvimento de ferramentas que traduzam os dados experimentais em informações práticas, permitindo a distinção funcional entre os produtos e favorecendo sua recomendação com base em evidências técnicas (Tanious et al., 2022). Exemplos de sucessos já se mostraram úteis em outras áreas da tecnologia de aplicação, como no caso do sistema proposto por Johnstone (1978), que categorizou o espectro de gotas com base no diâmetro, estabelecendo, por exemplo, que gotas acima de 500 μm são consideradas grossas e mais adequadas para aplicações de herbicidas em condições com alto risco de deriva.

Nesse sentido, torna-se necessária a proposição de uma classificação técnica que agrupe os adjuvantes com base em sua efetividade na redução da deriva, considerando parâmetros objetivos, como a porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (Rodrigues Neto et al., 2023; Hewitt, 2024). A adoção de critérios mensuráveis e reprodutíveis possibilita aos profissionais envolvidos na aplicação tomarem decisões mais embasadas quanto à seleção do adjuvante mais apropriado para cada contexto operacional, promovendo maior segurança, eficiência e racionalidade no uso de defensivos agrícolas. Assim, o objetivo foi avaliar o grau de redução de deriva de gotas fitossanitárias, com base no tamanho de gotas, como ação e diferenciação funcional de adjuvantes.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Departamento de Fitossanidade do Campus de Jaboticabal da UNESP, no Laboratório de Análise do Tamanho de Partículas (LAPAR) e

Técnicas de Aplicação de Produtos Fitossanitários, com o objetivo de avaliar o grau de redução de deriva de gotas fitossanitárias, com base no tamanho de gotas.

Para isso, foram selecionados e utilizados 28 adjuvantes, aplicados em suas dosagens mínima e máxima recomendadas pelos fabricantes, diluídos em água na proporção $v \ v^{-1}$. A escolha dos adjuvantes considerou sua ampla utilização no mercado, tanto por fabricantes quanto por produtores agrícolas. Seis desses adjuvantes possuíam apenas uma recomendação de uso, enquanto os demais (22 adjuvantes) apresentavam recomendações para duas doses, resultando em um total de 51 tratamentos avaliados (28 adjuvantes combinados + apenas água), sendo os tratamentos apresentados por números sequenciais com máxima ou mínima dosagem.

Os adjuvantes foram diluídos apenas em água representando as caldas fitossanitárias. Os nomes comerciais dos produtos não foram identificados no texto do experimento, uma vez que o foco do trabalho está nos dados gerados. Assim, o grau de redução de deriva foi baseado exclusivamente nos resultados obtidos a partir das análises realizadas.

Cinco pontas de pulverização hidráulicas foram utilizadas, cada uma caracterizada por diferentes padrões de formação de gotas. Essa seleção teve como objetivo representar os principais tipos de pulverização com energia hidráulica disponíveis no mercado, simulando as condições mais comumente adotadas nas aplicações agrícolas. Todas as pontas utilizadas foram do modelo de cor azul, correspondente a uma vazão nominal aproximada de $1,2 \text{ L min}^{-1}$. Os modelos testados foram: TXA 11003, de jato cônico vazio; XR 11003, de jato plano convencional; TT 11003, de jato plano defletor; AIXR 11003, de jato plano com indução de ar; e TTI 11003, de jato plano defletor com indução de ar.

2.1. Tamanho de gotas das caldas fitossanitárias

O tamanho de gotas foi caracterizado pelo diâmetro mediano volumétrico (DMV), pela uniformidade das gotas (Span) e pelas porcentagens de volume de gotas menores que $100 \mu\text{m}$ (V100) e $150 \mu\text{m}$ (V150), parâmetros físicos adotados para avaliar a redução

da deriva das caldas fitossanitárias. Essas variáveis influenciam diretamente a suscetibilidade das gotas à deriva, sendo determinantes para a eficiência da aplicação e para a chegada do produto no alvo (Xue et al., 2021; Basílio et al, 2024).

Para a análise de tamanho de gotas produzidas pelas caldas fitossanitárias foi utilizado um analisador de tamanho de partículas Mastersizer S® (Malvern Panalytical Ltda, Malvern, Reino Unido) (Figura 2), versão 2.19, pelo método de difração à laser. Neste equipamento, uma unidade óptica determina o diâmetro das gotas dentro do espectro pulverizado, por meio do desvio de trajetória sofrido pelo laser ao atingi-las (Calore et al., 2015). O acionamento e manutenção da pressão constante para a pulverização foram obtidos via ar comprimido. O jato pulverizado atravessa o feixe de luz laser e é movido transversalmente por um motor realizando uma amostragem completa de todo o jato pulverizado.

O diâmetro mediano de gotas em que 50% do volume pulverizado está abaixo do valor medido foi analisado e representado por valores de DMV, que é o tamanho da gota dentro do espectro pulverizado que divide o volume em duas partes iguais. As gotas com maiores potenciais de deriva foram analisadas considerando a porcentagem do volume de gotas menores que 100 µm (V100) e menores que 150 µm (V150). Além disso, foi analisado o coeficiente de uniformidade do espectro de gotas (Span), que é um valor que representa a uniformidade do espectro de gotas e foi analisado considerando a seguinte fórmula:

$$SPAN = (DV09 - DV01)/DV05,$$

onde DV05 é o DMV, DV09 é o diâmetro de gotas em que 90% do volume pulverizado está abaixo do valor e DV01 é o diâmetro de gotas em que 10% do volume pulverizado está abaixo do valor.

2.2. Redução de deriva de gotas fitossanitárias e diferenciação funcional de adjuvantes

A redução de deriva e a diferenciação funcional de adjuvantes forma baseadas em análises estatísticas exploratórias, as quais incluíram gráficos de dispersão entre

pares de variáveis, análise de componentes principais (PCA) e análise de agrupamento (cluster). As análises foram realizadas com base nos dados de diâmetro mediano volumétrico, uniformidade do espectro de gotas, porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm e a porcentagem de volume de gotas menores que 150 μm . Além disso, foram realizados ajustes agronômicos nas classes estabelecidas, garantindo coerência com a realidade prática. Dessa forma, a proposta de classificação apresentada ao longo do texto foi construída com embasamento estatístico e técnico, demonstrando-se viável e compatível com as exigências práticas de recomendação no campo.

A escolha do tamanho de gotas produzidas durante a pulverização como variável para avaliar o grau de deriva dos adjuvantes se baseia na relevância físico-química e prática dessa propriedade para tratamentos fitossanitários. O tamanho de gotas exerce influência direta sobre o risco de deriva, sendo um dos principais fatores a ser considerado em estratégias de manejo para reduzir perdas fora do alvo. Gotas menores, especialmente aquelas com DMV inferior a 100 μm , possuem menor massa e maior área superficial, o que as torna mais suscetíveis à ação do vento e à evaporação, aumentando a probabilidade de atingirem áreas indesejadas (Xue et al., 2021). Dessa forma, variáveis como o diâmetro mediano volumétrico, a porcentagem do volume de gotas sujeitas à deriva e o coeficiente de uniformidade são amplamente utilizadas como indicadores do potencial de deriva de uma pulverização (Makhnenko et al., 2021; Zhang e Xiong, 2021).

A utilização de adjuvantes comerciais e de suas dosagens recomendadas como base para a proposta se justifica por serem componentes amplamente presentes nas caldas fitossanitárias aplicadas em condições reais de campo. Os adjuvantes, ao modificarem as propriedades físicas das caldas, influenciam diretamente a formação das gotas no processo de pulverização. Dependendo da composição e da dosagem utilizada, esses produtos podem alterar o tamanho das gotas produzidas, impactando características como o diâmetro mediano volumétrico, a uniformidade da pulverização e gotas sujeitas à deriva (Li et al., 2022; Zeeshan et al., 2024).

A consideração das dosagens recomendadas pelos fabricantes amplia a aplicabilidade prática da proposta, ao permitir a avaliação do efeito da concentração

sobre o comportamento das gotas na pulverização. Essa abordagem torna a classificação mais robusta e alinhada à realidade do campo, possibilitando que os produtos sejam analisados em condições de uso real. Além disso, a classificação obtida poderá ser adotada como referência técnica pela indústria, permitindo que os fabricantes de adjuvantes desenvolvam e posicionem seus produtos em faixas funcionais relacionadas ao potencial de redução de deriva.

Gráficos de dispersão entre pares das variáveis diâmetro mediano volumétrico, porcentagem do volume de gotas menores que 100 e menores que 150 μm e uniformidade de gotas (pairplots) foram elaborados com o objetivo de explorar visualmente os padrões de correlação, distribuição dos dados e estruturas de agrupamento entre os adjuvantes e dosagens utilizadas. Essa abordagem permitiu a identificação de relações lineares ou não lineares, bem como tendências, contribuindo para uma compreensão inicial do comportamento físico de redução de deriva das caldas fitossanitárias avaliadas. Além disso, essa análise exploratória serviu como etapa preliminar para análises multivariadas subsequentes, como análise de componentes principais e análise de agrupamento.

A análise de componentes principais (PCA) foi realizada com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar padrões de variação entre os tratamentos avaliados, com base nas variáveis físicas de diâmetro mediano volumétrico, porcentagem do volume de gotas sujeitas à deriva (menores que 100 e 150 μm) e uniformidade de gotas. A PCA permitiu a transformação das variáveis originais em componentes principais ortogonais (PCs), ordenados conforme a variância explicada por cada um. A variância explicada pelos componentes principais 1 (PC1) e 2 (PC2) foi utilizada como critério para validação da redução de dimensionalidade.

Além de facilitar a visualização da distribuição dos tratamentos no espaço multivariado, essa análise possibilitou a identificação da variável com maior contribuição (peso) para a formação dos componentes. Com isso, foi avaliada a viabilidade de representar a funcionalidade de redução de deriva das caldas por meio de uma única variável, desde que essa apresentasse representatividade estatística e aplicabilidade prática.

Para a PCA, foram gerados três tipos de visualizações: um gráfico de dispersão dos scores nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), com codificação de cores para os tratamentos e respectivas dosagens (mínima e máxima); um gráfico de dispersão com elipses de agrupamento, com nível de confiança de 95%, utilizado para avaliar a proximidade e separação entre os grupos de tratamentos; e um biplot dos componentes principais, contendo os vetores das variáveis originais, indicando sua direção e a magnitude de contribuição de cada variável para a formação dos componentes extraídos.

E a análise de agrupamento hierárquico (cluster) foi realizada com o objetivo de identificar similaridades entre os tratamentos avaliados. A análise foi conduzida com base na variável selecionada na análise de componentes principais, que demonstrou maior representatividade para a descrição do comportamento de redução de deriva das caldas fitossanitárias. Os dados foram previamente normalizados (média zero e desvio padrão um) e a matriz de distâncias foi construída com base na métrica euclidiana. A ligação entre os agrupamentos foi feita pelo método de Ward, o qual minimiza a variância dentro dos grupos formados. Os resultados foram representados por meio de um dendrograma, permitindo a visualização da estrutura hierárquica entre os tratamentos e a identificação de grupos com comportamento semelhante.

Para a elaboração dos gráficos de dispersão entre pares de variáveis e para a análise de componentes principais, as cinco pontas de pulverização foram avaliadas sob uma pressão única de 43,51 PSI (3 bar), mantida constante com o objetivo de avaliar o efeito dos modelos das pontas sobre a formação das gotas abrangendo, assegurando uma mesma vazão. No total, foram analisados 255 tratamentos, cada um com quatro repetições. Para facilitar a visualização do comportamento das diferentes dosagens dos adjuvantes, os tratamentos foram numerados sequencialmente de 1 a 145. Um mesmo número foi atribuído ao mesmo adjuvante, sendo a diferenciação feita apenas por “máxima” e “mínima”, conforme as dosagens recomendadas pelos fabricantes para o adjuvante em questão. A distribuição das pontas foi organizada da seguinte forma: tratamentos 1 a 29 utilizaram a ponta TXA, 30 a 58 a XR, 59 a 87 a TT, 88 a 116 a AIXR

e 117 a 145 a TTI. Para essas análises, a estatística foi realizada com todas as pontas em conjunto e posteriormente, as pontas foram analisadas estatisticamente separadas.

Para a análise de agrupamento hierárquico, a primeira tentativa foi utilizar os mesmos 255 tratamentos utilizados nas análises anteriores. No entanto, observou-se que os valores máximos de porcentagem de volume de gotas menores que 100 μm ficaram em torno de 25%, enquanto aplicações que exigem alta cobertura e, portanto, a formação de gotas menores, podem formar valores superiores a 30% (Gibbs et al., 2021). Visando ampliar a faixa de dados relacionados a gotas suscetíveis à deriva, optou-se por incluir uma condição adicional para a ponta TXA, que, entre as avaliadas, é a que proporciona o menor espectro de gotas e maior volume de gotas sujeitas à deriva. Assim, além da pressão padrão de 43,51 PSI (3 bar), os adjuvantes nas dosagens mínima e máxima também foram avaliados sob pressão mais elevada de 72,52 PSI (5 bar), visto que pressões superiores favorecem a formação de gotas menores e, conseqüentemente, o aumento da proporção de gotas sujeitas à deriva (Makhnenko et al., 2021).

Com essa inclusão, a análise totalizou 306 tratamentos, mantendo-se a lógica de nomeação utilizada nas análises anteriores. A distribuição dos tratamentos ficou organizada da seguinte forma: tratamentos 1 a 29 correspondem à ponta TXA sob 72,52 PSI; 30 a 58 à TXA com 43,51 PSI; 59 a 87 à XR com 43,51 PSI; 88 a 116 à TT com 43,51 PSI; 117 a 145 à AIXR com 43,51 PSI; e 146 a 174 à TTI com 43,51 PSI.

Juntas, essas abordagens permitiram a identificação de padrões, seleção de variáveis representativas e organização dos tratamentos em grupos funcionalmente distintos, subsidiando a proposta de grau de redução de deriva baseada na variável mais relevante.

2.3. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas na linguagem Python (versão 3.12.7), com o auxílio das bibliotecas Pandas, NumPy, Seaborn, Matplotlib, SciPy, Scikit-learn e Pingouin (Python Software Foundation, 2024). Foram elaborados gráficos de dispersão entre pares das variáveis (pairplots), utilizando a biblioteca Seaborn. Para a análise de

componentes principais (PCA), os dados foram previamente padronizados (média zero e desvio padrão um), e a adequação dos dados à análise fatorial foi verificada por meio do teste de esfericidade de Bartlett e da medida de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), ambos realizados com a biblioteca Pingouin e realizada a análise do coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis. A PCA foi conduzida com a biblioteca Scikit-learn e as visualizações gráficas foram geradas com o auxílio das bibliotecas Matplotlib e Seaborn. A variância explicada pelos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) foi utilizada como critério para validação da redução de dimensionalidade.

A análise de agrupamento hierárquico (cluster), foi realizada com base na variável selecionada pela PCA. Antes da análise, os dados foram padronizados e a normalidade da variável foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk, por meio da função `normality` da biblioteca Pingouin, com nível de significância de 5%. A matriz de distâncias foi calculada com a métrica euclidiana e a ligação entre os agrupamentos foi feita pelo método de Ward. O resultado foi representado por meio de um dendrograma, permitindo a visualização das similaridades entre os tratamentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os gráficos de dispersão individuais para as variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), uniformidade de gotas (Span), porcentagens dos volumes de gotas menores que 100 μm (V100) e 150 μm (V150) (Figuras 1 A, E, H e J, respectivamente), utilizando a ponta TXA 11003. Observam-se comportamentos distintos entre os tratamentos em todas as variáveis analisadas, com evidências de agrupamentos e separações entre os adjuvantes e suas respectivas dosagens. Esses padrões indicam que os adjuvantes influenciam significativamente os atributos físicos da pulverização. As diferenças observadas reforçam a influência direta dos adjuvantes na formação do espectro de gotas, conforme também observado por Zeeshan et al. (2024), que destacam a modificação das propriedades físico-químicas da calda como um dos principais mecanismos de ação desses produtos.

Além disso, observa-se que os valores de DMV se concentraram entre 150 e 180 μm , com variação geral de 130 a 190 μm . Para a variável Span, os dados se concentraram entre 1,2 e 1,5, com amplitude variando de 1,1 a 1,9. Os valores de V100 variaram entre 12 e 33%, com maior concentração entre 10 e 25%. Já para V150, os dados se concentraram entre 35 e 50%, com variação de 30 a 60%.

As dispersões entre pares de variáveis (pairplot) para os tratamentos aplicados com a ponta TXA 11003, considerando os parâmetros diâmetro mediano volumétrico, uniformidade das gotas, porcentagem do volume de gotas com diâmetro inferior a 100 μm e inferior a 150 μm estão apresentadas a seguir. Além disso, as análises de correlações mostraram associações estatisticamente significativas entre todas as variáveis ($p < 0,0001$), confirmando relações lineares. Observou-se uma correlação negativa entre o DMV e as variáveis V100 ($r = -0,98$) e V150 ($r = 0,98$) (Figuras 1C e D, respectivamente), indicando que, conforme o tamanho mediano das gotas aumenta, há redução no volume de gotas pequenas, com maior potencial de deriva. Esse comportamento é coerente com os princípios da tecnologia de aplicação, uma vez que caldas que geram gotas maiores são menos suscetibilidade à deriva, especialmente em condições ambientais adversas (Li et al., 2022; Ferreira e Matuo, 2024).

A correlação entre DMV e Span foi negativa ($r = -0,79$) (Figura 1B), indicando que tratamentos que promoveram a formação de gotas maiores tendem, em geral, a apresentar espectros de distribuição mais homogêneos, uma vez que quanto mais próximo de zero o Span, mais uniformes são as gotas produzidas (Ferreira e Matuo, 2024). No entanto, há variações entre os tratamentos, sugerindo que, para um mesmo DMV, diferentes adjuvantes podem resultar em diferentes padrões de uniformidade das gotas, o que revela a influência direta de adjuvantes na qualidade do espectro de gotas. Alguns pontos isolados indicam tratamentos que produziram menores Span mesmo com DMV mais baixos.

Os gráficos de dispersão entre Span e as variáveis V100 e V150 indicaram correlações positivas ($r = 0,85$ e $r = 0,80$; respectivamente), embora com alguns pontos dispersos que destoam dessa relação (Figuras 1F e G, respectivamente). De maneira geral, tratamentos com maior variabilidade no tamanho das gotas (Span mais elevado)

tenderam a apresentar maior proporção de gotas finas, com maior potencial de deriva. Essa tendência foi mais evidente para V100, o que se justifica pela maior sensibilidade dessa variável à presença de gotas extremamente pequenas. Para os resultados entre V100 e V150, observa-se uma correlação positiva ($r = 0,99$), relação já esperada, uma vez que V100 é um subconjunto de V150 (Figura I).

A visualização dos dados permitiu identificar a formação de grupos de tratamentos que compartilham características semelhantes no tamanho de gotas, ainda que alguns pontos se posicionem de forma isolada nos gráficos. Observa-se que os tratamentos com maiores valores de DMV e menores valores de Span estão agrupados em uma região específica do gráfico, caracterizando caldas que geram gotas predominantemente maiores, com distribuição mais uniforme e menor formação de gotas sujeitas à deriva (V100 e V150). Em contrapartida, outro grupo se destaca pela combinação de menores valores de DMV, maior Span e maiores proporções de V100 e V150, refletindo caldas com maior heterogeneidade e predominância de gotas finas.

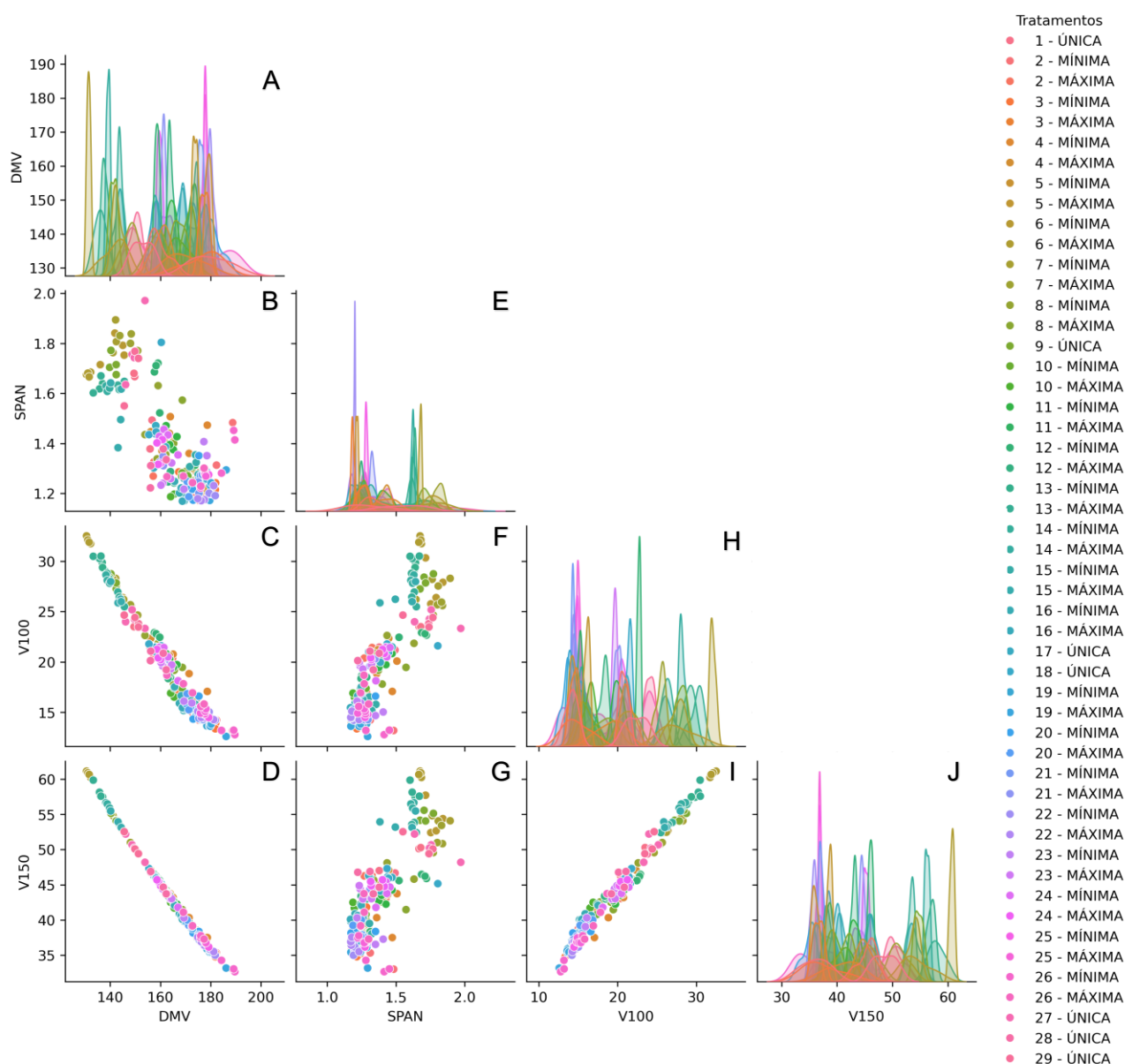


Figura 1. Densidade de distribuição do DMV (μm) entre os tratamentos com adjuvantes (A); dispersões entre DMV (μm) e Span (B); entre DMV (μm) e V100 (%) (C); e entre DMV (μm) e V150 (%) (D). Densidade de distribuição do Span (E); dispersões entre Span e V100 (%) (F); e entre Span e V150 (%) (G). Densidade de distribuição de V100 (%) (H); dispersões entre V100 (%) e V150 (%) (I); e densidade de distribuição de V150 (%) (J), com a ponta TXA 11003.

*As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas dosagens mínima e máxima.

A seguir estão apresentados os resultados da análise de componentes principais (PCA) para os tratamentos com adjuvantes aplicados com a ponta TXA, com base nas variáveis: diâmetro mediano volumétrico (DMV), coeficiente de uniformidade (SPAN), porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) e menores que 150 μm (V150) (Figuras 2, 3 e 4).

Na Figura 2, é possível observar os tratamentos no plano formado pelos dois primeiros componentes principais, que explicam conjuntamente 99,97% da variância total (92,7% por PC1 e 6,85% por PC2). A distribuição dos pontos demonstra que, embora muitos tratamentos estejam concentrados em uma região central do gráfico, há dispersão para algumas formulações específicas, como os tratamentos 6 - MÍNIMA, 7 - MÁXIMA, 13 - MÁXIMA e 26 - MÍNIMA, que se destacaram dos demais. Esses tratamentos isolados indicam características distintas no padrão de formação de gotas, o que se relaciona em específico com cada composição físico-química dos adjuvantes ou à dosagem utilizada. Além disso, é possível observar a formação de dois grupos de tratamentos, como observado na análise de dispersão entre as variáveis.

A Figura 3 acrescenta elipses de densidade sobre o mesmo plano fatorial, permitindo visualizar áreas com maior concentração de tratamentos. Nota-se que a maioria dos tratamentos se encontra agrupada em torno da origem dos eixos, sugerindo que diversos adjuvantes apresentam comportamento semelhante em relação às variáveis analisadas. No entanto, a existência de pontos periféricos evidencia que certas formulações promovem espectros de gotas com maior variabilidade ou tendência à formação de gotas finas, o que pode comprometer a eficiência da deposição ou aumentar o risco de deriva, conforme discutido por Saracho et al. (2024) e Wang et al. (2025).

A Figura 4 mostra o biplot dos componentes principais, que permite interpretar as contribuições das variáveis para os eixos PC1 e PC2. O PC1 foi determinado principalmente pelas variáveis V100 (0,527) e V150 (0,519), ambas positivamente correlacionadas entre si e associadas à presença de gotas pequenas. Em contrapartida, o DMV apresentou contribuição negativa para o PC1 (-0,520), o que confirma a relação inversa entre DMV e presença de gotas finas. Essa configuração indica que o eixo PC1

representa um gradiente de risco de deriva, no qual valores positivos indicam maior proporção de gotas suscetíveis à deriva e valores negativos representam tratamentos com DMV elevado e menor volume de gotas finas.

O PC2, por sua vez, foi influenciado principalmente pela variável Span (0,896), que expressa a uniformidade do espectro de gotas. Essa variável é importante para a consistência da pulverização, uma vez que um Span elevado indica maior heterogeneidade no tamanho das gotas, o que pode prejudicar a cobertura e deposição dos ingredientes ativos (Li et al., 2022).

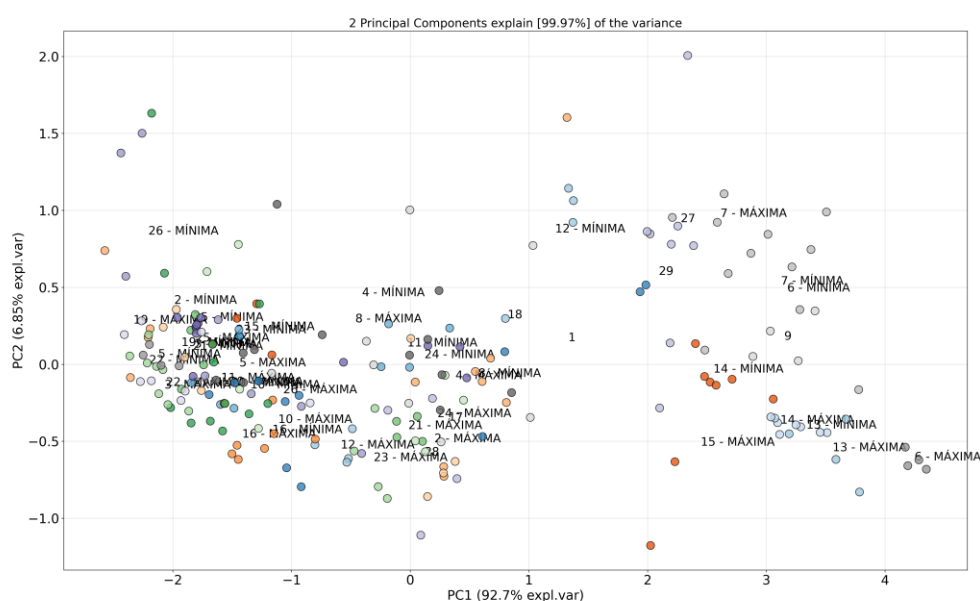


Figura 2. Dispersão dos tratamentos com adjuvantes nas doses mínima e máxima, conforme análise de componentes principais (PCA), com a ponta TXA 11003.

*As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas doses mínima e máxima.

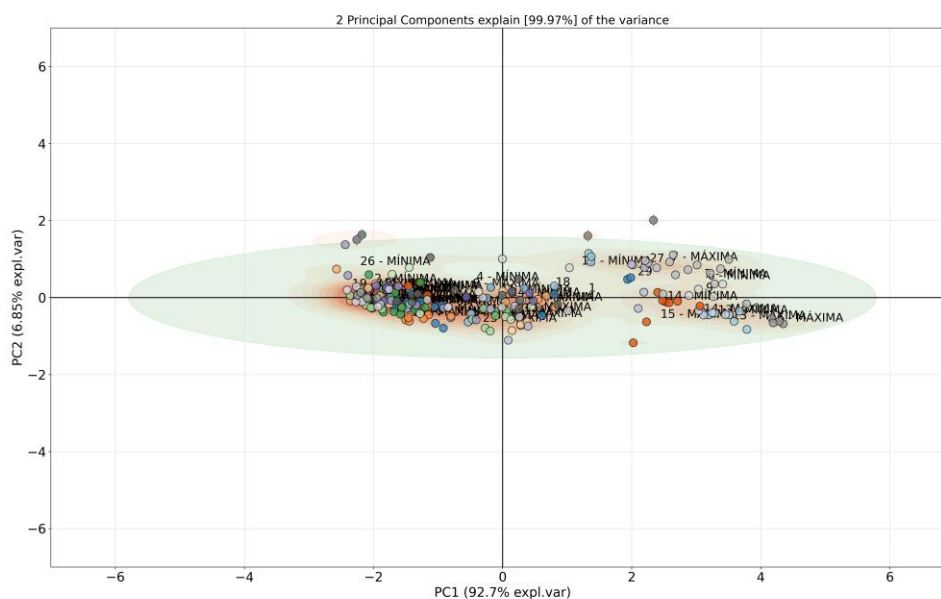


Figura 3. Dispersão dos tratamentos com adjuvantes nas doses mínima e máxima, conforme análise de componentes principais (PCA), com sobreposição das elipses de agrupamento, com a ponta TXA 11003.

*As elipses representam agrupamentos com base na similaridade entre os tratamentos. As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas doses mínima e máxima.

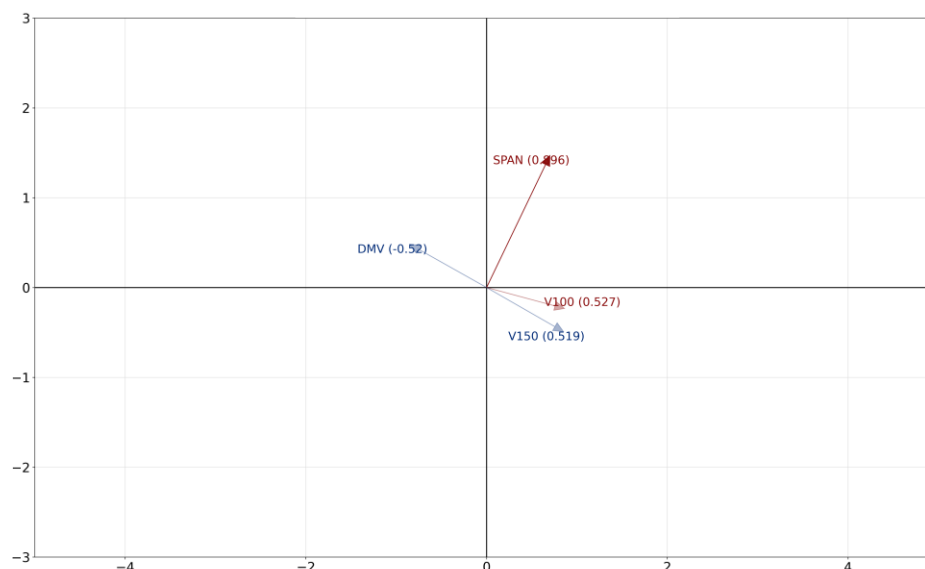


Figura 4. Projeção das variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), coeficiente de uniformidade (SPAN), porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) e menores que 150 μm (V150) nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), conforme análise de componentes principais (PCA), com a ponta TXA 11003.

Para a ponta XR 11003, são apresentados os gráficos de dispersão individuais para as variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), uniformidade de gotas (Span), e as porcentagens dos volumes de gotas menores que 100 μm (V100) e 150 μm (V150) (Figuras 5 A, E, H e J, respectivamente). Observam-se comportamentos distintos entre os tratamentos em todas as variáveis analisadas, com indícios de agrupamentos, embora com diferentes valores comparados à ponta TXA. Observa-se que os valores de DMV se concentraram entre 155 e 200 μm , com variação geral de 140 a 230 μm . Para a variável Span, os dados se concentraram entre 1,4 e 1,6, com amplitude variando de 1,2 a 1,9. Os valores de V100 variaram entre 8 e 30%, com maior concentração entre 15 e 25%, enquanto os de V150 se concentraram entre 30 e 50%, com uma variação geral de 22 a 55%. Esses resultados evidenciam a influência dos adjuvantes sobre a distribuição do tamanho das gotas.

As dispersões entre pares de variáveis para os tratamentos aplicados com a ponta XR 11003, considerando os parâmetros diâmetro mediano volumétrico, uniformidade das gotas, porcentagem do volume de gotas com diâmetro inferior a 100 μm e inferior a 150 μm , são apresentadas a seguir (Figura 5). A análise de correlação indicou que todas as variáveis estão estatisticamente associadas ($p < 0,0001$), evidenciando relações lineares significativas entre os parâmetros avaliados.

Observa-se uma correlação negativa entre DMV e V100 ($r = -0,90$) e entre DMV e V150 ($r = -0,99$) (Figuras 5 C e D, respectivamente), indicando que, à medida que o diâmetro mediano volumétrico aumenta, há uma redução na proporção de gotas finas no espectro. A correlação entre DMV e Span ($r = -0,67$) também foi negativa (Figura B), embora com menor intensidade, sugerindo que maiores DMV tendem a estar associados a uma maior uniformidade das gotas (menor Span). Por outro lado, as correlações entre Span e V100 ($r = 0,70$) e Span e V150 ($r = 0,69$) foram positivas (Figuras 5 F e G, respectivamente), indicando que caldas com maior heterogeneidade no tamanho das gotas tendem a gerar maiores proporções de gotas finas. A alta correlação entre V100 e V150 ($r = 0,95$) reflete a dependência direta entre essas variáveis (Figura 5 I).

A análise dos gráficos de dispersão da ponta XR revela que a formação de grupos não é tão bem definida quanto observado para a ponta TXA. Na XR, percebe-se uma distribuição mais contínua dos dados, com maior sobreposição entre os tratamentos e uma separação menos evidente entre os grupos. Além disso, observa-se que alguns pontos se destacam dos demais, assim como ocorre na TXA, a exemplo do tratamento 36 – MÁXIMA, que apresenta comportamento atípico em relação às demais combinações.

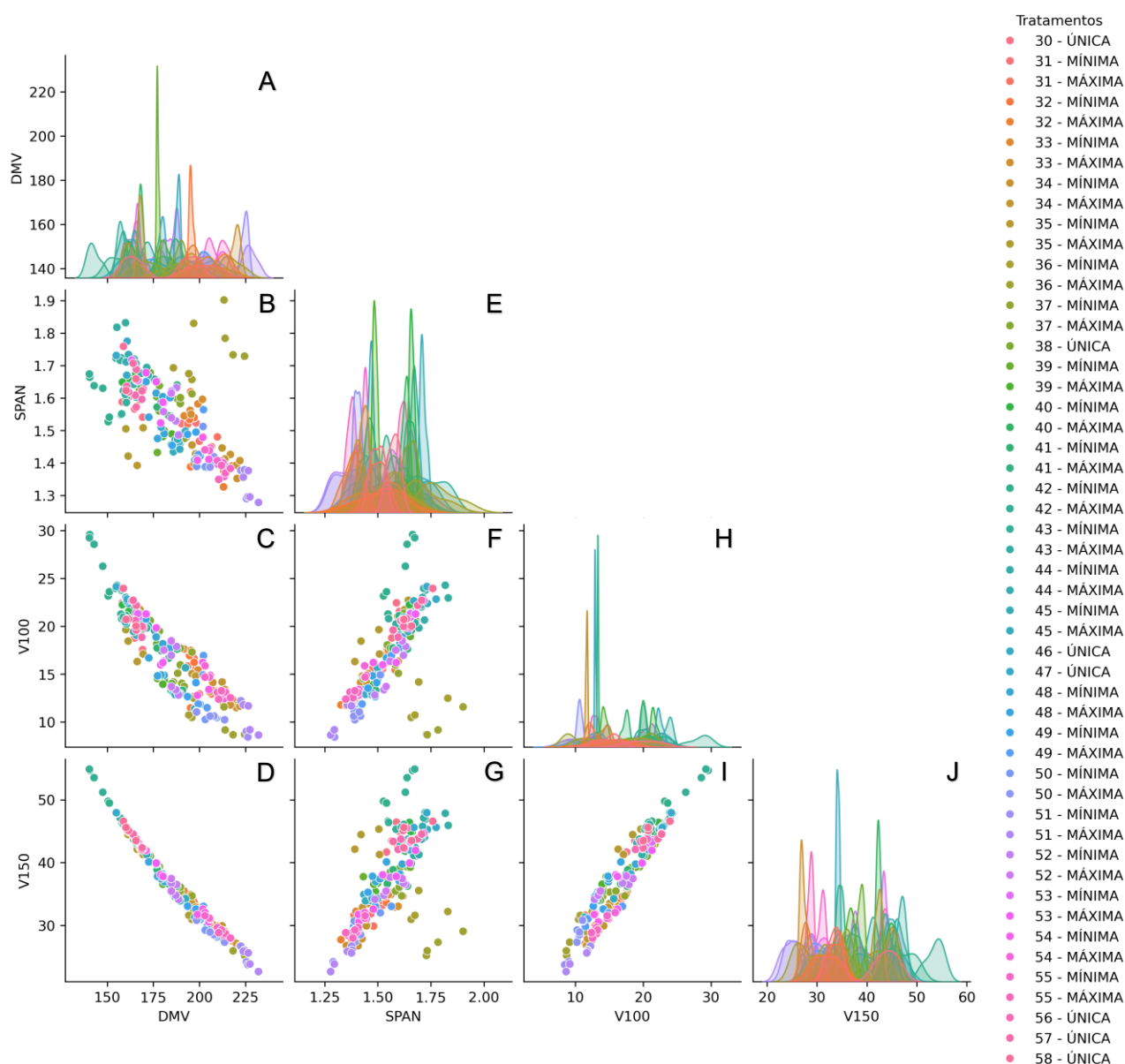


Figura 5. Densidade de distribuição do DMV (μm) entre os tratamentos com adjuvantes (A); dispersões entre DMV (μm) e Span (B); entre DMV (μm) e V100 (%) (C); e entre DMV (μm) e V150 (%) (D). Densidade de distribuição do Span (E); dispersões entre Span e V100 (%) (F); e entre Span e V150 (%) (G). Densidade de distribuição de V100 (%) (H); dispersões entre V100 (%) e V150 (%) (I); e densidade de distribuição de V150 (%) (J), com a ponta XR 11003.

*As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas dosagens mínima e máxima.

A seguir estão apresentados os resultados da análise de componentes principais (PCA) para os tratamentos com adjuvantes aplicados com a ponta XR, com base nas variáveis: diâmetro mediano volumétrico (DMV), coeficiente de uniformidade (SPAN), porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) e menores que 150 μm (V150) (Figuras 6, 7 e 8).

O gráfico de dispersão dos tratamentos, obtido pela análise de componentes principais, evidencia uma distribuição mais contínua dos dados, com uma separação menos evidente entre os grupos, quando comparado à ponta TXA (Figura 6). Ainda assim, percebe-se uma organização dos tratamentos ao longo dos eixos principais, refletindo as diferenças no comportamento do espectro de gotas entre os diferentes adjuvantes e dosagens avaliados. Além disso, destaca-se a presença de pontos isolados que se distanciam dos agrupamentos centrais, como os tratamentos 36 – MÁXIMA e 36 – MÍNIMA, que apresentam comportamento atípico em relação aos demais.

O gráfico de dispersão com elipses permite uma visualização da distribuição dos tratamentos no espaço multivariado, destacando que, embora existam tendências de agrupamento, há uma considerável sobreposição entre os tratamentos, indicando que muitos compartilham características semelhantes em relação às variáveis DMV, Span, V100 e V150 (Figura 7). A maior concentração dos tratamentos próximos ao centro dos eixos indica que grande parte dos dados apresenta características semelhantes, enquanto os tratamentos mais afastados, como 36 - MÁXIMA, 36 - MÍNIMA e 42 - MÁXIMA, sugerem respostas diferenciadas no comportamento físico da calda.

O biplot das variáveis permite compreender a associação de cada variável com os componentes principais (Figura 8). Observa-se que V100 e V150 estão correlacionados positivamente entre si no PC1, direcionando-se para a mesma região do gráfico, o que indica que essas variáveis seguem uma mesma tendência de variação. DMV se posiciona em direção oposta, indicando uma relação inversa, ou seja, tratamentos com maior DMV estão associados a menores porcentagens de gotas finas. Por outro lado, o vetor de Span apresenta orientação predominantemente na direção do PC2, indicando que essa variável contribui para explicar uma dimensão específica da

variabilidade dos dados, relacionada à distribuição e à heterogeneidade no tamanho das gotas entre os tratamentos, de forma independente das demais variáveis que estão mais associadas ao PC1.

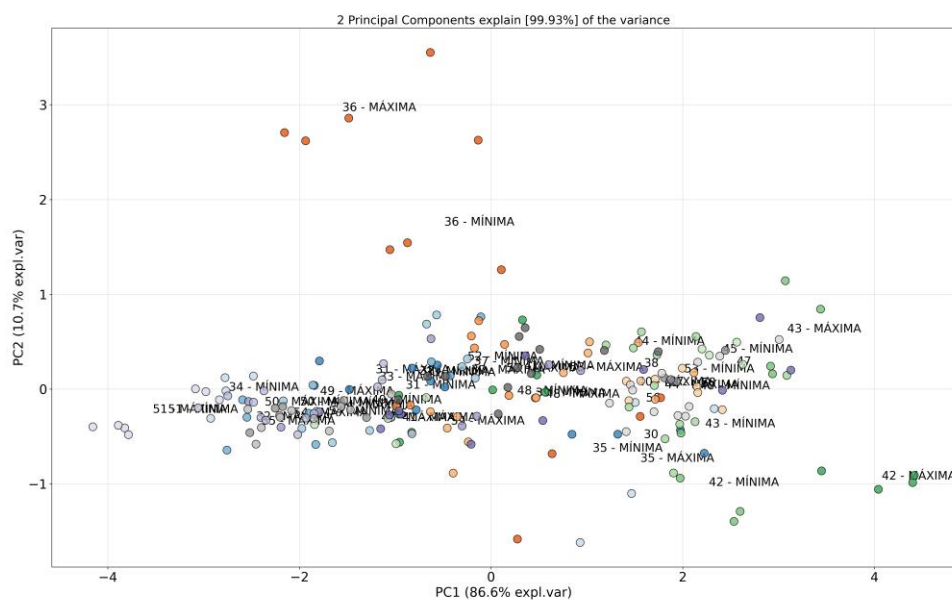


Figura 6. Dispersão dos tratamentos com adjuvantes nas doses mínima e máxima, conforme análise de componentes principais (PCA), com a ponta XR 11003.

*As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas doses mínima e máxima.

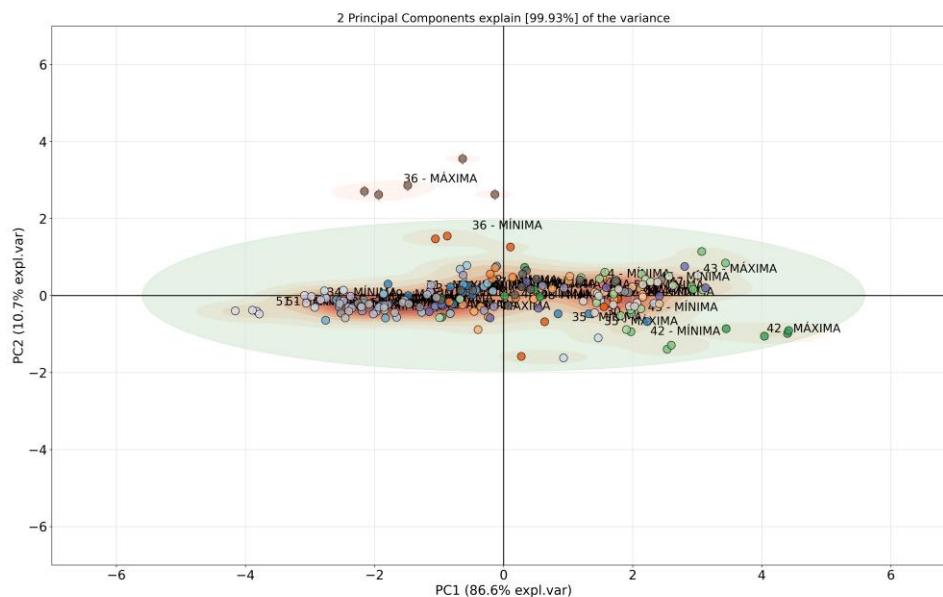


Figura 7. Dispersão dos tratamentos com adjuvantes nas doses mínima e máxima, conforme análise de componentes principais (PCA), com sobreposição das elipses de agrupamento, com a ponta XR 11003.

*As elipses representam agrupamentos com base na similaridade entre os tratamentos. As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas doses mínima e máxima.

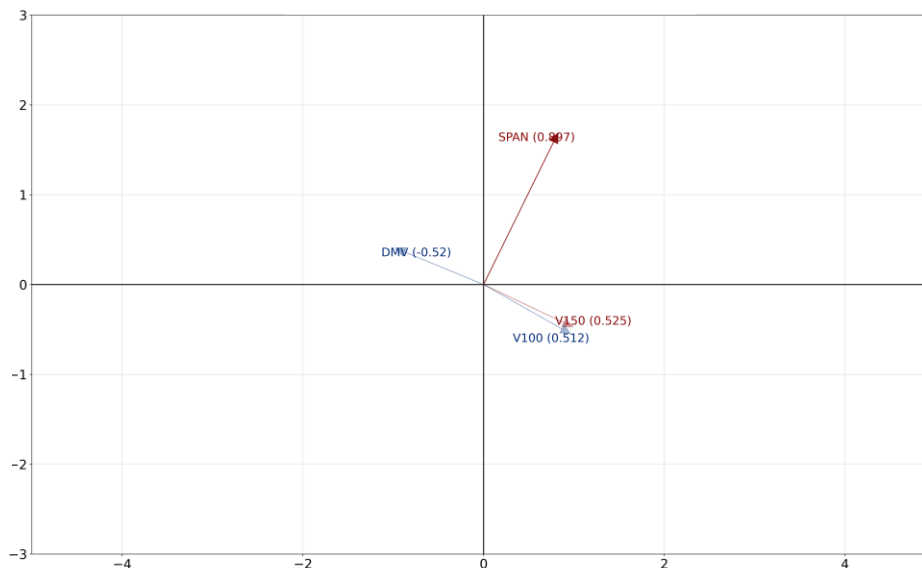


Figura 8. Projeção das variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), coeficiente de uniformidade (SPAN), porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) e menores que 150 μm (V150) nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), conforme análise de componentes principais (PCA), com a ponta XR 11003.

Para a ponta TT 11003, são apresentados os gráficos de dispersão individuais para as variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), uniformidade de gotas (Span) e as porcentagens dos volumes de gotas menores que 100 μm (V100) e 150 μm (V150) (Figuras 9 A, E, H e J, respectivamente). Observam-se comportamentos distintos entre os tratamentos em todas as variáveis, com indícios de formação de agrupamentos, embora com valores e padrões diferentes em relação às demais pontas.

Os dados de DMV concentraram-se, majoritariamente, entre 280 e 320 μm , com variação de 260 a 400 μm . Os valores de Span estiveram concentrados entre 1,4 e 1,6, variando de 1,1 a 2,2. As variáveis V100 e V150, que indicam a proporção de gotas finas suscetíveis à deriva, apresentaram baixas amplitudes, com V100 concentrando-se abaixo de 10%, mas com variação geral de 5 a 20%, e V150 abaixo de 20%, variando entre 11

e 24%. Esse comportamento evidencia uma baixa geração de gotas finas nessa configuração de ponta quando comparada às pontas TXA e XR.

A análise de correlação (Figura 9 D) indicou uma correlação negativa entre DMV e V150 ($r = -0,70$; $p < 0,0001$), indicando que o aumento do diâmetro mediano reduz a porcentagem de gotas menores que 150 μm . A correlação entre DMV e V100 foi mais baixa ($r = -0,39$; $p < 0,0001$), sugerindo que o aumento no diâmetro mediano volumétrico impacta, embora de forma mais reduzida, a porcentagem de gotas menores que 100 μm (Figura 9 C). Por outro lado, não houve relação linear significativa entre DMV e Span ($r = 0,03$; $p > 0,05$), demonstrando que, para essa ponta, a variação no tamanho das gotas ocorre independentemente da uniformidade do espectro.

A variável associada à uniformidade do espectro de gotas (Span) demonstrou correlação positiva tanto com V100 ($r = 0,66$; $p < 0,0001$) quanto com V150 ($r = 0,50$; $p < 0,0001$), indicando que caldas com maior dispersão no tamanho das gotas tendem a formam maior porcentagem de gotas finas (Figuras 9 F e G, respectivamente). Como esperado, V100 e V150 apresentaram correlação positiva ($r = 0,91$; $p < 0,0001$), visto que V100 é um subconjunto de V150. Assim como observado para as pontas TXA e XR, existem tratamentos que se destacam de forma isolada nos gráficos de dispersão. No caso da ponta TT, o tratamento 71 - MÁXIMA apresentou os maiores valores de Span e das porcentagens de gotas suscetíveis à deriva, mesmo mantendo DMV semelhante a outros tratamentos avaliados.

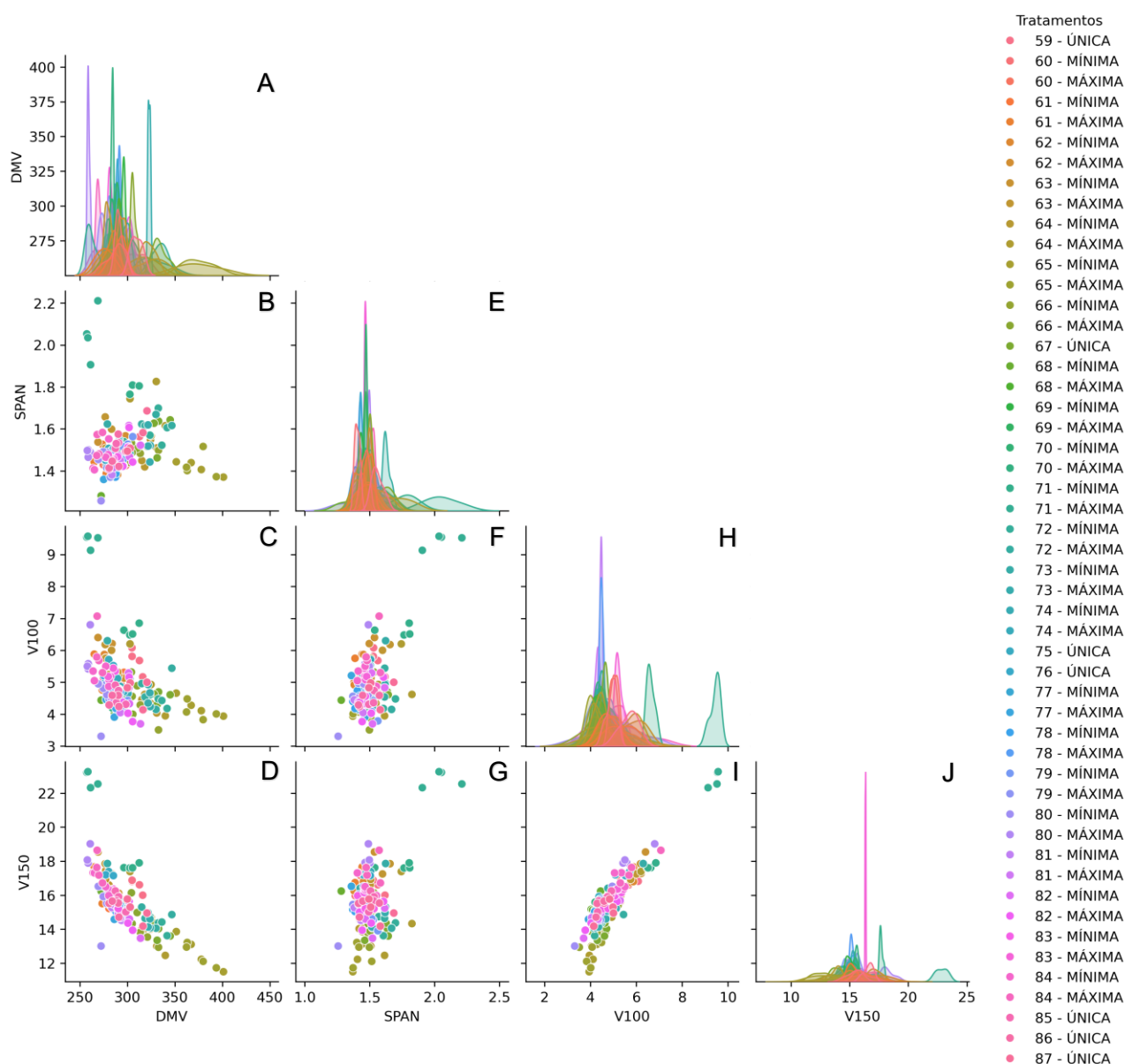


Figura 9. Densidade de distribuição do DMV (μm) entre os tratamentos com adjuvantes (A); dispersões entre DMV (μm) e Span (B); entre DMV (μm) e V100 (%) (C); e entre DMV (μm) e V150 (%) (D). Densidade de distribuição do Span (E); dispersões entre Span e V100 (%) (F); e entre Span e V150 (%) (G). Densidade de distribuição de V100 (%) (H); dispersões entre V100 (%) e V150 (%) (I); e densidade de distribuição de V150 (%) (J), com a ponta TT 11003.

*As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas dosagens mínima e máxima.

A análise de componentes principais (PCA) aplicada aos dados da ponta TT explica 93,7% da variância total nas duas primeiras componentes principais, sendo 66,5% explicada pelo primeiro componente (PC1) e 27,2% pelo segundo componente (PC2) (Figura 10). Observa-se que os tratamentos apresentam certa dispersão no espaço multivariado, com formação de agrupamentos, mas com alguns tratamentos claramente isolados. O posicionamento isolado de alguns tratamentos, como o 71 – MÁXIMA, reflete características associadas a maiores valores de Span e maiores porcentagens de gotas finas (V100 e V150), como previamente observado nos gráficos de dispersão.

A projeção das densidades (Figura 11) confirma a maior concentração da maioria dos tratamentos próximos ao centro do plano PCA, indicando comportamentos similares para a maior parte das misturas avaliadas. Contudo, as regiões de menor densidade destacam a dispersão de alguns tratamentos que apresentam características distintas, especialmente aqueles que produziram maiores valores de Span e de porcentagens de gotas finas.

No biplot das variáveis (Figura 12), observa-se que o componente principal PC1 é fortemente influenciado por Span, V100 e V150, que apresentam correlação positiva com esse eixo, refletindo a relação direta entre a uniformidade do espectro de gotas e a porcentagem de gotas sujeitas à deriva. Por outro lado, o componente PC2 é fortemente influenciado por DMV, que apresenta correlação positiva com esse eixo, indicando que PC2 separa os tratamentos com base no diâmetro mediano volumétrico das gotas. Este padrão confirma que, para a ponta TT, o aumento no tamanho das gotas (DMV) ocorre de forma inversamente associado à formação de gotas finas, com maior destaque para V150. No entanto, não foi observada relação entre DMV e Span ($r = 0,032$), indicando que, para essa ponta, o tamanho das gotas varia de forma independente da uniformidade do espectro.

Portanto, a análise multivariada reforça as observações anteriores, demonstrando que, embora a maior parte dos tratamentos apresente comportamento similar, determinados tratamentos em dosagem máxima, dependendo da formulação, se

destacam por promover maior heterogeneidade no espectro de gotas e maior formação de gotas suscetíveis à deriva.

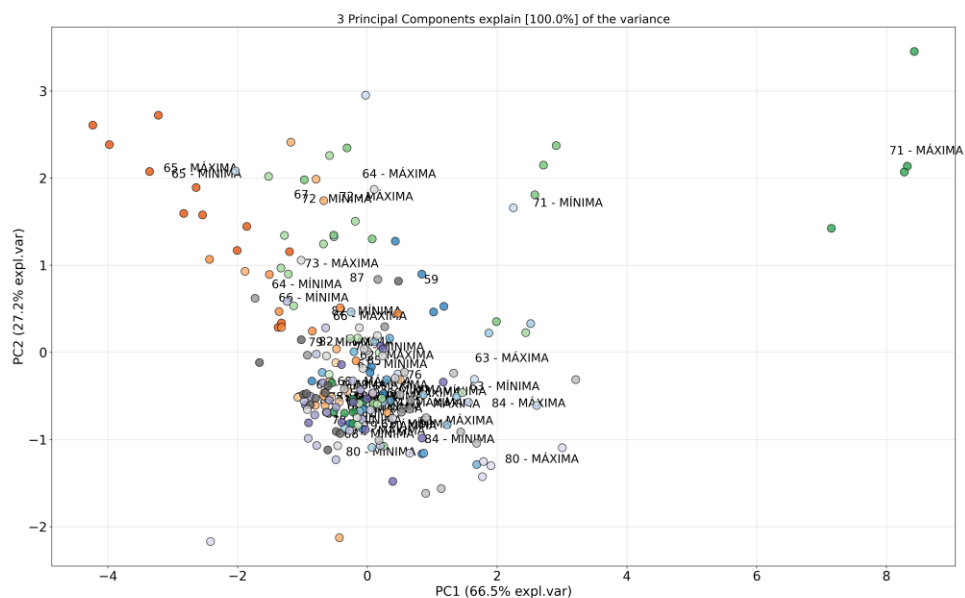


Figura 10. Dispersão dos tratamentos com adjuvantes nas doses mínima e máxima, conforme análise de componentes principais (PCA), com a ponta TT 11003.

*As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas doses mínima e máxima.

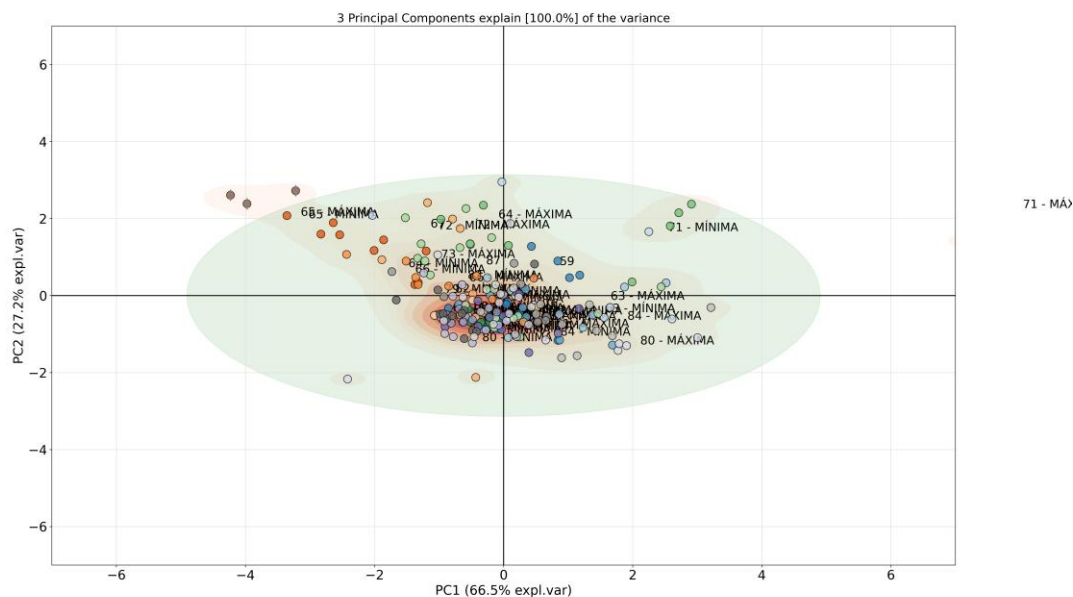


Figura 11. Dispersão dos tratamentos com adjuvantes nas doses mínima e máxima, conforme análise de componentes principais (PCA), com sobreposição das elipses de agrupamento, com a ponta TT 11003.

*As elipses representam agrupamentos com base na similaridade entre os tratamentos. As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas doses mínima e máxima.

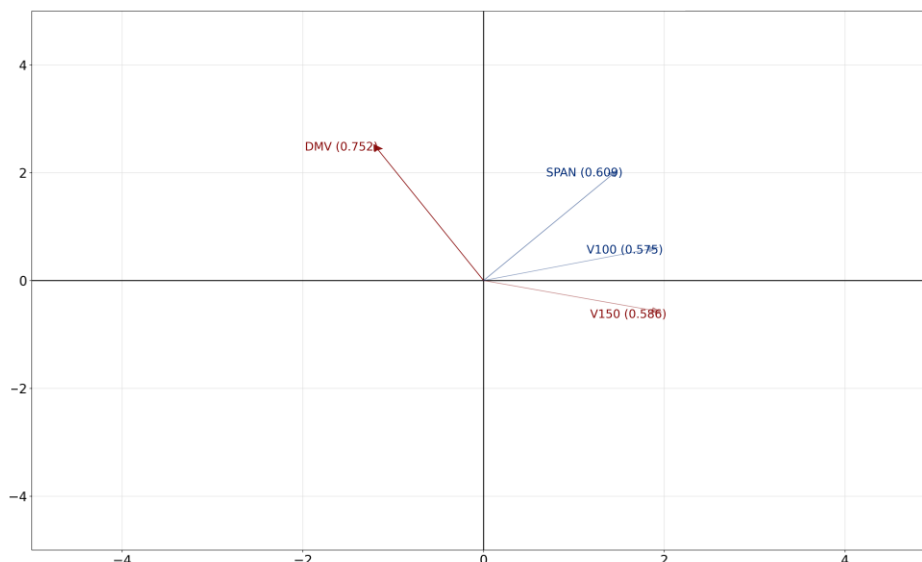


Figura 12. Projeção das variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), coeficiente de uniformidade (SPAN), porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) e menores que 150 μm (V150) nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), conforme análise de componentes principais (PCA), com a ponta TT 11003.

Para a ponta AIXR 11003, são apresentados os gráficos de dispersão individuais para as variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), uniformidade de gotas (Span) e as porcentagens dos volumes de gotas menores que 100 μm (V100) e 150 μm (V150) (Figuras 13 A, E, H e J, respectivamente). Observam-se comportamentos distintos entre os tratamentos em todas as variáveis, com indícios de formação de agrupamentos, embora com valores e padrões diferentes em relação às demais pontas.

Os valores de DMV estiveram, predominantemente, entre 350 e 425 μm , com amplitude variando de 260 a 440 μm . A uniformidade do espectro, representada pelo Span, apresentou concentração entre 1,2 e 1,4, com variações observadas de 1,1 a 2,0. As porcentagens do volume de gotas finas, expressas por V100 e V150, mantiveram-se em baixos níveis, com V100 concentrando-se abaixo de 5% e oscilando entre 1 e 10%, enquanto V150 permaneceu inferior a 15%, com variação entre 6 e 22%. Esses

resultados indicam que, para essa ponta, há uma tendência de menor formação de gotas finas, quando comparada às pontas TXA, XR e TT, comportamento característico de pontas com tecnologia de indução de ar, que priorizam a formação de gotas maiores e menos suscetíveis à deriva (Alves et al., 2018).

A análise de correlação ($p < 0,0001$) indicou que o DMV apresentou correlação negativa com a variável Span ($r = -0,52$), indicando que, para essa ponta, soluções que produziram gotas maiores tendem a apresentar espectros mais uniformes, com menor heterogeneidade no tamanho das gotas (Figura 13 B). As correlações entre DMV e as variáveis relacionadas à formação de gotas finas foram ainda mais expressivas, sendo negativa tanto com V100 ($r = -0,82$; $p < 0,0001$) quanto com V150 ($r = -0,88$; $p < 0,0001$) (Figuras C e D, respectivamente). Esses resultados demonstram que o aumento no tamanho das gotas está diretamente associado à redução da formação de gotas suscetíveis à deriva, comportamento característico de pontas que produzem gotas maiores.

Por outro lado, a variável Span demonstrou correlação positiva tanto com V100 ($r = 0,71$; $p < 0,0001$) quanto com V150 ($r = 0,77$; $p < 0,0001$), indicando que soluções com maior heterogeneidade no espectro de gotas também tendem a gerar maior porcentagem de gotas finas (Figuras F e G, respectivamente). Como esperado, V100 e V150 apresentaram correlação positiva ($r = 0,97$; $p < 0,0001$), uma vez que V100 representa um subconjunto de V150.

Diferentemente das pontas TXA e XR, os gráficos de dispersão da ponta AIXR não indicam tendência de formação de grupos, com os tratamentos distribuindo-se de forma relativamente homogênea nas diferentes variáveis avaliadas. Esse comportamento reflete a menor amplitude dos dados, especialmente nas porcentagens de gotas sujeitas à deriva (V100 e V150), características típicas de pontas de indução de ar, que promovem a formação de gotas maiores e mais uniformes (Khan et al., 2024).

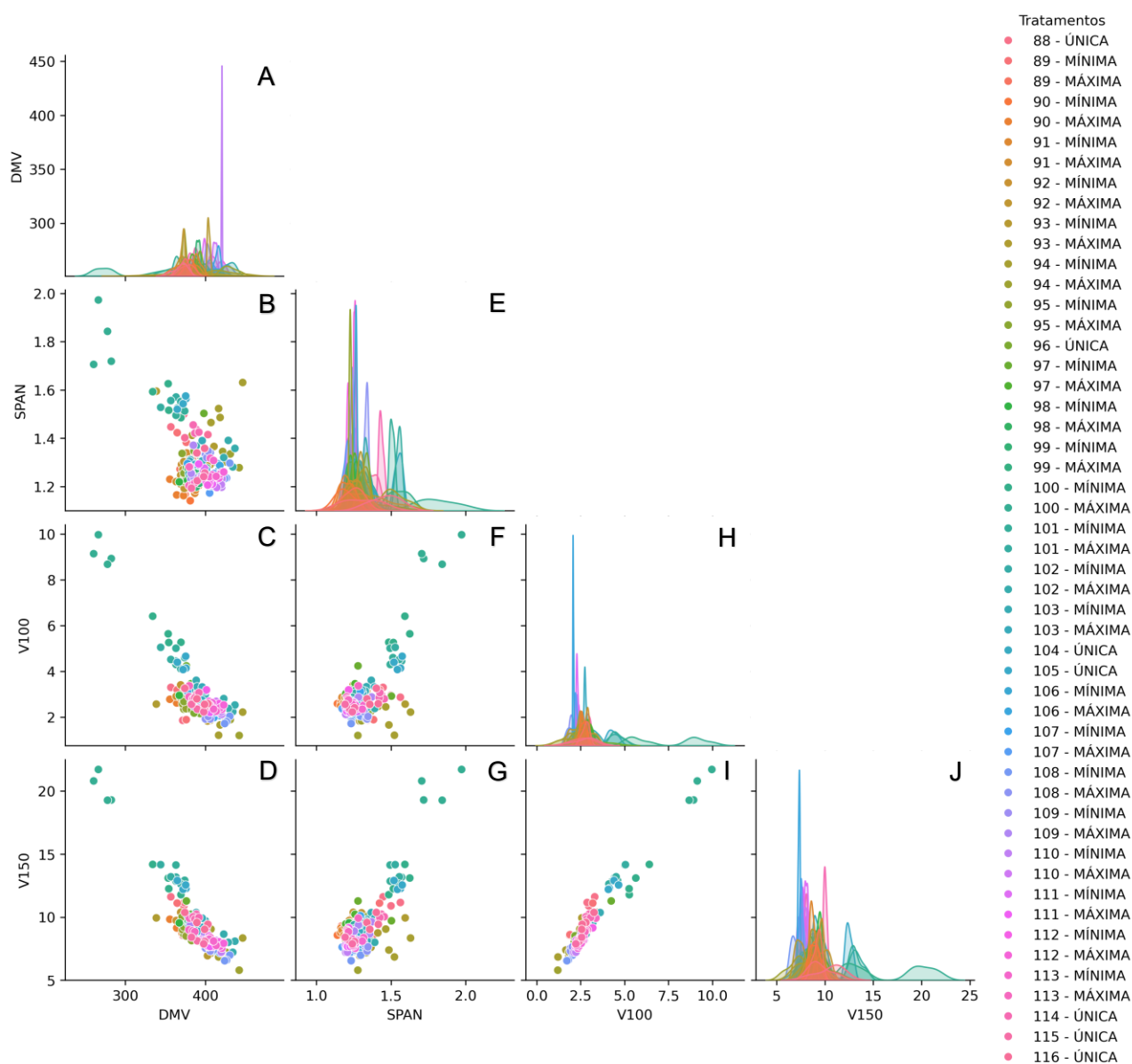


Figura 13. Densidade de distribuição do DMV (μm) entre os tratamentos com adjuvantes (A); dispersões entre DMV (μm) e Span (B); entre DMV (μm) e V100 (%) (C); e entre DMV (μm) e V150 (%) (D). Densidade de distribuição do Span (E); dispersões entre Span e V100 (%) (F); e entre Span e V150 (%) (G). Densidade de distribuição de V100 (%) (H); dispersões entre V100 (%) e V150 (%) (I); e densidade de distribuição de V150 (%) (J), com a ponta AIXR 11003.

*As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas dosagens mínima e máxima.

A análise do biplot revela que o componente principal PC1, responsável por 83,8% da variância, é influenciado por V100 e V150, refletindo a variabilidade associada à produção de porcentagem de gotas suscetíveis à deriva. Por outro lado, o componente PC2, que explica 12,2% da variância, é mais influenciado por DMV e Span, indicando que este eixo representa as variações relacionadas ao tamanho das gotas e à uniformidade do espectro (Figuras 16). Este comportamento demonstra que, para a ponta AIXR, a principal fonte de variação entre os tratamentos está associada à formação de gotas finas, enquanto a variação no DMV e na uniformidade exerce uma influência secundária, mas relevante.

De forma geral, observa-se que a maior parte dos tratamentos apresenta comportamento agrupado, com baixa dispersão no espaço multivariado, refletindo a tendência desta ponta em produzir espectros de gotas mais homogêneos (Alves et al., 2018; Khan et al., 2024). No entanto, alguns tratamentos se destacaram, especialmente o 100 - MÁXIMA, que se posiciona de forma bastante afastada dos demais, com forte influência no PC1, indicando maior formação de gotas sujeitas à deriva. Além dele, os tratamentos 100 – MÍNIMA, 101 – MÁXIMA e MÍNIMA e 105 também aparecem deslocados no espaço da PCA, embora em menor magnitude quando comparados ao tratamento 100 – MÁXIMA (Figuras 14 e 15). Esses tratamentos evidenciam comportamentos atípicos dentro da configuração da ponta AIXR, indicando composições ou condições específicas que resultaram em maior heterogeneidade no espectro de gotas e maior formação de gotas suscetíveis à deriva.

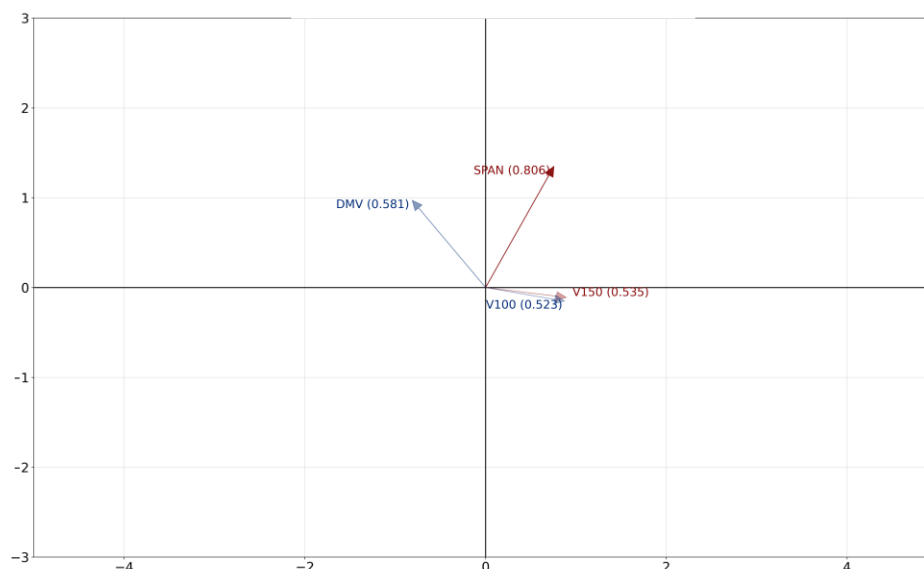


Figura 16. Projeção das variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), coeficiente de uniformidade (SPAN), porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) e menores que 150 μm (V150) nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), conforme análise de componentes principais (PCA), com a ponta AIXR 11003.

Para a ponta TTI 11003, são apresentados os gráficos de dispersão individuais para as variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), uniformidade do espectro de gotas (Span) e as porcentagens dos volumes de gotas menores que 100 μm (V100) e 150 μm (V150) (Figuras 17 A, E, H e J, respectivamente). De maneira geral, é possível observar uma diferenciação entre os tratamentos em todas as variáveis analisadas, indicando tendências de agrupamento, embora com padrões distintos em relação às demais pontas avaliadas.

Os valores de DMV ficaram concentrados, principalmente, na faixa de 550 a 700 μm , com variação geral entre aproximadamente 470 e 900 μm . A variável Span, com a maioria dos dados situando-se entre 1,3 e 1,5, e amplitude variando de 1,1 até 1,8. As variáveis V100 e V150, mantiveram-se em níveis mais baixos comparadas as demais pontas, refletindo o padrão de formação das gotas dessa ponta (Alves et al., 2018). V100

apresentou concentração abaixo de 2%, com amplitude entre 0,4 e 3%, enquanto V150 permaneceu majoritariamente abaixo de 5%, oscilando entre 2 e 7%. Esse comportamento confirma a elevada capacidade da ponta TTI de produzir espectros dominados por gotas grandes, minimizando a formação de gotas suscetíveis à deriva, atributo característico de pontas com tecnologia de indução de ar e com jato defletor (Subr et al., 2025).

O DMV proporcionou correlação negativa com o Span ($r = -0,44$; $p < 0,0001$), indicando que soluções que produziram gotas maiores apresentaram espectros mais uniformes (Figura 17 B). As correlações entre DMV e as variáveis relacionadas às gotas sujeitas à deriva foram negativas tanto com V100 ($r = -0,23$; $p < 0,0010$) quanto com V150 ($r = -0,59$; $p < 0,0001$) (Figuras 17 C e D, respectivamente), demonstrando que o aumento do DMV resulta na redução da formação de gotas pequenas. Por sua vez, a variável Span apresentou correlação positiva com V100 ($r = 0,71$; $p < 0,0001$) e V150 ($r = 0,74$; $p < 0,0001$), evidenciando que, quanto maior a heterogeneidade do espectro, maior é a formação de gotas finas (Figuras 17 F e G). E V100 e V150 apresentaram correlação positiva ($r = 0,86$; $p < 0,0001$).

Observa-se uma distribuição mais uniforme dos tratamentos em todas as variáveis, comportamento que reflete a baixa variabilidade na formação de gotas finas e a elevada consistência no padrão de pulverização, características típicas de pontas com indução de ar, como a TTI, reconhecida por sua alta capacidade de redução de deriva (Khan et al., 2024).

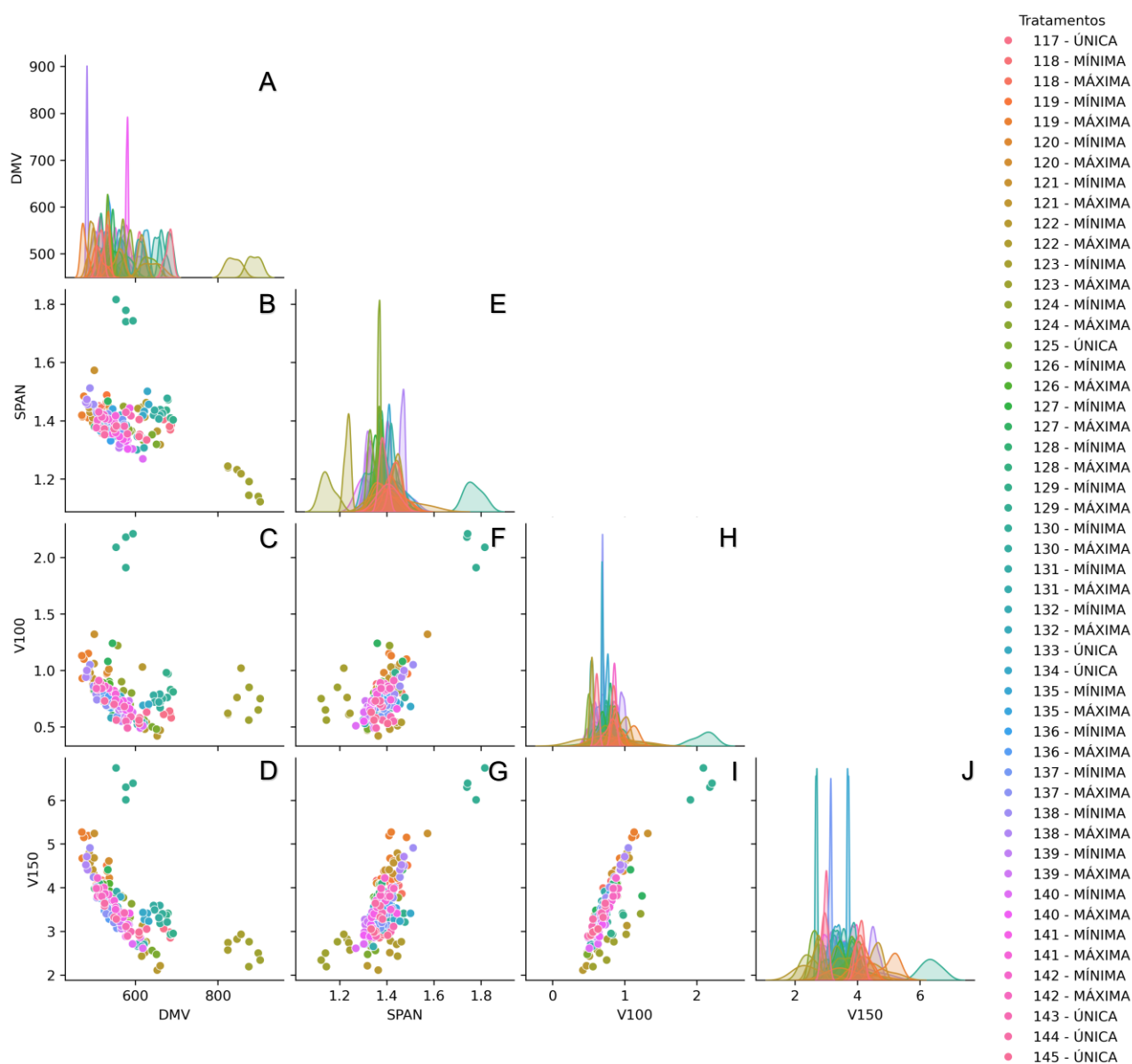


Figura 17. Densidade de distribuição do DMV (μm) entre os tratamentos com adjuvantes (A); dispersões entre DMV (μm) e Span (B); entre DMV (μm) e V100 (%) (C); e entre DMV (μm) e V150 (%) (D). Densidade de distribuição do Span (E); dispersões entre Span e V100 (%) (F); e entre Span e V150 (%) (G). Densidade de distribuição de V100 (%) (H); dispersões entre V100 (%) e V150 (%) (I); e densidade de distribuição de V150 (%) (J), com a ponta TTI 11003.

*As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas dosagens mínima e máxima.

A análise do biplot revela que o componente principal PC1, responsável por 70,7% da variância, é influenciado principalmente pelas variáveis V100, V150 e pelo Span, refletindo a variabilidade associada tanto à formação de gotas finas quanto à uniformidade do espectro. Já o componente PC2, que explica 19,9% da variância, apresenta maior relação com a variável DMV, indicando que este eixo representa as variações associadas ao tamanho das gotas (Figuras 20). Este comportamento demonstra que, para a ponta TTI, a principal fonte de variação entre os tratamentos está relacionada à formação de gotas sujeitas à deriva e à uniformidade do espectro, enquanto as diferenças no DMV possuem uma contribuição relevante, porém secundária.

De maneira geral, observa-se que a maior parte dos tratamentos tende a se agrupar de forma concentrada no espaço multivariado, refletindo a baixa variabilidade da ponta TTI na formação de gotas finas e seu padrão consistente de pulverização (Figuras 18 e 19). Esse agrupamento é típico de pontas que produzem gotas com tecnologia de indução de ar e jato defletor, cuja principal função é produzir espectros compostos por gotas maiores e mais uniformes, favorecendo a redução da deriva (Subr et al., 2025).

Por outro lado, alguns tratamentos se destacaram do grupo central, especialmente os tratamentos 123 - MÍNIMA e 123 - MÁXIMA, que se posicionaram de forma bastante isolada no espaço multivariado, com forte influência no PC2, indicando que essas combinações apresentaram maior influência do DMV no comportamento do espectro. Além deles, o tratamento 129 - MÁXIMA também apareceu deslocado, especialmente no eixo PC1, sugerindo maior influência de gotas finas e da uniformidade de gotas quando comparados aos demais. Esses tratamentos indicam variações pontuais no comportamento da ponta TTI, possivelmente relacionadas à composição da calda, dosagem dos adjuvantes ou condições operacionais específicas, que afetaram o equilíbrio entre o tamanho das gotas e a formação de gotas mais suscetíveis à deriva (Figuras 18 e 19).

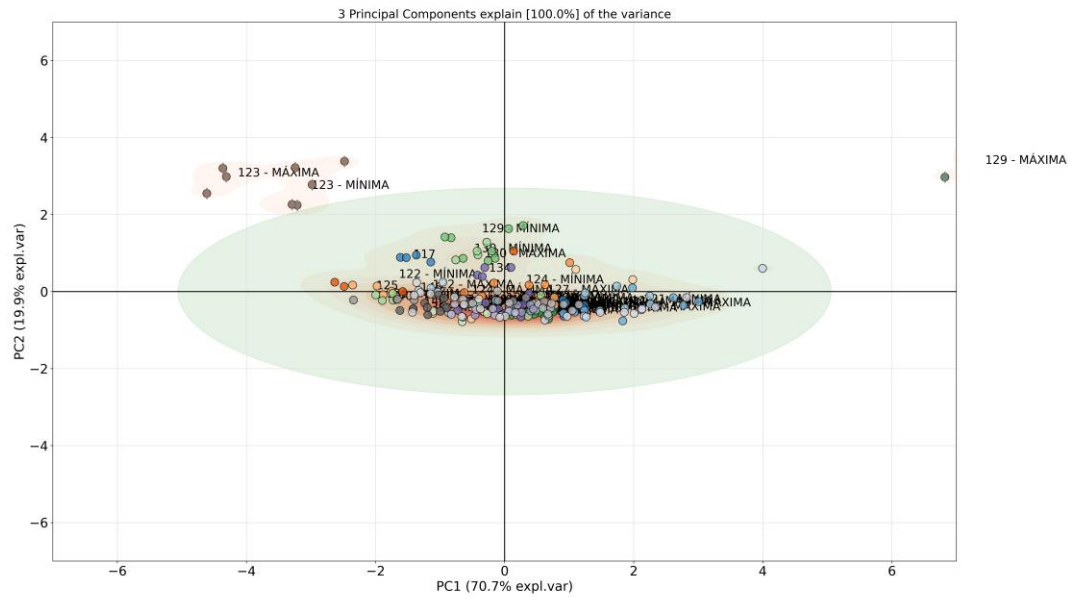


Figura 19. Dispersão dos tratamentos com adjuvantes nas doses mínima e máxima, conforme análise de componentes principais (PCA), com sobreposição das elipses de agrupamento, com a ponta TTI 11003.

*As elipses representam agrupamentos com base na similaridade entre os tratamentos. As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas doses mínima e máxima.

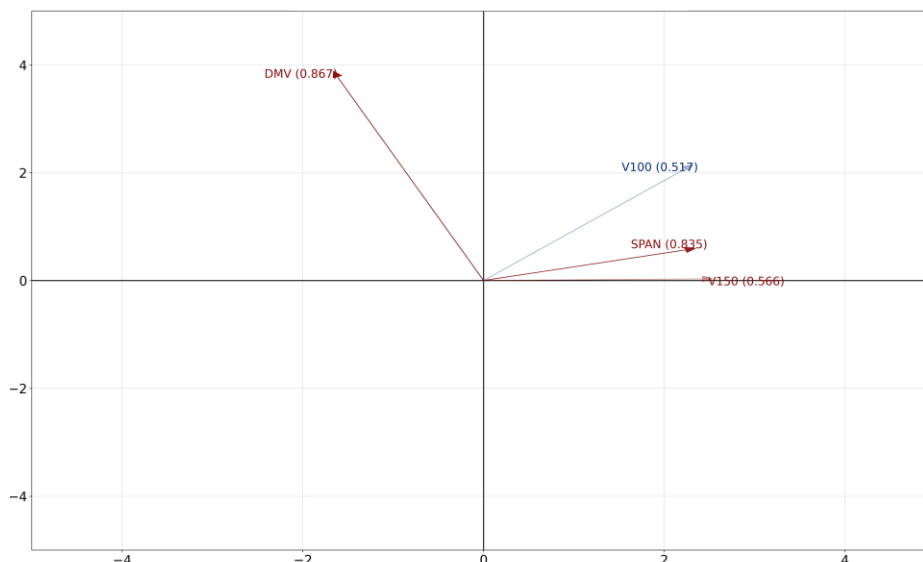


Figura 20. Projeção das variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), coeficiente de uniformidade (SPAN), porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) e menores que 150 μm (V150) nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), conforme análise de componentes principais (PCA), com a ponta TTI 11003.

A análise dos gráficos de dispersão das variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), uniformidade do espectro de gotas (Span) e das porcentagens dos volumes de gotas menores que 100 μm (V100) e 150 μm (V150) foi realizada considerando todas as pontas e tratamentos em conjunto (Figuras 21 A, E, H e J, respectivamente). Observa-se ampla variabilidade nos dados, reflexo das diferentes características de formação de gotas dos modelos de pontas avaliados, que incluem desde aquelas voltadas para a formação de gotas finas até as de tecnologia de indução de ar e jato defletor, que priorizam a formação de gotas maiores.

De modo geral, os valores de DMV apresentaram ampla variação, entre aproximadamente 130 e 900 μm , refletindo as diferenças no padrão de formação de gotas entre as pontas avaliadas e a formação de grupos bem definidos. A variável Span apresentou concentração maior entre 1,2 e 1,6, embora tenham sido observados valores

que chegaram a até 2,2, indicando que, em alguns tratamentos, houve menor uniformidade no espectro de gotas. As variáveis V100 e V150 apresentaram ampla dispersão, com V100 variando de 0,4 até cerca de 30%, e V150 oscilando entre 2% e mais de 60%, evidenciando a influência do tipo de ponta e da combinação dos tratamentos.

A correlação, considerando o conjunto completo de pontas e tratamentos, revelou que o DMV possui correlação negativa com Span ($r = -0,32$; $p < 0,0001$) (Figura 21 B). As correlações entre DMV e as porcentagens de gotas finas foram negativas tanto com V100 ($r = -0,83$, $p < 0,0001$) quanto com V150 ($r = -0,88$; $p < 0,0001$) (Figuras C e D, respectivamente). Por outro lado, Span apresentou correlação positiva tanto com V100 ($r = 0,42$; $p < 0,0001$) quanto com V150 ($r = 0,38$; $p < 0,0001$) (Figuras F e G, respectivamente). Além disso, V100 e V150 apresentaram correlação positiva ($r = 0,99$; $p < 0,0001$) (Figura I).

A partir da análise dos gráficos de dispersão entre as variáveis e das distribuições individuais, observa-se que as variáveis DMV, V100 e V150 formam grupos bem definidos, com valores característicos para cada tipo de ponta, refletindo as diferenças no padrão de formação de gotas. Já a variável Span apresenta um comportamento distinto, sem uma separação tão clara entre os grupos. Embora em alguns casos apresente menor variação dentro de determinados agrupamentos, o Span oscila de forma mais ampla, sendo influenciado tanto pelas características da ponta quanto pela composição dos adjuvantes utilizados, o que afeta diretamente a uniformidade do espectro de gotas.

Além disso, observa-se uma forte correlação positiva entre V100 e V150, o que era esperado devido à relação direta entre essas variáveis, uma vez que V100 é parte do volume considerado em V150. Por outro lado, verifica-se uma correlação negativa entre DMV e as variáveis V100 e V150, indicando que o aumento no tamanho das gotas reduz a formação de gotas sujeitas à deriva. Esse comportamento, no entanto, se estabiliza em faixas de DMV mais elevadas, especialmente a partir de $600\ \mu\text{m}$, onde a variação de gotas sujeitas à deriva (V100 e V150) torna-se muito baixa. Isso evidencia que, acima desse tamanho de gota, a formação de gotas finas é praticamente semelhante,

independentemente do adjuvante utilizado, com exceção de casos específicos, como o tratamento 129 - MÁXIMA aplicado com a ponta TTI, que apresentou comportamento distinto.

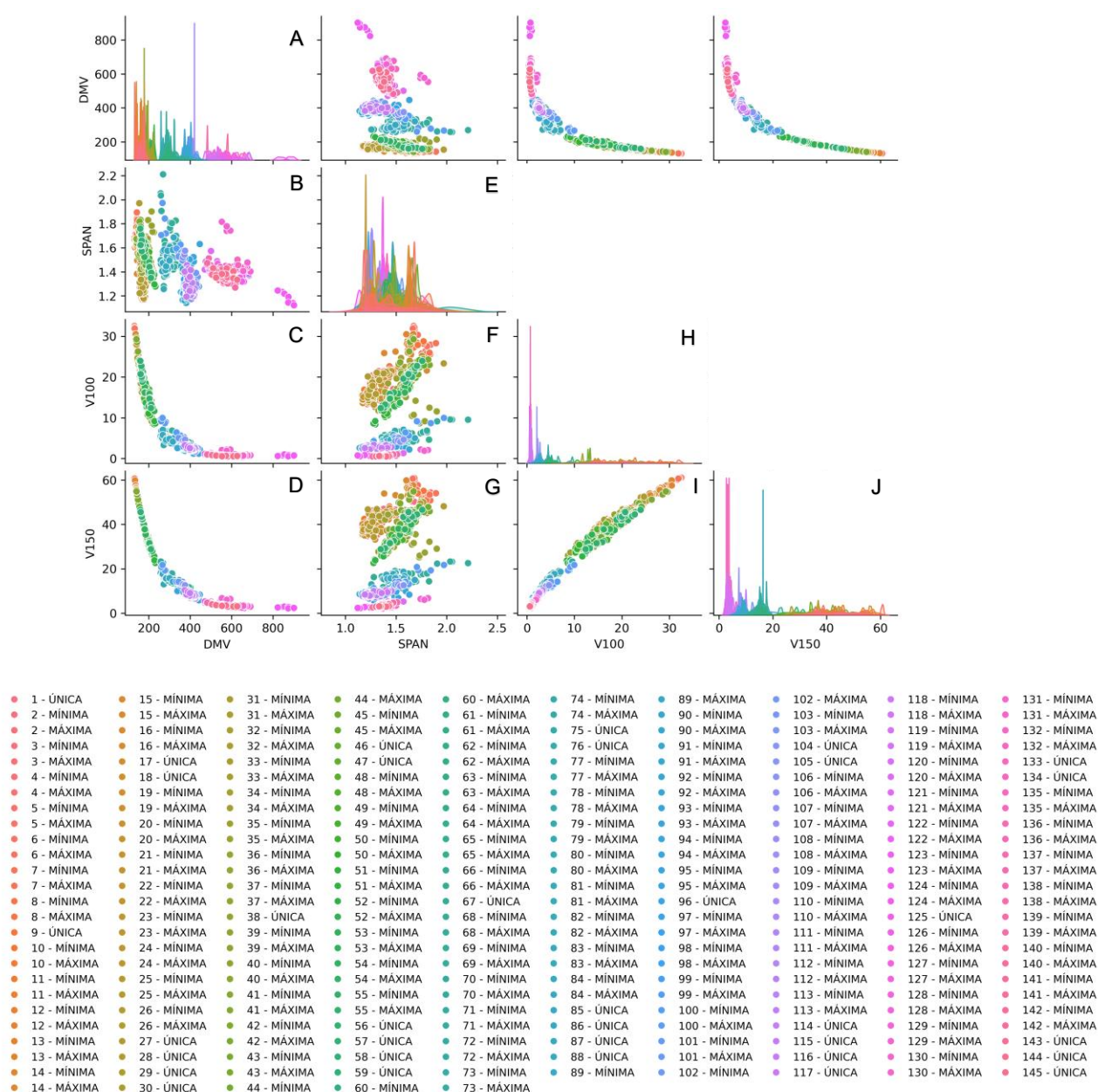


Figura 21. Densidade de distribuição do DMV (μm) entre os tratamentos com adjuvantes (A); dispersões entre DMV (μm) e Span (B); entre DMV (μm) e V100 (%) (C); e entre DMV (μm) e V150 (%) (D). Densidade de distribuição do Span (E); dispersões entre Span e V100 (%) (F); e entre Span e V150 (%) (G). Densidade de distribuição de V100 (%) (H); dispersões entre V100 (%) e V150 (%) (I); e densidade de distribuição de V150 (%) (J), com todos os tratamentos e pontas.

*As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas dosagens mínima e máxima.

A análise do biplot mostra que o componente principal PC1, responsável por 75,2% da variância, é fortemente influenciado pelas variáveis V100 e V150, de forma positiva, e pelo DMV, de forma negativa. Esse eixo representa, portanto, a variabilidade associada à formação de gotas finas, que se opõe ao aumento do tamanho das gotas. Por sua vez, o componente PC2, que explica 19,8% da variância, é predominantemente associado à variável Span, indicando que este eixo expressa as variações na uniformidade do espectro de gotas (Figura 24).

Observa-se que os tratamentos apresentam formação de grupos bem definidos no espaço multivariado, o que reflete a ampla variação no espectro de gotas em função das combinações entre os diferentes tratamentos e pontas avaliadas. A separação entre os grupos ocorre, principalmente, no eixo PC1, que representa a relação entre o tamanho das gotas e a formação de gotas suscetíveis à deriva, com DMV exercendo influência negativa e V100 e V150 exercendo influência positiva.

Apesar da formação dos grupos, alguns tratamentos se posicionam fora das regiões mais densas do espaço multivariado, caracterizando comportamentos atípicos. Esse desvio não está associado apenas à composição dos adjuvantes, mas também à dosagem empregada, como observado no tratamento 129, cuja dosagem máxima apresentou claro afastamento em relação aos demais, enquanto a dosagem mínima manteve-se próxima à região central do gráfico (Figura 19). Esses resultados reforçam que, embora existam padrões bem definidos, a variabilidade nas respostas das variáveis DMV, Span, V100 e V150 é fortemente influenciada pela interação entre a formulação dos adjuvantes, as dosagens aplicadas, os tratamentos e o tipo de ponta de pulverização utilizado, o que explica a maior heterogeneidade observada em determinados casos.

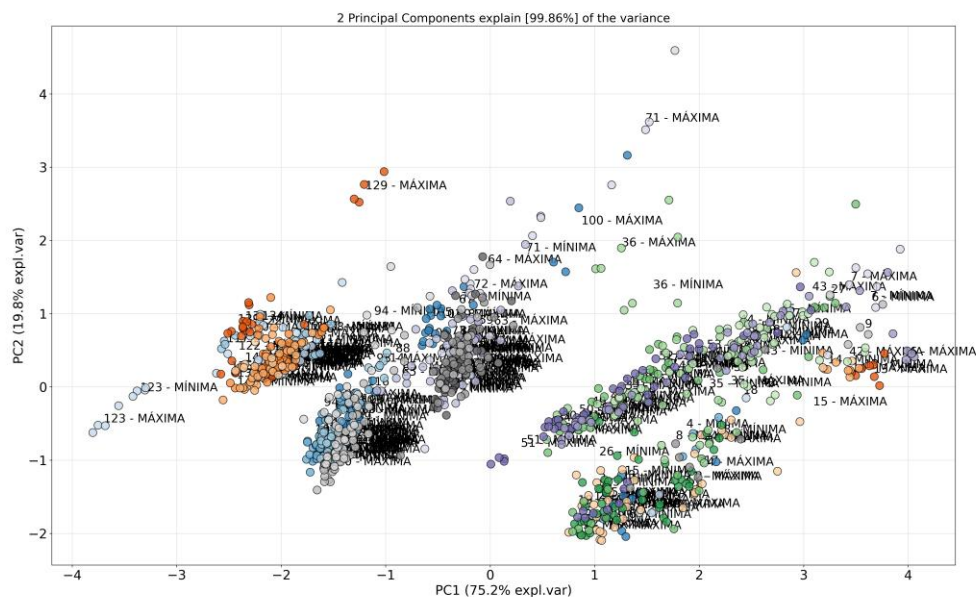


Figura 22. Dispersão dos tratamentos com adjuvantes nas doses mínima e máxima, conforme análise de componentes principais (PCA), com todos os tratamentos e pontas. *As cores representam as caldas fitossanitárias com adjuvantes aplicados nas doses mínima e máxima.

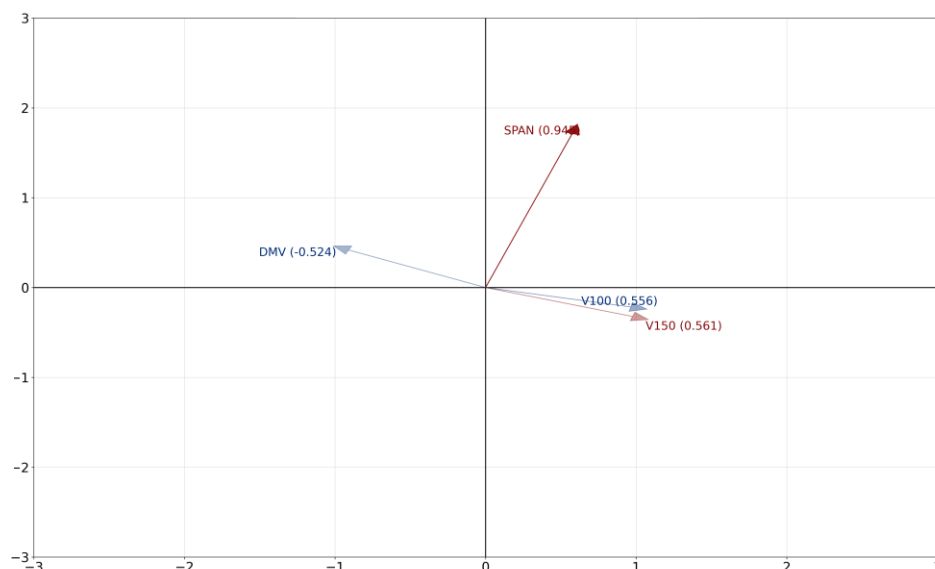


Figura 24. Projeção das variáveis diâmetro mediano volumétrico (DMV), coeficiente de uniformidade (SPAN), porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) e menores que 150 μm (V150) nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), conforme análise de componentes principais (PCA), com todos os tratamentos e pontas.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a interação entre os adjuvantes, suas dosagens e os modelos de pontas de pulverização exercem influência significativa sobre o espectro de gotas formado, afetando diretamente atributos como o diâmetro mediano volumétrico (DMV), a uniformidade do espectro (Span) e as porcentagens do volume de gotas menores que 100 μm e 150 μm (V100 e V150, respectivamente), as quais estão diretamente relacionadas ao risco de deriva. Esse comportamento está alinhado com estudos que evidenciam a capacidade dos adjuvantes em modificar as propriedades físico-químicas da calda, influenciando diretamente a formação e estabilidade das gotas (Basílio et al., 2024; Zeeshan et al., 2024).

A influência dos adjuvantes na fragmentação dos líquidos em gotas durante a pulverização de caldas fitossanitárias está diretamente ligada às alterações nas propriedades físico-químicas das soluções, especialmente na tensão superficial e na

viscosidade. Essas propriedades afetam não apenas processo de formação, mas também a distribuição, a deposição, o depósito e a absorção das gotas sobre os alvos (Basílio et al., 2024; Brankov et al., 2025).

Adjuvantes à base de tensoativos, especialmente os organosiliconados, são amplamente utilizados para modificar as propriedades físico-químicas das caldas de pulverização agrícola. Embora promovam a redução da tensão superficial e favoreçam a formação de gotas menores, seu impacto sobre a deriva varia em função do tipo de tensoativo, da formulação e das condições de aplicação. A escolha adequada do adjuvante pode contribuir significativamente para a redução da deriva; entretanto, alguns tensoativos podem, ao contrário, aumentar esse risco quando não são corretamente selecionados (Li et al., 2022; Zeeshan et al., 2024).

A adição de um surfactante siliconado à calda fitossanitária reduziu a tensão superficial em 3,6 vezes em relação à água. Contudo, essa adição resultou em um aumento de 20% na porcentagem de gotas suscetíveis à deriva, ou seja, aquelas com diâmetro inferior a 100 μm (Baio et al., 2015). Esse mesmo comportamento foi observado para a ponta TXA neste estudo, na qual o uso de alguns adjuvantes elevou a porcentagem de gotas sujeitas à deriva em valores que variaram de aproximadamente 5% a 48%, dependendo do adjuvante utilizado.

Além disso, para essa ponta TXA cone vazio, o diâmetro mediano volumétrico (DMV) das gotas foi de tamanho finas, segundo a norma ASABE/ANSI/ASAE S572.1 (ASABE, 2009). Esse espectro é tecnicamente desejável em situações que exigem alta cobertura, como no controle de doenças fúngicas em dosséis adensados (Ru et al., 2023). No entanto, seu uso não é recomendado em aplicações próximas a culturas sensíveis ou corpos d'água, em função do elevado potencial de deriva associado à maior geração de gotas finas.

A ponta XR, do tipo jato plano convencional, foi responsável pela formação de gotas finas (ASABE, 2009). Projetada principalmente para aplicações que demandam gotas finas a médias, essa ponta é amplamente utilizada em manejos fitossanitários que exigem alta cobertura, como no controle de pragas, doenças e plantas daninhas. No

entanto, a XR também pode gerar gotas grossas, dependendo do adjuvante e da dosagem utilizada (Buosi et al., 2024).

Adjuvantes com ação de reduzir a deriva, como polímeros e agentes espessantes, mostraram-se eficazes na redução da porcentagem de gotas suscetíveis à deriva, promovendo aumento no diâmetro mediano volumétrico (DMV) e redução do coeficiente de uniformidade (Span) (Gaillard et al., 2022). A adição de polímeros, em particular, pode elevar o DMV em até 25%, conforme a composição (Gaillard et al., 2022; Ítmeç et al., 2022). Neste trabalho, foram observadas formações de gotas com DMV superior a 200 μm em determinadas adjuvantes, enquanto a pulverização com água resultou em DMV de aproximadamente 161 μm .

Embora os polímeros sejam frequentemente utilizados para reduzir a porcentagem de gotas suscetíveis à deriva, aquelas com diâmetro inferior a 100 μm , alguns podem provocar um aumento expressivo no diâmetro mediano volumétrico (DMV) e no diâmetro abaixo do qual estão 90% do volume total das gotas (DV90). Como consequência, pode haver aumento no valor de Span, indicando menor uniformidade no espectro de gotas produzidas. Além disso, o uso de concentrações excessivas de polímeros pode resultar em efeitos indesejáveis, como o aumento acentuado da viscosidade da calda, o que compromete o processo de pulverização e pode reduzir tanto a eficiência operacional quanto a eficácia no controle fitossanitário (Kettler et al., 2008; Gaillard et al., 2022).

A ponta TT é uma ponta de pulverização agrícola com jato defletor, projetada para produzir gotas de tamanho médio a grosso, sendo amplamente utilizada em aplicações de produtos fitossanitários que demandam menor risco de deriva e cobertura eficiente com gotas médias (Subr et al., 2025). Os resultados obtidos neste estudo corroboram essa característica, com a maioria dos adjuvantes avaliados apresentando porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm inferior a 10%. No entanto, a presença de alguns tratamentos com valores de Span superiores a 2,0, associados a maiores porcentagens de gotas finas, indica que a escolha inadequada do adjuvante ou de sua dosagem pode comprometer o desempenho da ponta, reduzindo sua capacidade na mitigação da deriva. Esse comportamento foi observado, por exemplo, no tratamento

71 - MÁXIMA, que se destacou por apresentar Span elevado e maior formação de gotas sujeitas à deriva.

As pontas AIXR e TTI demonstraram comportamento mais uniforme em relação ao diâmetro mediano volumétrico (DMV) e à uniformidade do espectro (Span) para a maioria dos adjuvantes testados. Predominaram valores de DMV acima de 350 μm para a AIXR e superiores a 500 μm para a TTI, com poucos tratamentos destoando desse padrão. Além disso, as porcentagens de volume de gotas menores que 100 μm mantiveram-se, na maioria dos casos, abaixo de 5% com a AIXR e de 2% com a TTI.

Esses resultados confirmam a eficiência das tecnologias de indução de ar na mitigação do risco de deriva, sendo a indução com jato defletor a mais eficaz entre as avaliadas, como já apontado na literatura (Alves et al., 2018; Khan et al., 2024). Destaca-se, ainda, que, em casos específicos, essas pontas podem reduzir significativamente o potencial de deriva mesmo na ausência de adjuvantes, reforçando seu papel como estratégia essencial em aplicações que demandam maior segurança, como no uso de herbicidas sistêmicos e auxínicos, ou em áreas próximas a culturas ou organismos não alvo sensíveis à contaminação por produtos fitossanitários.

A utilização de pontas TTI em combinação com polímeros pode reduzir em até 95% a porcentagem de gotas menores que 100 μm , quando comparadas a pontas de jato plano convencional ou a pontas com jato defletor sem indução de ar (Alves et al., 2018). No presente estudo, a ponta TTI manteve a porcentagem de volume de gotas suscetíveis à deriva (V100) abaixo de 2% na maioria dos tratamentos. No entanto, casos específicos, como o tratamento 129 - MÁXIMA, demonstraram que ainda pode ocorrer, embora de forma limitada, aumento na formação de gotas finas. Esse resultado reforça que nenhum sistema é totalmente imune aos efeitos da composição da calda, especialmente em relação à dosagem utilizada, já que o mesmo adjuvante, no tratamento 129 - MÍNIMA, não provocou tal aumento em V100. Por outro lado, o adjuvante adicionado aos tratamentos 123 - MÍNIMA e 123 - MÁXIMA apresentou elevada eficiência na redução de gotas suscetíveis à deriva, independentemente da dosagem, indicando que seu efeito está mais relacionado à composição do produto do que à quantidade aplicada, destacando-se em relação aos demais.

De maneira geral, observou-se que as pontas TXA e XR se associam mais intensamente à formação de gotas finas, apresentando maior risco de deriva, enquanto as pontas TTI e, em menor grau, AIXR demonstraram maior tendência à formação de gotas maiores, favorecendo a redução da deriva. A ponta TT apresentou comportamento intermediário, com influência marcante do DMV e do Span. A predominância da variável Span no segundo componente principal (PC2) evidencia que a uniformidade do espectro de gotas é uma característica relevante para determinadas pontas, embora sua influência dependa do equilíbrio com as demais variáveis. Esses resultados reforçam que o desempenho das pontas de pulverização não é determinado unicamente pelo diâmetro mediano das gotas, mas sim pela interação entre as porcentagens de gotas sujeitas à deriva (V100 e V150) e a uniformidade do espectro (Span), fatores que em conjunto definem o equilíbrio entre eficiência de cobertura e risco potencial de deriva.

Além disso, a análise de componentes principais usando todos os tratamentos e pontas de pulverização mostrou um padrão em que o primeiro componente (PC1) está fortemente associado à formação de gotas finas (V100 e V150), em oposição ao DMV. Esse resultado evidencia de forma clara a relação inversa inerente à tecnologia de pulverização, na qual o aumento do diâmetro mediano volumétrico (DMV) contribui para a redução do potencial de deriva, enquanto a diminuição do DMV favorece a cobertura do alvo, mas tende a elevar o risco de perdas por deriva (Ferreira e Matuo 2024). Nesse contexto, observa-se que o componente principal 1 (PC1) está fortemente associado à variabilidade relacionada à deriva, por meio das porcentagens do volume de gotas finas (V100 e V150).

O segundo componente principal (PC2) está relacionado principalmente à variável Span, que expressa a uniformidade do espectro de gotas. Esse aspecto é especialmente relevante, pois espectros com alto Span indicam maior heterogeneidade na pulverização, podendo resultar simultaneamente em gotas muito grandes e muito pequenas. Essa condição compromete tanto a eficácia biológica, por falhas de cobertura, quanto a segurança ambiental, devido ao aumento do risco de deriva (Xue et al., 2021; Basílio et al, 2024).

Portanto, os resultados relacionados ao tamanho de gotas evidenciam que tanto o tipo de ponta de pulverização quanto o tipo funcional, a composição dos adjuvantes e as dosagens utilizadas nas caldas fitossanitárias são determinantes na definição do espectro de gotas. Essas variáveis afetam diretamente a eficiência da aplicação e o risco de deriva, com implicações agronômicas e ambientais relevantes. O entendimento aprofundado desses efeitos permite que técnicos e produtores tomem decisões mais embasadas, promovendo um equilíbrio entre eficiência no controle biológico e redução dos impactos ambientais.

Apesar de as variáveis DMV, Span, V100 e V150 fornecerem informações sobre o espectro de gotas produzido na pulverização, optou-se por utilizar a porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) como variável principal para a análise de cluster. Essa escolha se justifica pela relevância prática da V100 na estimativa do potencial de deriva, já que gotas com diâmetro inferior a 100 μm são mais suscetíveis à deriva antes de atingirem o alvo (Rodrigues Neto et al., 2023). O DMV representa o diâmetro mediano do volume de gotas e o Span indique a uniformidade do espectro, ambos, no entanto, não distinguem diretamente a quantidade mais crítica em termos de risco ambiental.

Embora gotas menores que 150 μm também possam contribuir para a deriva, a porcentagem abaixo de 100 μm é considerada a mais crítica, pois essas gotas apresentam comportamento aerodinâmico muito mais instável e são as principais responsáveis pelas perdas. Assim, a utilização de V100 como critério de agrupamento é respaldada tanto por fundamentos técnicos quanto por diretrizes de classificação internacional (ASABE, 2009), além de ter sido estatisticamente sustentada pela PCA, que indicou forte contribuição dessa variável para a variação dos dados entre os tratamentos.

O dendrograma apresentado a seguir permite visualizar a estrutura de agrupamentos dos tratamentos em função dos adjuvantes e as dosagens mínimas e máximas recomendadas pelos fabricantes. A representação gráfica mostra a similaridade entre os tratamentos, onde aqueles com maior proximidade são mais semelhantes em relação a porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (Figura 25).

Os adjuvantes que compartilham a mesma coloração no dendrograma pertencem a um mesmo grupo, indicando similaridade quanto à variável analisada. Esses adjuvantes foram, portanto, agrupados dentro de uma mesma classe funcional. Em contrapartida, aqueles representados por cores distintas formam grupos diferentes, totalizando seis agrupamentos. Esses agrupamentos refletem padrões de comportamento semelhantes quanto à porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100). Tal resultado é consistente com a análise de componentes principais (PCA), na qual o componente principal 1 (PC1) mostrou forte associação com a variável V100, sendo interpretado como um indicador do potencial de deriva. Dessa forma, o agrupamento gerado pela análise de cluster com base na V100 forneceu suporte para a distinção funcional entre os adjuvantes quanto à sua capacidade de redução da deriva.

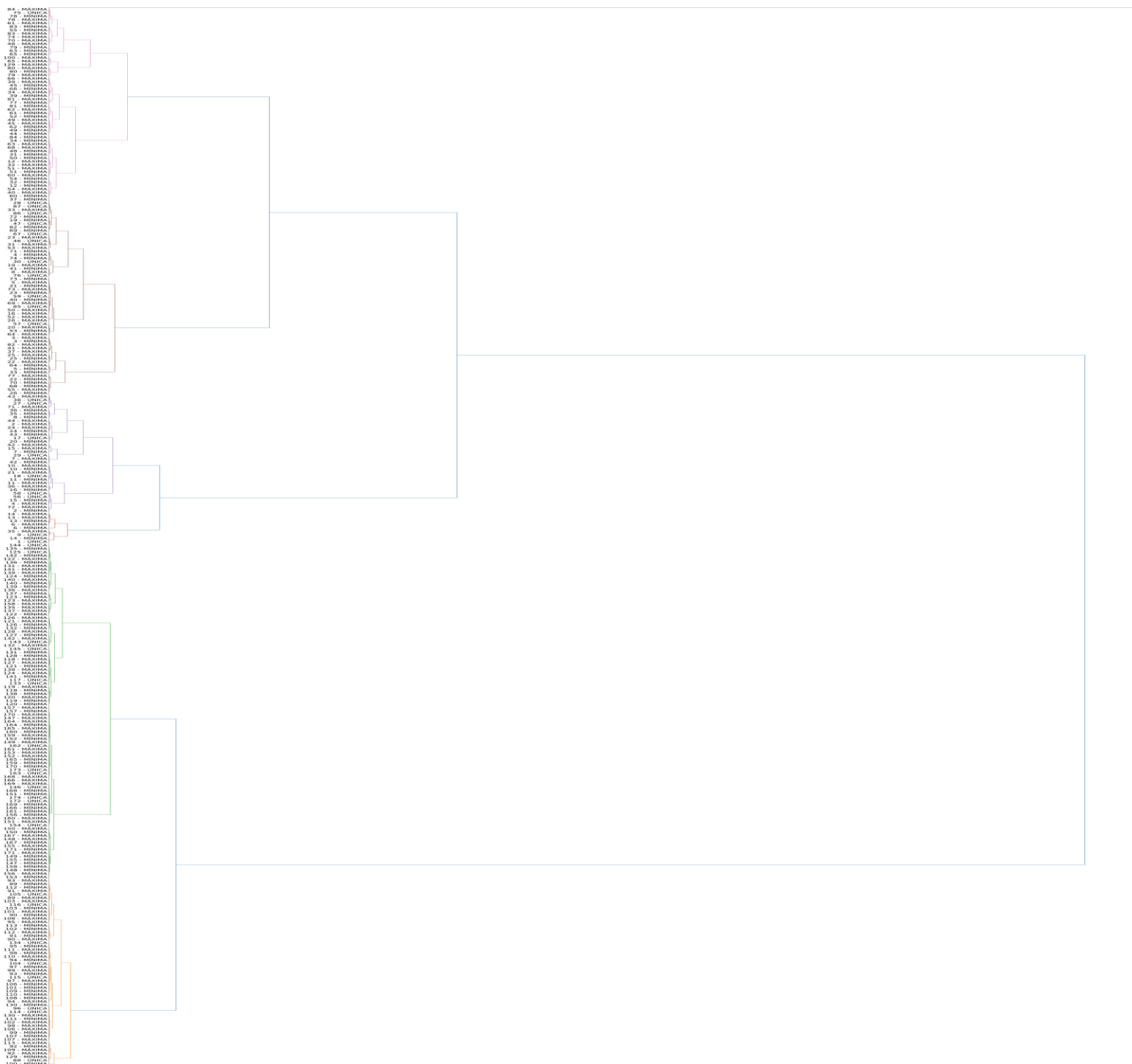


Figura 25. Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico dos tratamentos com adjuvantes nas dosagens mínima e máxima, com base na variável porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm .

*As cores indicam os diferentes grupos formados, sendo que tratamentos com a mesma cor pertencem ao mesmo grupo.

Os agrupamentos observados no dendrograma da Figura 25 foram reorganizados na Tabela 1, em ordem decrescente com base nos intervalos de porcentagem de gotas sujeitas à deriva, sendo que cada grupo foi colocado em faixa com o valor maior e o valor menor dentro de cada grupo. Dessa forma, o Grupo 1 reúne os adjuvantes com os maiores valores de porcentagem do volume de gotas menores que 100 µm, enquanto o Grupo 6, aquele com o menor valor, refletindo, respectivamente, os extremos superior e inferior dos dados obtidos com os tratamentos utilizados.

Os adjuvantes foram distribuídos de acordo com seus respectivos níveis de redução de deriva agrupados na análise de Cluster, sendo o Grupo 1 composto por caldas com V100 superiores a 31%. À medida que se avança para os demais grupos, observa-se uma redução gradual nos valores de porcentagem de gotas menores que 100 µm, o que reflete aumentos progressivos na capacidade de redução de deriva. O Grupo 6, por sua vez, reuniu os adjuvantes com os menores valores de V100 (entre 3,27 e 0,52%).

A organização da Tabela 1 em faixas de porcentagem de gotas menores que 100 µm facilitou a visualização dos limites numéricos que separam os grupos. Por exemplo, o Grupo 1 compreende adjuvantes com valores entre 34,22 e 31,26%, o Grupo 2 entre 30,39 e 23,74%, o Grupo 3 entre 22,75 e 17,30, e assim sucessivamente, até o Grupo 6, que abrange os valores mais baixos. Essa segmentação contribui para evidenciar a transição entre os níveis de deriva.

Ainda com base na Figura 25 e na Tabela 1, observa-se que um mesmo adjuvante pode ser classificado em diferentes grupos conforme a dosagem aplicada. Um exemplo é o adjuvante 35, avaliado com a ponta XR, que foi alocado no Grupo 1 na dosagem máxima, enquanto sua dosagem mínima resultou em classificação no Grupo 2, indicando uma menor porcentagem de gotas suscetíveis à deriva nesta condição. Em contraste, o mesmo adjuvante apresentou comportamento consistente com outras pontas: com a TXA (tratamento 6), foi classificado no Grupo 1 em ambas as dosagens, e com a TTI (tratamento 122), permaneceu no Grupo 6 independentemente da dosagem. Esses resultados, obtidos por meio da análise de componentes principais (PCA) e da

análise de agrupamento (cluster), reforçam que o desempenho dos adjuvantes quanto à porcentagem de gotas sujeitas à deriva depende não apenas do produto em si, mas também da interação com o modelo de ponta de pulverização e com a dosagem utilizada.

Tabela 1. Agrupamento dos tratamentos com adjuvantes, com base nos valores de porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm , conforme análise de agrupamento hierárquico (dendrograma).

Cor representativa do grupo do dendrograma	Faixa de porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (%) (V100)	Grupo
Vermelho	34,22 – 31,26	1
Roxo	30,39 – 23,74	2
Marrom	22,75 – 17,30	3
Rosa	16,71 – 9,18	4
Laranja	6,62 – 4,10	5
Verde	3,27 – 0,52	6

A abordagem estatística por meio da análise de cluster permitiu identificar faixas distintas de porcentagem de gotas suscetíveis à deriva entre os tratamentos, com base na similaridade dos valores observados. Os grupos foram formados conforme a distribuição dos dados, diferenciando os adjuvantes quanto ao seu potencial risco à deriva, sendo os grupos iniciais associados às maiores porcentagens. Essa análise possibilitou a segmentação dos adjuvantes em faixas de comportamento quanto à deriva, permitindo uma visualização inicial de classes funcionais relacionadas à suscetibilidade à deriva.

Com base nos resultados obtidos, foi possível propor uma classificação em faixas para a funcionalidade de redução de deriva dos adjuvantes em caldas fitossanitárias. A análise de agrupamento teve papel central na definição inicial dessas classes, ao fornecer uma base estatística para a separação dos grupos. A partir disso, as faixas de classificação foram ajustadas de modo a compor classes sequenciais e subdivididas entre os intervalos identificados, como exemplificado pela Classe 1, que abrange

porcentagem do volume de gotas sujeitas à deriva entre 34,22 e 31,26%, e pela Classe 2, que contempla valores de 30,39 e 23,74%, sendo criada uma classe intermediária entre 31,25 e 30,40% para preencher a lacuna entre os grupos originalmente formados.

Dessa forma, as faixas originalmente estabelecidas foram refinadas com o objetivo de garantir uma classificação contínua, coerente e capaz de abranger todos os valores observados (Tabela 2). Esse ajuste considerou não apenas aspectos estatísticos, mas também critérios agronômicos, funcionais e práticos, com o intuito de tornar a proposta aplicável em contextos reais de recomendação e uso técnico no manejo das pulverizações.

As novas faixas foram estabelecidas com base na amplitude dos dados observados, considerando a distribuição dos grupos formados originalmente (Tabela 1), porém com ajustes que visaram eliminar lacunas e assegurar uma classificação mais contínua, robusta e aplicável. Complementarmente, as classes foram nomeadas de acordo com o comportamento de porcentagem do volume de gotas sujeitas à deriva dos componentes nas caldas fitossanitárias observado, a fim de facilitar a interpretação prática dos resultados. A categorização foi dividida em seis classes, organizadas de forma decrescente quanto ao risco de deriva, e fornece uma base técnica para a seleção de adjuvantes conforme seu desempenho na formação de gotas finas.

Tabela 2. Proposta de classificação de faixas para a funcionalidade porcentagem do volume de gotas sujeitas à deriva dos componentes nas caldas fitossanitárias.

Classificação	Faixa de porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (v) (%)	Funcionalidade
1	$v > 30$	DERIVA EXTREMAMENTE ALTA
2	$24 \leq v < 30$	DERIVA MUITO ALTA
3	$17 \leq v < 24$	DERIVA ALTA
4	$10 \leq v < 17$	DERIVA INTERMEDIÁRIA
5	$5 \leq v < 10$	DERIVA MODERADA
6	$v < 5$	DERIVA BAIXA

Adjuvantes inseridos na Classe 1 apresentam valores de V100 superiores a 30%, sendo classificados como de deriva extremamente alta. Esse comportamento indica elevado risco de perdas por deriva, com potencial comprometimento da eficiência da aplicação e aumento da contaminação ambiental, sendo, portanto, produtos pouco recomendados para uso em áreas sensíveis ou proximidade de culturas não-alvo (Gibbs et al., 2021; Saracho et al., 2024).

A Classe 2, correspondente à deriva muito alta (30 - 24%), também apresenta desempenho crítico, ainda que ligeiramente menor que a classe anterior. Adjuvantes inseridos nesta faixa exigem maior cautela quanto à tecnologia de aplicação, especialmente no que se refere à escolha da ponta e à adequação das condições meteorológicas (Wang et al., 2025). A Classe 3 abrange adjuvantes com deriva alta (23,9 - 17%), que ainda contribuem com quantidades consideráveis de gotas suscetíveis à deriva, mas podem ser aceitáveis em aplicações específicas, como produtos de contato em dosséis densos, desde que haja controle das variáveis operacionais (Ru et al., 2023).

A Classe 4, definida como de deriva intermediária (16,9 - 10%), representa adjuvantes com desempenho funcional mais estável. Esses produtos já demonstram capacidade efetiva de reduzir a formação de gotas suscetíveis à deriva, embora ainda não atinjam os níveis das classes superiores. Sua utilização é indicada em aplicações que exigem controle moderado de deriva, sendo especialmente útil quando se busca equilíbrio entre segurança ambiental e cobertura eficiente sobre o alvo. Essa faixa pode ser considerada um ponto de transição funcional, ocupando uma posição intermediária entre adjuvantes com baixa eficiência na redução de gotas suscetíveis à deriva e aqueles que apresentam alta capacidade na redução desse risco, o que a torna particularmente relevante para decisões técnicas em situações agronômicas intermediárias (Subr et al., 2025).

As Classes 5 e 6 correspondem aos adjuvantes com melhor desempenho funcional em relação ao controle da deriva, apresentando deriva moderada (9,9 - 5,0%) e deriva baixa (4,9 - 0,0%), respectivamente. Produtos dessas classes são indicados para aplicações em áreas sensíveis, bordaduras ou sob condições ambientais restritivas. Além disso, demonstram maior compatibilidade com pontas de indução de ar e estratégias

voltadas à agricultura sustentável (Alves et al., 2018; Khan et al., 2024). O comportamento diferenciado desses adjuvantes também foi evidenciado nas análises estatísticas, como PCA e análise de cluster, nas quais os tratamentos com menores valores de V100 se agruparam nos extremos associados ao aumento do DMV e à redução da porcentagem de gotas finas, reforçando a coerência da classificação funcional proposta.

A proposta de classificação baseada na porcentagem do volume de gotas suscetíveis à deriva permite não apenas diferenciar os adjuvantes formulados pelos fabricantes, mas também avaliar a calda fitossanitária a ser aplicada em função da combinação entre produto, dosagem e modelo de ponta de pulverização. Dessa forma, produtores e profissionais responsáveis pela aplicação podem utilizar essa ferramenta como um critério técnico para verificar se a calda, nas condições operacionais escolhidas, é adequada às exigências de cobertura do alvo e compatível com as condições meteorológicas no momento da aplicação. A classificação funcional fornece um indicativo do potencial de deriva, possibilitando ajustes na escolha dos adjuvantes ou na tecnologia de aplicação, visando maximizar a eficiência do controle e minimizar a contaminação de áreas não-alvo.

Além da classificação baseada na porcentagem do volume de gotas suscetíveis à deriva, foi desenvolvida uma segunda proposta voltada à avaliação da redução da deriva, considerando o percentual de diminuição desse volume em relação à calda fitossanitária padrão, ou seja, aquela utilizada como base para comparação nas estratégias voltadas à redução do risco de deriva. Enquanto a primeira proposta permite estimar o risco potencial de deriva de uma calda em função de sua composição e da tecnologia de aplicação, como o modelo de ponta de pulverização, a segunda possibilita quantificar a efetividade das modificações adotadas com o objetivo de reduzir esse risco, como a adição de adjuvantes ou alterações na formulação.

Ambas as classificações utilizam como base as mesmas seis classes principais definidas pelos intervalos de V100. No entanto, a proposta de redução de deriva subdivide cada classe em três níveis, representando diferentes intensidades de redução: 1. baixa, 2. moderada e 3. alta. Essa estrutura oferece uma ferramenta prática aos

usuários, permitindo verificar se modificações realizadas nas caldas padrão, como o uso de adjuvantes, resultam efetivamente em redução da deriva e, em caso positivo, identificar o nível de desempenho alcançado com base nos critérios propostos.

Para garantir coerência e abrangência, os intervalos de redução dentro de cada classe foram divididos de forma equitativa entre os três níveis, utilizando valores decimais sempre que necessário. Por exemplo, na Classe 2, cujo intervalo de V100 varia de 30% a 24%, os seis pontos percentuais foram distribuídos em três faixas de 2,0%, definindo os limites para os diferentes níveis de redução (2.1 baixa redução de deriva, 2.2 moderada redução e 3.1 alta redução de deriva. Dessa forma, as duas propostas de classificação se complementam, oferecendo uma ferramenta robusta para a tomada de decisão técnica, ao considerar tanto o risco intrínseco de deriva quanto a eficiência das medidas adotadas para sua mitigação.

Tabela 3. Proposta de classificação de faixas para a funcionalidade redução de deriva dos componentes nas caldas fitossanitárias.

Classificação	Faixa de V100 (v) (%) *	Redução (r) (%)	Funcionalidade
1	$v > 30$ ¹	-	SEM REDUÇÃO DE DERIVA
2.1	$24 \leq v < 30$	$r \leq 2,0$	BAIXA REDUÇÃO DE DERIVA
2.2		$2,0 < r \leq 4,5$	MODERADA REDUÇÃO DE DERIVA
2.3		$r > 4,5$	ALTA REDUÇÃO DE DERIVA
3.1	$17 \leq v < 24$	$r \leq 2,0$	BAIXA REDUÇÃO DE DERIVA
3.2		$2,0 < r \leq 4,5$	MODERADA REDUÇÃO DE DERIVA
3.3		$r > 4,5$	ALTA REDUÇÃO DE DERIVA
4.1	$10 \leq v < 17$	$r \leq 2,0$	BAIXA REDUÇÃO DE DERIVA
4.2		$2,0 < r \leq 4,5$	MODERADA REDUÇÃO DE DERIVA
4.3		$r > 4,5$	ALTA REDUÇÃO DE DERIVA
5.1	$5 \leq v < 10$	$r \leq 2,0$	BAIXA REDUÇÃO DE DERIVA
5.2		$2,0 < r \leq 4,5$	MODERADA REDUÇÃO DE DERIVA
5.3		$r > 4,5$	ALTA REDUÇÃO DE DERIVA
6.1	$v < 5$	$r \leq 2,0$	BAIXA REDUÇÃO DE DERIVA
6.2		$2,0 < r \leq 4,5$	MODERADA REDUÇÃO DE DERIVA
6.3		$r > 4,5$	ALTA REDUÇÃO DE DERIVA

*Faixa de porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm (V100) (%).

¹Calda com V100 acima de 30% que, após modificação, passar para abaixo desse valor deve ser enquadrada na nova classe correspondente; se a redução exceder o limite da classe, considera-se alta redução de deriva.

A proposta de classificação por redução de deriva permite organizar os tratamentos de pulverização com base na efetividade da diminuição da porcentagem de gotas suscetíveis à deriva, em relação a uma calda padrão utilizada como referência. Essa classificação oferece uma interpretação funcional da magnitude da redução alcançada, ao subdividir cada faixa de porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm em três níveis de desempenho: baixa, moderada e alta redução de deriva.

A Classe 1 abrange caldas com V100 superior a 30%, sendo consideradas de alto risco de deriva. Essa classe inclui tanto caldas padrão quanto aquelas que mesmo após o uso de estratégias de modificação, como a adição de adjuvantes ou ajustes na formulação, mantêm-se acima desse limite crítico. Por esse motivo, não há subdivisões funcionais dentro da Classe 1, sendo todos os casos classificados como sem redução de deriva. Essa condição reflete uma situação crítica, na qual as modificações realizadas na calda não resultam em efeito funcional sobre a diminuição da quantidade de gotas suscetíveis à deriva, já que valores de V100 superiores a 30% indicam elevado risco de perdas por deriva sob o ponto de vista técnico e ambiental (Gibbs et al., 2021). A permanência de formulações nessa classe indica a necessidade de revisão da estratégia adotada, seja pela substituição do adjuvante, pela adequação da dosagem ou pela escolha de tecnologias de aplicação mais eficazes para a contenção do risco de deriva.

Quando uma calda apresentar valor de V100 superior a 30% e, após alguma modificação, como a troca da ponta de pulverização ou o ajuste da pressão, esse valor for reduzido para abaixo desse limite, ela passa a ser enquadrada em uma das seis classes propostas. O percentual de redução obtido é então comparado com as faixas de redução estabelecidas para a nova classe, possibilitando a definição do nível funcional correspondente: baixa, moderada ou alta redução de deriva. Caso o valor de redução ultrapasse o limite máximo de redução previsto para a classe, considera-se que o tratamento apresenta alta redução de deriva, evidenciando um efeito expressivo da alteração realizada.

Como exemplo, no tratamento 35 - MÁXIMA, a calda apresentou valor de V100 de 32% ao ser aplicada com a ponta TXA. Com a substituição pela ponta XR (tratamento 64 - MÁXIMA), o valor caiu para 20%, o que enquadra o tratamento na Classe 3 (V100 entre 23,9% e 17%). A redução observada foi de 12 pontos percentuais, valor que excede o limite máximo de redução estabelecido para essa classe (6,9%), sendo, portanto, considerado como de alta redução de deriva. Outro exemplo é o tratamento 6 - MÍNIMA, com valor de V100 de 32% utilizando a ponta TXA a 5 bar. Ao reduzir a pressão para 3 bar (tratamento 35 - MÍNIMA), o V100 foi reduzido para 29%, o que posiciona o tratamento dentro da Classe 2 (V100 entre 30% e 24%). A redução de 3 pontos

percentuais, por estar dentro da faixa de 2,0% a 3,9% definida para a classe, caracteriza o caso como de moderada redução de deriva.

As Classes 2 e 3, que abrangem os intervalos de V100 entre 30,0% e 17,0%, representam faixas com risco moderado a elevado de deriva, nas quais a resposta às modificações realizadas nas caldas tende a ser mais evidente. Em ambas as classes, foram definidos os mesmos três níveis de funcionalidade: baixa, moderada e alta redução de deriva, com limites proporcionais ao intervalo de cada classe. A presença de reduções superiores a 4,0% dentro dessas faixas indica um desempenho agronomicamente relevante, especialmente quando o ponto de partida é um cenário de maior risco (Ru et al., 2023). Essas classes são úteis para identificar situações em que o uso de adjuvantes ou ajustes operacionais resultam em melhorias significativas na segurança da pulverização.

A Classe 4, com valores de V100 entre 16,9% e 10%, representa caldas com risco menor comparada as classes anteriores, mas ainda relevante em condições adversas, como aplicações próximas a áreas de preservação ou em culturas suscetíveis (Subr et al., 2025). Os níveis de redução mantêm a estrutura de baixa (0,0 - 2,0%), moderada (2,1 - 4,5%) e alta (> 4,5%), permitindo avaliar o quanto as estratégias empregadas ainda conseguem otimizar a qualidade da aplicação. A interpretação funcional nessa faixa valoriza ajustes que, mesmo sobre caldas com bom desempenho, proporcionam ganhos adicionais em termos de redução da deriva.

As Classes 5 e 6, com V100 variando entre 9,9% e 0,0%, reúnem caldas com baixo ou muito baixo risco de deriva. Na Classe 5 (9,9% a 5,0%), pequenas reduções ainda podem representar avanços relevantes em contextos mais restritivos, como aplicações próximas a áreas sensíveis. Já a Classe 6 (4,9% a 0,0%) contempla caldas com o menor potencial de formação de gotas finas, normalmente associadas ao uso de pontas com indução de ar, tecnologia reconhecida pela sua eficiência na redução da deriva (Khan et al., 2024).

Para ambas as classes, os limites funcionais de redução foram definidos como: baixa (0,0 - 2,0%), moderada (2,1 - 4,5%) e alta (> 4,5%) redução de deriva. Nesses casos, para que um adjuvante promova alterações mensuráveis em V100 abaixo de 5%,

é necessário que ele exerça um efeito expressivo, dada a baixa suscetibilidade inicial da calda à formação de gotas finas (Zhang e Xiong, 2021; İtmeç et al., 2022). Ainda que os ganhos absolutos sejam mais limitados, a classificação continua sendo uma ferramenta válida para identificar melhorias adicionais, valorizando estratégias que buscam aperfeiçoar a segurança da aplicação mesmo em condições tecnicamente favoráveis, reforçando o compromisso com a eficiência agronômica e a preservação ambiental.

Dessa forma, os resultados demonstram que os adjuvantes avaliados exercem influência direta sobre os parâmetros físicos associados à deriva, sendo capazes de alterar o tamanho e a distribuição das gotas formadas. Essa modificação reforça a importância de uma avaliação funcional dos adjuvantes quanto ao seu desempenho na redução do potencial de perdas por deriva durante a pulverização, contribuindo para o aprimoramento das recomendações agronômicas e facilitando a escolha do adjuvante mais adequado às condições específicas de aplicação. Além disso, essa abordagem pode auxiliar fabricantes, pesquisadores e profissionais do campo na padronização e comunicação técnica sobre as funcionalidades dos adjuvantes. Recomenda-se que estudos futuros explorem outras variáveis, com o objetivo de ampliar as possibilidades de classificação em diferentes contextos.

4. CONCLUSÃO

A avaliação do grau de redução de deriva com base na porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm demonstrou ser uma estratégia eficaz para diferenciar o desempenho dos adjuvantes quanto à capacidade de reduzir a deriva das caldas fitossanitárias. O uso de ferramentas estatísticas exploratórias, como gráficos de dispersão, análise de componentes principais e análise de cluster, possibilitou a definição de faixas representativas do comportamento da variável porcentagem do volume de gotas menores que 100 μm , servindo como parâmetro de classificação funcional.

5. REFERÊNCIA

Alves GS, Kruger GR, Cunha JPAR da (2018) Spray drift and droplet spectrum from dicamba sprayed alone or mixed with adjuvants using air-induction nozzles. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 53:693-702.

<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000600005>

ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers (2009). **ANSI/ASABE S572.1**: Spray nozzle classification by droplet spectra. St. Joseph.

<https://cdn2.hubspot.net/hub/95784/file-32015844-pdf>

Baio FHR, Gabriel RRF, Camelosi HS (2015) Alteração das propriedades físico-químicas na aplicação contendo adjuvantes. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering** 9:151-161.

<https://doi.org/10.18011/bioeng2015v9n2p151-161>

Basílio S, Furtado Júnior MR, Alvarenga CB de, Vitória EL da; Vargas BC, Privitera S, Caruso L, Cerruto E, Manetto G (2024) Effect of adjuvants on physical–chemical properties, droplet size, and drift reduction potential. **Agriculture** 14:2271-2283.

<https://doi.org/10.3390/agriculture14122271>

Brankov M, Simić M, Vukadinović J, Zarić M, Tataridas A, Božinović S, Dragičević V (2025) Could adjuvants serve as an agroecological tool? **Frontiers in Agronomy** 6:e1523208.

Buosi GGP, Neto ADR, Lopes PRM, Ferrari S, Guerreiro JC, Filho PJF, Lima RC, Nascimento V, Funichello M, Raetano CG, Prado EP (2024) Droplet size and hydraulic spray nozzles in peanut plant spray deposition. **Journal of Plant Diseases and Protection** 131:27-33.

<https://doi.org/10.1007/s41348-023-00796-8>

Calore RA, Ferreira MC, Rodrigues NEL, Otuka AK (2015) Distribution pattern, surface tension and contact angle of herbicides associated to adjuvants on spraying and control of *Ipomea hederifolia* under rainfall incidence. **Engenharia Agrícola** 35:756-768.

<https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n4p756-768/2015>

Ferreira MC, Matuo T (2024) **Tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários: fundamentos**. São Paulo: Editora Cultura, 296 p.

Gaillard A, Sijs R, Bonn D (2022) What determines the drop size in sprays of polymer solutions? **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics** 305:e104813.

<https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2022.104813>

Gibbs J, Peters TM, Heck, LP (2021) Comparison of droplet size, coverage, and drift potential from UAV application methods and ground application methods on row crops. **Transactions of the ASABE** 64:819-828.

<https://doi.org/10.13031/trans.14121>

Hewitt AJ (2024) Adjuvant use for the management of pesticide drift, leaching and runoff. **Pest Management Science** 80:4819-4827.

<https://doi.org/10.1002/ps.8255>

İtmeç M, Bayat A, Bolat A, Toraman MC, Soysal A (2022) Assessment of spray drift with various adjuvants in a wind tunnel. **Agronomy** 12:e2377.

<https://doi.org/10.3390/agronomy12102377>

Johnstone DR (1978) **Statistical description of spray drop size for controlled drop application**. In: **British Crop Protection Council**. Proceedings of the Symposium on Controlled Drop Application (London) p. 35-42.

<https://www.bcpc.org/wp-content/uploads/2022/05/Controlled-Drop-Application-p35-42.pdf>

Kettler E, Müller CB, Klemp R, Hloucha M, Döring T, Von-Rybinski W, Richtering W (2008) Polymer-stabilized emulsions: influence of emulsion components on rheological properties and droplet size. **Progress in Colloid and Polymer Science** 134:90-100.
https://doi.org/10.1007/2882_2008_074

Khan FA, Khorsandi F, Ali M, Ghafoor A, Khan RAR, Umair M, Shahzaib M, Rehman A, Hussain Z (2024) Spray drift reduction management in agriculture: a review. **Progress in Agricultural Engineering Sciences** 20:1-36.
<https://doi.org/10.1556/446.2024.00118>.

Li X, Chen L, Tang Q, Li L, Cheng W, Hu P, Zhang R (2022) Characteristics on the spatial distribution of droplet size and velocity with different adjuvants in nozzle spraying. **Agronomy** 12:e1960.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12081960>

Makhnenko I, Alonzi ER, Fredericks S, Colby CM, Dutcher CS (2021) A review of liquid sheet breakup: Perspectives from agricultural sprays. **Journal of Aerosol Science** 157:e105805.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105805>

Python Software Foundation (2024) **Python** (Version 3.12.7).

Rodrigues Neto AD, Ribeiro NAA, Oliveira FAZ, Faria GA, Prado EP (2023) Droplet spectrum characteristics and drift potential of different droplet classes and spray volumes application of atrazine with nicosulfuron. **Ciência Rural** 53:e20220509.
<https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220509>

Ru Y, Hu C, Chen X, Yang F, Zhang C, Li J, Fang S (2023) Droplet penetration model based on canopy porosity for spraying applications. **Agriculture** 13:e13020339.
<https://doi.org/10.3390/agriculture13020339>

Saracho W, Panzl V, Colazzo M, Villalba J (2024) Estimation of drift generated by ground sprayer applications for different droplet sizes. **International Journal of Pest Management** 70:15-25.
<https://doi.org/10.1080/09670874.2024.2439996>

Subr A, Parafiniuk S, Al-Ahmadi A, Milanowski M (2025) The effect of design and the accelerated wear test of agricultural nozzles on the resulting droplet size. **Agricultural Engineering** 29:1-13.
<https://doi.org/10.2478/agriceng-2025-0001>

Sun W, Guo Y, Wang H, Sun Y, Xu J, Zhang K, Jin H (2025) Impact of airflow-assisted spraying technology on droplet drift: a solution for reducing pesticide drift under multidirectional strong wind conditions. **Pest Management Science** 81:3312-3327.
<https://doi.org/10.1002/ps.8702>

Tanious R, Manolov R (2023) Violin plots as visual tools in the meta-analysis of single-case experimental designs. **Methodology: European Journal of Research Methods for the Behavioral and Social Sciences** 18:221-238.
<https://doi.org/10.5964/meth.9209>

Wang B, Geng Z, Pan B, Jiang L, Lin Y (2025) Effect of Vegetable Oil Adjuvant on Wetting, Drift, and Deposition of Pesticide Droplets from UAV Sprayers on Litchi Leaves. **Agronomy** 15:e15020293.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15020293>

Xue S, Xi X, Lan Z, Wen R, Ma X (2021) Longitudinal drift behaviors and spatial transport efficiency for spraying pesticide droplets. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 177:e121516.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121516>

Zeeshan M, Li H, Yousaf G, Ren H, Liu Y, Arshad M, Dou Z, Han X (2024) Effect of formulations and adjuvants on the properties of acetamiprid solution and droplet deposition characteristics sprayed by UAV. **Frontiers in Plant Science** 15:e1441193.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1441193>

Zhang X, Xiong L (2021) Effect of surfactants on the size and stability of droplets in emulsions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 619:e126557.

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126557>

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados de qualidade da aplicação e controle sustentam a recomendação do uso de adjuvantes para herbicidas de contato como o fomesafen, especialmente em condições de campo onde variações ambientais e características da superfície foliar podem comprometer a eficácia. A seleção racional de adjuvantes baseada em propriedades físico-químicas, espalhamento e tamanho de gotas, é uma das ferramentas para otimizar o desempenho agrônomo das aplicações fitossanitárias.

A proposta de classificação para as funcionalidades de espalhamento e redução de deriva foi construída com base em análises estatísticas exploratórias, incluindo gráficos de dispersão entre pares de variáveis, análise de componentes principais e análise de cluster, que, embora envolvam certo grau de arbitrariedade, conferiram solidez à segmentação dos dados utilizados. Além disso, sua definição considerou uma descrição racional do uso atual das caldas fitossanitárias em aplicações agrícolas, assegurando equilíbrio entre fundamentação analítica e aplicabilidade prática, o que torna a classificação uma ferramenta promissora para subsidiar decisões mais eficientes e orientadas no manejo fitossanitário.

Essa abordagem pode contribuir para a melhoria das recomendações agrônomicas, facilitando a escolha do adjuvante mais adequado às condições específicas de aplicação. Além disso, pode auxiliar fabricantes, pesquisadores e profissionais do campo na padronização e comunicação técnica sobre as funcionalidades dos adjuvantes. Recomenda-se que estudos futuros explorem outras variáveis a fim de propor mais classificações em diferentes contextos.