

Bento Gonçalves, RS / Setembro, 2025

Caracterização da pulverização por drone classe II com duplo rotor coaxial e atomizador duplo de disco centrífugo em vinhedos

Fabio Rossi Cavalcanti⁽¹⁾, Lillian Espindola Müller⁽²⁾, Marcos Botton⁽¹⁾, João Caetano Fioravanzo⁽¹⁾ e Christian Bredemeier⁽³⁾

⁽¹⁾ Pesquisadores, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves, RS. ⁽²⁾ Engenheira-agrônoma, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. ⁽³⁾ Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

Resumo – O presente boletim apresenta avaliações da eficácia da pulverização aérea em vinhedos, com ênfase no uso de drones classe II com duplo rotor coaxial e atomizador centrífugo. A pesquisa envolve a necessidade de controle mecanizado de doenças em videiras, considerando que métodos tradicionais, como pulverizações manuais e por trator, podem ser ineficazes e ambientalmente danosos. Como alternativa, drones oferecem precisão na aplicação de produtos fitossanitários, promovendo economia de recursos e minimizando impactos ambientais. Os experimentos foram realizados em dois vinhedos da Embrapa Uva e Vinho, RS, com variedades Cabernet Sauvignon em espaldeira e Niágara Rosada em latada. Seis passagens distintas de pulverização foram testadas em diferentes volumes e orientações, empregando cartões hidrossensíveis para avaliar a distribuição e cobertura das gotas. A análise dos dados incluiu métodos não paramétricos, como os testes de Kruskal-Wallis e Wilcoxon, além de análise de variância (Anova) e Tukey para variáveis com distribuição normal. Os resultados mostram que a aplicação com drones exige ajustes específicos segundo o sistema de condução. Foi verificado que o uso de drones classe II com rotor duplo e atomizadores para controle de doenças em vinhedos espaldeira, com pelo menos três passagens paralelas às linhas de plantio e uma aplicação mínima de 40 L ha⁻¹, tende a atender condições de qualidade de pulverização.

Termos para indexação: *Plasmopara viticola*, controle químico, agricultura de precisão, viticultura, veículo aéreo não tripulado.

Drone spraying characterization class II with double coaxial rotor and double centrifugal disc atomizer in vineyards

Abstract – The current report presents evaluations of the effectiveness of aerial spraying in vineyards, focusing on the use of class II drones equipped with dual coaxial rotors and centrifugal atomizers. This research addresses the need for mechanized disease control in vineyards, considering that traditional methods, such as manual and tractor-based spraying, can be ineffective and environmentally harmful. As an alternative, drones offer precision

Embrapa Uva e Vinho

Rua Livramento, n° 515
Caixa Postal 130
95701-008 Bento Gonçalves, RS
www.embrapa.br/uva-e-vinho
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente
Henrique Pessoa dos Santos
Secretária-executiva
Renata Gava
Membros
Fernando José Hawerth,
Mauro Celso Zanus, Joelsio
José Lazzarotto, Jorge Tonietto,
Thor Vinicius Martins Fajardo,
Alessandra Russi, Edgardo
Aquiles Prado Perez, Fábio
Ribeiro dos Santos, Luciana
Elena Mendonça Prado, Michele
Belas Coutinho Pereira
e Rochelle Martins Alvorcem

Revisão de texto
Renata Gava

Normalização bibliográfica
Rochelle Martins Alvorcem
(CRB-10/1810)

Projeto gráfico
Leandro Sousa Fazio

Diagramação
Renata Gava

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados à Embrapa.

in applying phytosanitary products, promoting resource efficiency and minimizing environmental impacts. Experiments were conducted in two vineyards at Embrapa Uva e Vinho, RS, featuring 'Cabernet Sauvignon' in a vertical shoot positioning (VSP) system ('Trellis') and 'Niagara Rosada' in a pergola system. Six distinct spray passes were tested with varying volumes and orientations, using water-sensitive paper cards to assess droplet distribution and coverage. Data analysis included non-parametric methods such as Kruskal-Wallis and Wilcoxon tests, as well as Anova and Tukey's test for variables with normal distribution. Results indicate that drone spraying requires specific adjustments according to the vineyard training system. Findings suggest that using class II drones with dual rotors and atomizers for disease control in VSP vineyards, with at least three parallel passes along planting rows and a minimum application rate of 40 L ha⁻¹, tends to meet quality spraying conditions.

Index terms: *Plasmopara viticola*, chemical control, precision agriculture, viticulture, unmanned aerial vehicle.

Introdução

A produção de uvas e vinhos é uma indústria vital para a economia agrícola global, com o Brasil se destacando em meio a muitos produtores. Além dos desafios climáticos e geográficos, o manejo fitossanitário nos vinhedos é um elemento fundamental. O controle de doenças é essencial para garantir a alta qualidade da produção de uvas e a viabilidade econômica dos vinhedos (Reynolds, 2021). No entanto, as abordagens tradicionais de controle, como a pulverização manual ou por trator, apresentam diversos problemas. Estes métodos são laboriosos, consomem tempo e demandam muitos recursos. Adicionalmente, eles podem levar a uma distribuição desigual de produtos químicos, exacerbando problemas de poluição ambiental (Sanchavat et al., 2017).

Em resposta a esses desafios, as tecnologias emergentes, como os drones, nome fantasia para veículos aéreos não tripulados (Vant) ou aeronaves remotamente pilotadas (RPAs), começaram a ganhar espaço no mercado. Esses dispositivos oferecem uma alternativa inovadora aos métodos tradicionais de pulverização, permitindo a aplicação de produtos químicos de forma mais precisa. Os drones têm sido empregados em várias aplicações agrícolas. Estas aplicações vão desde o monitoramento de culturas até a pulverização precisa

com volumes significativamente menores do que os métodos tratorizados. Com o avanço da tecnologia do drone, vários processos industriais vêm sendo adaptados, e a agricultura está envolvida nessa revolução. O emprego crescente de drones tem possibilitado aumento da produtividade, redução de custos e melhor alocação de recursos (Herbst et al., 2020; Anken; Waldburger, 2020; Biglia et al., 2022). É importante destacar que, além da pulverização, esses drones também podem vir carregados com sensores de imagem avançados que podem detectar doenças precocemente, capturando imagens de alta resolução e identificando mudanças sutis na saúde das plantas (Matese et al., 2016; Zarco-Tejada et al., 2018). Outras vantagens da pulverização aérea vêm das possibilidades de definição de planejamento de rota de voo (preciso e exato), parâmetros operacionais (largura de faixa de aplicação, altura e velocidade de voo) e pulverização localizada. No contexto de agricultura de precisão isso expande possibilidades. No entanto, a pulverização aérea com drones tem se espalhado recentemente em todo o mundo (Chen et al., 2021), particularmente na China e em muitos países da União Europeia (Biglia et al., 2022). De fato, vários experimentos em campo, em culturas agrícolas, foram realizados em regiões asiáticas para investigar os parâmetros operacionais que mais afetam a pulverização. Em particular, os efeitos da altura e velocidade de voo do Vant, e, portanto, o impulso dos rotores com a formação do "downwash" e a qualidade de pulverização do dossel foram investigados em campos de trigo e arroz (Lou et al., 2018, Abd Kharim et al., 2019) com diferentes tipos de Vants, helicópteros ou multirotores (He et al., 2017; Herbst et al., 2020).

No entanto, para a cultura da videira, a deposição de gotas no dossel a partir de uma RPA não está completamente clara e o mecanismo de deposição ainda necessita ser estudado em detalhes. Até agora, os principais desafios encontrados para a qualidade da pulverização aérea com drones, em vinhedos, estão relacionados com a definição de parâmetros adequados de voo, como altura e velocidade, além da taxa de aplicação mínima para se obter o controle fitossanitário efetivo (Cavalcanti; Müller, 2023). Com relação aos parâmetros técnicos de pulverização, foram observados alguns obstáculos, tais como: a) a falta de uniformidade na distribuição das gotas; b) a passagem de calda para o solo; c) a quantificação e padronização da força de aspersão (ar); e d) a estimativa do impacto ambiental devido à deriva e ao uso excessivo de produtos (Biglia et al., 2022; Cavalcanti; Müller, 2023).

Para garantir que essa tecnologia ofereça os resultados desejados, é crucial que a pulverização seja calibrada com precisão. Seja em pulverizadores tratorizados ou drones, a exatidão na aplicação dos fungicidas é desejável. Uma maneira comprovada de medir a eficácia da pulverização é através do uso de cartões hidrossensíveis. Estes cartões, que mudam de cor quando entram em contato com soluções aquosas, proporcionam informações qualitativas e quantitativas sobre a deposição de pulverização. Assim, auxiliam os agricultores a aperfeiçoar suas técnicas e, conseqüentemente, promover a melhor qualidade de aplicação (Matthews et al., 2016; Brandoli et al., 2021).

O presente trabalho teve por objetivo caracterizar a pulverização de uma RPA classe II, segundo o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial – RBAC-E nº 94 (Agência Nacional de Aviação Civil, 2023), com duplo rotor coaxial e munido por duplo atomizador de disco centrífugo, em diferentes taxas de aplicação. Com esse equipamento, diferentes tipos de passagem foram testados e comparados, em vinhedos com sistemas de condução em espaldeira e latada, na tentativa de se obter, com as configurações disponíveis do aparelho, um método seguro para pulverização visando ao controle de míldio em vinhedos.

Material e métodos

Para testar as passagens do drone, dois vinhedos foram utilizados: um vinhedo com sistema de condução em “espaldeira” e outro em “latada”. O espaçamento nos dois vinhedos foi de 3,0 m entre as fileiras e 2,0 m entre as plantas. As linhas do vinhedo espaldeira, com plantas da variedade Cabernet Sauvignon (*Vitis vinifera* L.), apresentou disposição norte/sul, com inclinação entre 5–10°N (GPS: -29.163481, -51.529086). O segundo vinhedo usado nos ensaios foi um ‘Niágara Rosada’ (*Vitis labrusca*) (GPS: -29.163615, - 51.528286), em sistema de condução latada com disposição leste/oeste e inclinação entre 5–10°. Ambos os vinhedos estiveram em âmbito interno à Embrapa Uva e Vinho, em Bento Gonçalves, RS.

O equipamento utilizado para pulverizações foi uma aeronave remotamente pilotada classe II, com rotor duplo coaxial em quatro semieixos, totalizando 8 rotores, com sistema de pulverização atomizada dupla e dois aspersores centrífugos atomizadores para pulverização uniforme, com largura de faixa máxima de 11 m (para altura de voo de 2,5 m e velocidade de voo de 7 m/s) e com capacidade do tanque de operação de 40 L e taxa máxima de fluxo de 12 L por minuto.

Foram realizadas seis passagens de pulverização utilizando água como simulador de calda fungicida. As passagens foram realizadas durante a safra 2023/2024 nas mesmas linhas dos vinhedos acima apresentados, com a copa das plantas em estágio fenológico após o início do florescimento, no dia 19/10/2023, com menos de 25% das flores abertas. Os tratamentos presentes na Tabela 1, por ordem de passagem, foram: 1) uma passagem na espaldeira (40 L ha⁻¹, ‘40Lesp’); 2) uma passagem de 40 L ha⁻¹ na latada (‘40 L ha⁻¹, ‘40Llat’); 3) uma passagem na espaldeira (20 L ha⁻¹, ‘20Lesp’); 4) uma passagem ortogonal de 40 L ha⁻¹ na espaldeira (‘40Lort’); 5) uma passagem na espaldeira (90 L ha⁻¹, ‘90Lesp’); e 6) três passagens de 40 L ha⁻¹ na espaldeira (‘3x40Lesp’). As passagens se restringiram entre os horários das 10h e as 12h50, pelo horário de Brasília. Exceto pela passagem (4), todas as demais foram realizadas no sentido das linhas das plantas.

Para avaliar os padrões das gotas emitidos pelas passagens do drone classe II, empregaram-se cartões que reagem à água, conhecidos como cartões hidrossensíveis, de dimensões 26 x 76 mm. A escolha dos dias para a condução dos testes levou em conta as condições meteorológicas ideais para a pulverização agrícola, atendendo às diretrizes para uma aplicação segura, conforme citado por Souza et al.(2002). As informações climáticas, essenciais para a decisão, foram obtidas através de instituições especializadas em meteorologia.

O delineamento dos ensaios experimentais seguiu um esquema fatorial, com bordaduras de 10 x 20 m ao redor das parcelas, sendo as bordaduras e as plantas das linhas externas desconsideradas para evitar efeitos de borda e facilitar o trânsito nas passagens. Para elaboração dos tratamentos e análise de dados, foram levados em consideração os seguintes fatores: a) as passagens, acima detalhadas (e resumidas na Tabela 1); b) dois diferentes tipos de condução, sendo espaldeira e latada; c) quatro orientações geográficas: norte, sul, leste e oeste. Aplicando o método de Cavalcanti e Muller (2023), para levantamento dos dados foram consideradas seis repetições (parcelas experimentais) por tratamento, sendo a parcela experimental definida como um cartão hidrossensível inteiro (26 x 76 mm) disposto no sentido de uma única orientação (um ponto cardeal) específica. Logo, em cada planta, um cartão foi direcionado para cada ponto cardeal: norte, sul, leste e oeste, totalizando quatro cartões por planta e seis plantas no total, com cada planta portando quatro parcelas experimentais. Os cartões foram afixados em um ponto médio do dossel vegetativo, tanto em altura (referência vertical) quanto

Tabela 1. Condições e parâmetros para a realização dos testes com o drone classe II.

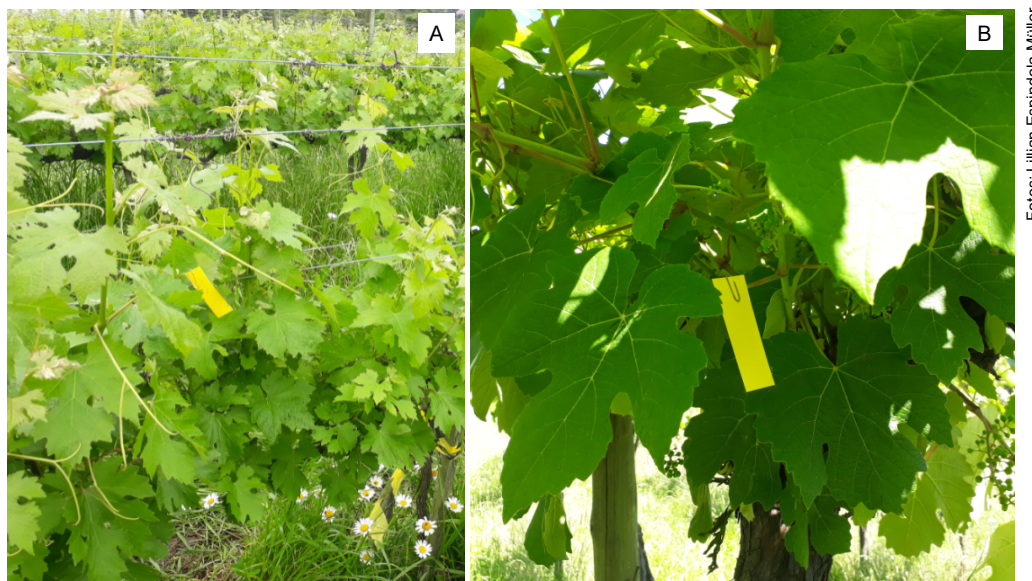
Condição	Parâmetro	Tratamento (passagem do drone)					
		'40Lesp'	'40Llat'	'20Lesp'	'40Lort'	'90Lesp'	'3x40Lesp'
Dado de voo	Altura de voo (m)	4	4	4	4	4	4
	Velocidade de voo (km/h)	16	16	16	16	9,4	16
	Largura de faixa (m)	8,47	6,27	8,04	10,29	8,48	8,47
	Taxa de aplicação (L)	40	40	20	40	90	40
	Vazão (L/min)	8,96	10,09	3,73	10,88	11,91	8,96
	Tamanho de gota (μm)	200	200	200	200	200	200
	Horário do voo	10h	10h25	11h	11h40	12h24	12h50
Dado meteorológico	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	17	18	19	20	19	19
	Umidade relativa (%)	79	75	72	69	73	77
	Velocidade do vento (Km/h)	10	10	10	8	8	10
	Direção do vento	Leste	Leste	Leste	Leste	Leste	Leste

em profundidade (referência horizontal) da copa, conforme Figura 1. Após o término da pulverização e a consequente secagem das gotas nos cartões hidrossensíveis, estes foram coletados, acondicionados em papel alumínio e devidamente etiquetados. Para a digitalização, imagens dos cartões foram captadas por câmera digital, com distância focal de 12 cm e enquadramento padronizado por suporte físico da câmera e dos cartões. O recorte das fotografias garantiu arquivos .png de trabalho com resolução fixa em 2.000 x 690 pixels. Os arquivos .png foram então submetidos a software de leitura de cartões, de acordo com Chaim et al. (2012), onde as variáveis de estudo foram levantadas: a) 'número de gotas'; b) 'número de diâmetros'; c) 'dispersão'; d) 'volume' (L ha^{-1}); e) 'densidade' (gotas cm^{-2}); f) 'cobertura' (%); g) D10% (μm); h) D50% (μm); e i) D90% (μm). Cada variável medida tem um objetivo na caracterização da pulverização: o 'número de gotas' refere-se ao número total encontrado em toda a superfície da amostra. O 'número de diâmetros' é a quantidade de classes de tamanhos de gotas que foram encontrados na amostra. Ou seja, o 'número de gotas' foca na quantidade total de gotas depositadas, independentemente do tamanho e o 'número de diâmetros' se refere à medição e análise dos tamanhos das gotas, permitindo entender a distribuição da pulverização.

A 'dispersão' representa a distribuição dos tamanhos das gotas dentro de uma amostra, indicando a uniformidade ou variabilidade das mesmas. O 'volume' indica quantos litros de calda atingiram

a amostra analisada. A 'densidade' (gotas cm^{-2}) informa quantas gotas atingiram uma área equivalente a um centímetro quadrado. A 'cobertura' (%) é o percentual da área do cartão coberto por gotas, indicando a eficácia da pulverização. D10%, D50% e D90%, em micrômetros (μm), representam os diâmetros abaixo dos quais respectivamente 10, 50 e 90% do volume total das gotas está contido, indicando a menor fração das gotas.

Foram utilizadas estatísticas descritivas e procedimentos de análise não paramétrica, como Kruskal-Wallis e o teste de Wilcoxon, através de *scripts* em R, empregando os pacotes *tidyverse* (Wickham et al. 2019), *multcompView* (Graves et al., 2024), *rstatix* (Kassambara, 2023), *ggplot2* (Wickham, 2016) (complementados por *egg* [(Auguie, 2025) e *ggpubr* (Kassambara, 2025)] e *fmsb* (Nakazawa, 2019), para representações no formato radar. Ainda que tenham sido conduzidas análises paramétricas, como análise de variância (Anova) e teste de Tukey, estas foram aplicadas apenas para variáveis cuja distribuição dos dados se encaixava na normalidade, conforme verificado pelo teste de Shapiro-Wilk. No entanto, uma vez que grande parte dos dados nas variáveis analisadas não apresentou normalidade e considerando que as conclusões oriundas dos testes de desvio mínimo significativo não se diferenciaram daquelas derivadas dos procedimentos não paramétricos, optou-se, ao final, pela utilização de métodos não paramétricos. Todos os testes foram conduzidos a 5% de nível de significância. As condições meteorológicas no dia de ensaio



Fotos: Lillian Espindola Müller

Figura 1. Cartões hidrossensíveis afixados em copas de videiras conduzidas em: espaladeira ('Cabernet Sauvignon') (A) e latada ('Niágara Rosada') (B), conforme Cavalcanti e Muller (2023). A unidade experimental (parcela) foi definida como sendo uma planta individual com um cartão inteiro (26 x 76 mm) afixado em um ponto médio do dossel vegetativo, tanto em altura (referência vertical) quanto em profundidade (referência horizontal) da copa. Em três linhas de vinhedo foram distribuídas seis parcelas por orientação (norte, sul, leste, oeste), ou seja, seis repetições para cada orientação.

foram observadas de acordo com o Manual de Tecnologia de Aplicação de Produtos Fitossanitários ((Associação Nacional de Defesa Vegetal, 2004).

Resultados e discussão

O presente trabalho aplicou um método para medir a qualidade de deposição de gotas em seis pulverizações feitas por drone classe II com duplo rotor coaxial e atomizador duplo de disco centrífugo, comparando-as entre si. Essas passagens foram feitas em espaladeira, mas um teste foi conduzido em latada; dois sistemas de condução, portanto. Após o levantamento dos dados, foi verificado que os desempenhos de cada tipo de passagem foram relativamente próximos, no entanto com particularidades tais que foram capazes de produzir diferenças significativas em diferentes passagens comparadas duas a duas (mediante testes de Wilcoxon, $P < 0,05$), para as diferentes variáveis de estudo levantadas (Figura 2). De fato, indicadores dessas diferenças foram demonstrados por respostas em variáveis de medição extraídas de leituras de cartões hidrossensíveis, obedecendo ao método estabelecido. As variáveis, bem como inferências de testes não paramétricos, estão apresentadas na Figura 2. Como esperado, as três passagens do drone em taxa de 40 L ha^{-1} ('3x40Lesp') produziram os indicadores mais consistentes em

termos de qualidade de pulverização, como 'densidade' (Figura 2A), 'NDiâmetros' (Figura 2B), 'volume' (Figura 2D) e 'cobertura' (%) (Figura 2E), embora pouco abaixo das metas de qualidade de controle de doença. Com relação ao diâmetro mediano volumétrico 'VMD' (D50%), a passagem '3x40Lesp' não diferiu da aplicação com 90 L ha^{-1} ('90Lesp', $P = 0,40$), sendo ambos os tratamentos aplicados no sistema de condução de espaladeira (Figura 2F). Esses dois tratamentos foram considerados as abordagens em força máxima para o equipamento testado. As três passagens em 40 L ha^{-1} produziram um sensível mas significativo aumento na 'dispersão' (Figura 2C). O único teste feito em sistema 'latada' (40Llat) gerou padrões de leitura de cartões significativamente ($P < 0,05$) similares à passagem 20Lesp e abaixo das passagens feitas em taxas acima de 40 L ha^{-1} , com níveis de qualidade de aplicação abaixo da meta eficaz para controle de doença (Chaim, 2009; Mangado et al., 2013). Considerando as observações feitas em Cavalcanti e Muller (2023) e as reduzidas leituras evidenciadas na passagem '40Llat' comparativamente às trazidas pelos testes feitos na espaladeira, o presente estudo acabou sendo direcionado para as passagens no vinhedo em sistema de condução em espaladeira ('Cabernet Sauvignon'). Pelas evidências observadas nas safras 2022/2023 e 2023/2024, fica postulado que estudos envolvendo aplicações com drones em sistemas latada devem ser conduzidos

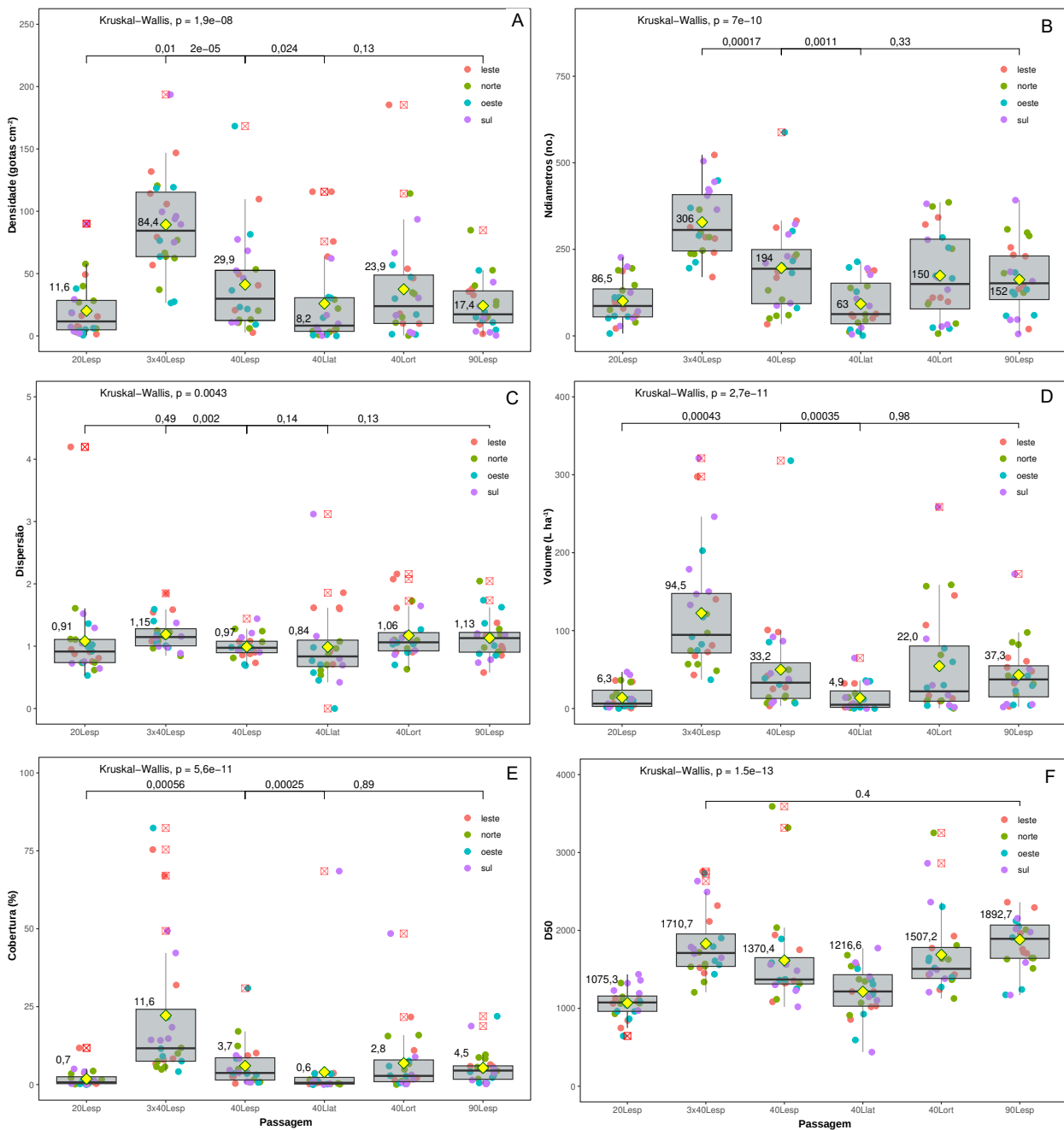


Figura 2. Boxplots com valores das medianas de variáveis descritoras de qualidade, em diferentes passagens do drone classe II feitas no dia 19/10/2023: (A) densidade de gotas (gotas/cm²); (B) número de diâmetros; (C) dispersão; (D) volume (L/ha), e) cobertura (%) e f) D50% (VMD, μm). Os tratamentos avaliados (passagens), na sequência do eixo "x" foram: 1) espaldeira ('20Lesp', 20L ha⁻¹); 2) três passagens em 40 L ha⁻¹ em espaldeira ('3x40Lesp'); 3) espaldeira ('40Lesp', 40L ha⁻¹); 4) latada ('40Lat', 40 L ha⁻¹); 5) passagem ortogonal de 40 L ha⁻¹ ('40Lort') e 6) espaldeira ('90Lesp', 90 L ha⁻¹). Exceto em (2) todos os tratamentos se basearam em apenas uma passagem. Pontos nos boxplots em diferentes cores referem-se a uma orientação da rosa dos ventos. Valores 'p' no ponto médio dos colchetes que marcam a comparação dois a dois foram obtidos pelo teste de Wilcoxon a 5% de significância. Valor 'p' de Kruskal-Wallis indica diferença entre tratamentos, a 5% de significância. Losango amarelo indica o valor da média. Valores aberrantes (*outliers*) estão marcados por uma caixa vermelha.

de modo independente a testes feitos para vinhedos em espaldeira. No entanto, foi preferível utilizar os dados da passagem em latada no presente trabalho como base de informação referencial para futuros trabalhos.

A realização dos voos com a RPA seguiram as diretrizes regulamentares previstas no RBAC-E nº 94 (Agência Nacional de Aviação Civil, 2023), executando-se a solicitação de uso do espaço aéreo brasileiro ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (Decea) da Agência Nacional da Aviação Civil (Anac). Este regulamento especifica os padrões e as regras para o uso de aeronaves remotamente pilotadas no Brasil. Para garantir a segurança e eficácia da aplicação, além de seguir o plano de voo, manter a visibilidade direta e ajustar parâmetros como a largura da faixa de aplicação, a altura e a velocidade de voo, foram observadas outras precauções essenciais, tais como: a) respeitar a velocidade do vento adequada (3 a 10 km/h); b) operar em temperaturas inferiores a 30 °C; e c) aplicar com umidade relativa do ar entre 55 e 85%, conforme recomendado pela Associação Nacional de Defesa Vegetal (Andef) (Associação Nacional de Defesa Vegetal, 2004) e por Giles e Billing (2015).

Em avaliação, os resultados da pulverização executada pelo drone de classe II mostraram-se, como os de classe III, inferiores aos obtidos pelo sistema tratorizado, de acordo com as medições feitas por Cavalcanti e Muller (2023). Adicionalmente,

da mesma forma que no trabalho citado, foram observados vários cartões não marcados e/ou excessivamente manchados, produzindo população heterogênea de cartões. Isso se refletiu na ocorrência de valores aberrantes (*outliers*) em todas as variáveis de estudo (Figuras 2 e 3). No entanto, diferentemente do que foi visto para aplicações com drones classe III, o equipamento classe II conseguiu aproximar os valores de deposição de gotas dos padrões ideais para uma efetiva prevenção de doenças (Figura 4) (Mangado et al., 2013). Ao operar com a capacidade de carga (90 L ha⁻¹), o Vant exibiu uma ligeira melhoria em seu desempenho nas variáveis analisadas, ainda que permanecesse aquém do nível necessário para combater doenças e sem apresentar diferenças significativas ($P < 0,05$) da passagem '40Lesp', exceto na variável 'Diâmetro Mediano Volumétrico' (VMD ou D50%) (Figura 2). Em tecnologia de aplicação, especialmente quando falamos de pulverização, é crucial entender o tamanho e a distribuição das gotas. Isso porque o tamanho da gota pode influenciar na eficiência da aplicação, na deriva (movimento não intencional de um pesticida para fora da área-alvo) e no destino final da calda no ambiente. O VMD é uma métrica que descreve o tamanho da gota de modo que 50% do volume total das gotas é composto por gotas menores e 50% por gotas maiores do que o VMD. Em outras palavras, é o diâmetro da gota (em μm) abaixo do qual 50% do volume de líquido é encontrado. Nesse sentido,

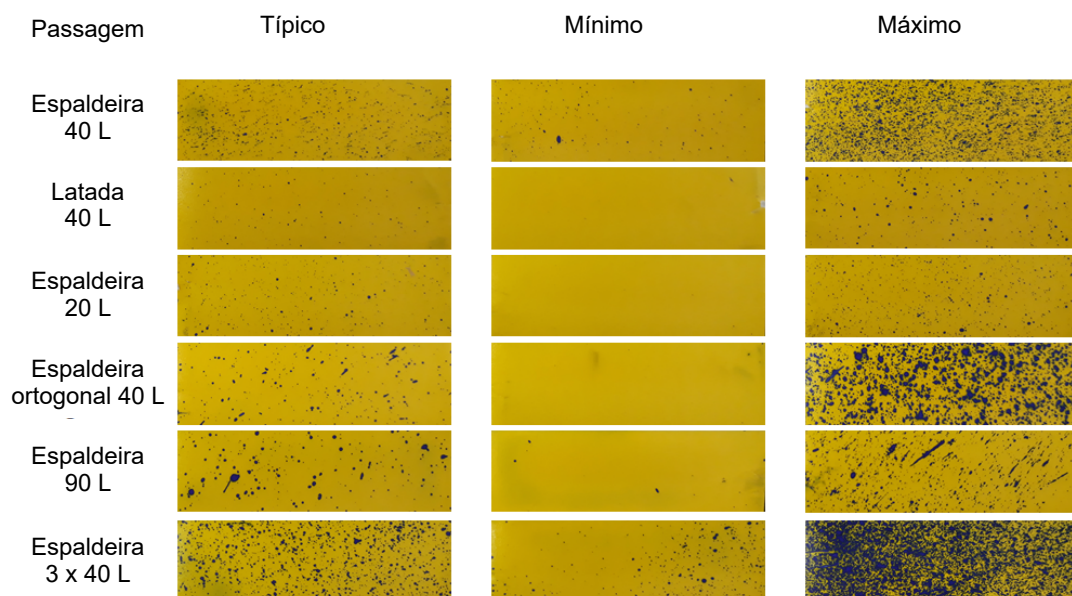


Figura 3. Aspecto visual dos estados típico, máximo e mínimo de exemplares de cartões hidrossensíveis usados nas diferentes passagens do drone classe II investigadas. Cartões típicos estão representados por um cartão que mostra um perfil típico de marcação de gotas compreendido entre o 1º e 3º quartis, sobre os dados de todas as variáveis medidas.

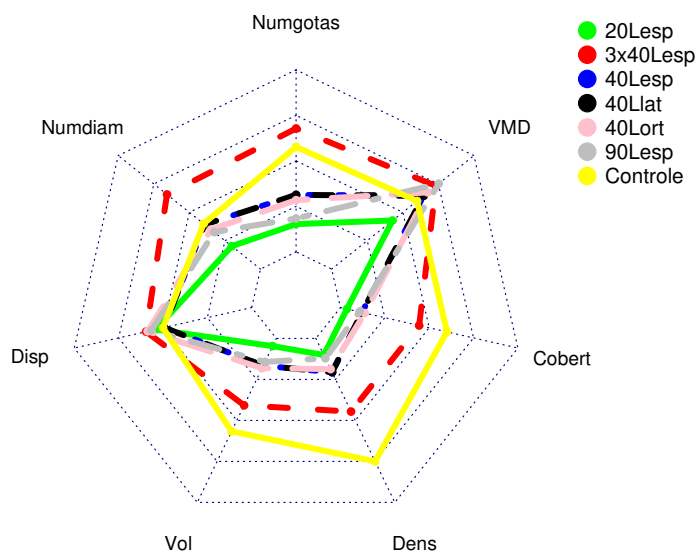


Figura 4. Perfis de variáveis descritoras da qualidade em pulverizações feitas por sobrevoos do drone classe II com duplo rotor coaxial e atomizador duplo de disco centrífugo. Os tratamentos testados foram: 1) espaladeira ('20Lesp', 20 L ha⁻¹); 2) três passagens de 40 L ha⁻¹ em espaladeira ('3x40Lesp'); 3) espaladeira ('40Lesp', 40 L ha⁻¹); 4) latada ('40Llat', 40 L ha⁻¹); 5) passagem ortogonal em 40 L ha⁻¹ ('40Lort'); e 5) espaladeira ('90Lesp', 90 L ha⁻¹). Traço amarelo indica a recomendação de maior eficiência na pulverização para o controle de doença (Chaim, 2009; Mangado et al., 2013).

o maior VMD visto em '90Lesp' quando comparada com '40Lesp' informa que a primeira aplicação produziu gotas de tamanho médio maior do que a da segunda, e que isso pode refletir em incremento na resistência à deriva. Convém lembrar que, em termos de VMD, apenas a passagem '3x40Lesp' se compara com '90Lesp', a despeito da primeira aplicação superar este e os demais tratamentos em todas as variáveis estudadas associadas à qualidade (Figura 2). Muito embora as passagens '40Lesp' e '90Lesp' demonstrem equivalência em termos estatísticos, manifestando um espaço para trabalhar com a taxa de 40 L ha⁻¹ de maneira consistente em drones classes II.

Com relação às orientações dos cartões (nos pontos cardeais norte, sul, leste e oeste) e apesar da distribuição não normal dos dados gerados pelas passagens únicas (em taxas de 20, 40 e 90 L ha⁻¹), a análise de Kruskal-Wallis ($p = 0,05$) não indicou variações relevantes na deposição das gotas conforme a orientação dos cartões, ou vieses de orientação nas aplicações. Isso pode refletir as condições ambientais favoráveis para pulverização aérea encontradas no dia e nos horários dos testes.

Considerando a passagem única em baixo volume ('20Lesp', 20 L ha⁻¹) experimentada na espaladeira, a aplicação retornou variáveis de qualidade significativamente reduzidas em comparação com as aplicações em taxas de 40 e 90 L ha⁻¹, exceto

na variável 'dispersão' ('fator de dispersão', Fd) (Figura 2C). O Fd oferece informações das dispersões dos tamanhos das gotas dentro de uma amostra. A dispersão relativa mede o quão diferentes são as dimensões de gotas de uma determinada pulverização. O Fd é também conhecido em algumas literaturas como "coeficiente de variação" ou "uniformidade de aplicação" e ajuda a quantificar a homogeneidade com que as gotas são distribuídas sobre uma área-alvo. Valores maiores podem indicar aplicações desiguais de calda, muitas vezes ineficazes para controle de doenças (Chaim, 2009). A eficiência da pulverização e a quantidade de deriva associada são influenciadas por diversos fatores, incluindo a técnica de poda, a disposição da copa e a configuração geométrica do pomar (Duga et al., 2015; Pascuzzi, 2016). Isso reforça o postulado de que investigações em latada devam ser conduzidas em paralelo e separadamente das realizadas em espaladeira. O dossel vegetativo tem um papel significativo na quantidade de deriva gerada durante a aplicação. Assim, é importante conduzir ensaios específicos para avaliar como diferentes culturas, métodos de condução e fases de crescimento da planta impactam a deriva durante a pulverização (Grella et al., 2017). As aplicações realizadas no presente estudo foram conduzidas com a copa das plantas em estágio fenológico após o início do florescimento, com menos de 25% das flores abertas,

diferentemente das parcelas usadas em Cavalcanti e Muller (2023) com a copa em final de safra, e esse fator deve ser levado em consideração.

Repetindo uma abordagem feita por Biglia et al. (2022), uma das passagens únicas foi realizada sobre as parcelas marcadas em direção ortogonal (perpendicular) às linhas do vinhedo espaldeira. A passagem foi efetuada utilizando uma taxa de aplicação de 40 L ha⁻¹ ('40Lort'). Enquanto que Biglia et al. (2022) verificaram respostas marcadamente baixas na deposição de gotas nas copas dos vinhedos em teste (espaldeiras cultivar Barbera) com alta deriva para o solo, no presente estudo foi verificada uma equivalência entre os tratamentos '40Lort' e '40Lesp', cuja passagem seguia a direção das fileiras. No caso, em variável alguma foram observadas diferenças estatísticas ($P > 0,05$) entre as passagens em linha e ortogonal (Figura 2). Visualmente, o padrão de gotas da deposição '40Lort' aparenta ser de 'grossa' a 'muito grossa' (Figura 3). Isso é corroborado pelas leituras de comparação entre as variáveis observadas na passagem em linha e ortogonal; valores maiores (embora sem apresentar diferença significativa) para 'no. de gotas', 'cobertura' e 'densidade' em '40Lesp', em linha, enquanto que um maior valor de VMD para '40Lort' (Figura 2F).

A investigação sobre a aplicação aérea de drones na vitivinicultura é uma área emergente, com resultados progressivamente disponíveis para profissionais e o setor produtivo. No estudo de Delpuelch et al. (2022), a capacidade dos drones/Vants para monitorar e combater doenças em vinhedos foi explorada. A pesquisa destacou a capacidade dos sistemas de pulverização com drones de aplicar fungicidas e outros agentes de maneira precisa, buscando reduzir a incidência de doenças nas vinhas e diminuir os impactos ambientais. Biglia et al. (2022) examinaram a eficácia de dois métodos de pulverização aérea utilizando um drone de seis rotores para o controle de doenças em vinhedos. Como acima comentado, eles observaram deposições bem maiores em faixa, paralelas às linhas de plantas, utilizando pontas de pulverização de cone vazio, do que em pulverizações ortogonais às linhas. A pesquisa revelou ainda que as pontas convencionais foram mais eficazes em aumentar a deposição no dossel do que as pontas com indução de ar e que velocidades mais altas de voo podem potencializar a deposição no dossel. No entanto, os pesquisadores também observaram que a taxa de aplicação de pouco mais de 50 L ha⁻¹ empregada nos testes foi abaixo da ideal, pois não proporcionou a deposição adequada, considerando a 'densidade' (nº de gotas por centímetro quadrado), já que a grande maioria dos cartões hidrossensíveis indicou deposições

inferiores ao ideal. Esses resultados estão aderentes aos encontrados por Cavalcanti e Muller (2023) testando drones de pulverização classe III.

Em relação a produtos destinados ao combate de pragas e doenças da videira, observa-se uma ampla variação nas recomendações de dosagens entre diferentes países e regiões (Ruegg et al., 2001; Cavalcanti, 2023). Dada essa variedade, a urgência de estabelecer uma estratégia unificada no setor de proteção agrícola é evidente. Como ressaltado por Siegfried et al. (2007), a qualidade da deposição dos produtos pulverizados é essencial para um controle efetivo de pragas e patógenos. A água, nesse contexto, funciona primariamente como um veículo para transportar os agrotóxicos até as folhas. Por isso, é crucial determinar com precisão a quantidade de ingrediente ativo necessária, levando em consideração a área foliar.

Conclusões

Recomenda-se que:

- 1) Métodos de aplicação de caldas por drones de pulverização em vinhedos sejam desenvolvidos de modo específico, em função do sistema de condução adotado.
- 2) Drones de pulverização classe II com duplo rotor coaxial e atomizador duplo de disco centrífugo possam ser usados para controle de doenças de dossel (míldio, oídio) em vinhedos 'espaldeira', desde que se admita um número de pelo menos três passagens paralelas às linhas, em taxa de aplicação mínima de 40 L ha⁻¹ e considerando as configurações presentes neste estudo.

Referências

ABD KHARIM, M. N.; WAYAYOK, A.; SHARIFF, A. R. M.; ABDULLAH, A. F.; HUSIN, E. M. Droplet deposition density of organic liquid fertilizer at low altitude UAV aerials-praying in ricecultivation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 167, n. 105045, Dec. 2019. DOI: 10.1016/j.compag.2019.105045.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL.

Regulamento Brasileiro da Aviação Civil – RBAC-E nº 94 – Emenda nº 03. Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil. 03 abril 2023. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94>. Acesso em: 29 de julho de 2025.

ANKEN, T.; WALDBURGER, T. Working quality, drift potential and homologation of spraying drones in Switzerland. In: UMWELT, U.; GANDORFER, T. M.; et al.:

Digitalisierung für mensch, Umwelt und Tier, Lecture Notes in Informatics (LNI). Bonn, Alemanha: Gesellschaft für Informatik, Bonn, 2020.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA VEGETAL. **Manual de tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários**. Campinas: Línea Criativa, 2004. 52 p.

AUGUIE, B. **egg**: Extensions for 'ggplot2'. R package version 0.4.5. 2025. Disponível em: <https://github.com/baptiste/egg>. Acesso em: 15 ago. 2025.

BIGLIA, A.; GRELLA, M.; BLOISE, N.; COMBA, L.; MOZZANINI, E.; SOPEGNO, A.; PITTARELLO, M.; DICEMBRINI, E.; ALCATRÃO, L. E.; GUGLIERI, G.; BALSARI, P.; AIMONINO, D. R.; GAY, P. UAV-spray application in vineyards: flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposit, coverage and off-target losses. **Science of the Total Environment**, v. 845, n. 157292, p. 1-17, Nov. 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157292.

BRANDOLI, B.; SPADON, G.; ESAU, T.; HENNESSY, P.; CARVALHO, A. C. P. L.; AMER-YAHIA, S.; RODRIGUES-JR, J.F. DropLeaf: a precision farming smartphone tool for real-time quantification of pesticide application coverage. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 180, n. 105906, Jan. 2021. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105906.

CAVALCANTI, F. R. **Aproximações em Análise Multivariada para comparação de esquemas de controle de doenças entre vinhedos**. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, out. 2023. (Embrapa Uva e Vinho. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 24). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1157819/1/BolPesqDes-24-o.pdf>. Acesso em: 19 set. 2024.

CAVALCANTI, F. R.; MULLER, L.S. **Caracterização da pulverização por drone classe III com ponta 110-015 em dois sistemas de condução de videira**. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, set. 2023. (Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica 165). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1156770>. Acesso em: 19 set. 2024.

CHAIM, A. **Manual de tecnologia de aplicação de agrotóxicos**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. 73 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/663946>. Acesso em: 19 set. 2024.

CHAIM, A.; NETO, J. C.; GATTAZ, N. C.; VISOLI, M. C. **Programa de Calibração de Pulverização - Gotas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária. 2012. Disponível em: <http://www.cnpma.embrapa.br/forms/gotas.php>. Acesso em: 15 out. 2024.

CHEN, H.; LAN, Y.; FRITZ, B. K.; CLINT HOFFMANN, W.; LIU, S. Review of agricultural spraying technologies

for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 14, n. 1, p. 38-49, 2021. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211401.5714.

DELPUELCH, X.; GORIOUX, H.; POUXVIEL, G. Quality assessment of drone spraying in steeply sloping vineyards. **IVES Technical Reviews: vine & wine**, 24 Feb. 2022. DOI: 10.20870/IVES-TR.2022.5402.

DUGA, A.T.; RUYSEN, K.; DEKEYSER, D.; NUYTENS, D.; BYLEMANS, D.; NICOLAI, B.M.; VERBOVEN, P. Spray deposition profiles in pome fruit trees: effects of sprayer design, training system and tree canopy characteristics. **Crop Protection**, v. 67, p. 200-213, Jan. 2015. DOI: 10.1016/j.cropro.2014.10.016.

GILES, D.; BILLING, R. Deployment and performance of a UAV for crop spraying. **Chemical Engineering Transactions**, v. 44, p. 307-312, 2015. DOI: 10.3303/CET1544052.

GRAVES, S.; PIEPHO, H. P.; SELZER, L.; DORAI RAJ, S. **multcompView**: Visualizations of Paired Comparisons. R package version. 0.1 10. Luciano Selzer, Ago. 2024. DOI: 10.32614/CRAN.package.multcompView.

GRELLA, M.; GALLART, M.; MARUCCO, P.; BALSARI, P.; GIL, E. Ground deposition and airborne spray drift assessment in vineyard and orchard: the influence of environmental variables and sprayer settings. **Sustainability**, v. 9, n. 5, e728, 2017. DOI: 10.3390/su9050728.

HE, X.; BONDS, J.; HERBST, A.; LANGENAKENS, J. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 10, n. 3, p. 18-30, 2017. DOI: 10.3965/j.ijabe.20171003.3248.

HERBST, A.; BONDS, J.; WANG, Z.; ZENG, A.; HE, X.; GOFF, P. The influence of unmanned agricultural aircraft system design on spray drift. **Journal für Kulturpflanzen**, v. 72, n. 1, p. 1-11, 2020. DOI: 10.5073/JfK.2020.01.01.

KASSAMBARA, A. **ggpubr**: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots. R package version 0.6.1. 2025. Disponível em: <https://rpkgs.datanovia.com/ggpubr/>. Acesso em: 15 ago. 2025.

KASSAMBARA, A. **rstatix**: Pipe Friendly Framework for Basic Statistical Tests. R package version 0.7.2. 2023. Disponível em: <https://rpkgs.datanovia.com/rstatix/>. Acesso em: 15 ago. 2025.

LOU, Z.; XIN, F.; HAN, X.; LAN, Y.; DUAN, T.; FU, W. Effect of unmanned aerial vehicle Flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites. **Agronomy**, v. 8, n. 9, e-187, Sept. 2018. DOI: 10.3390/agronomy8090187.

MANGADO, J.; ARAZURI, S.; ARNAL, P.; JARÉN, C.; LÓPEZ, A. Measuring the accuracy of a pesticide treatment by an image analyzer. **Procedia Technology**, v. 8, p. 498–502. 2013. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.11.066.

MATESE, A.; DI GENNARO, S. F.; BERTON, A. Assessment of a canopy height model (CHM) in a vineyard using UAV-based multispectral imaging. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8-10, p. 2150-2160, Sept. 2016. DOI: 10.1080/01431161.2016.1226002.

MATTHEWS, G.; BATEMAN, R.; MILLER, P. **Pesticide application methods**. 4th ed. Wiley, 2016.

NAKAZAWA, M. **fmsb**: Functions for Medical Statistics Book with some Demographic Data. R package version 0.7.6. Jan. 2019. DOI: 10.32614/CRAN.package.fmsb.

PASCUZZI, S. Outcomes on the spray profiles produced by the feasible adjustments of commonly used sprayers in “Tendone” vineyards of Apulia (Southern Italy). **Sustainability**, v. 8, n. 12, p. 1307, Dec. 2016. DOI: 10.3390/su8121307.

REYNOLDS, A. **Managing Wine Quality**. Volume 1: Viticulture and wine quality, 2nd ed. Elsevier, Nov. 2021. 1280p. eBook ISBN: 9780081020685.

RUEGG, J.; SIEGFRIED, W.; RAISIGL, U.; VIRET, O.; STEFFEK, R.; REISENZEIN, H.; PERSEN, U. Registration of plant protection products in EPPO countries: Current status and possible approaches to harmonization. **EPPO Bulletin**, v. 31, n. 2, p. 143–152, 2001. DOI: 10.1111/j.1365-2338.2001.tb00983.x

SANCHAVAT, H. B.; CHAUDHARY, H. S.; BHAUTIK, G.; SINGH, S. N. Field evaluation of a tractor mounted boom sprayer. **Agricultural Engineering Today**, v. 41, n. 4, p. 67-71, Oct./Dec. 2017.

SIEGFRIED, W.; VIRET, O.; HUBER, B.; WOHLHAUSER, R. Dosage of plant protection products adapted to leaf area index in viticulture. **Crop Protection**, v. 26, p. n. 2, p. 73–82, 2007. DOI:10.1016/j.cropro.2006.04.002.

SOUZA, F. G.; PORTES, M. F.; SILVA, M. V.; TEIXEIRA, M. M.; FURTADO JÚNIOR, M. R. Impact of sprayer drone flight height on droplet spectrum in mountainous coffee plantation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 12, p. 901-906, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n12p901-906>.

ZARCO-TEJADA, P. J.; CAMINO, C.; BECK, P. S. A.; CALDERON, R.; HORNERO, A.; HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R.; KATTENBORN, T.; MONTES-BORREGO, M.; SUSCA, L.; MORELLI, M.; GONZALEZ-DUGO, V.; NORTH, P. R. J.; LANDA, B. B.; BOSCIA, D.; SAPONARI, M.; NAVAS-CORTES, J. A. Previsual symptoms of *Xylella fastidiosa* infection revealed in spectral plant-trait alterations. **Nature Plants (Letters)**, v. 4, p. 432-439, June 2018. DOI:10.1038/s41477-018-0189-7, 2018.

WICKHAM, H. **ggplot2**: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer Verlag, 2016.

WICKHAM, H.; AVERICK, M.; BRYAN, J.; CHANG, W.; MCGOWAN, L. D.; FRANÇOIS, R.; GROLEMUND, G.; HAYES, A.; HENRY, L.; HESTER, J.; KUHN, M.; PEDERSEN, T. L.; MILLER, E.; BACHE, S. M.; MÜLLER, K.; OOMS, J.; ROBINSON, D.; SEIDEL, D. P.; SPINU, V.; TAKAHASHI, K.; VAUGHAN, D.; WILKE, C.; WOO, K.; YUTANI, H. Welcome to the tidyverse. **Journal of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, Nov. 2019. DOI:10.21105/joss.01686.