

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Análise do desempenho operacional de ponta de pulverização de jato
cônico vazio sob diferentes pressões e fluxo de ar lateral em laboratório**

Renan Henrique Ferreira

**Trabalho de conclusão de curso apresentado como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo**

**Piracicaba
Ano 2025**

Renan Henrique Ferreira

**Análise do desempenho operacional de ponta de pulverização de jato cônico vazio
sob diferentes pressões e fluxo de ar lateral em laboratório**

Orientador(a):
Prof. Dr. CASIMIRO DIAS GADANHA JUNIOR

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte
dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo

**Piracicaba
Ano 2025**

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos acadêmicos Matheus Ogusuku Regiani e Mateus Schmidt Rafael, integrantes do GEPTA - Grupo de Extensão e Pesquisa em Tecnologia de Aplicação, pelo apoio técnico e auxílio nas etapas experimentais, e agradeço ao Prof. Dr. Casimiro Dias Gadanha Junior, coordenador do grupo, pela orientação e contribuições científicas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos colaboradores e técnicos do departamento de Eng. de Biosistemas, agradeço pelo suporte na infraestrutura e na parte eletrônica utilizada na obtenção dos dados experimentais.

À BASF S.A. – Unidade de Santo Antônio de Posse (SP), agradeço pelo apoio institucional, em especial aos colaboradores Adriano Vilames da Silva e Gabriela Pelegrini, pelo suporte técnico prestado.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1.	Objetivos gerais	14
1.2.	Objetivos específicos	14
2.	REVISÃO.....	15
2.1.	Tipos de bicos hidráulicos cônicos e princípios de atomização	15
2.2.	Comportamento do espectro de gotas e efeitos da pressão.....	15
2.3.	Padrões de distribuição transversal e estabilidade operacional	16
2.4.	Influência do vento e caracterização da deriva	17
2.5.	Métodos de caracterização do espectro de gotas	18
2.6.	Aplicações tecnológicas e estratégias de mitigação.....	18
3.	METODOLOGIA.....	19
3.1.	Caracterização da infraestrutura	20
3.2.	Caracterização das pontas	26
3.3.	Teste de vazão.....	27
3.4.	Perfil individual	28
3.5.	Sobreposição em mesa.....	32
3.6.	Avaliação do espectro de gotas.....	33
3.7.	Análise estatística.....	35
4.	RESULTADOS	36
4.1.	Teste de Vazão	36
4.2.	Espectro de Gotas	37
4.3.	Perfil Individual	38
4.4.	Perfil de Barra	45
	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS.....	55
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	62

RESUMO

A eficiência da aplicação de produtos fitossanitários é determinante para o sucesso da produção agrícola, dependendo diretamente da qualidade da pulverização e da mitigação de perdas, como a deriva. A uniformidade de distribuição e o espectro de gotas são parâmetros críticos influenciados pelo design das pontas, pela pressão de trabalho e pelas condições meteorológicas, especialmente o vento lateral. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de pontas de pulverização hidráulicas de jato cônico (modelo CVE 9002 com tecnologia de indução), submetidas a diferentes condições operacionais e ambientais. A metodologia compreendeu ensaios realizados em laboratório utilizando um túnel de vento montado sobre uma mesa de distribuição volumétrica transversal e um analisador de partículas por difração a laser. Foram avaliadas três pressões de trabalho (300, 500 e 700 kPa) combinadas com seis velocidades de fluxo de ar (0; 0,92; 1,48; 2,05; 2,50 e 3,13 m s⁻¹). Os parâmetros analisados foram a vazão, o espectro de gotas (Diâmetro Mediano Volumétrico - DMV, amplitude relativa e porcentagem de gotas finas), a uniformidade de distribuição transversal (perfil individual e em barra) e indicadores de deriva e deslocamento do padrão de pulverização (SPD). Os resultados da análise do espectro de gotas confirmaram a relação inversa entre pressão e tamanho de gotas, onde o aumento da pressão para 700 kPa resultou na produção de gotas nas classes fina e muito fina, elevando significativamente a porcentagem do volume suscetível à deriva (gotas menores que 100 µm). Em relação à distribuição volumétrica, observou-se que o vento lateral provoca distorções severas no perfil individual, transformando o padrão simétrico característico em perfis com picos de deposição e caudas alongadas. Na configuração de barra, os coeficientes de variação (CV) obtidos na faixa útil foram superiores aos limites recomendados de qualidade, indicando baixa uniformidade e a formação de zonas de irregularidade na dosagem. Além disso, quantificou-se um aumento progressivo da deriva e do deslocamento do perfil com o incremento da velocidade do vento. A pressão de 300 kPa apresentou menor porcentagem de deriva, atribuída ao maior diâmetro das gotas, embora tenha sofrido maior deslocamento do centro de massa do perfil devido à menor energia cinética. Conclui-se que a utilização dessas pontas exige rigoroso monitoramento das condições climáticas e ajuste de pressão para garantir a eficácia da aplicação e reduzir riscos ambientais.

Palavras-chave: Bico hidráulico; espectro de gotas; túnel de vento.

ABSTRACT

The efficiency of pesticide application is crucial for the success of agricultural production, directly depending on the quality of spraying and the mitigation of losses, such as drift. Uniformity of distribution and droplet spectrum are critical parameters influenced by nozzle design, working pressure, and meteorological conditions, especially crosswinds. In this context, this work aimed to evaluate the performance of hydraulic cone jet spray nozzles (model CVE 9002 with induction technology) subjected to different operational and environmental conditions. The methodology comprised laboratory tests using a wind tunnel mounted on a transverse volumetric distribution table and a laser diffraction particle analyzer. Three working pressures (300, 500, and 700 kPa) combined with six airflow velocities (0, 0.92, 1.48, 2.05, 2.50, and 3.13 m s⁻¹) were evaluated. The parameters analyzed were flow rate, droplet spectrum (Volume Median Diameter - VMD, relative amplitude, and percentage of fine droplets), transverse distribution uniformity (individual and boom profile), and drift and spray pattern displacement (SPD) indicators. The droplet spectrum analysis results confirmed the inverse relationship between pressure and droplet size, where increasing the pressure to 700 kPa resulted in the production of droplets in the fine and very fine classes, significantly increasing the percentage of the volume susceptible to drift (droplets smaller than 100 µm). Regarding volumetric distribution, it was observed that lateral wind causes severe distortions in the individual profile, transforming the characteristic symmetrical pattern into profiles with deposition peaks and elongated tails. In the boom configuration, the coefficients of variation (CV) obtained in the useful range were higher than the recommended quality limits, indicating low uniformity and the formation of zones of irregularity in the dosage. Furthermore, a progressive increase in drift and profile displacement was quantified with increasing wind speed. The 300 kPa pressure showed the lowest percentage of drift, attributed to the larger droplet diameter, although it suffered greater displacement of the profile's center of mass due to lower kinetic energy. It is concluded that the use of these nozzles requires rigorous monitoring of weather conditions and pressure adjustment to ensure application effectiveness and reduce environmental risks.

Keywords: Hydraulic nozzle; droplet spectrum; wind tunnel.

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1.1. Vazão nominal, vazão real e desvio de vazão para as pontas estudadas em cada pressão	36
Tabela 4.2.1. Diâmetro mediano volumétrico DMV, em μm , amplitude relativa (AR), e porcentagem do volume pulverizado menor que 100 ($\%V < 100 \mu\text{m}$) e 150 micros ($\%V < 150 \mu\text{m}$).	37
Tabela 4.2.2. Porcentagem do volume pulverizado nas classes de tamanho de gota extremamente fina ($V < 60 \mu\text{m}$), muito fina ($60 < V < 106 \mu\text{m}$), fina ($106 < V < 236 \mu\text{m}$) e média ($236 < V < 341 \mu\text{m}$).	38
Tabela 4.3.1. Vazão coletada, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$, desvio de vazão, em %, ângulo, em $^{\circ}$, e coeficiente de variação, em %, para cada pressão e velocidade do fluxo de ar para os perfis individuais.	39
Tabela 4.4.1 Vazão coletada, em $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$, desvio de vazão, em %, coeficiente de variação (CV) na faixa total e útil, em %.	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Lutron Electronic, Vane Anemometer AH-4223.	19
Figura 3.2. Minipa Do Brasil Ltda, Relógio Termo-Higrômetro Digital MT-242A.	19
Figura 3.1.1. Túnel de vento (1) montado acima de uma mesa de distribuição volumétrica transversal (2).	20
Figura 3.1.2. Saída do túnel de vento.....	21
Figura 3.1.3. Vista traseira da estrutura de suporte, do ventilador, inversor de frequência (1), motor (2) e polia de transmissão (3).....	21
Figura 3.1.4. Detalhe das provetas graduadas e numeradas.	22
Figura 3.1.5. Vista lateral da mesa com suas alavancas (1 - Para o controle das provetas; 2 - Para o direcionamento do fluxo de água) e a bomba de retorno (3) à esquerda e seu reservatório secundário à direita.....	22
Figura 3.1.6. Conjunto tanque principal (1), motor elétrico (2), bomba de êmbolo (3) e comando hidráulico (4), à esquerda, e detalhe do comando hidráulico à direita.	23
Figura 3.1.7. Esquema do sistema hidráulico utilizado, onde as setas indicam o fluxo da água e as linhas conexões.....	23
Figura 3.1.8. Caixa do Arduino.	24
Figura 3.1.9. Transdutor de pressão (A) e manômetro (B).....	24
Figura 3.1.10. Esquema do sistema de aquisição de dados da pressão.....	25
Figura 3.1.11 Barra de pulverização de 0,25 m entre porta-bicos. A posição onde o transdutor de pressão é instalado está indicado pela seta vermelha.	25
Figura 3.1.12. Porta-bico.	25
Figura 3.2.1. Ponta de pulverização CVE 9002, com a exposição de seus componentes internos, capa (1), câmara de turbilhonamento (2), disco (3) e difusor (4).....	26
Figura 3.2.2. Corte da ponta para visualização do difusor.....	26
Figura 3.2.3. Outros componentes utilizados para a montagem dos bicos de pulverização. Onde: A - Filtros com malha de 50 mesh; B - Anéis de vedação;	27
Figura 3.3.1. Béquer (esquerda), balança (centro) e cronômetro digital (direita).	27

Figura 3.3.2. Etapas para o teste de vazão. a - As cinco pontas abertas dispostas na barra; b, c, d, e, f - Béqueres sendo adicionados sequencialmente a cada dez segundos; g - Retirada do primeiro béquere ao completar um minuto de coleta; h - Pesagem do béquere com a água coletada.....	28
Figura 3.4.1. Nível e prumo utilizados.	29
Figura 3.4.2. Utilização do nível (1) e do prumo (2). A seta indica a canaleta central.	29
Figura 3.4.3. Coleta de perfil individual.	30
Figura 3.5.1. Configurações padrão dos espaçamentos utilizados.....	32
Figura 3.5.2. Definição da largura útil para o perfil de distribuição em configurações de barra	33
Figura 3.6.1. Equipamento Malvern Panalytical, modelo Spraytec	34
Figura 4.3.1 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a pressão de 300 kPa para diferentes velocidades de vento.....	40
Figura 4.3.2 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a pressão de 500 kPa para diferentes velocidades de vento.....	40
Figura 4.3.3 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a pressão de 700 kPa para diferentes velocidades de vento.....	40
Figura 4.3.4 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 0 m/s para as diferentes pressões.....	41
Figura 4.3.5 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 0,92 m/s para as diferentes pressões.....	41
Figura 4.3.6 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 1,48 m/s para as diferentes pressões.....	42
Figura 4.3.7 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 2,05 m/s para as diferentes pressões.....	42
Figura 4.3.8 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 2,50 m/s para as diferentes pressões.....	42
Figura 4.3.9 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 3,13 m/s para as diferentes pressões.....	43

Figura 4.3.10. Índice de deriva, em cm, em relação a velocidade do vento, em m s^{-1} , para cada pressão.	43
Figura 4.3.11. Deriva, em %, em relação a velocidade do vento, em m s^{-1} , para cada pressão.	44
Figura 4.4.1. Coeficiente de variação (CV), em %, em relação a velocidade do fluxo de ar para cada pressão.	46
Figura 4.4.2 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada velocidade do vento, para a pressão de 300 kPa.	47
Figura 4.4.3 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada velocidade do vento, para a pressão de 500 kPa.	48
Figura 4.4.4 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada velocidade do vento, para a pressão de 700 kPa.	48
Figura 4.4.5 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada pressão, para a velocidade do fluxo de ar de 0 m s^{-1}	49
Figura 4.4.6 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada pressão, para a velocidade do fluxo de ar de $0,9 \text{ m s}^{-1}$	49
Figura 4.4.7 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada pressão, para a velocidade do fluxo de ar de $1,5 \text{ m s}^{-1}$	49
Figura 4.4.8 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada pressão, para a velocidade do fluxo de ar de $2,1 \text{ m s}^{-1}$	50
Figura 4.4.9. Deriva, em %, em relação a velocidade do fluxo de ar para cada pressão.	50
Figura 4.4.10. <i>Spray Pattern Displacement</i> (SPD), em cm, em relação a velocidade do fluxo de ar para cada pressão.	51
Figura 4.4.11. Índice de deriva, em cm, em relação a velocidade do fluxo de ar para cada pressão.	52

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de produtos fitossanitários constitui etapa fundamental na produção agrícola, pois a sua eficácia do controle de pragas, doenças e plantas daninhas depende diretamente da uniformidade de distribuição da pulverização e da qualidade do produto. A eficiência dessa operação é influenciada por diversos fatores, entre eles o tamanho das gotas, o tipo e o projeto das pontas, a pressão de trabalho, uniformidade de distribuição e condições atmosféricas de umidade, temperatura e vento. Países, como a Suíça, já exigem, por exemplo, que drones agrícolas sejam submetidos a avaliações de distribuição transversal de pulverização (Anken, 2024), e sistemas de certificação como a ISO 16122-2 (2024) requerem coeficiente de variação inferior a 10% em pulverizações de campo, destacando a importância da uniformidade como critério de qualidade.

Cunha et al. (2004) demonstraram que gotas de menor diâmetro apresentam velocidade de queda reduzida e percorrem maiores distâncias horizontais, aumentando sua exposição às condições atmosféricas e, portanto, sua suscetibilidade à deriva. Essa vulnerabilidade é particularmente relevante porque a deriva representa uma das principais causas de perdas na pulverização, ocasionando redução da eficácia dos produtos, impactos ambientais e potenciais riscos à saúde humana (Hassen et al., 2004; Contiero et al., 2016; Cerruto, 2017). Além disso, gotas pequenas são mais propensas ao arraste e à evaporação, fenômeno que se intensifica à medida que o diâmetro das gotas diminui (Kincaid e Longley, 1989; Lorenzini, 2004). Nesse contexto, gotas menores que 150 ou 100 μm são amplamente reconhecidas como altamente deriváveis (Cunha et al., 2004), e a literatura destaca a relação direta entre o tamanho da gota e sua sensibilidade às condições atmosféricas.

A uniformidade de distribuição e o espectro de gotas são, portanto, elementos centrais para a eficiência da aplicação. Gotas menores podem apresentar vantagens específicas, como maior penetração em copas densas (Chen et al., 2020; Hu et al., 2021), mas também elevam o risco de deriva. Entre os sistemas de fragmentação de calda em gotas utilizados na agricultura, destacam-se pontas hidráulicas, sendo mais utilizadas, e pontas com jato em leque, o principal entre eles (Algaadi, 2010; Xia et al., 2017), porém dependendo do tipo de aplicação as pontas de jato cônicas se destaca, recomendados principalmente para aplicações de fungicidas e inseticidas (Juliatti et al., 2013; Sukumaran et al., 2013). Desde a década de 1970, o conceito de “tamanho ótimo biológico” destaca que gotas muito grandes ou muito pequenas são indesejáveis, pois comprometem a eficácia e aumentam perdas por escoamento ou deriva respectivamente (Uk, 1977). A uniformidade do tamanho das gotas depende de múltiplos

fatores, incluindo tensão superficial, ângulo de aspersão, altura, pressão e temperatura, os quais influenciam o processo de atomização e a formação da distribuição espacial (Roudini e Wozniak, 2019; Matthews, 2008; Feng et al., 2018; Womac et al., 2001).

Nesse contexto, a caracterização do espectro de gotas exige métodos padronizados capazes de quantificar com precisão a distribuição gerada por diferentes pontas e condições operacionais. Entre os principais métodos disponíveis, destacam-se a difração a laser (Barnett & Matthews, 1992), a sonda óptica (Butler Ellis & Bradley, 2002) e o PDPA (Farooq et al., 2001), sendo a difração a laser amplamente empregada devido à sua simplicidade e rapidez (Sijs et al., 2021).

A literatura registra ampla investigação sobre otimização de parâmetros de pulverização, combinando métodos experimentais, modelagem computacional e avaliações em laboratório e campo (Ma et al., 2021; Haoqi et al., 2021; Faqiri e Krishnan, 2005; Hassen, 2013; Broniarz-Press et al., 2016; Yao et al., 2020; Shrigondekar et al., 2020; Liu et al., 2019; EMMA et al., 2019; Ru et al., 2016; Ru et al., 2020). Esses estudos mostram que variáveis operacionais e construtivas, como a pressão de trabalho, o diâmetro do orifício calibrado do bico, ou vazão, e a desenho interno da ponta, influenciam diretamente no espectro de gotas e a uniformidade da aplicação. Contudo, observa-se que aumentos de pressão não resultam necessariamente em melhorias contínuas na uniformidade, sendo recomendado o ajuste integrado desses parâmetros para reduzir perdas por evaporação e dispersão, buscando aproximar-se do diâmetro mais adequado ao alvo.

A deriva, por sua vez, depende fortemente da interação entre o espectro de gotas e o vento lateral. Estudos em túneis de vento demonstram que o fluxo de ar desloca o perfil de distribuição volumétrica na direção do vento, arrastando gotas e formando caudas assimétricas (Boschiero, 2020; Douzals e Al Heidary, 2014). A avaliação da deriva pode ser realizada tanto em campo quanto em ambiente controlado, como túneis de vento, que permitem simular condições reprodutíveis de pressão, altura da barra e velocidade do ar (Moreira Júnior, 2009; Douzals et al., 2014). Túneis de vento são amplamente empregados em diversas áreas da engenharia devido à sua capacidade de reproduzir escoamentos atmosféricos de forma precisa (Hegade et al., 2020), sendo essenciais para estudos de dinâmica de fluidos, aerodinâmica e aplicações agrícolas. Eles podem ser projetados em circuito aberto ou fechado, cada qual com vantagens e limitações (Barlow, Rae Jr. e Pope, 1999), e operam com diferentes métodos de geração de fluxo, como ventiladores únicos, múltiplos ventiladores ou arranjos combinados (İtmeç et al., 2022; Panigrahi et al., 2025). A literatura reforça que, embora simulações

computacionais estejam em avanço, os túneis de vento ainda são indispensáveis para a calibração e validação de dados experimentais em engenharia de precisão (Brion et al., 2018).

Considerando que o espectro de gotas e a pressão influenciam diretamente no efeito do vento lateral sobre o perfil de distribuição, a uniformidade de distribuição e o potencial de deriva, torna-se fundamental investigar esses parâmetros de forma integrada. Nesse contexto, a utilização de túneis de vento para avaliar o desempenho de pontas de pulverização sob diferentes condições operacionais é fundamental para reduzir os riscos de perdas por deriva, garantir maior qualidade de aplicação e atender às exigências normativas e ambientais.

1.1. Objetivos gerais

Avaliar o desempenho operacional da ponta de pulverização hidráulica de jato cônico vazio com tecnologia de redução de deriva (modelo CVE 9002), analisando o espectro de gotas e a influência de diferentes pressões de trabalho e velocidades de vento lateral sobre a uniformidade de distribuição volumétrica e o potencial de deriva em laboratório.

1.2. Objetivos específicos

- Verificar a vazão real das pontas e determinar o desvio em relação à vazão nominal para validação das pontas utilizadas nos ensaios.
- Caracterizar o espectro de gotas gerado pelas pontas, determinando o Diâmetro Mediano Volumétrico (DMV), a Amplitude Relativa (AR) e a porcentagem de volume em gotas suscetíveis à deriva ($< 100 \mu\text{m}$ e $< 150 \mu\text{m}$) sob pressões de 300, 500 e 700 kPa.
- Avaliar o perfil de distribuição volumétrica transversal individual e em barra (sobreposição), determinando o Coeficiente de Variação (CV) nas condições de diferentes velocidades de fluxo de ar (0; 0,92; 1,48; 2,05; 2,50 e $3,13 \text{ m s}^{-1}$) e pressões de 300, 500 e 700 kPa.
- Quantificar o efeito do vento lateral sobre a pulverização através de indicadores de deriva, especificamente o deslocamento do padrão de pulverização (Spray Pattern Displacement - SPD), o Índice de Deriva e a porcentagem de perda por deriva.

2. REVISÃO

2.1. Tipos de bicos hidráulicos cônicos e princípios de atomização

Os bicos hidráulicos cônicos são tradicionalmente classificados em cone de jato vazio e cone de jato cheio (Marchione et al., 2007). Bicos de jato vazio concentram a maior parte das gotas na borda externa do jato, formando um anel de deposição, enquanto os bicos de cone de jato cheio tendem a distribuir as gotas de maneira mais uniforme sobre a superfície de impacto. Em ambos os casos, a formação da lâmina cônica ocorre devido à entrada tangencial do líquido na câmara de turbilhonamento, que gera um vórtice capaz de promover fragmentação primária e secundária do filme líquido, produzindo gotas finas e um padrão característico de pulverização (Miller e Ellis, 2000; Shirwal et al., 2020).

Estudos mostram que os bicos cônicos de jato vazio formam perfis volumétricos com gotículas predominantemente finas e distribuídas nas extremidades do perfil de distribuição, o que pode favorecer a cobertura de culturas agrícolas (Foqué e Nuyttens, 2011). Em comparação, os bicos de leque produzem uma distribuição gradual de tamanhos de partículas, sendo menores no centro e maiores nas extremidades do leque (Xia et al., 2017).

As condições operacionais, especialmente a pressão de trabalho, influenciam diretamente na vazão, no ângulo de aspersão e no espectro de gotas. A altura do bico em relação ao alvo altera a sobreposição e o padrão transversal de distribuição, reforçando a importância da caracterização adequada da ponta.

2.2. Comportamento do espectro de gotas e efeitos da pressão

Estudos clássicos e recentes demonstram que a resposta dos bicos cônicos às variações de pressão envolve alterações significativas em parâmetros do espectro de gotas como DMV e SPAN o que pode gerar mudanças de classificação de gotas com forme a ASABE (2009). Além disso, a pressão pode influenciar o ângulo de aspersão e largura total da faixa de aplicação, o que dificulta a previsibilidade da distribuição resultante. Por sua importância o ângulo de aspersão é padronizado pela ISO/FDIS 5682-1:2016(E), determinando um limite de $\pm 10^\circ$ de variação do valor nominal.

Cunha et al. (2004) observaram que bicos cônicos mantêm relativa estabilidade no espectro para D01, D05 e D09, sem diferenças entre pressões, exceto por uma leve redução da proporção de gotas $<100 \mu\text{m}$ em pressões menores (400 kPa). De forma semelhante, o SPAN apresentou comportamento próximo a outros bicos avaliados.

A análise da correlação dos componentes principais conduzida por Baio et al. (2025) mostrou que, em bicos hidráulicos, o DMV não apresenta correlação com o SPAN, mas é inversamente proporcional à pressão, e à proporção de gotas menores que 100 μm , sendo, esses últimos três parâmetros diretamente proporcionais entre si.

Kumar et al. (2020) demonstraram que o aumento da pressão e da vazão resulta no aumento da largura total e do ângulo de aspersão, além da redução do coeficiente de variação. Diferenças significativas foram observadas para D01, D05, D09 e SPAN entre 145 e 445 kPa. Yadav (2017), para bicos cônicos de jato vazio também registrou incremento do ângulo de aspersão com o aumento da pressão.

Upadhyay et al. (2024) destacam que os bicos cônicos de jato vazio apresentam espectro de gotas com gotas mais finas, resultando em maior área superficial específica e consequentemente maior cobertura, além de amplitude relativa semelhante à de outros bicos hidráulicos. A distribuição transversal segue o padrão típico de menores volumes na região central e certa estabilidade com o aumento da pressão.

Por outro lado, Tripathi e D'Souza (2020) relataram perfis mais uniformes para bicos cônicos de jato vazio, com pouca variação volumétrica na região central e redução gradual nas extremidades, resultando em uma cauda com baixa vazão. Também observaram aumento da largura total com a pressão. Elwakeel et al. (2021), trabalhando com pressões entre 600 e 950 kPa, encontraram uniformidade na região central do perfil, com coeficiente de variação estável e aumento da largura total com o aumento da pressão.

Choudhary et al. (2023) reforçam que o aumento da pressão e do tamanho do orifício leva ao aumento do ângulo de aspersão. Além disso, esse estudo evidencia a formação de dois picos volumétricos laterais típicos de bicos cônicos de jato vazio e aumento da largura total com a pressão.

2.3. Padrões de distribuição transversal e estabilidade operacional

É relatado que o fluxo de ar direcionado às superfícies impermeáveis dos padronizadores, ou mesa de distribuição não representa adequadamente a complexidade da cobertura vegetal real (Anken, 2024). Porém essa afirmação é válida apenas para mesa de distribuição com padrão corrugado de uma chapa de aço. O presente trabalho utiliza de uma mesa de distribuição que permite o fluxo de gotas e do ar carregado para baixo e direciona a massa de ar para as laterais e o líquido para os coletores, não gerando influência sobre a deposição feita pelo jato.

Os bicos cônicos de jato vazio apresentam características específicas e frequentemente mais complexas para obtenção de uniformidade transversal em comparação com outros

modelos. Diversos estudos relatam que o perfil de distribuição apresenta dois picos laterais e menor volume na região central, dificultando a obtenção de CVs baixos em condições padronizadas (Choudhary et al., 2023).

Anken (2024) avaliou três métodos distintos de medição da distribuição volumétrica transversal — mesa de distribuição e dois métodos baseados em papéis hidrossensíveis — e observou que os resultados mantêm o mesmo padrão independentemente da metodologia. Porém, foi relatado que a mesa de distribuição fornece dados mais consistentes, com menor desvio padrão entre repetições. O autor concluiu que o bico cônico de jato vazio apresenta maior estabilidade operacional, em relação aos bicos de leque simples, por apresentar menor variabilidade entre os resultados dos três métodos de avaliação. Apesar de sua vantagem em relação a concordância dos resultados independentemente dos métodos de avaliação, o perfil característico de dois picos torna mais difícil atingir uniformidade quando comparado a outros tipos de bicos.

2.4. Influência do vento e caracterização da deriva

A determinação da deriva e sua quantificação são baseadas em normas internacionais consolidadas, como ISO 22856:2008 (túnel de vento), ISO 22866:2005 (ensaios de campo) e a série ISO 22369:2010, que estabelece critérios de classificação e métodos de redução. Contudo, Planas et al. (2013) demonstraram que diferentes metodologias — espectro de gotas, coletas em campo ou medições em túnel — podem gerar resultados divergentes, destacando a necessidade de padronização e correta interpretação experimental.

Estudos voltados à mitigação de deriva incluem sistemas que ajustam o ângulo de orientação do bico em função da direção de vento, com eficiência comprovada para vento frontal, mas sem considerar vento lateral, o que constitui lacuna relevante para a distribuição transversal (Bayat; İtmeç; Özlüoymak, 2023).

Tecnologias adicionais de redução de deriva incluem barras protegidas (Sidahmed; Awadalla; Haidar, 2004), assistência de ar (Bayat et al., 1999), pulverização eletrostática (Martin; Lateef, 2017) e bicos antideriva (Vallet; Tinet, 2013). O uso de adjuvantes pode reduzir o índice de deriva por aumentar o DMV e diminuir a formação de gotas menores que 150 μm (İtmeç et al., 2022).

Trabalhos conduzidos em túnel de vento mostram o deslocamento significativo dos perfis volumétricos em função da velocidade do ar (Douzals e Al Heidary, 2014), podendo ser mensurados por índices específicos, como SPD ou Índice de Deriva. Entretanto, métodos baseados em amostragem espacial, como a difração a laser, apresentam limitações: estudos

clássicos mostram sobreposição da fração de gotas menores em velocidades de ar inferiores a 8–11 m/s durante medição (SDTF, 1997).

Essas evidências reforçam a sensibilidade da medição do espectro de gotas à dinâmica do ar e justificam o uso cuidadoso de plataformas experimentais padronizadas.

2.5. Métodos de caracterização do espectro de gotas

A caracterização do espectro de gotas em pulverização agrícola utiliza parâmetros como DMV, amplitude relativa (SPAN) e porcentagem de gotas menores que 100 μm . A amplitude relativa expressa a homogeneidade da população de gotas, sendo valores menores indicativos de maior uniformidade (Baio, 2016).

Entre os métodos de medição, destacam-se a difração a laser (Barnett & Matthews, 1992), a sonda óptica (Butler Ellis & Bradley, 2002) e o PDPA (Farooq et al., 2001). A difração a laser é amplamente utilizada por sua rapidez e simplicidade.

2.6. Aplicações tecnológicas e estratégias de mitigação

Diversas tecnologias têm sido implementadas para melhorar a qualidade da pulverização e reduzir perdas. Além dos sistemas de controle ativo de orientação do jato (Bayat; İtmeç; Özlüoymak, 2023), pulverizadores modernos incorporam barras protegidas, assistência de ar, bicos antideriva e pulverização eletrostática, visando aumentar deposição e reduzir deslocamento indesejado das gotas (Sidahmed; Awadalla; Haidar, 2004; Bayat et al., 1999; Martin; Lateef, 2017; Vallet; Tinet, 2013).

Estudos mostram ainda que adjuvantes modificam o espectro de gotas, aumentando o DMV e reduzindo o número de gotas potencialmente deriváveis, o que diminui o Índice de Deriva (İtmeç et al., 2022).

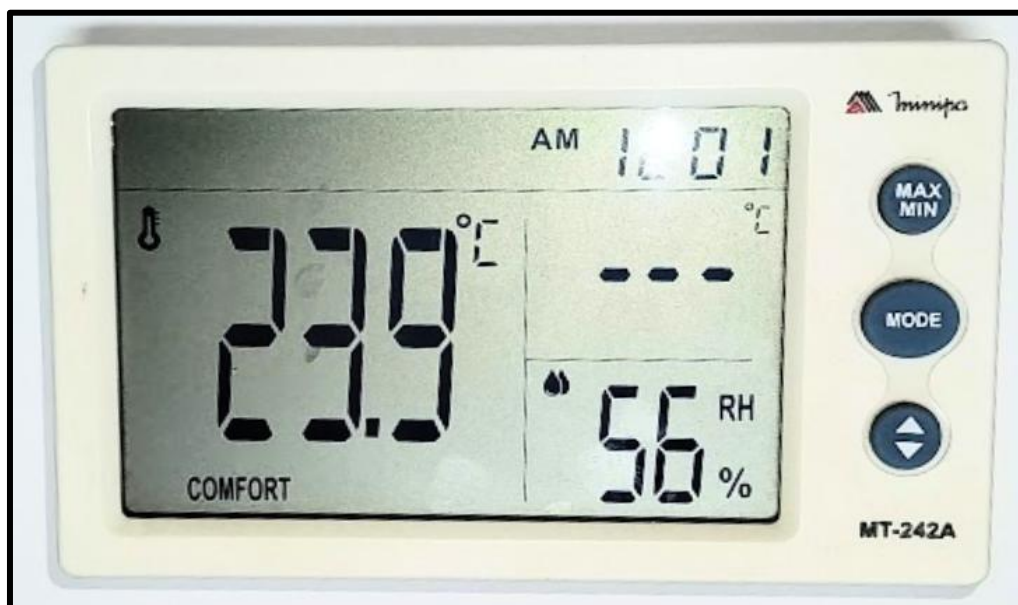
3. METODOLOGIA

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia de Aplicação do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP. As condições de temperatura e pressão foram mensurados por instrumentos de medição de marcas Lutron Electronic e Minipa Do Brasil Ltda, respectivamente, dos modelos Vane Anemometer AH-4223 (Figura 3.1) e Relógio Termo-Higrômetro Digital MT-242A (Figura 3.2).

Figura 3.1. Lutron Electronic, Vane Anemometer AH-4223.



Figura 3.2. Minipa Do Brasil Ltda, Relógio Termo-Higrômetro Digital MT-242A.



3.1. Caracterização da infraestrutura

Utilizou-se um túnel de vento instalado sobre uma mesa de distribuição volumétrica transversal (Figura 3.1.1). A mesa possui 3,1 m de largura, 3,8 m de comprimento e 133 canaletas espaçadas em 0,025 m, permitindo a coleta dos perfis volumétricos por meio de provetas graduadas de 250 ml. O túnel de vento apresenta seção vertical de 1,2 x 1,2 m de largura e 4,6 m de comprimento, com um ventilador axial de 5 pás com 1,1 m de diâmetro instalado em uma extremidade e aberto na outra para a saída do fluxo de ar (Figura 3.1.2).

O ventilador (Figura 3.1.3) é acionado por motor elétrico com inversor de frequência ajustável entre 0 e 60 Hz. As frequências utilizadas foram de 0, 10, 15, 20, 25 e 30, correspondendo as velocidades de 0, 0,92, 1,48, 2,05, 2,50 e 3,13 m s⁻¹, conforme dados de velocidades de vento já obtidas em estudos anteriores. Para assegurar a uniformidade e reduzir turbulências, foi instalada uma colmeia na parte frontal do ventilador, com 0,30 m de comprimento e 441 subdivisões de 0,05 × 0,05 m, conforme Moreira Júnior (2009).

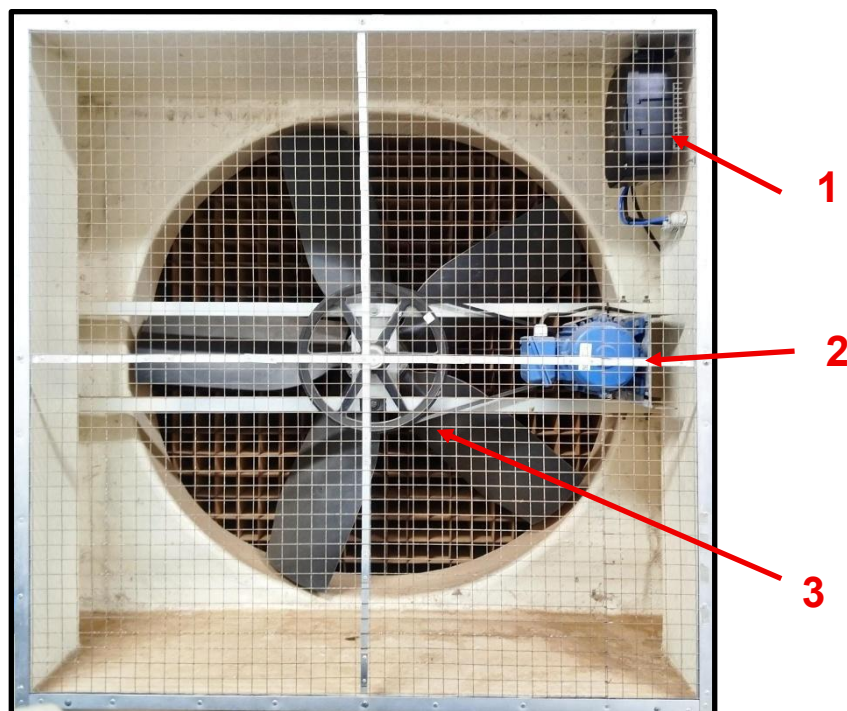
Figura 3.1.1. Túnel de vento (1) montado acima de uma mesa de distribuição volumétrica transversal (2).



Figura 3.1.2. Saída do túnel de vento.



Figura 3.1.3. Vista traseira da estrutura de suporte, do ventilador, inversor de frequência (1), motor (2) e polia de transmissão (3).



A mesa possui dois sistemas de alavancas em sua lateral direita, o primeiro permite colocar as provetas na vertical, para a coleta de água e leitura dos volumes obtidos, ou reclinadas para o descarte da água no reservatório secundário (Figura 3.1.5). O segundo sistema permite direcionar o fluxo de água para as provetas graduadas (Figura 3.1.4) no início de uma coleta de perfil ou para o reservatório secundário ao final da coleta. A água no reservatório secundário é encaminhada para o reservatório principal por meio de uma bomba de retorno para reutilização.

Figura 3.1.4. Detalhe das provetas graduadas e numeradas.



Figura 3.1.5. Vista lateral da mesa com suas alavancas (1 - Para o controle das provetas; 2 - Para o direcionamento do fluxo de água) e a bomba de retorno (3) à esquerda e seu reservatório secundário à direita.



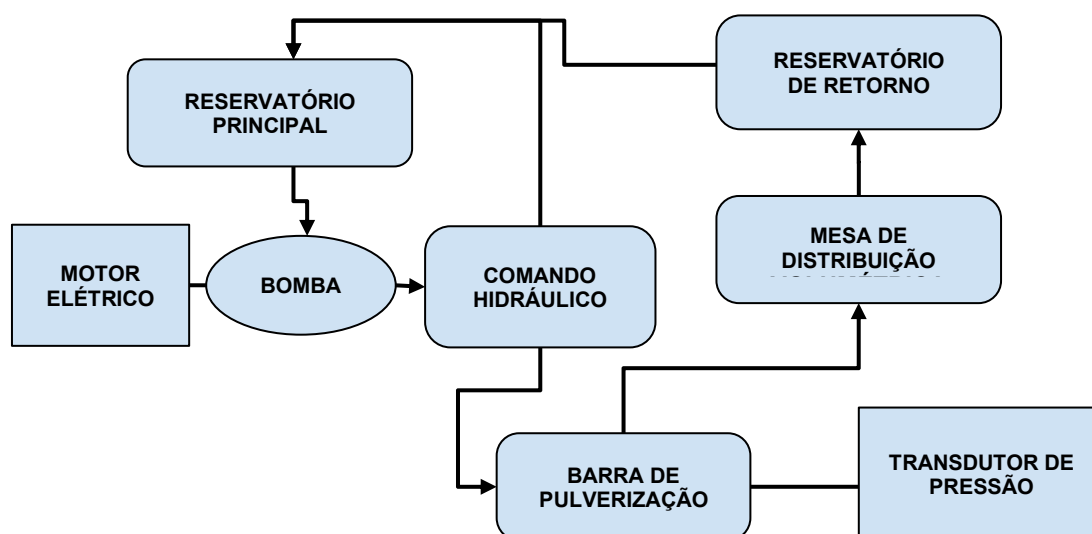
O sistema hidráulico (Figura 3.1.6 e 3.1.7) utilizado é composto por um comando hidráulico convencional, uma bomba de deslocamento positivo de êmbolos marca Jacto

modelo JP-75 com vazão de 75 L.min^{-1} , pressão máxima de 35 kgf.cm^2 , potência de 6,5 c.v e rotação de 540 rpm, acionada por um motor elétrico de 7,5 c.v., com um tanque com capacidade de 2.000 litros e a barra de pulverização.

Figura 3.1.6. Conjunto tanque principal (1), motor elétrico (2), bomba de êmbolo (3) e comando hidráulico (4), à esquerda, e detalhe do comando hidráulico à direita.



Figura 3.1.7. Esquema do sistema hidráulico utilizado, onde as setas indicam o fluxo da água e as linhas conexões.



Para mensuração da pressão na barra de pulverização, foi utilizado um transdutor de pressão analógico de marca Zurich® de modelo PSI-05 (Figura 3.1.9 A) instalado na barra de pulverização. O transdutor é capaz de mensurar a faixa de pressão estudada, convertendo a pressão em um sinal de saída analógico de 0-10 V para um sistema microcontrolado, que tem como principais componentes um Arduino Uno, inserido em uma caixa fechada (Figura 3.1.8), um condicionador de sinal e um regulador de tensão 9 Vcc. O Arduino recebe o sinal do condicionador em uma porta analógica de 0-05 Vcc, proporcional a pressão de 0-10 bar e envia os dados de pressão média via porta USB com frequência de 1 Hz ao computador, que possui um software desenvolvido em Delphi, com dois displays de indicação, instantânea e média da pressão de operação, aferida durante 30 segundos. Para verificação da constância da pressão relatada pelo transdutor, temos instalado dois manômetros (Figura 3.1.9 B) na barra, conforme Figura 3.1.11.

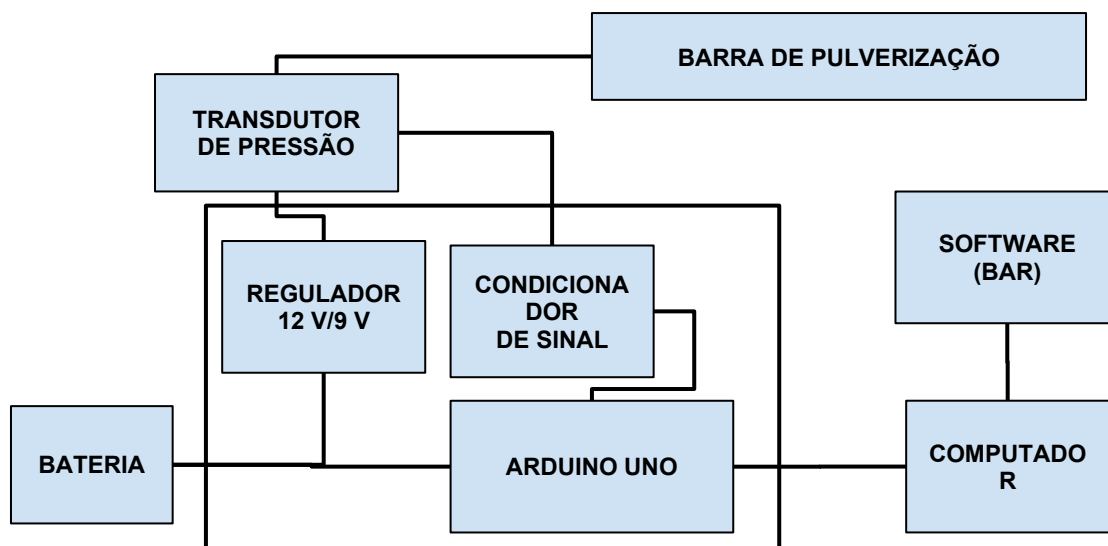
Figura 3.1.8. Caixa do Arduino.



Figura 3.1.9. Transdutor de pressão (A) e manômetro (B).



Figura 3.1.10. Esquema do sistema de aquisição de dados da pressão.



Para os ensaios, foi utilizada uma barra úmida de pulverização, uma com dez porta-bicos espaçados em 25 cm e alimentação central (Figura 3.1.11). Os porta-bicos utilizados nas barras, (Figura 3.1.12) possuem uma válvula anti-gotejo e ponto de encaixe para até três bicos.

Figura 3.1.11 Barra de pulverização de 0,25 m entre porta-bicos. A posição onde o transdutor de pressão é instalado está indicado pela seta vermelha.

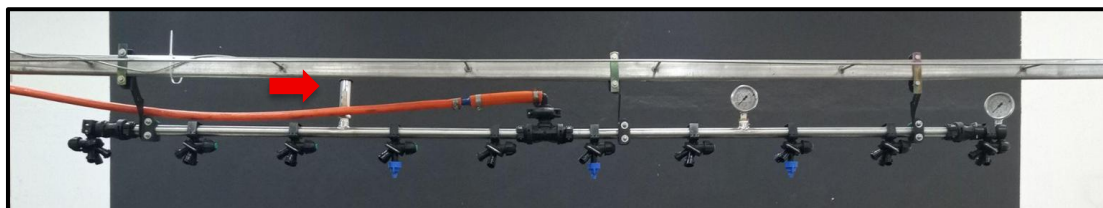


Figura 3.1.12. Porta-bico.



3.2. Caracterização das pontas

Foram adquiridas no mercado as pontas CVE 9002 (Figura 3.2.1) utilizam a tecnologia FlexDROP da empresa Projeta Agrícola (ECON, 2025), indicando que variações de velocidade de operação, pressão e vazão geram baixa alteração no diâmetro mediano volumétrico das gotas e no ângulo de aspersão de 90°. Além disso, é dito que a tecnologia Econ que atua antes do orifício de saída, modificando o comportamento da calda por meio de um difusor que redireciona o fluxo para um côncavo, como ilustrado na Figura 3.2.2, resulta em redução de deriva e maior uniformidade das gotas aplicadas.

Figura 3.2.1. Ponta de pulverização CVE 9002, com a exposição de seus componentes internos, capa (1), câmara de turbilhonamento (2), disco (3) e difusor (4).

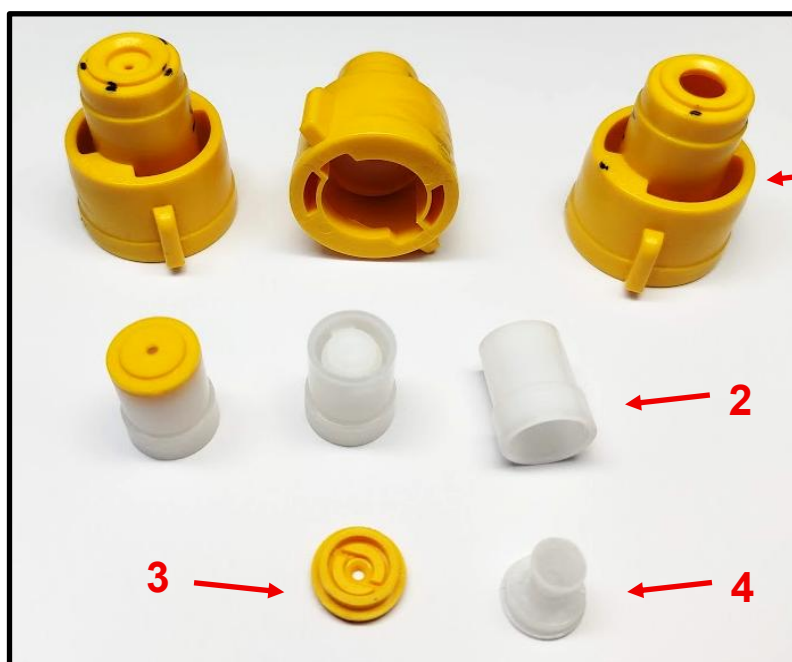


Figura 3.2.2. Corte da ponta para visualização do difusor.



Fonte: ECON, 2025.

Foram utilizados filtros com malha de 50 mesh e anéis de vedação ilustrados na figura 3.2.3.

Figura 3.2.3. Outros componentes utilizados para a montagem dos bicos de pulverização. Onde: A - Filtros com malha de 50 mesh; B - Anéis de vedação;



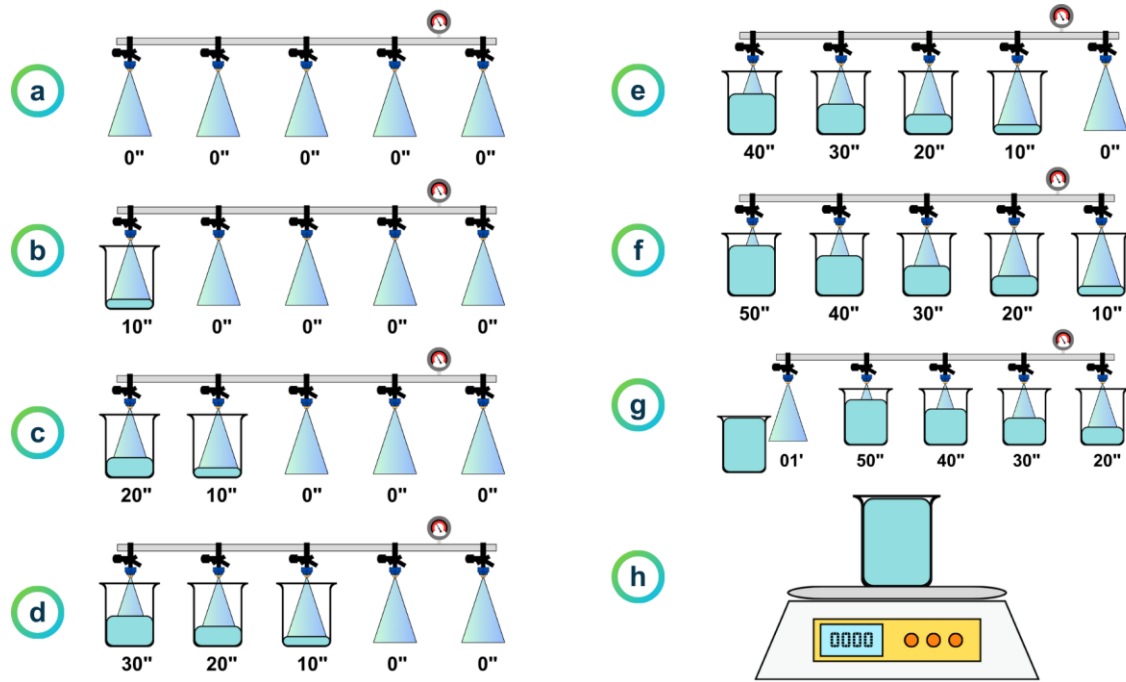
3.3. Teste de vazão

O objetivo do teste de vazão foi verificar a vazão nominal das pontas de pulverização, em relação ao catálogo para as pressões estudadas. O teste é feito pela pesagem da água, em uma balança Toledo 9094, coletada em um béquer por um minuto, medido por um cronômetro, mostrados na Figura 3.3.1. Por questão de praticidade, o teste foi realizado com 5 pontas do modelo estudado que foram dispostas na barra e béqueres de massa conhecida foram colocados, sequencialmente, sob cada ponta a cada dez segundos por três repetições, como ilustra na Figura 3.3.2.

Figura 3.3.1. Béquer (esquerda), balança (centro) e cronômetro digital (direita).



Figura 3.3.2. Etapas para o teste de vazão. a - As cinco pontas abertas dispostas na barra; b, c, d, e, f - Béqueres sendo adicionados sequencialmente a cada dez segundos; g - Retirada do primeiro béquere ao completar um minuto de coleta; h - Pesagem do béquere com a água coletada.



A média obtida para as três repetições em cada pressão foram comparadas com as vazões nominais indicadas pelo fabricante. Foi calculado o desvio de vazão, conforme a Equação 3.3.1.

$$\text{Desvio de vazão (\%)} = \frac{\bar{Q} - Q_n}{Q_n} \cdot 100 \quad (3.3.1)$$

onde: $\bar{Q}$ - O volume médio das três repetições de uma ponta, em uma determinada pressão, por minuto (L); Q_n - A vazão nominal do modelo para a mesma pressão (L/min).

O desvio de vazão foi utilizado para a escolha das pontas a serem utilizadas no teste de perfil. Sendo selecionadas as três pontas que tiveram os valores de desvio mais próximos, para melhor comparação entre elas.

3.4. Perfil individual

Os perfis individuais foram obtidos com a ponta instalada a 0,50 m de altura sobre a mesa em um porta bico diretamente acima da canaleta central da mesa de distribuição volumétrica transversal. As pressões testadas foram 300, 500 e 700 kPa, combinadas com as velocidades de vento de 0, 0,92, 1,48, 2,05, 2,50 e 3,13 m s⁻¹. Para cada combinação foram realizadas três repetições para cada uma das três pontas, com tempo de coleta correspondente ao tempo

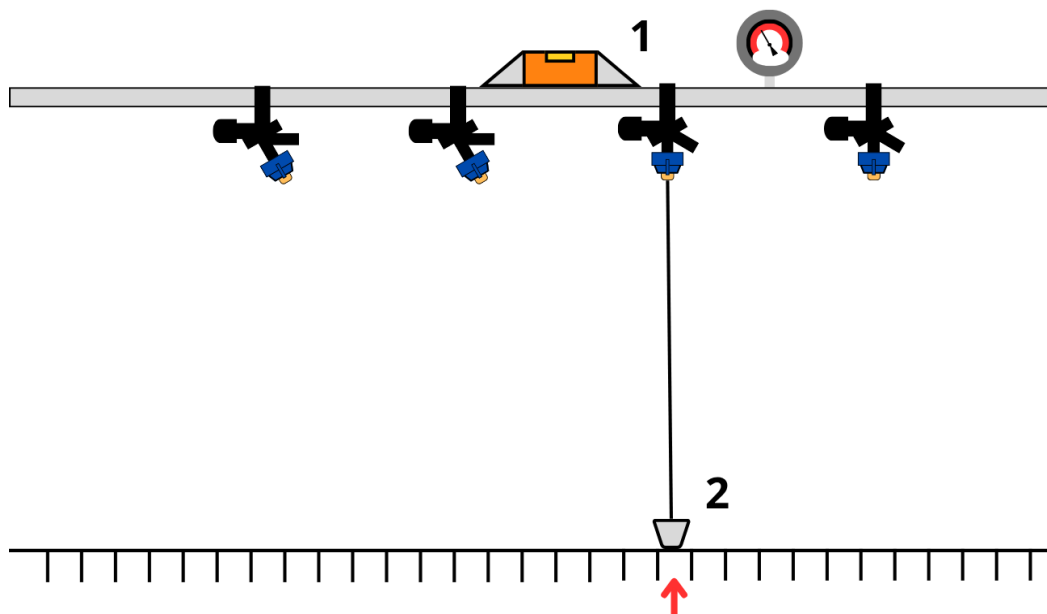
necessário para que a proveta com mais volume atingisse 210 ml, equivalente a 90% da capacidade volumétrica dos béqueres

A altura de aplicação foi configurada a partir da superfície horizontal da mesa até a extremidade inferior da ponta de pulverização. Foram utilizados um nível e um prumo (Figura 3.4.1) para, respectivamente, manter a barra de pulverização nivelada à mesa de distribuição e manter a ponta alinhada com a canaleta central (Figura 3.4.2).

Figura 3.4.1. Nível e prumo utilizados.



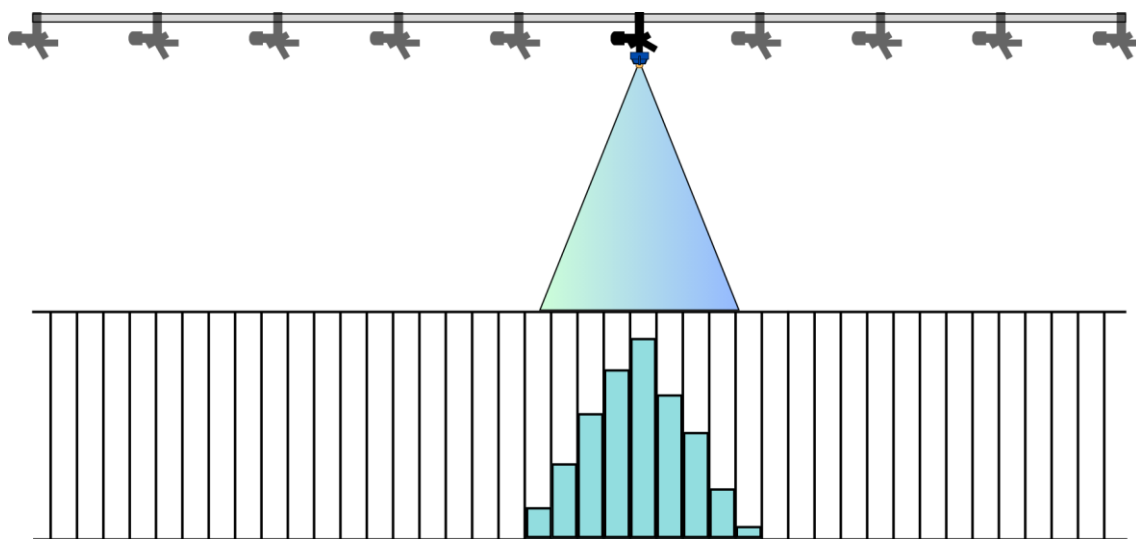
Figura 3.4.2. Utilização do nível (1) e do prumo (2). A seta indica a canaleta central.



As coletas foram iniciadas com as provetas vazias, iniciadas quando a comporta da mesa é aberta para permitir que a água alimente as provetas, nesse momento o cronômetro é acionado

para iniciar a contagem do tempo. A repetição é encerrada quando uma das provetas se aproxima de 210 mL, então o fluxo de água para as provetas é interrompido e o tempo no cronômetro é pausado. A ilustração da coleta do perfil individual é apresentada na Figura 3.4.3.

Figura 3.4.3. Coleta de perfil individual.



Após se encerrar uma repetição, é realizada a leitura e registro do tempo indicado no cronômetro e do volume de água em cada canaleta. Após isso, a água nas provetas é retirada e direcionada para o reservatório secundário. Quando são mudadas as condições de ensaio, a próxima coleta acontece depois da estabilização do fluxo para as provetas.

Ao final de cada repetição de perfil individual, a vazão coletada e o desvio de vazão foram calculados, segundo as Equações 3.4.1 e 3.4.2. O valor usado como referência para o cálculo do desvio de vazão é a média da vazão real obtida das três repetições da respectiva ponta, no teste de vazão, para a mesma pressão utilizada no perfil individual.

Com os dados obtidos, para os ensaios com velocidade do vento de 0 m s^{-1} , foi possível calcular o ângulo de aspersão das pontas, em cada pressão. Foi utilizada a Equação 3.4.3 para calcular a largura da faixa total (LT). O ângulo da ponta efetivo foi calculado com base na altura de aplicação e os dados de largura da faixa lateral (LL) da direita e da esquerda do perfil, em relação à canaleta central, segundo Equação 3.4.4. O ângulo de aspersão foi obtido segundo a Equação 3.4.5.

$$\text{Vazão coletada (L/min)} = \frac{V_c}{t \cdot 1000} \quad (3.4.1)$$

onde: V_c - Somatório do volume de água coletado nas canaletas do perfil (mL); t - Tempo de coleta do perfil (min).

$$\text{Desvio de vazão coletada (\%)} = \frac{Q_c - Q_r}{Q_r} \cdot 100 \quad (3.4.2)$$

onde: Q_c - Vazão coletada calculada para o perfil (mL/min); Q_r - Vazão real da ponta, o volume médio de água em um minuto obtido no teste de vazão (mL/min).

$$LT (m) = C_t \cdot d \quad (3.4.3)$$

onde: C_t - Número total de canaletas contabilizadas do perfil (adimensional); d - largura das canaletas (m).

$$LL (m) = 0,0125 + C_l \cdot d \quad (3.4.4)$$

onde: C_l - Número de canaletas do perfil em um dos lados da canaleta central (adimensional); d - largura das canaletas (m).

$$\text{Ângulo de aspersão (graus)} = \arctan \left(\frac{LL_e}{h} \right) + \arctan \left(\frac{LL_d}{h} \right) \quad (3.4.5)$$

onde: $\arctan$ - Função arco tangente; LL_e - Largura da faixa lateral esquerda (m); LL_d - Largura da faixa lateral direita; h - Altura de aplicação (m).

Os perfis foram avaliados quanto a uniformidade de distribuição pelo coeficiente de variação (CV) da faixa total, dado pela Equação 3.4.6, para cada pressão e velocidade de vento, considerando os valores de todas as provetas com líquido.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (3.4.6)$$

onde: σ - Desvio padrão das vazões das canaletas (m); $\bar{X}$ - Média das vazões das canaletas (L/min).

O deslocamento de faixa de aplicação e a modificação do perfil de distribuição transversal, foi quantificado por um indicador de deriva. O Índice de Deriva proposto por Balsari, Marucco e Tamagnone (2000) determina o deslocamento do perfil de distribuição em relação à posição inicial da ponta (Equação 3.4.7). Além disso, a deriva foi quantificada pelo desvio da vazão entre a vazão coletada sob ação do vento em relação à vazão obtida sem vento, conforme a Equação 3.4.8.

$$ID = \frac{\sum_{n=1}^N V(n) \cdot d(n)}{\sum_{n=1}^N V(n)} \quad (3.4.7)$$

onde: N - número total de provetas com líquido; V - Vazão de uma canaleta; d - distância da canaleta em relação ao centro.

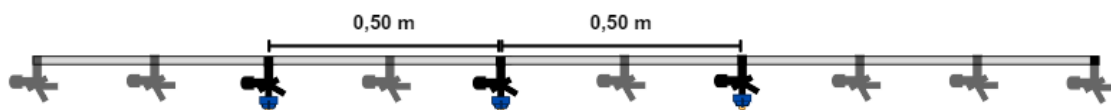
$$Deriva (\%) = \frac{\bar{Q} - Q_{csv}}{Q_{csv}} \cdot 100 \quad (3.4.8)$$

onde: $\bar{Q}$ – A vazão coletadas do perfil com vento, (L); Q_{csv} - A vazão coletada do perfil sem vento para as mesmas condições, (L/min).

3.5. Sobreposição em mesa

Para o perfil de barra, as três pontas escolhidas para o teste de perfil individual são sorteadas para ficar em uma ordem, que não será mais alterada para aquele modelo, para serem colocadas na barra de pulverização. As condições para realizar as coletas são as mesmas para as coletas de perfil individual, como pressão e a velocidade do fluxo de ar. Foram realizadas três repetições para cada perfil de sobreposição. As distâncias entre as pontas utilizadas foram de 0,50 metro (Figura 3.5.1). As etapas para coleta, são as mesmas indicadas no perfil individual.

Figura 3.5.1. Configurações padrão dos espaçamentos utilizados.



Após a coleta de dados, a LT dos perfis foi definida, juntamente com o CV da faixa total. Para os perfis de barra, há a necessidade de definição da uniformidade de distribuição para a zona de sobreposição, que é definida como coeficiente de variação (CV) na faixa útil de pulverização, sendo calculada com as vazões das canaletas dentro da largura da faixa de deposição útil (LU) que se refere à distância entre as canaletas sobre as quais se encontram a primeira e a última pontas abertas na barra (Figura 3.5.2).

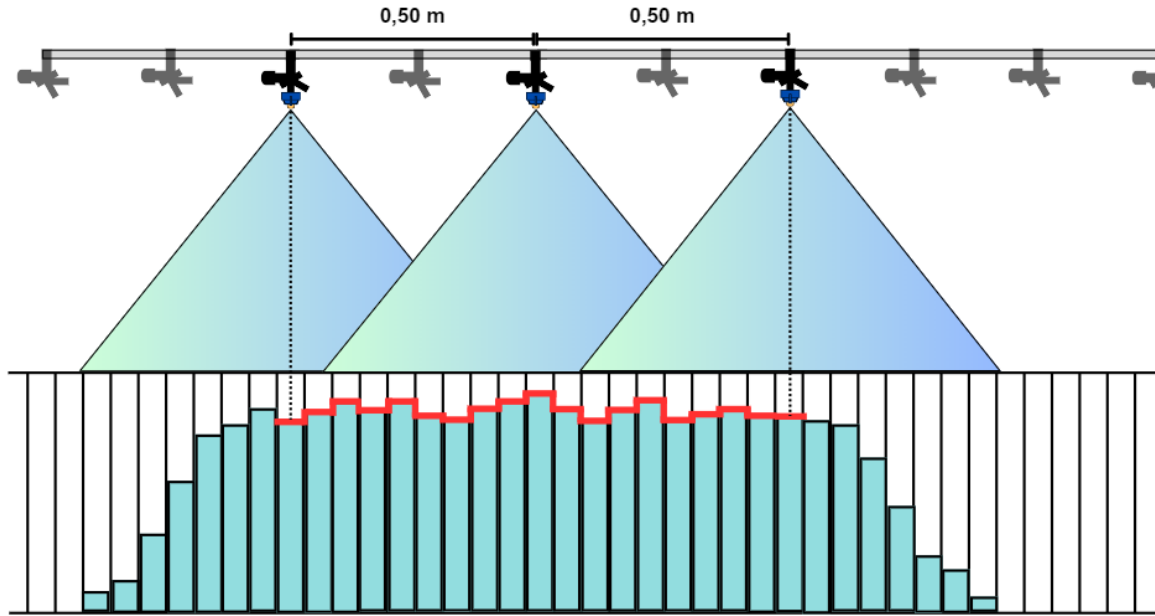
O desvio de vazão foi calculado, sendo a vazão coletada, a vazão da barra, e a vazão real, a soma das vazões das respectivas pontas em barra. Além disso, os indicadores de deriva e deslocamento de perfis de distribuição, deriva e ID, foram utilizados da mesma forma que na avaliação dos perfis individuais.

O *spray pattern displacement* (SPD), conforme Krishnan, Kemble e Gottfried (1993), permite estimar o deslocamento lateral do padrão de pulverização provocado pelo vento, em relação ao perfil sem vento (Equação 3.4.9). Foi avaliado, para os perfis de distribuição em barra, utilizando somente os valores dentro da LU.

$$SPD = \frac{\sum_{n=1}^N [V_{sv}(n) - V_{cv}(n)]}{\sum_{n=1}^N V_{sv}(n)} \quad (3.4.9)$$

onde: *SPD* - spray pattern displacement (%); *N* - número total de provetas com líquido; *V_{sv}* - Vazão de uma canaleta sem vento; *V_{cv}* - Vazão de uma canaleta com vento.

Figura 3.5.2. Definição da largura útil para o perfil de distribuição em configurações de barra



3.6. Avaliação do espectro de gotas

O espectro de gotas foi medido por um analisador do tamanho de partículas por difração a laser, marca Malvern Panalytical, modelo Spraytec (Figura 3.6.1), com lentes de 750 mm, com precisão de 1%, quando comparado com padrões de látex rastreáveis pelo NIST (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos EUA) (NIST, 2025). Foram realizadas quatro repetições para cada ponta em cada pressão. Foram analisados os parâmetros: D01, D05 (ou DMV), D09, $V\% < 150 \mu\text{m}$, $V\% < 100 \mu\text{m}$ e AR, onde:

- D01 – Diâmetro que indica que 10% do volume total pulverizado está contido em gotas menores, em μm ;
- D05 ou Diâmetro Mediano Volumétrico (DMV): Indica que 50% do volume total pulverizado está contido em gotas menores e 50% em gotas maiores que esse diâmetro, em μm ;
- : D09 - Diâmetro que indica que 90% do volume total pulverizado está contido em gotas menores, em μm ;
- Amplitude Relativa (AR): Calculada através da Equação 2.9.1;

- $V\% < 150 \mu\text{m}$: Porcentagem do volume pulverizado em gotas com diâmetro inferior a $150 \mu\text{m}$;
- $V\% < 100 \mu\text{m}$: Porcentagem do volume pulverizado em gotas com diâmetro inferior a $100 \mu\text{m}$;

Figura 3.6.1. Equipamento Malvern Panalytical, modelo Spraytec



Além disso, foi avaliado a porcentagem de volume pulverizado em cada classe de tamanho de gotas, segundo o ASABE (2009): Extremamente fina (EF), Muito fina (MF), Fina (F), Média (M), Grossa (G), Muito grossa (MG), Extremamente grossa (EG) e Ultra grossa (UG) que são, respectivamente, gotas com diâmetros menores que $60\mu\text{m}$, de 61 a $105\mu\text{m}$, 106 a $235\mu\text{m}$, 236 a $340\mu\text{m}$, 341 a $403\mu\text{m}$, 404 a $502\mu\text{m}$, 503 a $665\mu\text{m}$ e maiores que $665\mu\text{m}$.

$$AR = \frac{D_{09} - D_{01}}{D_{05}} \quad (3.6.1.)$$

onde: D_{09} - Diâmetro de gota, o qual 90% do volume pulverizado se encontra em diâmetros menores (μm); D_{01} - Diâmetro de gota, o qual 10% do volume pulverizado se encontra em diâmetros menores (μm); D_{05} - Diâmetro de gota, o qual 50% do volume pulverizado se encontra em diâmetros menores (μm).

3.7. Análise estatística

Os pressupostos da análise de variância (ANOVA) foram verificados pelos testes de Shapiro e Wilk (1965) (normalidade) e Levene/Bartlett (homogeneidade). A comparação das médias será realizada pelo teste de Tukey, com nível de significância de 5%. As análises foram realizadas com o software R (R Core Team 2018), v.3.3.4, utilizando os pacotes ExpDes.pt Ferreira et al. (2018) e ggplot2 Wilkinson (2011). Utilizou-se o estimador robusto de variância HC3, implementado via pacote sandwich (ZEILEIS, 2004), quando não se cumpria os pressupostos da análise, que, conforme demonstrado por Glass et al. (1972) e Lix et al. (1996), assegura a validade do teste F mesmo sob possíveis violações da normalidade dos resíduos.

4. RESULTADOS

Os resultados serão divididos em relação ao teste de vazão, avaliação do espectro de golpes, avaliação do perfil de distribuição volumétrica transversal individual e configuração de barra. Para o ensaio do espectro de gotas a temperatura variou entre 22,9 - 24,4 °C e a umidade relativa, entre 76 - 81%. Para o ensaio da mesa de distribuição volumétrica transversal, a temperatura variou entre 21,5 – 26,5 °C e a umidade relativa, entre 70 - 88%.

4.1. Teste de Vazão

A tabela abaixo apresenta o teste de vazão executado. Observa-se que os valores de desvio estão acima do recomendado para pontas novas, por volta de +/- 5%. Porém, para a avaliação dessas pontas, foi determinado que seriam escolhidas pontas com desvio de uma vazão mais próximas e estáveis, para que elas fossem menos variáveis entre si, e os resultados não dependessem tanto das variações entre as pontas. Foram escolhidas as pontas 3, 4 e 5.

Tabela 4.1.1. Vazão nominal, vazão real e desvio de vazão para as pontas estudadas em cada pressão

Pressão (kPa)	Vazão Nominal (L/min)	Ponta	Vazão Real (L/min)	Desvio de Vazão (%)
300	0,84	1	0,75	-10,60
		2	0,81	-3,81
		3	0,78	-6,98
		4	0,78	-7,42
		5	0,78	-7,50
500	1,078	1	0,96	-10,88
		2	1,03	-4,42
		3	1,00	-7,02
		4	1,01	-6,34
		5	1,00	-7,20
700	1,275	1	1,13	-11,01
		2	1,21	-5,10
		3	1,19	-6,95
		4	1,19	-6,41
		5	1,18	-7,35

4.2. Espectro de Gotas

Foram avaliados os parâmetros do espectro de gota DMV, AR, %V < 100 µm e V < 150 µm, porcentagem do volume menor que 100 e menor que 150 µm, respectivamente e a porcentagem de volume pulverizado em cada classe de tamanho de gotas, segundo o ASABE (2009). Para o DMV, AR, porcentagem do volume pulverizado menor que 150 (%V < 150 µm), entre 106 e 236 µm e entre 236 e 341 µm, foi feita a correção utilizando o estimador robusto de variância HC3.

Os resultados obtidos para DMV, AR, %V < 100 µm e %V < 150 µm, estão presentes na tabela abaixo. Pode-se observar que o DMV reduz com o aumento da pressão, já documentado por Kumar et al. (2020) e Upadhyay et al. (2024), e a 700 kPa, a classe de gotas fica no limite entre fina e muito fina. A amplitude relativa tem pouca variação, independentemente da pressão, e foi encontrado valores menores que os de Cunha et al. (2004) e Upadhyay et al. (2024), mas semelhantes a Kumar et al. (2020). E há um aumento na porcentagem de gotas deriváveis, são aquelas menores que são de 100 e 150 µm, conforme o aumento da pressão. Isso já é relatado por Baio et al. (2025), pois essa maior energia exercida no líquido acaba o fragmentando mais gerando gotas mais finas.

Tabela 4.2.1. Diâmetro mediano volumétrico DMV, em µm, amplitude relativa (AR), e porcentagem do volume pulverizado menor que 100 (%V < 100 µm) e 150 micros (%V < 150 µm).

Pressão (kPa)	DMV (µm)	AR	%V < 100 µm	%V < 150 µm
300	131,185 A	1,174 A	26,164 C	62,217 C
500	113,050 B	1,242 A	38,967 B	74,628 B
700	105,359 C	1,244 A	46,308 A	78,535 A

Letras maiúsculas, na vertical, representam uma comparação entre médias das repetições entre pressões. Quando ambas iguais não existe diferença significativa e, quando diferentes, existe diferença significativa, ao nível de 5% de significância.

A tabela abaixo mostra a porcentagem do volume pulverizado que se encontra nas diferentes classes de tamanho de gota. A maior concentração do volume pulverizado se encontra entre 106 e 236 µm. E esse valor acaba reduzindo com o aumento da pressão para essa classe de gotas, que é a classe de gotas finas, pois com o aumento da pressão as gotas diminuem e acabam indo para classes mais baixas. Isso é evidenciado pelo aumento da porcentagem de gotas na classe extremamente fina e muito fina com o aumento da pressão.

Tabela 4.2.2. Porcentagem do volume pulverizado nas classes de tamanho de gota extremamente fina ($V < 60 \mu\text{m}$), muito fina ($60 < V < 106 \mu\text{m}$), fina ($106 < V < 236 \mu\text{m}$) e média ($236 < V < 341 \mu\text{m}$).

Pressão (kPa)	$V < 60 \mu\text{m}$ (%)	$60 < V < 106 \mu\text{m}$ (%)	$106 < V < 236 \mu\text{m}$ (%)	$236 < V < 341 \mu\text{m}$ (%)
300	2,9 C	27,4 B	59,9 A	6,9 A
500	6,5 B	35,9 A	50,4 B	3,0 B
700	10,7 A	38,5 A	44,6 C	3,1 B

Letras maiúsculas, na vertical, representam uma comparação entre médias das repetições entre pressões. Quando ambas iguais não existe diferença significativa e, quando diferentes, existe diferença significativa, ao nível de 5% de significância.

4.3. Perfil Individual

A tabela 4.3.1 apresenta a vazão coletada e desvio de vazão para as pressões e velocidades do fluxo de ar estudadas, como também, o ângulo e o coeficiente de variação para o perfil de distribuição volumétrico transversal individual. O trabalho de Boschiero (2020), trabalhando com pontas de jato plano com indução a ar FC ULD-MAX 13002 apresentou resultados de desvio de vazão de 10,9% com 600kPa e 6 m s^{-1} de velocidade do ar, evidenciando que o espectro de gotas mais grosso, apresentado por Gadanha Jr. et al. 2025, para a mesma ponta, possibilita uma maior resistência ao carregamento pelo vento.

O ângulo, analisado na velocidade de vento de 0 m.s^{-1} , foi muito semelhante entre pressões, reduzindo apenas para 300 kPa, evidenciando estabilidade, mesmo com uma grande amplitude na pressão, diferentemente do obtido por Choudhary et al. (2023) e Kumar et al. (2020). Esse resultado entra em conformidade com a norma ISO/FDIS 5682-1:2016(E), pois não ultrapassa o limite de $\pm 10^\circ$.

Para o parâmetro de coeficiente de variação na faixa total para o perfil individual foi utilizado o estimador robusto de variância HC3. O coeficiente de variação na faixa total apresentou um comportamento parabólico em relação à velocidade de vento, pois houve um maior coeficiente de variação para a velocidade de 1.5 m s^{-1} . Em relação à pressão, somente na velocidade do fluxo de ar de 0 m s^{-1} , a pressão de 300 kPa teve o maior valor do coeficiente de variação na faixa total, mas com o incremento da velocidade do ar, pressões de 500 e 700 tiveram valores maiores. A pressão de 700 kPa teve o maior valor do coeficiente de variação na faixa total.

A figura 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 apresentam o perfil de distribuição volumétrico transversal individual para a pressão de 300, 500 e 700 kPa, respectivamente, em relação às velocidades de vento. O gráfico de distribuição horizontal volumétrica evidencia a alteração progressiva do

perfil de deposição sob diferentes velocidades de vento, que é indicado indiretamente pelo CV na faixa total. Na condição sem vento, observa-se um perfil simétrico e formação de um platô central, semelhante ao encontrado por Tripathi e D'Souza (2020) e diferentemente do encontrado em Choudhary et al., 2023. Com a aplicação do vento: esse padrão é modificado; o platô é rebaixado e deslocado na direção do fluxo; a extremidade a favor do vento gera uma cauda alongada de baixo volume, porém extensa; e a extremidade oposta apresenta redução de deposição próxima ao ventilador. Adicionalmente, forma-se um pico volumétrico no ponto correspondente à interseção entre as duas metades do jato, resultante do transporte das gotas produzidas no lado próximo ao ventilador, que são desviadas, colidem com o jato oposto e depositam.

Tabela 4.3.1. Vazão coletada, $L \cdot min^{-1}$, desvio de vazão, em %, ângulo, em $^{\circ}$, e coeficiente de variação, em %, para cada pressão e velocidade do fluxo de ar para os perfis individuais.

Pressão (kPa)	Velocidade do Vento ($m \cdot s^{-1}$)	Vazão Coletada ($L \cdot min^{-1}$)	Desvio de Vazão (%)	Ângulo ($^{\circ}$)	CV (%)
300	0	0,75	-3,72	91,24 B	56,89 dA
	0,9	0,70	-10,66		92,57 bB
	1,5	0,66	-14,90		103,77 aB
	2,1	0,64	-17,56		99,18 aB
	2,5	0,61	-21,44		81,88 cC
	3,1	0,59	-24,46		86,27 cA
500	0	0,97	-3,48	91,87 A	47,19 aB
	0,9	0,89	-11,79		96,42 cB
	1,5	0,85	-15,51		105,98 dAB
	2,1	0,80	-19,92		104,33 dB
	2,5	0,79	-21,67		94,34 cB
	3,1	0,76	-24,37		87,57 bA
700	0	1,14	-3,72	92,16 A	43,63 dB
	0,9	1,03	-13,28		104,04 abA
	1,5	0,99	-16,66		109,58 aA
	2,1	0,96	-18,82		108,30 aA
	2,5	0,93	-21,78		99,16 bA
	3,1	0,87	-26,30		90,53 cA

Letras minúsculas, na vertical, representam uma comparação média das repetições entre velocidades do fluxo de ar. Letras maiúsculas, na vertical, representam uma comparação entre médias das repetições entre pressões. Quando ambas iguais não existe diferença significativa e, quando diferentes, existe diferença significativa, ao nível de 5% de significância.

A velocidade de vento mais baixa, de $0,92 \text{ ms}$, é a que mais distorce o perfil, formando um pico muito alto em relação ao resto da distribuição e $1,5 \text{ m s}^{-1}$ geram o valor mais alto de CV na faixa total pela combinação entre a formação do pico e da cauda na extremidade. As

maiores velocidades de vento geram uma distribuição muito cauda alongada pela deposição de gotas muito distantes do pico, porém o CV reduz pelo amortecimento do pico de vazão.

Figura 4.3.1 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a pressão de 300 kPa para diferentes velocidades de vento.

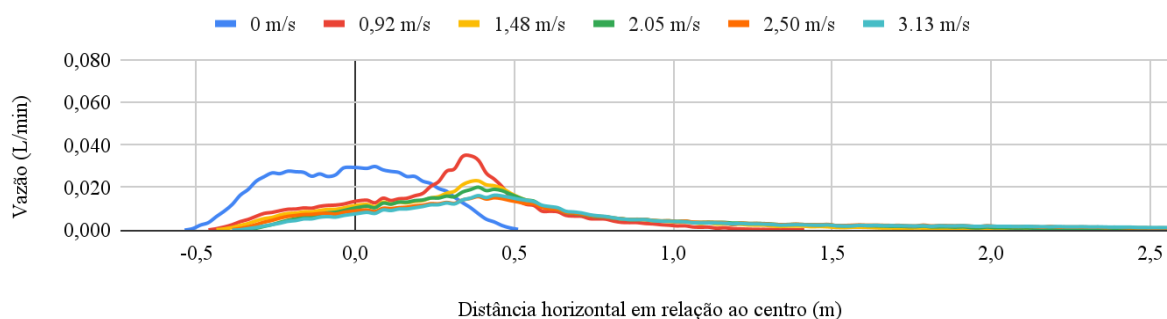


Figura 4.3.2 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a pressão de 500 kPa para diferentes velocidades de vento.

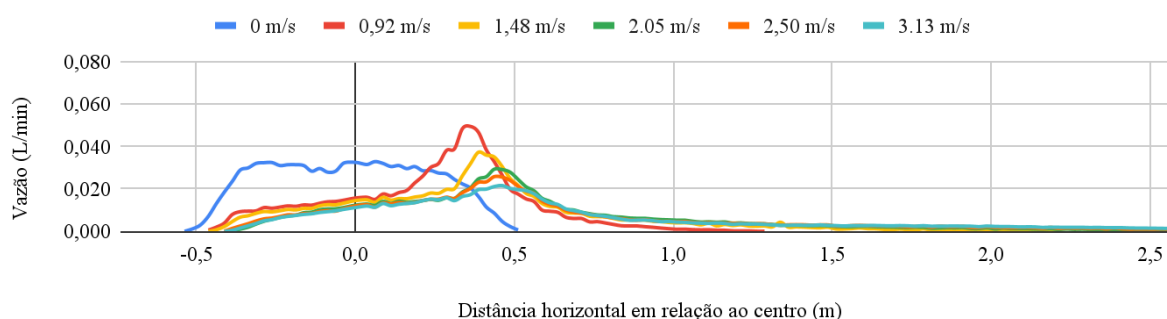
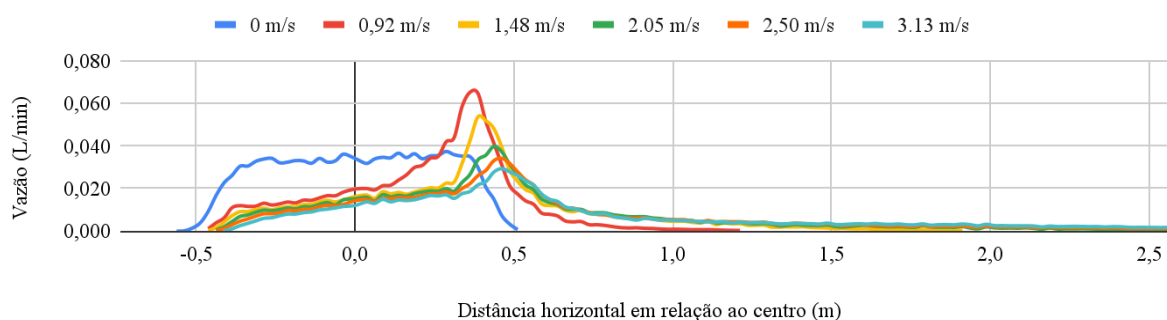


Figura 4.3.3 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a pressão de 700 kPa para diferentes velocidades de vento.



As figuras 4.3.4, 4.3.5, 4.3.6, 4.3.7, 4.3.8, 4.3.9 apresentam os perfis de distribuição transversal para as velocidades de fluxo de ar de 0, 0,92, 1,48, 2,05, 2,50 e 3,13, respectivamente, para cada pressão. Dessa forma, observa-se que, na condição sem vento, a pressão de 700 kPa produz um perfil mais uniforme na região central em comparação às

pressões menores, indicado pelo CV na faixa total reduzido, isso é observado em Tripathi e D'Souza (2020), pois o aumento de pressão, pode não aumentar o ângulo de aspersão, mas aumenta o volume pulverizado nas extremidades do perfil. Com o aumento da velocidade do vento, verifica-se que o incremento de pressão acentua a distorção do perfil pela formação de um pico mais elevado. Isso é observado no CV na faixa total que, com a pequena variação na velocidade de vento, a pressão mais alta acaba tendo valores maiores. O restante da distribuição apresenta relativa estabilidade e o deslocamento da cauda mais externa também se mantém praticamente constante, independentemente da pressão aplicada.

Figura 4.3.4 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 0 m/s para as diferentes pressões.

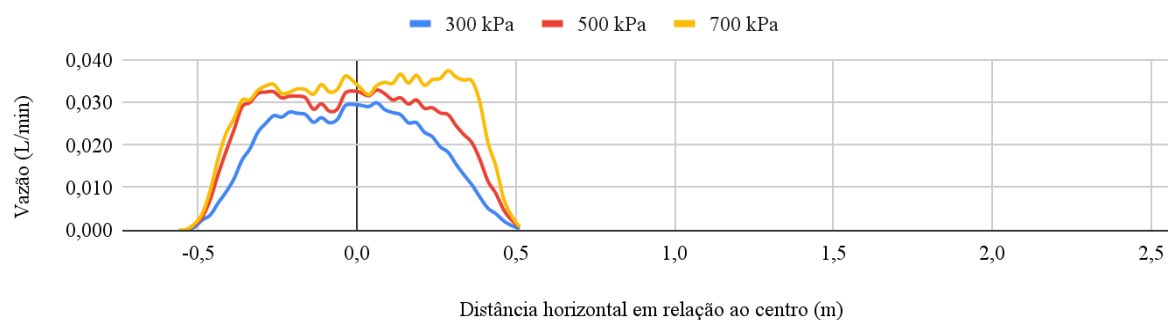


Figura 4.3.5 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 0,92 m/s para as diferentes pressões.

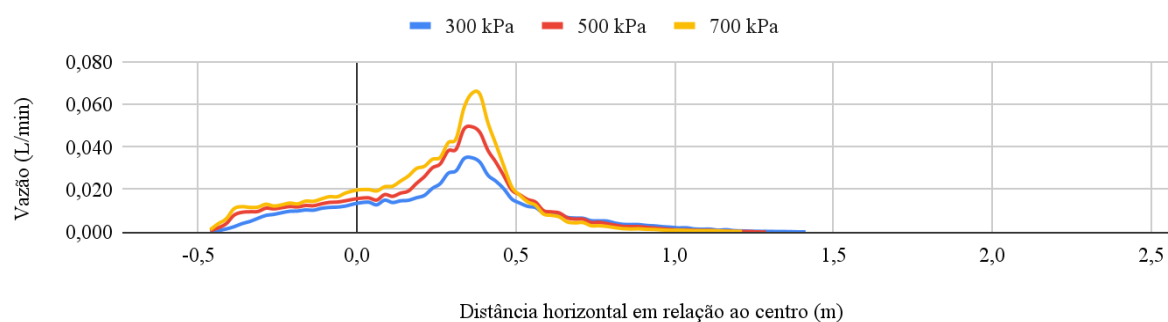


Figura 4.3.6 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 1,48 m/s para as diferentes pressões.

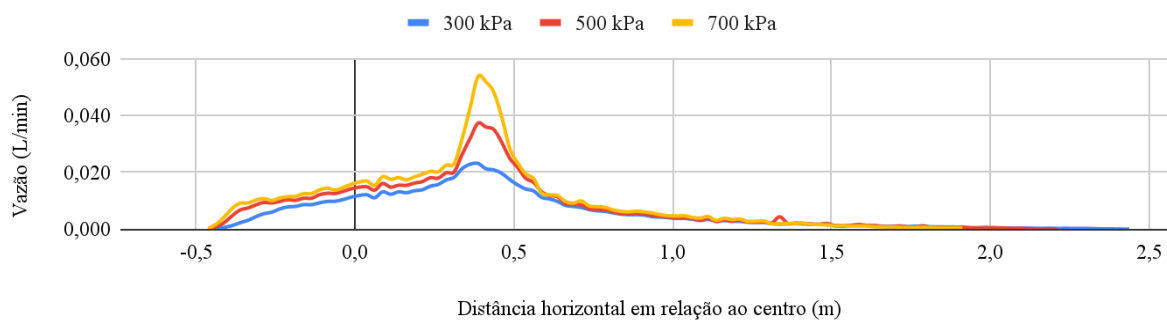


Figura 4.3.7 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 2,05 m/s para as diferentes pressões.

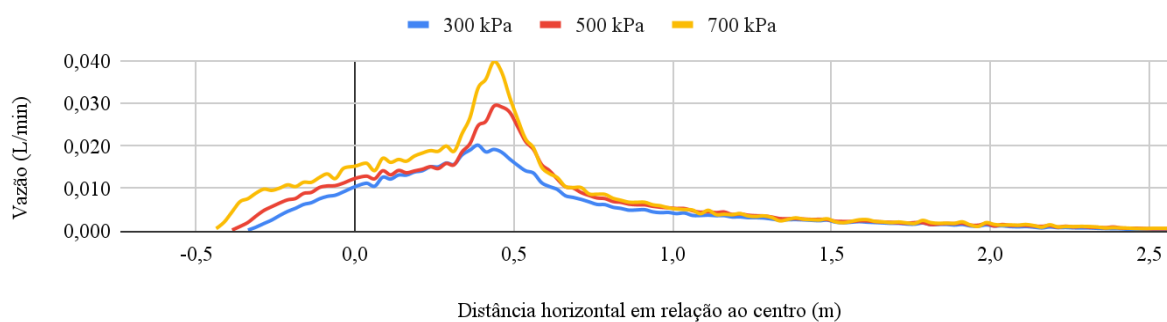


Figura 4.3.8 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 2,50 m/s para as diferentes pressões.

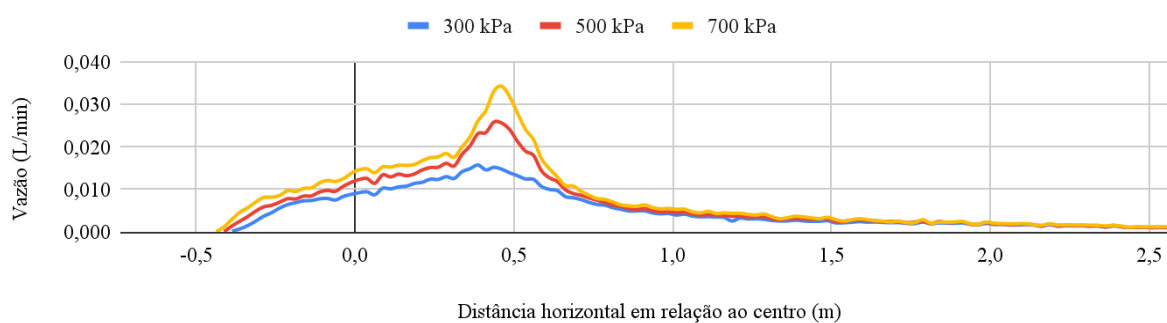
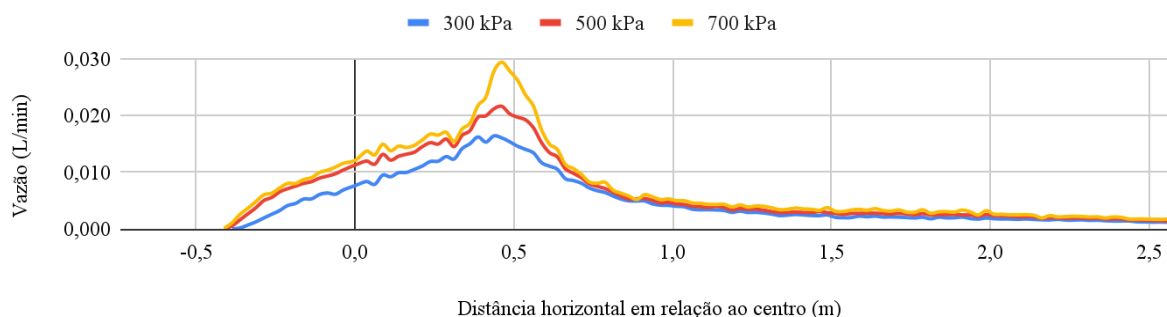
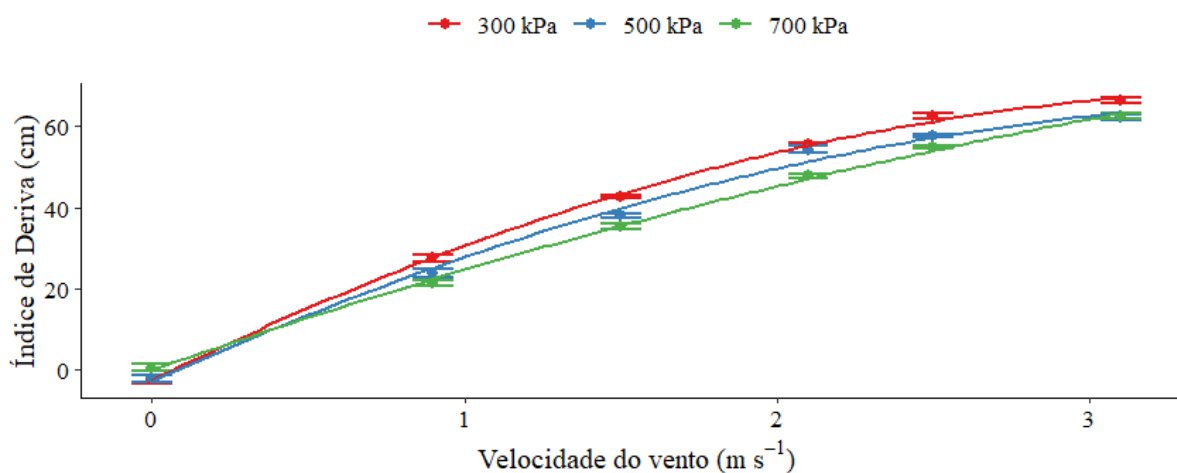


Figura 4.3.9 Perfis de distribuição volumétrica transversal para a velocidade do fluxo de ar de 3,13 m/s para as diferentes pressões.



A figura 4.3.10 apresenta o índice de deriva em relação à velocidade do vento para cada uma das pressões. Esse deslocamento do centro de massa, ou do perfil de maneira geral, chega até valores de 60 cm, indicando que o volume pulverizado foi muito deslocado e perdido por deriva. Comparado com os resultados encontrados por Ítmeç et al., 2022, analisando uma ponta de jato plano XR11002, ele obteve um valor de ID de 31,3 cm para 500 kPa em 2 m s^{-1} de velocidade de vento, evidenciando a maior susceptibilidade da ponta cônica estudada em relação ao vento. Existe um aumento com o aumento da velocidade do vento, mas uma certa estabilização quando a velocidade do vento está muito alta, podendo indicar que determinada parte da pulverização, como, por exemplo, gotas mais finas, é mais propensa à deriva mesmo em velocidades de vento mais baixas.

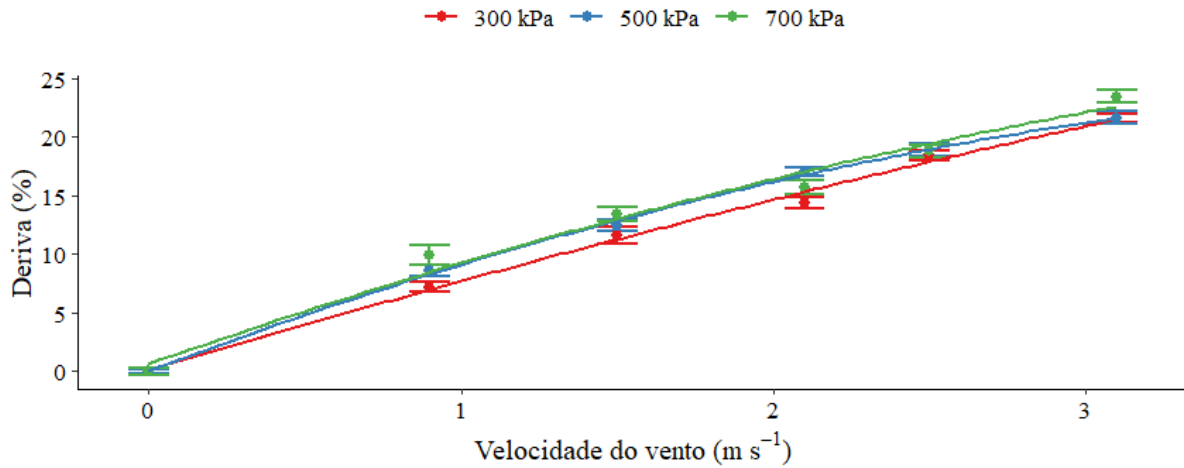
Figura 4.3.10. Índice de deriva, em cm, em relação a velocidade do vento, em m s^{-1} , para cada pressão.



A figura 4.3.11 apresenta a deriva em relação à velocidade do vento para cada pressão. Podemos observar uma crescente no aumento da deriva, que chega até 23%. Podemos observar

também que, para a pressão de 300 kPa, a deriva foi ligeiramente menor na maioria das velocidades, o que pode ser resultado de um espectro de gotas com gotas maiores.

Figura 4.3.11. Deriva, em %, em relação a velocidade do vento, em $m s^{-1}$, para cada pressão.



As equações 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 correspondem às curvas de 300, 500 e 700 kPa para a deriva, com os respectivos R^2 de 0,97, 0,97 e 0,94, e as equações 4.3.4, 4.3.5 e 4.3.6 correspondem às equações de cada pressão de 300, 500 e 700 kPa para o índice de deriva, os R^2 de 0,99, 0,99 e 0,99, respectivamente.

$$D_{300} = -0.0012 - 0.0794*x + 0.00333*x^2 \quad (4.3.1)$$

onde: D_{300} - Deriva em 300 kPa (μm); x - Velocidade do fluxo de ar ($m s^{-1}$).

$$D_{500} = -0.0007 - 0.1005*x + 0.00997*x^2 \quad (4.3.2)$$

onde: D_{500} - Deriva em 500 kPa (μm); x - Velocidade do fluxo de ar ($m s^{-1}$).

$$D_{700} = -0.0068 - 0.0932*x + 0.00724*x^2 \quad (4.3.3)$$

onde: D_{700} - Deriva em 700 kPa (μm); x - Velocidade do fluxo de ar ($m s^{-1}$).

$$ID_{300} = -2.5871 + 38.3049*x - 5.11191*x^2 \quad (4.3.4)$$

onde: ID_{300} - Índice de deriva em 300 kPa (μm); x - Velocidade do fluxo de ar ($m s^{-1}$).

$$ID_{500} = -2.9144 + 35.1968*x - 4.46384*x^2 \quad (4.3.5)$$

onde: ID_{500} - Índice de deriva em 500 kPa (μm); x - Velocidade do fluxo de ar ($m s^{-1}$).

$$ID_{700} = 0.0549 + 26.6611*x - 2.02771*x^2 \quad (4.3.6)$$

onde: ID_{700} - Índice de deriva em 700 kPa (μm); x - Velocidade do fluxo de ar ($m s^{-1}$).

4.4. Perfil de Barra

As avaliações dos perfis de sobreposição em barra foram feitas apenas até a velocidade do fluxo de ar de $2,1 \text{ m s}^{-1}$, pois, em testes prévios, observou-se que a distribuição não poderia ser completamente captada pela mesa, pois muito do líquido era deslocado além da capacidade da mesa, o que prejudicaria a avaliação e provavelmente superestimaria os valores de deriva e índice de deriva. Para o coeficiente de variação na faixa útil e total, SPD e índice de deriva foram utilizados o estimador robusto de variância HC3.

A tabela 4.4.1 apresenta vazão coletada, desvio de vazão e o coeficiente de variação na faixa total e útil para os perfis de distribuição volumétricas transversais em configuração de barra. O coeficiente de variação na faixa total apresenta diferenças entre as velocidades de vento, sendo menores para as velocidades de vento igual a 0 m s^{-1} e maiores para a velocidade de vento igual a $1,5 \text{ m s}^{-1}$, formando um nível máximo, assim como nos perfis individuais.

Tabela 4.4.1 Vazão coletada, em $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$, desvio de vazão, em %, coeficiente de variação (CV) na faixa total e útil, em %.

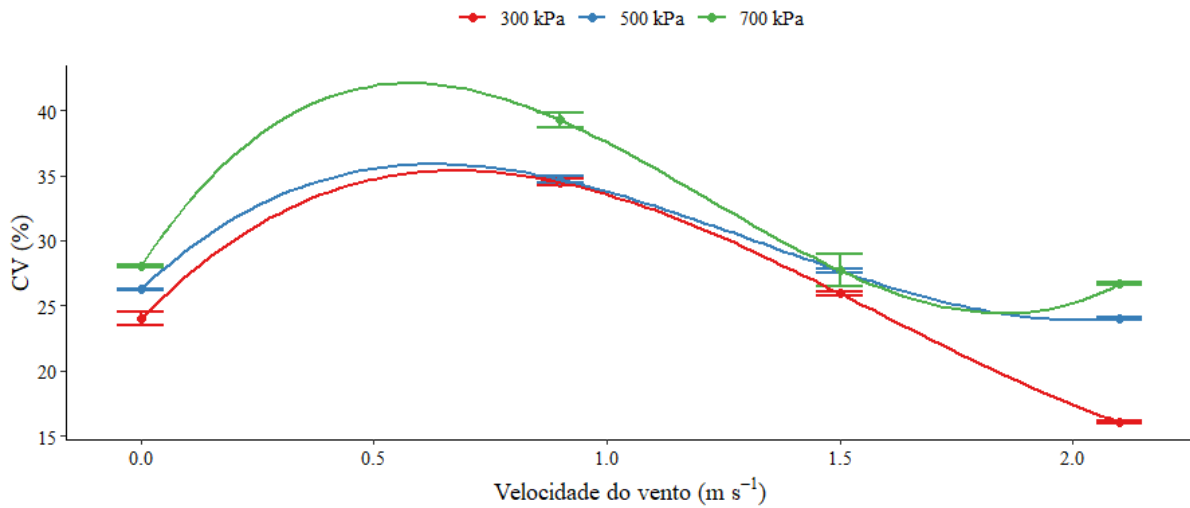
Pressão (kPa)	Vento (m/s)	Vazão Coletada (L/min)	Desvio de Vazão (%)	CV Total (%)	CV Útil (%)
300	0	2,25	-3,83	52,88 cA	23,99 cC
	0,9	2,23	-4,62	69,95 aA	34,47 aB
	1,5	2,16	-7,47	72,96 aA	25,95 bB
	2,1	2,16	-7,63	63,25 bB	16,09 dC
500	0	2,91	-3,39	56,29 cA	26,26 bB
	0,9	2,85	-5,49	68,08 bA	34,69 aB
	1,5	2,74	-8,93	73,36 aA	27,69 bA
	2,1	2,74	-8,91	66,67 bAB	24,02 cB
700	0	3,41	-4,23	55,72 cA	28,01 aA
	0,9	3,32	-6,63	66,68 bA	39,25 aA
	1,5	3,20	-10,26	75,43 aA	27,72 aA
	2,1	3,21	-9,79	69,41 bA	26,68 bA

Letras minúsculas, na vertical, representam uma comparação média das repetições entre velocidades do fluxo de ar. Letras maiúsculas, na vertical, representam uma comparação entre médias das repetições entre pressões. Quando ambas iguais não existe diferença significativa e, quando diferentes, existe diferença significativa, ao nível de 5% de significância.

O coeficiente de variação na faixa útil pode ser melhor visualizado na figura 4.4.1, que apresenta, em relação à velocidade de vento, para as pressões de 300, 500 e 700 kPa, o coeficiente de variação. Os valores encontrados estão além de qualquer padrão estabelecido como em Rietz (1997), que o valor de 9% é citado no trabalho como objetivo de uniformidade de distribuição, além da norma ISO 16122-2 (2024) que define 10% para aplicações em campo.

Considerando a pressão, pode-se notar que a pressão de 700 kPa acaba gerando, na velocidade de 0,9 e 2,1 m s⁻¹, o maior valor de coeficiente de variação, demonstrando uma pouca uniformidade nessa pressão, em relação às outras pressões. Além disso, velocidades de vento muito baixas acabam gerando picos de coeficiente de variação, que por consequência significam baixa uniformidade de distribuição. Também, velocidades de vento maiores acabam gerando uniformidades melhores de distribuição. O menor valor obtido para o coeficiente de variação útil foi na condição de 300 kPa a 2,1 m s⁻¹, evidenciando que pressões mais baixas geram melhores uniformidades, e existe, para uma determinada pressão, um ponto ótimo de velocidade de vento, onde se tem a melhor uniformidade de distribuição, não considerando a deriva. As equações 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 apresentam um coeficiente de variação na faixa útil para 300, 500 e 700 kPa, com o R² de 0,99, 0,99 e 0,97, respectivamente.

Figura 4.4.1. Coeficiente de variação (CV), em %, em relação a velocidade do fluxo de ar para cada pressão.



$$CV_{300} = 23.9923 + 37.0169*x - 34.77871*x^2 + 7.313939*x^3 \quad (4.4.1)$$

onde: CV_{300} - Coeficiente de variação em 300 kPa (%); x - Velocidade do fluxo de ar (m s⁻¹).

$$CV_{500} = 26.2593 + 33.9888*x - 35.34708*x^2 + 8.883400*x^3 \quad (4.4.2)$$

onde: CV_{500} - Coeficiente de variação em 300 kPa (%); x - Velocidade do fluxo de ar (m s⁻¹).

$$CV_{700} = 28.0130 + 54.4804*x - 61.96361*x^2 + 17.009051*x^3 \quad (4.4.3)$$

onde: CV_{700} - Coeficiente de variação em 300 kPa (%); x - Velocidade do fluxo de ar (m s⁻¹).

As figuras 4.4.2, 4.4.3 e 4.4.4 apresentam os perfis de distribuição volumétricos transversais em configurações de barra, com as três pontas estudadas, em cada velocidade do fluxo de ar para as pressões de 300, 500 e 700 kPa, respectivamente.

Pode-se observar que, independentemente da velocidade do vento, a distribuição volumétrica não é muito uniforme, formando picos de alta e vales de baixa vazão por distância horizontal, que é indicado pelo CV acima de 10% na faixa útil. O aumento da velocidade do vento gera um deslocamento que já foi observado no perfil de distribuição individual. Também aconteceu que, na velocidade de vento mais baixa, a variação entre picos e vales da distribuição é maior do que quando se tem velocidades maiores de vento, já indicado pelo CV da faixa útil na figura 4.4.1.

O mesmo princípio que é observado no perfil individual também acontece na sobreposição, que parte do jato intercepta o que foi desviado pelo vento, e o perfil de sobreposição resultante desse deslocamento pode ser observado aqui. A interceptação das gotas derivadas dos primeiros bicos mais próximos do ventilador é interceptada pelos jatos dos bicos subsequentes, o que acaba também gerando um deslocamento do pico de vazão.

Figura 4.4.2 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada velocidade do vento, para a pressão de 300 kPa.

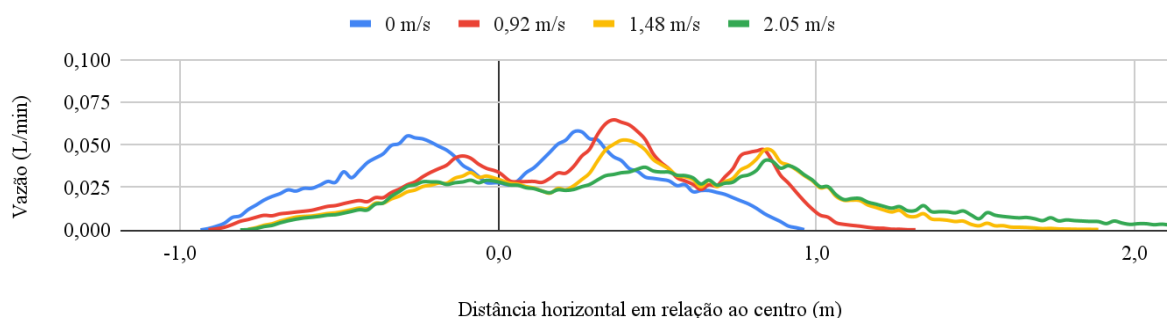


Figura 4.4.3 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada velocidade do vento, para a pressão de 500 kPa.

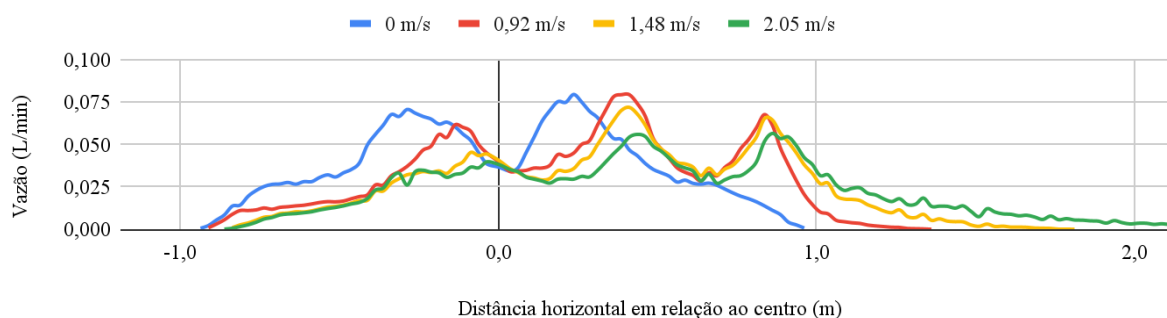
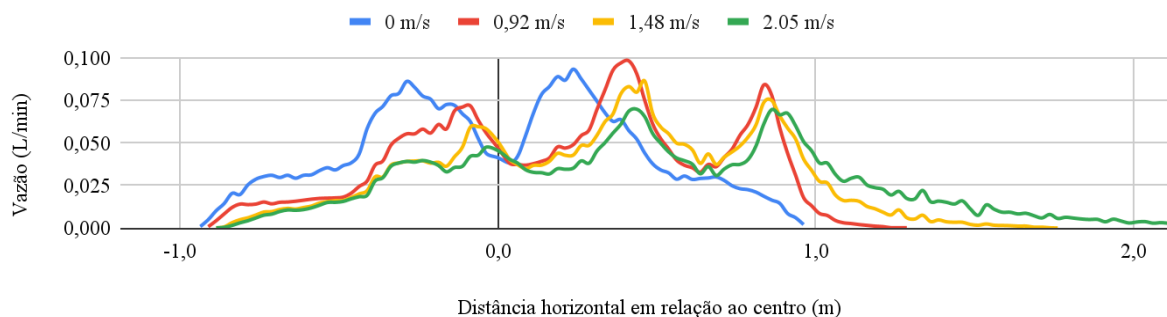


Figura 4.4.4 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada velocidade do vento, para a pressão de 700 kPa.



As figuras 4.4.5, 4.4.6, 4.4.7 e 4.4.8 apresentam a distribuição volumétrica em relação a pressão para as velocidades de fluxo de ar de 0, 0,92, 1,48, 2,05, 2,50 e 3,13, respectivamente. O mesmo comportamento observado no perfil de distribuição individual pode ser observado aqui, em relação à pressão, que é o aumento do pico de vazão com o aumento da pressão, mesmo sem vento, gerando um CV na faixa útil maior para 700 kPa, independentemente da pressão.

A região de sobreposição dos jatos dos bicos acaba gerando os picos de vazão observados. Isso pode ser explicado pelos perfis de distribuição individuais não terem uma forma triangular que facilitaria assim a sobreposição, para uma distribuição mais uniforme. Como o perfil individual tem um platô central e uma distância muito pequena nas extremidades com uma redução gradual de vazão. Assim, a distância ideal entre bicos onde teria a complementaridade das vazões é muito restrita e não é a estudada aqui.

Figura 4.4.5 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada pressão, para a velocidade do fluxo de ar de 0 m s^{-1} .

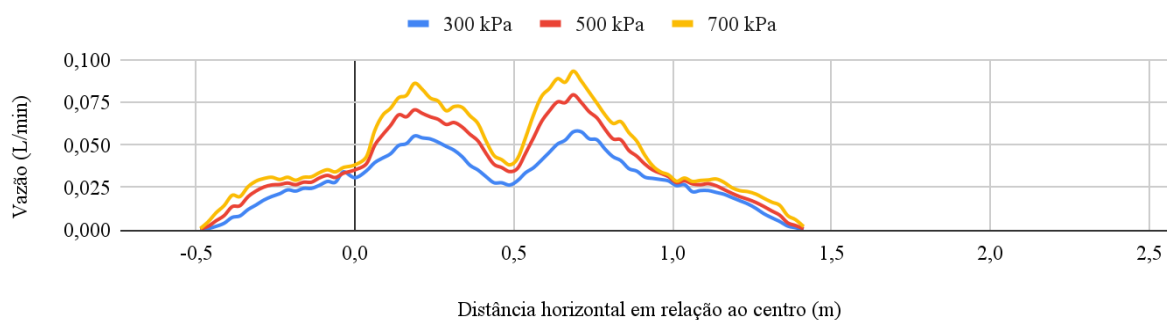


Figura 4.4.6 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada pressão, para a velocidade do fluxo de ar de $0,9 \text{ m s}^{-1}$.

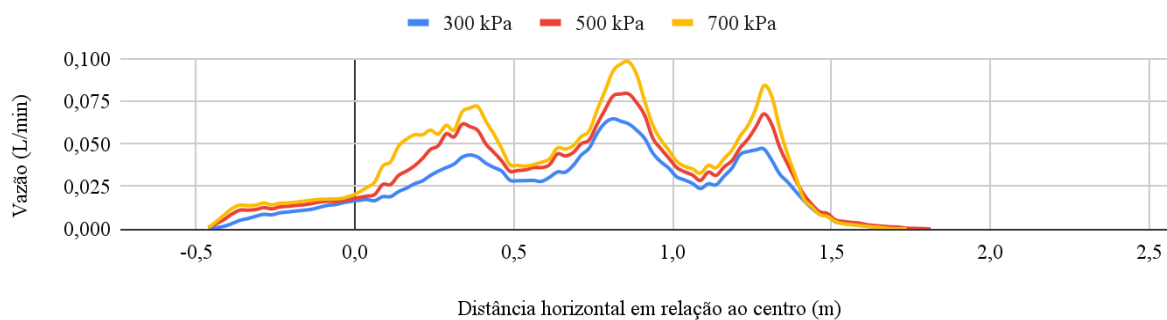


Figura 4.4.7 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada pressão, para a velocidade do fluxo de ar de $1,5 \text{ m s}^{-1}$.

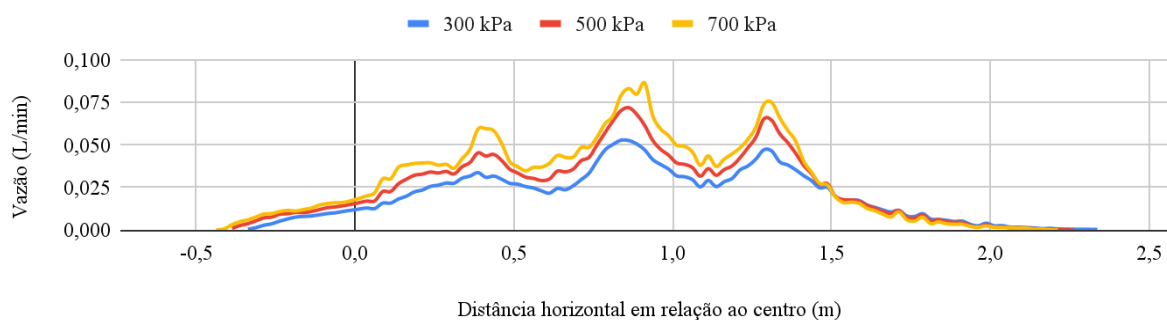
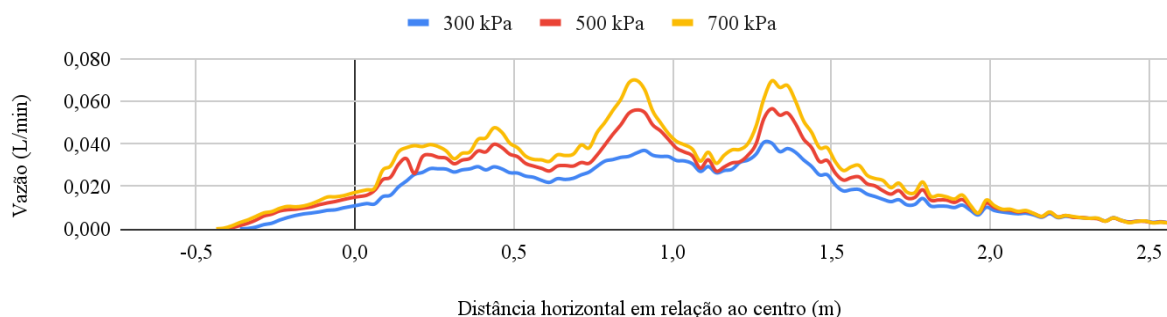


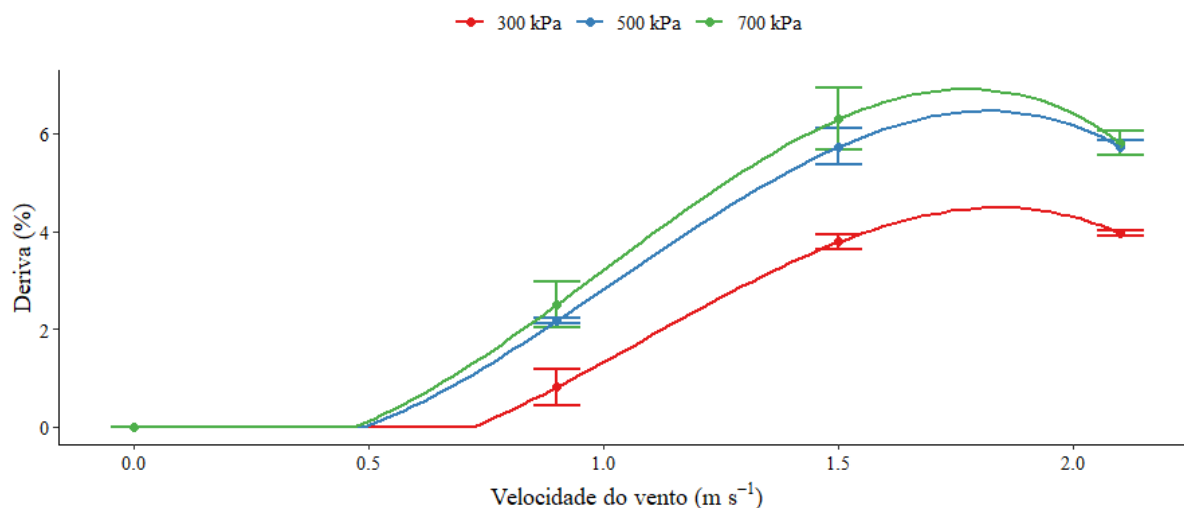
Figura 4.4.8 Distribuição volumétrica transversal em barra para cada pressão, para a velocidade do fluxo de ar de $2,1 \text{ m s}^{-1}$.



A figura 4.4.8 apresenta a regressão cúbica para a deriva em relação à velocidade do vento para cada pressão. Pode-se observar que a regressão nos dá que, até uma certa intensidade de vento, não há deriva estatisticamente relevante. Além disso, não há uma diferença muito grande entre os pontos de $1,5$ e $2,1 \text{ m s}^{-1}$, indicando que as gotas mais suscetíveis à deriva já são totalmente carregadas a partir de $1,5 \text{ m s}^{-1}$, e a deriva se estabiliza após isso. Esse comportamento não é observado nos perfis das pontas individuais, muito porque há uma interferência entre as pontas na barra, ou seja, os jatos das pontas acabam se colidindo e as gotas acabam se coalescendo e impedindo o carregamento das gotas pelo vento.

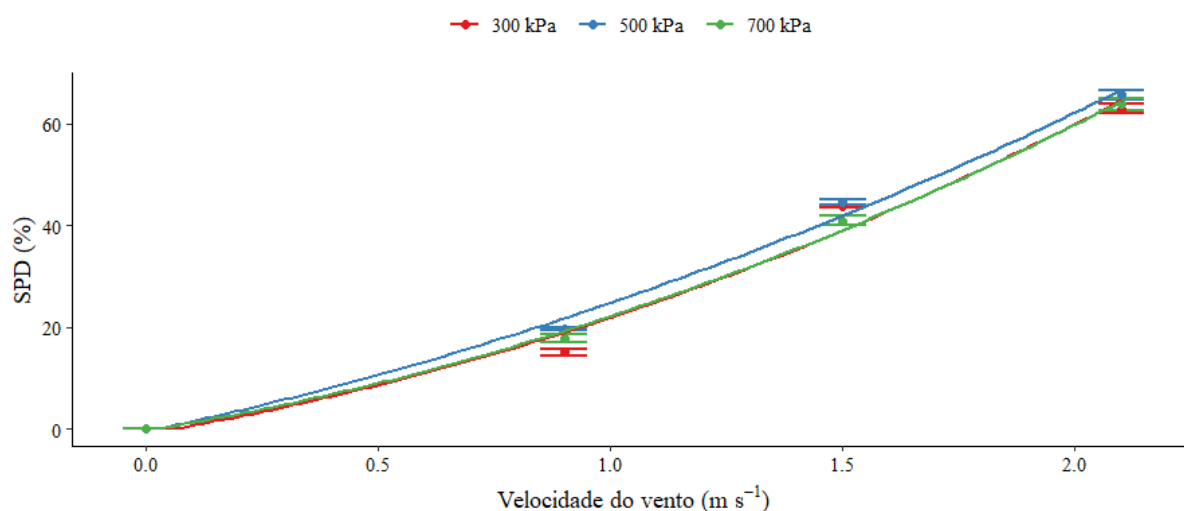
Esse resultado, porém, reflete apenas aquilo que a mesa não conseguiu captar de gotas por conta da limitação de espaço. Mas a deriva não consegue mostrar como o perfil se desloca e se altera com a velocidade do vento, o que pode ser muito bem observado nas figuras anteriores. Para a avaliação do deslocamento, é mais interessante o uso do *Spray Pattern Displacement*, que é o SPD, ou o índice de deriva, que avalia especificamente o deslocamento do perfil em relação ao centro da pulverização.

Figura 4.4.9. Deriva, em %, em relação a velocidade do fluxo de ar para cada pressão.



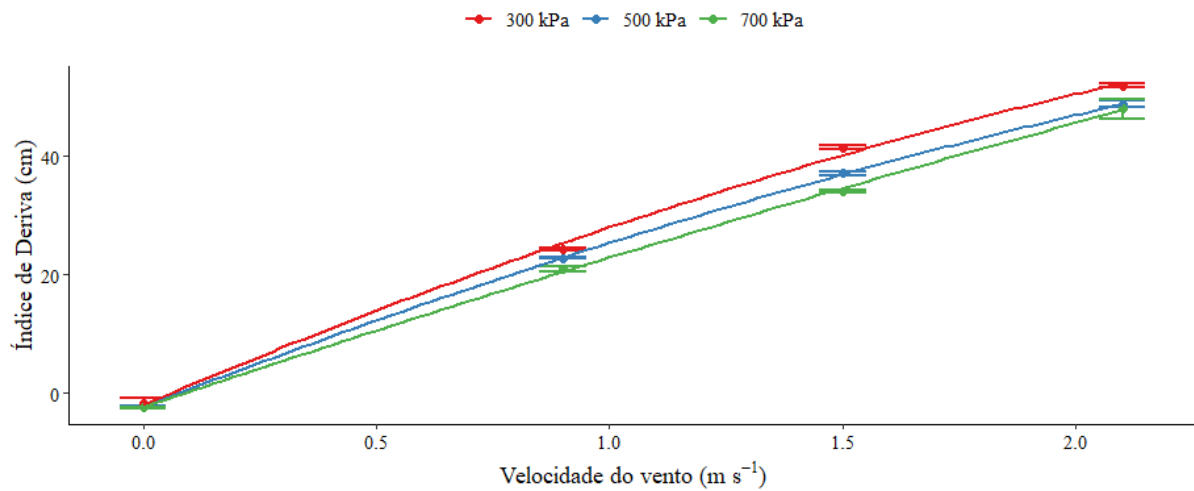
As figuras 4.4.9 e 4.4.10 apresentam, respectivamente, o *spray pattern displacement* (SPD) e o índice de deriva (ID) em relação à velocidade do vento para cada pressão. Podemos notar uma certa concordância entre os dois resultados, onde com o aumento da pressão há também um aumento dos indicadores. Pode-se observar que para o SPD, a pressão de 500 kPa teve maior desvio ou deslocamento do perfil. Isso pode ser explicado como o resultado de uma combinação mais prejudicial. Quando pensamos em 300 kPa, temos gotas maiores, e isso faz com que o perfil dentro da faixa útil se mantenha mais estável e para 700 kPa, a gota é menor, porém a energia depositada na gota é maior, mantendo assim o perfil dentro da faixa útil.

Figura 4.4.10. *Spray Pattern Displacement* (SPD), em cm, em relação a velocidade do fluxo de ar para cada pressão.



O índice de deriva mede todo o perfil de distribuição transversal como se fosse um objeto sólido e o valor é relativo ao centro de massa dessa distribuição. A pressão de 300 kPa teve o maior resultado de deslocamento da faixa, evidenciando que a menor energia cinética na gota acaba fazendo com que o vento tenha mais influência no seu deslocamento, no deslocamento de sua massa e, assim, reduzindo com o aumento da pressão.

Figura 4.4.11. Índice de deriva, em cm, em relação a velocidade do fluxo de ar para cada pressão.



As equações 4.4.4, 4.4.5 e 4.4.6 correspondem à regressão encontrada para a deriva para as pressões de 300, 500 e 700 kPa, com R^2 de 0,97, 0,99 e 0,95. As equações 4.4.7, 4.4.8 e 4.4.9 correspondem à regressão encontrada para a *Spray Pattern Displacement* para as pressões de 300, 500 e 700 kPa, com R^2 de 0,97, 0,99 e 0,99. As equações 4.4.10, 4.4.11 e 4.4.12 correspondem à regressão encontrada para a índice de deriva para as pressões de 300, 500 e 700 kPa, com R^2 de 0,99, 0,99 e 0,99.

$$D_{300} = 0.0572*x - 0.10184*x^2 + 0.031248*x^3 \quad (4.4.4)$$

onde: D_{300} -Deriva (%); x - Velocidade do fluxo de ar ($m s^{-1}$).

$$D_{500} = 0.0442*x - 0.10723*x^2 + 0.034879*x^3 \quad (4.4.5)$$

onde: D_{500} -Deriva (%); x - Velocidade do fluxo de ar ($m s^{-1}$).

$$D_{700} = 0.0467*x - 0.11835*x^2 + 0.039508*x^3 \quad (4.4.6)$$

onde: D_{700} -Deriva (%); x - Velocidade do fluxo de ar ($m s^{-1}$).

$$SPD_{300} = 0.0057 - 0.1479*x - 0.07724*x^2 \quad (4.4.7)$$

onde: SPD_{300} - *Spray Pattern Displacement*(%); x - Velocidade do fluxo de ar ($m s^{-1}$).

$$SPD_{500} = 0.0048 - 0.1926*x - 0.06024*x^2 \quad (4.4.8)$$

onde: SPD_{500} - *Spray Pattern Displacement*(%); x - Velocidade do fluxo de ar ($m s^{-1}$).

$$SPD_{700} = 0.0033 - 0.1493*x - 0.07569*x^2 \quad (4.4.9)$$

onde: SPD_{700} - Spray Pattern Displacement(%); x - Velocidade do fluxo de ar ($m\ s^{-1}$).

$$ID_{300} = -1.9420 + 33.7316*x - 3.74932*x^2 \quad (4.4.10)$$

onde: ID_{300} -Índice de Deriva (%); x - Velocidade do fluxo de ar ($m\ s^{-1}$).

$$ID_{500} = -2.3087 + 30.7710*x - 3.06137*x^2 \quad (4.4.11)$$

onde: ID_{500} -Índice de Deriva (%); x - Velocidade do fluxo de ar ($m\ s^{-1}$).

$$ID_{700} = -2.3097 + 26.4695*x - 1.23774*x^2 \quad (4.4.12)$$

onde: ID_{700} -Índice de Deriva (%); x - Velocidade do fluxo de ar ($m\ s^{-1}$).

CONCLUSÃO

Os valores de desvio de vazão real em relação ao nominal mantiveram-se acima dos limites recomendados pelas normas internacionais (5%), para todas as pressões utilizadas.

A realização deste trabalho permitiu caracterizar o desempenho das pontas de pulverização de jato cônico de jato vazio modelo CVE 9002, evidenciando as limitações e comportamentos deste modelo sob diferentes pressões e condições de vento.

Verificou-se que o aumento da pressão de trabalho (de 300 para 700 kPa) reduz significativamente o Diâmetro Mediano Volumétrico (DMV), mantendo a classificação das gotas na categoria fina e um incremento na porcentagem de volume de gotas menores que 100 μm , elevando o risco potencial de deriva.

As análises de uniformidade de distribuição volumétrica transversal demonstraram que o modelo estudado apresenta limitações para manter a qualidade da distribuição. Os coeficientes de variação (CV) na faixa útil em barra, mantiveram-se predominantemente acima dos limites recomendados pelas normas internacionais (10%), indicando uma distribuição irregular. A incidência de vento lateral manteve a irregularidade de distribuição, modificando os perfis individuais e criando áreas com maior e menor vazão.

A pressão de 300 kPa gerou menor percentual de deriva devido ao maior tamanho das gotas e apresentou os maiores índices de deslocamento da distribuição (SPD e Índice de Deriva), uma vez que as gotas possuem menor energia cinética para resistir à deflexão pelo vento. Por outro lado, pressões mais elevadas garantiram maior energia cinética ao jato principal, reduzindo o deslocamento do centro de massa, mas aumentaram as perdas por arraste de gotas finas.

Conclui-se, portanto, que a utilização dessas pontas exige um monitoramento rigoroso das condições de vento e um ajuste de pressão. O uso em condições de vento, mesmo em baixas velocidades (acima de 1,5 m/s), compromete a uniformidade, sugerindo que estratégias de redução de deriva e a escolha de pressões intermediárias são fundamentais para equilibrar a cobertura do alvo e a mitigação de perdas.

REFERÊNCIAS

- ALGAADI, K. A. Effect of nozzle height and type on spray density and distribution for a ground field sprayer. Gaadi, 2010.
- ASABE S572.1. 2009. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS.: Droplet Size Classification.
- ANKEN, T. et al. Transversal distribution of a spray drone applying different nozzles and measuring methods. Crop Protection, v. 179, p. 106603, 2024.
- BAIO, F. H. R.; PETTENAN, A. L.; CAMOLESE, H. S.; GABRIEL, R. R. F. Avaliação de depósitos de pulverização com bico duplo plano com indução de ar em dois estágios de desenvolvimento da soja. Idesia, v. 34, p. 1–6, 2016.
- BAIO, F. H. R. et al. Characterization of the droplet population generated by centrifugal atomization nozzles of UAV sprayers. AgriEngineering, v. 7, n. 1, p. 15, 2025.
- BALSARI, P.; MARUCCO, P.; TAMAGNONE, M. Valutazione di diverse tipologie di ugelli antideriva. Giornate Fitopatologiche, v. 1, p. 225–230, 2000.
- BARLOW, J. B.; RAE JR., W. H.; POPE, A. Low-Speed Wind Tunnel Testing. 3. ed. New York: John Wiley and Sons, 1999.
- BARNETT, G. S.; MATTHEWS, G. A. Effect of different fan nozzles and spray liquids on droplet spectra with special reference to drift control. International Pest Control, v. 34, n. 3, p. 81-85, 1992.
- BAYAT, A.; OZKAN, E.; DERKSEN, R. C.; FOX, R.; BRAZEE, R. Wind tunnel evaluation of air-assist sprayer operating parameters. ASAE Meeting Presentation, Paper n. 991117, 1999.
- BAYAT, A.; İTMEÇ, M.; ÖZLÜOYMAK, Ö. B. Development and assessment of a novel servo-controlled spraying system for real time adjustment of the orientation angle of the nozzles of a boom sprayer. Pest Management Science, v. 79, n. 11, p. 4439–4450, 2023.
- BOSCHIERO, G. Avaliação do potencial de deriva e uniformidade de distribuição utilizando ponta de pulverização com indução de ar em túnel de vento. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – ESALQ, USP, Piracicaba, 2022.
- BRION, V.; MENDONÇA, M. T.; SÁ, L. C.; CORDIOLI, J. A. Computational and experimental analysis of subsonic airfoils. Journal of Aerospace Technology and Management, v. 10, p. e0716, 2018.

BRONIARZ-PRESS, L.; WŁODARCZAK, S.; MATUSZAK, M. The effect of orifice shape and the injection pressure on enhancement of the atomization process for pressure-swirl atomizers. *Crop Protection*, v. 82, p. 65–74, 2016.

BUTLER-ELLIS, M. C.; BRADLEY, A. The influence of formulation on spray drift. *Aspects of Applied Biology*, v. 66, p. 251-258, 2002.

GADANHA JR., C. D. et al. Comparação de dois métodos para análise do espectro de tamanho de gotas gerado por uma ponta de pulverização. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 8, n. 3, p. e81614, 19 ago. 2025.

CERRUTO, Emanuele et al. A laboratory system for nozzle spray analysis. *Chem. Eng. Trans*, v. 58, p. 751-756, 2017.

CHEN, S. et al. Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV. *Agronomy*, v. 10, n. 2, p. 195, 2020.

CHOUDHARY, M. K. et al. Design Modifications of a Horizontal Spray Patternator. *Biological Forum – An International Journal*, v. 15, n. 2, p. 191–194, 2023.

CONTIERO, R. L.; BIFFE, D. F.; CATAPAN, V. Tecnologia de aplicação. In: BRANDÃO FILHO, J. U. T. et al. *Hortaliças-fruto*. Maringá: EDUEM, 2018. p. 401–449.

CROPLANDS. Optima Spraying Equipment Buyer's Guide. 2015. Disponível em: <http://croplands.com.au/>. Acesso em: 21 fev. 2015.

CROSS, J. V.; WALKLATE, P. J.; MURRAY, R. A.; RICHARDSON, G. M. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 2. Effects of spray quality. *Crop Protection*, v. 20, p. 333–343, 2001.

CUNHA, J. P. A. R. D. et al. Espectro de gotas de bicos de pulverização hidráulicos de jato plano e de jato cônico vazio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, p. 977-985, 2004.

DOUZALS, J. P.; AL HEIDARY, M. How spray characteristics and orientation may influence spray drift in a wind tunnel. *Aspects of Applied Biology*, n. 122, p. 271, 2014.

ECON – Tecnologia Antideriva ECON. Marília – SP, 2025. Disponível em: <https://econ.agr.br/>. Acesso em: 30 out. 2025.

ELWAKEEL, A. E. et al. Effect of spraying height, pressure, and nozzle type on flow characteristics of a field sprayer. *Al-Azhar Journal of Agricultural Engineering*, v. 1, n. 1, p. 29–38, 2021.

EMMA, B.; LQ, A.; YW, A. Evaluation of droplets size distribution and velocity pattern using Computational Fluid Dynamics modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 164, p. 104886, 2019.

FAQIRI, N. L.; KRISHNAN, P. (Eds.). Effect of Nozzle Pressure and Wind Condition on Spray Pattern Displacement of RF5 and 110-5R Nozzles. Sacramento, CA, July 29–August, 2005.

FAROOQ, M. et al. PA—precision agriculture: agricultural sprays in cross-flow and drift. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 78, n. 4, p. 347-358, 2001.

FENG, K. et al. Establishment of a static nozzle atomization model for forest barrier treatment. *Crop Protection*, v. 112, p. 201–208, 2018.

FERREIRA, B. et al. Title Pacote Experimental Designs (Portuguese). *Journal of Applied Mathematics*, 2018. doi:10.4236/am.2014.519280.

FOQUÉ, D.; NUYTENS, D. Effect of nozzle type and spray angle on spray deposition in ivy pot plants. *Pest Management Science*, v. 67, n. 2, p. 199–208, 2011.

GLASS, G. V.; PECKHAM, P. D.; SANDERS, J. R. Consequences of failure to meet assumptions underlying fixed effects analyses of variance and covariance. *Review of Educational Research*, v. 42, n. 3, p. 237–288, 1972.

HAOQI, L. et al. Study on atomization particle size characteristics of two-phase flow nozzle. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, v. 40, n. 4, 2021.

HASSEN, N. S.; SIDIK, N. A. C.; SHERIFF, J. M. Effect of nozzle type on spray drift in banding application. *Applied Mechanics and Materials*, v. 465–466, p. 520–525, 2004.

HASSEN, S. Effect of nozzle type, angle and pressure on spray volumetric distribution of broadcasting and banding application. *Journal of Mechanical Engineering Research*, v. 5, n. 4, p. 76–81, 2013.

HEGADE, K. P. N. et al. Design and study of mini wind tunnel for microsystems fluid interaction under low Reynolds number flows. *SN Applied Sciences*, v. 2, p. 850, 2020.

Hu, H., et al. 2021, Control effect on cotton aphids of insecticides sprayed with unmanned aerial vehicles under different flight heights and spray volumes. *Int. J. Precis. Agric. Avi.*, 4(1).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16122-2: Agricultural and Forestry Machinery. Inspection of Sprayers in Use. Part 2: Horizontal Boom Sprayers. Geneva: ISO, 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 22866: equipment for crop protection – methods for field measurement of spray drift. Geneva: ISO, 2005. 22p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 22856: Equipment for crop protection - Methods for the laboratory measurement of spray drift - Wind tunnels. Geneva: ISO, 2008. 22p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/DIS 22369-2: Crop protection equipment — Drift classification of spraying equipment - Part 2: Classification of field crop sprayers by field measurements. Geneva: ISO, 2010. 22p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/FDIS 5682-1: Equipment for crop protection — Spraying equipment — Part 1: Test methods for sprayer nozzles. 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5682-2: Equipment for crop protection — Spraying equipment — Part 2: Test methods to assess the horizontal transverse distribution for hydraulic sprayers. 2017.

İTMEÇ, M. et al. Assessment of spray drift with various adjuvants in a wind tunnel. *Agronomy*, v. 12, n. 10, p. 2377, 2022.

JULIATTI, F. C.; JULIATTI, B. C. M.; JACCOUD-FILHO, D. S. Technology of pesticide application in corn—nozzles, sprays volume, economic analysis and diseases control. In: *Fungicides: showcases of integrated plant disease management from around the world*. IntechOpen, 2013. p. 99–114.

KINCAID, D. C.; LONGLEY, T. S. A water droplet evaporation and temperature model. *Transactions of the ASAE*, v. 32, n. 2, p. 457–462, 1989.

KRISHNAN, P.; GAL, I.; KEMBLE, L. J.; GOTTFRIED, S. L. Effect of sprayer bounce and wind condition on spray pattern displacement of TJ60-8004 fan nozzles. *Transactions of the ASAE*, v. 36, n. 2, p. 261–264, 1993.

KUMAR, M. et al. Spray application characteristics of bio-pesticide solutions through hydraulic nozzles. *Journal of Agricultural Engineering*, v. 57, n. 4, p. 289–301, 2020.

LIU, Z. et al. The effects of spraying pressure and nozzle orifice diameter on atomizing rules and dust suppression performances of external spraying system. *Powder Technology*, v. 350, p. 62–80, 2019.

LIX, L. M.; KESELMAN, J. C.; KESELMAN, H. J. Consequences of assumption violations revisited: A quantitative review of alternatives to the one-way analysis of variance F test. *Review of Educational Research*, v. 66, n. 4, p. 579–619, 1996.

LORENZINI, G. Simplified modelling of sprinkler droplet dynamics. *Biosystems Engineering*, v. 87, n. 1, p. 1–11, 2004.

MA, X. et al. Orthogonal optimization design of structural parameters for bioaerosol sampler using computational fluid dynamics simulation and field experiments. *Aerosol Science and Technology*, v. 55, n. 1, 2021.

MARCHIONE, T.; ALLOUIS, C.; AMORESANO, A.; BERETTA, F. Experimental investigation of a pressure swirl atomizer spray. *Journal of Propulsion and Power*, v. 23, p. 1096–1101, 2007.

MARTIN, D. E.; LATEEF, M. A. Aerial electrostatic spray deposition and canopy penetration in cotton. *Journal of Electrostatics*, v. 90, p. 38–44, 2017.

MATTHEWS, G. A. *Pesticide Application Methods*. 3. ed. 2008.

MILLER, P. C. H.; BUTLER ELLIS, M. C. Effects of formulation on spray nozzle performance for applications from ground-based boom sprayers. *Crop Protection*, v. 19, p. 609–615, 2000.

MOREIRA JR., O. Construção e validação de um túnel de vento para ensaios de estimativa da deriva em pulverizações agrícolas. Tese (Doutorado) – UNESP, Botucatu, 2009.

NIST – NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. Method for measuring the diameter of polystyrene latex reference spheres by atomic force microscopy. Gaithersburg, MD: U.S. Department of Commerce, 2016.

NUYTENS, D. et al. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*, v. 97, n. 3, p. 333–345, 2007.

PANIGRAHI, K. et al. Performance evaluation of a fan-array wind tunnel for advanced aerodynamic studies. arXiv preprint, arXiv:2508.21130, 2025.

PLANAS, S. et al. Comparing standardized methods for potential drift assessment. In: 12th Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing, Valencia, 2013. p. 26–28.

RIETZ, S. Synopsis of Testing Plant Protection Equipment in the Federal Republic of Germany: legal requirements and publications of the federal biological research centre for agriculture and forestry (bba). *Berichte Aus Der Biologischen Bundesanstalt Für Land- Und Forstwirtschaft*, v. 25, p. 152, 1997.

ROUDINI, M.; WOZNIAK, G. Experimental investigation of spray characteristics of pre-filming air-blast atomizers II – influence of liquid properties. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, v. 13, n. 2, p. 679–691, 2019.

RU, Y. et al. Droplet size distribution of aerial nozzle for plant protection in wind tunnel and flight conditions. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016.

RU, Y. et al. Experimental study on spraying performance of biological pesticides in aerial rotary cage nozzle. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 13, n. 6, p. 1–6, 2020.

SDTF – SPRAY DRIFT TASK FORCE. Study No. A95-010, *Miscellaneous Nozzle Study*. EPA MRID No. 44310401, 1997.

SHAPIRO, S. S. & WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, v. 52, p. 591, 1965.

SHIRWAL, S. et al. Studies on operational parameters of different spray nozzles. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, v. 9, n. 1, p. 1267–1281, 2020.

SHRIGONDEKAR, H.; CHOWDHURY, A.; PRABHU, S. V. Characterization of solid-cone simplex mist nozzles. *Fire Safety Journal*, v. 111, 2020.

SIDAHMED, M. M.; AWADALLA, H. H.; HAIDAR, M. Symmetrical multi-foil shields for reducing spray drift. *Biosystems Engineering*, v. 88, p. 305–312, 2004.

SIJS, R. et al. Drop size measurement techniques for sprays: Comparison of image analysis, phase Doppler particle analysis, and laser diffraction. *AIP Advances*, v. 11, n. 1, 2021.

SUKUMARAN, S. et al. Effect of spraying pressure and usage on discharge rate and wear of hollow cone nozzle having different nozzle tip material. *Journal of Agricultural Engineering*, v. 50, n. 1, p. 1–8, 2013.

TRIPATHI, H.; D'SOUZA, P. M. Pressure effect on different spray characteristics of hydraulic energy hollow cone nozzles suitable for agricultural spraying. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, v. 9, n. 2, p. 2761–2767, 2020.

UK, S. Tracing insecticide spray droplets by sizes on natural surfaces. The state of the art and its value. *Pesticide Science*, v. 8, n. 5, p. 501–509, 1977.

UPADHYAY, A. et al. Study on discharge dynamics and droplet characteristics of various nozzle types for pesticide application. *Journal of Agricultural Engineering*, v. 61, n. 6, p. 735–752, 2024.

VALLET, A.; TINET, C. Characteristics of droplets from single and twin jet air induction nozzles. *Crop Protection*, v. 48, p. 63–68, 2013.

WHITE, H. A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica*, v. 48, n. 4, p. 817–838, 1980.

WILKINSON, L. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* by Wickham, H. *Biometrics*, v. 67, p. 678–679, 2011.

WOMAC, A. et al. Sprayer speed and venturi-nozzle effects on broadcast application uniformity. *Transactions of the ASAE*, v. 44, n. 6, p. 1437–1444, 2001.

XIA, Y. et al. Droplet size and velocity characteristics of water-air impinging jet atomizer. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 94, p. 31–43, 2017.

YADAV, H. K. Development of patternator and performance evaluation of different nozzles used in agricultural sprayers. Doctoral dissertation, GB Pant University of Agriculture and Technology, 2017.

YAO, W.; LAN, Y.; HOFFMANN, W. C. Droplet size distribution characteristics of aerial nozzles by Bell206L4 helicopter under medium and low airflow velocity wind tunnel conditions and field verification test. *Applied Sciences*, v. 10, n. 6, p. 2179, 2020.

ZEILEIS, A. Econometric computing with HC and HAC covariance matrix estimators. *Journal of Statistical Software*, v. 11, n. 10, p. 1-17, 2004.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ARAKI, K.; MORIYAMA, A.; TERADA, K.; MORI, S. Prediction of droplet velocity from droplet size in water spray. *Transactions ISIJ*, v. 20, p. 462–465, 1980.

BALDISSERA, A. dos S. Mapeamento de velocidades na seção de testes de um túnel de vento de baixa velocidade e dimensões reduzidas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2022.

BOX, G. E. P. Non-normality and tests on variances. *Biometrika*, v. 40, n. 3/4, p. 318–335, 1953.

CAMARA, F. T. da et al. Volumetric distribution and spectrum of drops of hydraulic nozzles of plane jet of expanded strip XR11003. *Engenharia Agrícola*, v. 28, p. 740–749, 2008.

CHAKER, M.; MEHER-HOMJI, C. B.; MEE, T. Inlet fogging of gas turbine engines. Part II: fog droplet sizing analysis, nozzle types, measurement, and testing. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 126, p. 559, 2004.

CORONA JR., J. J.; MESALHY, O.; CHOW, L.; LELAND, Q.; KIZITO, J. P. The best efficiency point of an axial fan at low-pressure conditions. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 13, n. 3, p. 1–17, 2021.

DELELE, M. A. et al. CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 55, n. 1, p. 16–27, 2007.

DOUZALS, J.-P.; CHALENDARD, M.-P. Vertical and horizontal spray distribution of hollow cone nozzles in a wind tunnel. In: 13th Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing, Lindau, Germany. SuproFruit, 2015. p. 32–34.

DOUZALS, J.-P.; AL HEIDARY, M.; SINFORT, C. Spray deposition in a wind tunnel: a kinetic approach of wind speed effects. *Aspects of Applied Biology*, p. 299–307, 2016.

GAWANDE, V. et al. Potential of precision farming technologies for eco-friendly agriculture. *International Journal of Plant & Soil Science*, v. 35, n. 19, p. 101–112, 2023.

GOMES, F. P. Curso de estatística experimental. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009.

GUIMARÃES, L. P. D. Análise do perfil de distribuição e potencial de deriva na ponta de pulverização em túnel de vento. Dissertação (Graduação) – ESALQ, USP, São Paulo, 2021.

KRUGER, G. R. et al. Spray drift of pesticides. University of Nebraska-Lincoln Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, 2013.

LONG, J. S.; ERVIN, L. H. Using heteroskedasticity-consistent standard errors in the linear regression model. *Sociological Methods & Research*, 2000.

MACKINNON, J. G.; WHITE, H. Some heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimators with improved finite sample properties. *Journal of Econometrics*, v. 29, n. 3, p. 305–325, 1985.

MALKANI, P. et al. Design of laboratory setup for performance assessment of weed detection and herbicide application system. *The Pharma Innovation Journal*, v. 12, n. 7S, p. 123–132, 2023.

MINOV, S. V. et al. Spray nozzle characterization using a backlighted high-speed imaging technique. *Aspects of Applied Biology*, n. 122, p. 353–361, 2014.

NETO, W. G. P. Volatilização e espectro de gotas do dicamba influenciada por diferentes formulações, adjuvantes e sais de glifosato. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – ESALQ, USP, Piracicaba, 2021.

PROTRACTOR ONLINE. Transferidor Online – Meça Ângulos no Navegador. Protractor Online, [s.d.]. Disponível em: <https://protractoronline.com/br/>. Acesso em: 24 jun. 2025.

RIBEIRO, J. R. D. et al. Espectro de gotas da ponta de pulverização TTI-110025 sob diferentes pressões de trabalho. *Brazilian Journal of Production Engineering*, v. 9, n. 2, p. 161–169, 2023.

SANCHAVAT, H. B. et al. Field evaluation of a tractor mounted boom sprayer. *Agricultural Engineering Today*, v. 41, n. 4, p. 67-71, 2017.

SMITH, D. B. Uniformity and recovery of broadcast sprays using fan nozzles. *Transactions of the ASAE*, v. 35, n. 1, p. 39-44, 1992.

VIANA, R. G. et al. Características técnicas de pontas de pulverização LA-1JC e SR-1. *Planta Daninha*, v. 25, n. 1, p. 211–218, 2007.

YOUNES, M.; GALAL-GORCHEV, H. Pesticides in drinking water. *Food and Chemical Toxicology*, v. 38, p. S87–S90, 2000.