

HUMBERTO SANTIAGO

SIMULAÇÃO DE PERDAS POR EVAPORAÇÃO NA PULVERIZAÇÃO AÉREA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

S235s
2016 Santiago, Humberto, 1984-
Simulação de perdas por evaporação na pulverização aérea /
Humberto Santiago. - Viçosa, MG, 2016.
xiii, 70f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Mauri Martins Teixeira.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.58-70.

1. Pulverização - Equipamento e acessório. 2. Pulverização. 3.
Produtos químicos agrícolas - Aplicação. 4. Evaporação. 5. Gotas. I.
Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II.
Título.

CDD 22 ed. 631.3

HUMBERTO SANTIAGO

SIMULAÇÃO DE PERDAS POR EVAPORAÇÃO NA PULVERIZAÇÃO AÉREA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

APROVADA: 04/08/2016

Edney Leandro da Vitória

Haroldo Carlos Fernandes
(Coorientador)

Murilo Aparecido Voltarelli

Williams Pinto Marques Ferreira

Mauri Martins Teixeira
(Orientador)

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

Ao Divino Espírito Santo e à minha família

*“Tendo amor e saúde, da vida eu não reclamo,
amo a vida que levo, e levo a vida que amo”.*

Tião Carreiro

AGRADECIMENTOS

Ao professor Mauri Martins Teixeira pela oportunidade, orientação e conselhos.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela realização do Programa de Pós-Graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte financeiro do trabalho.

Aos professores coorientadores Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier e Paulo Roberto Cecon pelas contribuições e sugestões.

À minha mãe, Genoveva Medeiros Santiago, ao meu pai, Eduardo Santiago (*in memoriam*,) e à minha irmã, Ana Paula Santiago.

Ao Divino Espírito Santo pela vida e pelos objetivos conquistados.

Aos funcionários da Mecanização Agrícola, Marcelo, Vantuil, Gil, Geraldo e Danilo.

Aos amigos e colegas da mecanização, Ronaldo, Juliana, Flora, Christian, Gustavo, Marconi, Cleunice, Bruno, Germano, Tiago, Paulo, Anderson, Wesley, Philipe, Remo, Larissa, Flávio e Natália.

Aos amigos da República Mói-Cana, Lucas, José, Enzo, Guilherme, Fernando, Antonione e João.

À minha esposa Daniella de Souza Almeida Santiago e sua família.

A todos os amigos das Repúblicas.

Aos demais que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho!

BIOGRAFIA

Humberto Santiago, filho de Eduardo Santiago e Genoveva Medeiros Santiago, nasceu no dia 27 de setembro de 1984, no município de Piracicaba, São Paulo. Em 2003, concluiu o ensino médio pela Escola Estadual Elias de Mello Ayres, em Piracicaba, São Paulo. Graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa (MG), no ano de 2011. Concluiu o Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, em 2013. No mesmo ano, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, área de concentração Mecanização Agrícola, em nível de doutorado. Em agosto de 2016, submeteu-se à defesa pública de tese, para a obtenção do título de Doctor Scientiae e foi aprovado para professor de Máquinas Agrícolas na Universidade Federal Oeste da Bahia (UFOB) para o curso de Agronomia, Barra – BA.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS E QUADROS	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
OBJETIVOS GERAIS.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1. Evaporação e Deriva	7
2.1.1. Tensão superficial da calda de pulverização.....	11
2.1.2. Redução da evaporação e da deriva	12
2.2. Condições climáticas e contaminação na aplicação de agrotóxicos.....	14
2.3. Tecnologia de aplicação de agrotóxicos	18
2.4. Aviação agrícola	19
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1. Estrutura do simulador de pulverização aérea.....	24
3.2. Determinação da curva característica do ventilador	28
3.3. Determinação das condições psicrométricas no túnel de vento	30
3.4. Espectro de gotas.....	34
3.5. Determinação do diâmetro da mediana volumétrica.....	35
3.6. Amplitude relativa no diâmetro das gotas	35
3.7. Determinação das perdas por evaporação	36
3.8. Determinação da evaporação da gota em superfície foliar.....	38
3.9. Estimativa de deriva pelo <i>software</i> DRFITSIM e análise da velocidade terminal da gota influenciada pela evaporação	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1. Curva característica do ventilador	41
4.1.1. Caracterização do atomizador rotativo em laboratório	42
4.1.2. Espectro de gotas proporcionadas pelo atomizador rotativo em diferentes déficits de pressão de vapor e vazão do atomizador	43
4.1.3. Perdas por evaporação em diferentes déficits de pressão de vapor e vazão da ponta.....	49

4.2. Perdas por evaporação da gota depositada em superfície foliar	51
4.3. Perdas por deriva em diferentes diâmetros de gotas por influências do deficit de pressão de vapor do ar.....	53
5. CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do simulador para avaliação da pulverização aérea.	24
Figura 2 - Esquema do simulador de pulverização aérea acoplado ao trator, para acionar o ventilador com condução do ar ao túnel de vento.	24
Figura 3 – Estrutura de simulação para pulverização aérea com câmara climática com vista lateral (a), vista superior (b) e vista frontal (c) da câmara climática.	25
Figura 4 – Atomizador rotativo da pulverização aérea (a) e saída de ar e do jato de pulverização (b).	26
Figura 5 - Rotação do atomizador (rpm) em relação à velocidade de voo (mph) da aeronave para formação do espectro de gotas.	26
Figura 6 – Ângulo da pá (a), estrutura do atomizador rotativo (b) e distribuição do atomizador na barra de pulverização da aeronave Ipanema (c).	27
Figura 7 - Estrutura para avaliação do ventilador e construção da curva característica do ventilador (pressão, vazão e potência exigida).	28
Figura 8 – Esquema do circuito ligado da placa arduino duemilanove com sensores.	32
Figura 9 – Faixa de deficit de pressão de vapor do ar, o qual demonstra a variação do ambiente em ter capacidade de absorver vapor d'água da pulverização (ZOLNIER, 2010)	34
Figura 10 – Unidade de restrição variável (vru) de controle de vazão	35
Figura 11 - Diâmetro da mediana volumétrica (dv_{50}).	35
Figura 12 – Desenho esquemático da câmara climática e do sistema de avaliação da gota em superfície foliar para evaporação da gota.	39
Figura 13 - Curva de calibração do ventilador em função da vazão de ar, da potência de acionamento (a) e da pressão estática do ar (b).	41
Figura 14 – Curva de calibração do manômetro utilizado na determinação da pressão da calda direcionada ao atomizador rotativo.	42
Figura 15 – Espectro de gota variando de 100 μm para de 500 μm , divididos em faixa de 50 μm , em diferentes vazões e deficit de pressão de vapor do ar (DPV), **1%, *5%, ***10%, ****15% e ^{ns} não significativo pelo teste t.	45

Figura 16 – Variação do Dv_{10} , Dv_{50} , Dv_{90} e SPAN, em relação à vazão da calda e o deficit de pressão de vapor do ar (DPV), **1%, *5%, e ^{ns} não significativo pelo teste t.	48
Figura 17 – Perda real e perda máxima de calda por evaporação em função da vazão e do deficit de pressão de vapor do ar (DPV), **1%, *5%, e ^{ns} não significativo pelo teste t, X = DPV e Y = VAZÃO.	50
Figura 18 - Tempo de evaporação da gota em relação ao déficit de pressão de vapor do ar. Significativo a ***1%.	52
Figura 19 – Tempo de evaporação da gota e redução de sua área de cobertura em relação ao deficit de pressão de vapor do ar.	53
Figura 20 – Análise computadorizada da deriva em relação ao espectro de gotas formado na pulverização aérea em diferentes déficits de pressão de vapor do ar, deslocamento das gotas com vazão de $3,58 \text{ L min}^{-1}$ (a) e deslocamento da gota com vazão de $7,00 \text{ L min}^{-1}$ (b).	54

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Parâmetros físicos e químicos de agrotóxicos	8
Tabela 2 - Limites de temperatura e umidade relativa do ar para diferentes tamanhos de gotas.....	15
Tabela 3 – Limites de agrotóxicos (ppm) em grão de milho em diferentes regiões do mundo	17
Tabela 4 – Codificação dos ensaios de acordo com DCCR.....	23
Tabela 5 – Matriz de planejamento de acordo com o DCCR	23
Tabela 6 – Dados técnicos da placa Arduino duemilanove.....	31
Quadro 1 – Vazão do atomizador rotativo em diferentes pressões.....	43
Quadro 2 - Análise de variância do tempo de evaporação da água em relação ao DPV.....	51
Quadro 3 – Estimativa do tempo de evaporação das gotas de 0,5 µL em função do déficit de pressão (DPV) de vapor do ar	52

RESUMO

SANTIAGO, Humberto, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2016. **Simulação de perdas por evaporação na pulverização aérea**. Orientador: Mauri Martins Teixeira, Coorientadores: Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier e Paulo Roberto Cecon.

Nas últimas décadas, o uso indiscriminado de agrotóxicos em atividades agrícolas tem sido motivo de preocupação por parte dos pesquisadores que visam promover soluções para a redução do consumo desses produtos. A evaporação e deriva e as principais perdas, e é influenciada pelas condições psicrométricas do ar, como temperatura, umidade e deficit de pressão de vapor. Os métodos para quantificar as perdas por evaporação de agrotóxicos são poucos conhecidos e difíceis de serem avaliados, portanto, objetivou-se, com este trabalho, quantificar as perdas por evaporação e analisar o espectro de gotas em cinco condições de deficit de pressão de vapor do ar e cinco vazões. O experimento foi conduzido em uma câmara climática, com condições psicrométricas controladas, foi utilizado análise de variância com significância de 5% de probabilidade pelo teste t, no Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) e as médias quantitativas foram mensuradas por superfície de resposta. Os parâmetros avaliados foram Porcentagem de Volume de Gotas, com diâmetro na faixa < 100 μm , 100 – 150 μm , 150 – 200 μm , 200 – 250 μm , 250 – 300 μm , 300 – 350 μm , 350 – 400 μm , 400 - 450 μm , 450 - 500 μm , > 500 μm , Dv_{10} , Dv_{50} , Dv_{90} , SPAN, “Perda Real” e “Perda Máxima por Evaporação”. O ensaio para evaporação de gotas em superfície foliar em câmara climática automatizada foi realizado utilizando-se uma microseringa eletrônica para a deposição da gota sobre a superfície da folha de café arábica. O experimento foi conduzido em esquema fatorial (5 x 1), ou seja, cinco deficits de pressão de vapor e uma calda de pulverização (água) em delineamento inteiramente casualizado (DIC). Na análise de variância dos dados significativos a 5% de probabilidade pelo teste t, as médias quantitativas foram mensuradas por regressão quadrática. A deriva foi avaliada em relação ao diâmetro da faixa de 100 μm , 200 μm , 300 μm , 400 μm e 500 μm , em diferentes deficits de pressão de vapor do ar, a análise de variância dos dados significativos a 5% de probabilidade pelo teste t, foi testado as médias quantitativas por regressão quadrática e linear. Pode ser observado nos resultados que, para todas as gotas, independentemente do seu diâmetro, ocorre evaporação, e que a

quantidade de perda máxima da calda de pulverização por evaporação pode chegar a 17%, quando o deficit de pressão de vapor atingir 35 hPa. No experimento, constatou-se que o tempo de evaporação de uma gota na superfície da folha se reduz em 81%, quando o deficit de pressão de vapor do ar varia de 7 hPa a 35 hPa. O tempo de evaporação de uma gota foi de, no máximo, 18 minutos, visto que esse potencial evaporativo depende da interação entre a água e o Deficit de Pressão de Vapor do ar (DPV). As gotas de 100 μm derivam em até 12 metros na condição psicrométrica de 7 hPa. O aumento da vazão de 3,58 L min^{-1} para 7 L min^{-1} aumenta o potencial deriva em razão do aumento do número gotas de até 43% dentro da mesma classe de diâmetro. Portanto, a pulverização aérea deve ser monitorada constantemente em razão que suas perdas por evaporação e deriva pode ser intensificada e irá prejudicar a qualidade da aplicação, a condição financeira do produtor e a contaminação da fauna e da flora.

ABSTRACT

SANTIAGO, Humberto, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, august 2016. **Simulation of evaporation losses in aerial spraying.** Advisor: Mauri Martins Teixeira, Co-advisors: Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier and Paulo Roberto Cecon.

In recent decades, the indiscriminate use of pesticides in agricultural activities has been of concern on the part of researchers to promote solutions to reduce the consumption of these products. Evaporation and drift and the main losses and is influenced by the psychrometric air conditions such as temperature, humidity, vapor pressure deficit. Methods to quantify the losses by evaporation of pesticides are little known and difficult to assess, so if aimed with this work to quantify the losses by evaporation and analyze the spectrum of drops in five vapor pressure deficit conditions air-five flow. The experiment was conducted in a climate chamber with controlled psychrometric conditions, we used analysis of variance with significance level of 5% probability by the t test, and the Delineation Central Composite Rotational (CCRD) and quantitative averages were measured by response surface. The parameters evaluated were percentage drops volume, with a diameter in the range $< 100 \mu\text{m}$, $100 - 150 \mu\text{m}$, $150 - 200 \mu\text{m}$, $200 - 250 \mu\text{m}$, $250 - 300 \mu\text{m}$, $300 - 350 \mu\text{m}$, $350 - 400 \mu\text{m}$, $400 - 450 \mu\text{m}$, $450 - 500 \mu\text{m}$, $> 500 \mu\text{m}$, Dv_{10} , Dv_{50} , Dv_{90} , SPAN, "Real Loss" and "Maximum Loss by Evaporation". The assay for droplet evaporation of leaf surface automated climatic chamber was performed using an electronic microsyringe for depositing the droplet onto the surface of sheet Arabica coffee. The experiment was conducted in a factorial scheme (5×1), five vapor pressure deficits and a spray solution (water) in a completely randomized design (CRD). In the analysis of variance of the significant data to 5% probability by the t test, the quantitative medium were measured by quadratic regression. The drift was evaluated in relation to the diameter of $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$, $400 \mu\text{m}$ e $500 \mu\text{m}$ in different deficits air vapor pressure, analysis of variance of the significant data at 5% probability by t test, was tested by quantitative medium quadratic and linear regression. It can be seen in the results, for all the drops, regardless of its diameter, is evaporation, and the maximum amount of the evaporative spray solution loss can reach 17% when the vapor pressure deficit to 35 hPa. In the experiment, it was found that the evaporation time for a drop on the surface of the sheet is reduced by 81%, when the deficit of

air vapor pressure ranges from 7 hPa to 35 hPa. The evaporation time was a drop of no more than 18 minutes, whereas this potential depends on the interaction between evaporative water and air Deficit Vapor Pressure (DPV). The droplets of 100 μm derive up to 12 meters in piscrométrica condition 7 hPa. The increased flow rate of 3.58 L min^{-1} for 7 L min^{-1} increases the potential drift due to the increased number of drops to 43% within the same diameter class. Therefore, aerial spraying should be constantly monitored because their losses by evaporation and drift can be intensified and will damage the quality of implementation, the financial condition of the producer and the contamination of the fauna and flora.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por alimento no mundo, bem como a dificuldade de produção de alimentos frente às alterações climáticas que vêm ocorrendo nos últimos anos, tem levado os pesquisadores a busca de soluções concernentes à pulverização agrícola, com o objetivo de reduzir o efeito das condições psicrométricas do ar na evaporação e deriva de solução aquosa. O uso intensivo de defensivos agrícolas tem gerado crescente preocupação à sociedade, a qual, por sua vez, tem pressionado as autoridades de planejamento agrícola e ambiental, exigindo novas metodologias de aplicação que minimizem a perda potencial de agrotóxico para a atmosfera, visando à redução da contaminação ambiental e dos riscos à saúde dos trabalhadores, consumidores e animais.

A redução no uso dos agrotóxicos deve ser fundamentada na diminuição de perdas, principalmente aquelas provenientes da evaporação e deriva da calda de pulverização. Essas perdas são responsáveis por cerca de 70 mil intoxicações agudas e crônicas que podem ter como consequência o óbito de indivíduos a elas expostos, e um número muito maior de doenças agudas advindas do envenenamento por agrotóxicos. Além do risco de intoxicação direta, há também outros efeitos adversos à saúde humana, como produtos dispersos no ar, além de resíduos nos alimentos e nas águas de rios e de lençóis freáticos. O acúmulo de agrotóxicos no ambiente, bem como o contato destes com seres humanos, pode levar a alterações genéticas que aumentam o índice de câncer e da má-formação de fetos em gestantes (BRASIL, 2011). Por isso, os métodos utilizados para aplicação de defensivos agrícolas devem ser alterados e fiscalizados, uma vez que essa concentração de agrotóxicos no ar e no corpo humano vem se intensificando cada vez mais, podendo tomar proporções incomensuráveis futuramente.

A evaporação e deriva são fatores que devem ser estudados constantemente, como forma de trazer para a sociedade respostas sobre a segurança do uso de agrotóxicos. Para que isso ocorra, é necessário um trabalho de conscientização junto aos aplicadores sobre tecnologias de aplicação e toxicologia desses produtos, para que se consiga efetuar a aplicação de forma mais precisa e exata.

A ineficiência da aplicação de agrotóxicos está condicionada a uma série de fatores que, muitas vezes, não são levados em consideração no momento da

pulverização, tais como: se as condições climáticas estão favoráveis; se o pulverizador está apto para ser utilizado; se o aplicador tem conhecimento sobre as formulações dos agrotóxicos; especificidades sobre o local do alvo (se a praga é ou não móvel, se o patógeno tem ou não ciclo rápido de esporulação e qual espécie de planta daninha está sendo controlada dentro da lavoura); qual a ponta de pulverização a ser usada, bem como a asseveração quanto ao diâmetro da gota, pressão, vazão e o volume de calda da ponta ideal para determinada pulverização; qual sistema de pulverização deve ser utilizado para aquela cultura e verificação da regulação e calibração do pulverizador; se a mão de obra é especializada e em conformidade com a normatização padrão da *Food and Agricultural Organization of the United Nations* FAO e União Europeia UE, bem como certificar-se de que a formulação do agrotóxico pode ser misturada sem que haja efeitos antagônicas entre os produtos.

O escasso conhecimento acerca das técnicas e dos procedimentos adequados para a aplicação de agrotóxicos irá condicionar a deposição do produto em concentração inadequada no alvo e no ambiente, trazendo efeitos nocivos para o solo, onde agrotóxico irá permanecer por vários anos, e para as águas de rios e lençóis freáticos, que, contaminadas, serão utilizadas para irrigar alimentos ou até mesmo evaporarão, condensando-se em forma de “chuva química” em centros urbanos, atingindo, assim, o topo da cadeia alimentar.

O Brasil é o maior consumidor mundial de agrotóxicos e isso ocorre por causa de uma série de benefícios fiscais, financeiros e técnicos voltados para a utilização desses insumos na agricultura. No ano de 2012, foram registrados cerca de 1.400 agrotóxicos, 430 ingredientes ativos e 750 produtos técnicos no país, movimentando, apenas no ano de 2015, um montante de 12 bilhões de dólares, ultrapassando a marca de 1 milhão de toneladas, o equivalente a 5,2 kg de agrotóxico por habitante. As principais agências fiscais brasileiras consideram que o uso indiscriminado de agrotóxico nas lavouras está relacionado ao manejo errôneo da cultura e à negligência das técnicas corretas no momento da aplicação (CARNEIRO et al., 2015; VIERO et al., 2016).

Os agrotóxicos alteram as condições físicas e químicas da calda de pulverização em relação à tensão superficial e à pressão de vapor do líquido, que irá intensificar a evaporação e deriva devido ao efeito psicrométrico do ambiente. A evaporação das gotas na atmosfera está intrinsecamente relacionada ao déficit

de pressão de vapor d'água (DPV), parâmetro atmosférico que expressa a diferença entre a pressão exercida pela saturação de vapor d'água no ar e a pressão parcial de vapor d'água, sendo estas diretamente relacionadas com a umidade relativa e a temperatura do ar, sendo, assim, o principal efeito do ambiente sobre a gota de pulverização. Ele também irá determinar o potencial evaporativo da atmosfera e a duração das gotas em transporte e das já depositadas no alvo da aplicação (BEDOS et al., 2010; CARLSEN et al., 2006a).

A evaporação ocorre em qualquer condição de temperatura, umidade e pressão. Entretanto, alguns fatores podem intensificar a ocorrência desse fenômeno, por exemplo, a elevada superfície específica das gotas. Para ocorrer a evaporação, é necessário que a energia cinética das moléculas de água reduza a intensidade das forças intermoleculares e consiga vencer a tensão superficial, fazendo com que as moléculas se desprendam e escapem para o ar. Portanto, quanto maior for a DPV, maior será a evaporação e menor será o tempo de vida da gota.

À medida que a gota perde volume por evaporação, a massa também diminui, ficando mais lenta a sua queda, em função da redução da atração gravitacional. Além disso, também pode ocorrer o aumento da concentração dos agrotóxicos e proporcionar a redução da pressão de vapor do líquido contido na gota e, com isso, diminuir a evaporação.

As gotas formadas durante o processo de pulverização apresentam elevada relação superfície/volume, o que aumenta o potencial de evaporação destas quando lançadas na atmosfera. À medida que as gotas evaporam, ocorre uma elevação dessa relação superfície/volume, presumindo-se, desse modo, que a taxa de evaporação aumenta com o tempo de duração das gotas. Muitos tratamentos fitossanitários necessitam de grande cobertura do produto no alvo, o que é obtido mediante a produção de gotas finas. No entanto, deve-se tomar cuidado com o risco de evaporação proveniente do lançamento de gotas com diâmetro reduzido na atmosfera (GIMENES et al., 2013; XU et al., 2011).

A evaporação do componente aquoso das gotas pode criar uma situação em que as moléculas químicas do produto aplicado desassociam-se das gotas, em detrimento do aumento da concentração em níveis que desfavoreçam a miscibilidade. A liberação da molécula química do produto da parte aquosa da gota pode ocasionar a dispersão de partículas e compostos tóxicos na atmosfera

e contribuir para o aumento da poluição atmosférica, podendo ser deslocados para longas distâncias e chegar a centros urbanos. Para reduzir o potencial de evaporação das gotas, é recomendado realizar a aplicação de defensivos em condições de temperatura e umidade que forneçam um baixo DPV, que geralmente são alcançadas no período noturno e nas primeiras horas do dia (TEPPER, 2012).

Outro fator a ser considerado são as perdas após o depósito das gotas no alvo. O tempo de molhamento determina a maior ou menor absorção do produto químico pela folha, visto que cada produto apresenta gradiente osmótico característico no sistema folha/calda, o que pode proporcionar diferentes tempos de absorção para cada situação. Maior tempo de permanência das gotas sobre a folha pode proporcionar germinação de certos agentes patogênicos, enquanto a permanência reduzida pode proporcionar elevação da concentração do produto e a formação de cristais de resíduos fitotóxicos (CARLSEN et al., 2006a; GIMENES et al., 2013; RÜDEL, 1997; XU et al., 2011).

As gotas já depositadas também são grande fonte de perdas por evaporação, chegando a um potencial de 60% a 80% de perdas e, em casos mais graves, até 99% de perdas de volume depositado. Portanto, mesmo após o produto ter atingido o alvo, a perda de agrotóxico pode ser intensificada e prejudicar a qualidade da pulverização (BERG et al., 1999; CARLSEN et al., 2006a).

A deriva ocorre quando as gotas são arrastadas, pelo vento, para fora do alvo, podendo ser caracterizada pela endoderiva e exoderiva. A endoderiva é determinada quando ocorre a movimentação da massa de ar dentro da cultura, favorecendo a deposição na parte basal da folha da planta, a qual apresenta maior quantidade de estômatos, melhorando a absorção do produto químico. Já exoderiva é um fator alarmante da pulverização, por se dar entre o momento de fragmentação da calda em gotas até atingir a copa da cultura. Essas gotas ficam sobre a ação do vento, que as deslocam para diversas áreas e provoca a desuniformidade de deposição da calda no campo (CHECHETTO, 2015). As gotas provenientes da pulverização podem ficar em suspensão no ar e ser inaladas pelos indivíduos de comunidades do entorno (GRISOLIA, 2005).

Portanto, a pulverização aérea pode intensificar as perdas de produtos para o ambiente, e em razão disso foi avaliado o efeito do déficit de pressão de

vapor do ar (DPV) e vazão de calda em relação à evaporação e deriva. No intuito de gerar informações para orientar a aplicação de agrotóxicos e prover parâmetros para definir condições adequadas para a aplicação aérea.

OBJETIVOS GERAIS

Objetivou-se, com o presente trabalho, avaliar o efeito do deficit de pressão de vapor d'água no ar (DPV) e da vazão da calda de pulverização em relação ao espectro de gota formado pela ponta de pulverização, bem como estimar as possíveis perdas líquidas por evaporação em tempo real, antes de chegar ao alvo, e também avaliar a evaporação da gota em superfície foliar e a deriva provocada pela alteração do diâmetro de gota em diferentes deficitis de pressão de vapor.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir e avaliar a câmara climática, com condições psicrométricas controladas.
- Avaliar o sistema de ventilação, para simular o voo da aeronave.
- Desenvolver um simulador de pulverização aérea.
- Avaliar o espectro de gotas em diferentes deficitis de pressão de vapor do ar e vazão de calda (água) de pulverização.
- Estimar a perda real e a perda máxima da evaporação no simulador de pulverização aérea.
- Estimar o tempo de evaporação da gota em superfície foliar.
- Estimar a deriva de gotas pelo *software* DRIFTSIM, em diferentes deficitis de pressão de vapor do ar.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Evaporação e Deriva

Os métodos utilizados para aplicação de defensivos agrícolas apresentam problemas como as perdas de produto por deriva e evaporação para o ambiente. Portanto, os parâmetros técnicos que influenciam esses dois fenômenos devem ser observados durante a aplicação dos defensivos agrícolas.

O tamanho das gotas produzidas na pulverização aérea é determinado pelas características da ponta de pulverização, pressão de trabalho, velocidade de voo e tipo de mistura, entre outros fatores. O diâmetro das gotas está correlacionado às perdas por evaporação, em consequência da relação de superfície/volume da gota, e esse fator, que é um problema não visível, pode correlacionar com o aumento do potencial de deriva, pelo fato de as gotas terem seus diâmetros reduzidos com a evaporação e ficarem mais propensas ao arrasto provocado pelo vento.

Os fatores climáticos são cruciais no momento da aplicação de agrotóxicos por via líquida, por influenciarem diretamente na dinâmica das gotas produzidas e lançadas na atmosfera, principalmente no que diz respeito à evaporação e deriva.

A evaporação é influenciada pela concentração da substância evaporante no ar, temperatura do ar, pressão do ar, radiação solar, superfície de contato da gota, velocidade do vento, forças intermoleculares do agrotóxico, diâmetro das gotas, estabilidade atmosférica e altura a partir da qual as gotas são lançadas.

As moléculas de água estão em constante estado de evaporação e condensação próximo à superfície do líquido. Se uma molécula localizada na superfície de uma gota recebe energia suficiente, ela deixará o líquido, na formação de vapor, dependendo da pressão do ar. A umidade do ar é formada por partículas de água em forma de vapor, que podem ser inaladas pelos seres vivos durante a respiração. Sendo assim, o vapor de água no ar pode ser proveniente da evaporação da calda de pulverização e conter moléculas de agrotóxicos. Diversas são as propriedades dos defensivos agrícolas que intensificam esse fenômeno, sendo a pressão de vapor do ar e do líquido a mais citada em pesquisas (BEDOS et al., 2002; BEDOS et al., 2010; CARLSEN et al., 2006b; RÜDEL, 1997). A evaporação do agrotóxico também é influenciada pela sua degradação, coeficiente de partição n-octanol/água, tensão superficial,

constante de Henry e solubilidade (BEDOS et al., 2002; BEDOS et al., 2010; BOEHNCKE et al., 1990; HEALTH et al., 1992; KUBIAK et al., 1993).

Na Tabela 1 são fornecidos dados sobre as características físicas de diferentes ingredientes ativos de agrotóxicos que interferem na evaporação.

Tabela 1 - Parâmetros físicos e químicos de agrotóxicos

Ingrediente ativo	Peso Molécula (g mol ⁻¹)	Solubilidade em água (g L ⁻¹)	n-octanol/água ⁻¹ (log P _{ow})	Constante dissociação (pK _a)
Fipronil	437,15	0,00378	3,75	ñ
Imidacloprid	255,7	0,61	0,57	ñ
Thiamethoxan	291,71	4,1	-0,13	ñ
Thiacloprid	252,72	0,184	1,26	ñ
Clothianidin	249,7	0,34	0,905	11,1
Acetamiprid	222,67	2,95	0,8	0,7
Nitencyram	270,72	590	-0,66	3,1
Dinotefuram	202,21	39,83	-0,549	12,6

Fonte: Bonmatin et al. (2015), ñ = não dissociação.

O ângulo de contato da gota com uma superfície hidrofóbica ou hidrofílica é o parâmetro mais utilizado para demonstrar a quebra da tensão superficial da gota. Essa quebra de tensão superficial aumenta a área de cobertura e, conseqüentemente, auxilia o agrotóxico a atingir os estômatos da folha (JUNIOR et al. 2015; LIN et al. 2016). No trabalho de Herbil (2015), foi desenvolvido um modelo matemático acerca da geometria da gota em contato com o alvo, correlacionando a absorção do agrotóxico e o tempo de evaporação da gota. Foi identificado que, quando são utilizados adjuvantes que alteram as condições físicas e químicas do líquido, a evaporação pode ser intensificada, porém, o adjuvante promove a absorção mais rápida e mantém o agrotóxico aderido à epiderme foliar junto à camada cerosa.

Segundo Sasaki (2014), o potencial de perda máxima por evaporação em um sistema de resfriamento adiabático é próximo de 40% do volume de calda aplicada em deficit de pressão de vapor do ar (DPV) de 35 hPa. Para todas as condições de DPV, a perda máxima apresenta valores superiores à perda real por evaporação. Isso se deve ao fato de a perda máxima por evaporação desprezar o efeito da retirada de energia do ar atmosférico feito pela água absorvida.

Normalmente, a evaporação de uma gota é determinada pelo seu tempo de contato com ar e com a superfície em que é depositada. A evaporação pode ser agravada quando a gota se desloca em direção ao solo, em razão da instabilidade atmosférica. A instabilidade vertical da atmosfera pode intensificar as perdas tanto por evaporação como por deriva. Dessa forma, podem ocorrer três tipos de condição atmosférica: neutra, instável e estável. O conhecimento desse fator atmosférico habilita ao aplicador identificar se as gotas pulverizadas são efetivamente depositadas sobre a planta ou permanecem em suspensão no ambiente TEPPER, (2012).

No estudo da evaporação da calda pulverizada, deve ser considerado o efeito do ambiente em que as avaliações são conduzidas, mesmo que as condições psicrométricas sejam idênticas entre dois ambientes diferentes. No trabalho de Tepper, (2012) demonstrou que, quando a gota pulverizada se aproxima da cultura, do solo descoberto ou do solo com palhada (sistema de plantio direto), a temperatura do ambiente é elevada e o potencial de evaporação das gotas é intensificado.

Xu et al., (2011), ao estudarem o tempo de evaporação, a área molhada e os processos de propagação das gotas após a sua deposição em folhas com cera e folhas com tricomas, de duas variedades diferentes de plantas, usando quatro tipos representativos de adjuvante em cinco diferentes concentrações, concluíram que o uso do adjuvante aumenta a área de cobertura, que a quebra da tensão superficial não permitiu que a gota ficasse aderida aos tricomas foliares e que o tempo de evaporação da gota depende da superfície foliar e da concentração do adjuvantes.

As perdas de agrotóxico durante a pulverização podem ocorrer devido à deriva, à evaporação e ao escorrimento da gota na superfície foliar. A deriva é o desvio na trajetória da gota que impede que o alvo seja atingido. Esse fenômeno é fortemente influenciado pelo diâmetro das gotas e pela velocidade do vento. Além disso, outras variáveis, como o espectro de gotas, a altura da barra de pulverização, a velocidade de deslocamento e o DPV, influenciam a deriva das gotas pulverizadas. Devido a esse grande número de variáveis influenciando a trajetória da gota, o aplicador de agrotóxicos deve estar sempre atento, certificando-se quanto a essas condições, para minimizar, ao máximo, as perdas

durante o período de aplicação do agrotóxico. (ARVIDSSON et al., 2011; GIL et al., 2014; CARLSEN et al., 2006b; NUYTTENS et al., 2010; SASAKI et al., 2011).

Os processos de deriva, evaporação e escurimento das gotas pulverizadas podem culminar na deposição dos defensivos agrícolas em lugares indesejados. Essa falha na deposição do agrotóxico pode provocar danos ambientais pela contaminação de cursos d'água, da fauna e da flora. Além disso, as perdas econômicas devido a não deposição do produto sobre o alvo comprometem a qualidade da aplicação e conseqüentemente a eficiência do tratamento fitossanitário.

O custo dos agrotóxicos para o controle da ferrugem asiática no Brasil, para o produto à base de Azoxistrobina + ciproconazol, está em torno de U\$ 18,52 ha⁻¹. O custo total para o controle da ferrugem em uma propriedade com área de 3000 ha e de U\$ 55710,00. Ao se observar as porcentagens de perdas por evaporação de 17% e de deriva de 32% que ocorre nas lavouras brasileiras, o custo da perda por evaporação é de U\$ 3,15 por hectare, totalizando U\$ 9.470,70, e, por deriva, de U\$ 5,94 por hectare, totalizando U\$ 17.827,00, em uma única pulverização.

Em virtude dos expressivos valores de perda por evaporação e deriva, que pode causar problemas ao meio ambiente e à saúde humana, a aplicação de defensivos agrícolas por meio de aeronaves foi proibida no continente Europeu e em algumas regiões do Brasil. Para minimizar a evaporação e deriva, deve-se estabelecer a pulverização dentro das condições climáticas com DPV menor que 10 hPa, vento menor 5 km h⁻¹ e diâmetro de gotas maiores que 200 µm. A aplicação não deve ser efetuada na ausência de vento, em razão do risco de ocorrência de inversão térmica e corrente convectiva de ar, que dificultam a deposição das gotas pequenas sobre o alvo (OZKAN, 1998).

O espectro de gotas produzido na pulverização é influenciado pela pressão de trabalho e pelas características da ponta de pulverização. As gotas menores que 100 µm são facilmente carregadas pelo vento, sofrendo mais intensamente a ação dos fenômenos climáticos. De acordo com Zhu et al., (1994), gotas com diâmetro acima de 500 µm têm pouco problema de deriva e gotas abaixo de 50 µm, em geral, evaporam antes de atingir o solo.

Jiao et al., (2016) desenvolveram um método para análise da deriva com câmara com infravermelho. Nesse trabalho, foi observada a desuniformidade na

deposição da faixa de pulverização. Segundo os autores, esse método é capaz de analisar a deriva por meio do processamento de imagens digitais.

Xinyu et al., (2014), ao analisarem o local de deposição das gotas que sofreram deriva, observaram que a deposição dessas gotas diminui com o aumento da distância em relação ao alvo. Dessa forma, a deriva a 8 metros do alvo pode ser de até 92,8% do total de gotas pulverizadas. Esse fato demonstra que, se houver falta de monitoramento, ocorrerá falha na uniformidade de aplicação.

A solução para esse problema, utilizada em outros países, deu-se pelo estabelecimento de zonas de seguranças (*"buffer zones"*). Trata-se de áreas dentro da lavoura que não devem ser pulverizadas, em virtude de possível contaminação, como um curso de água. O tamanho dessas áreas é definido de acordo com as condições da aplicação.

Nesses casos, devem ser realizados estudos com auxílio de programas computacionais, que simulam a distância horizontal percorrida pela gota (SNOO, 1999).

2.1.1. Tensão superficial da calda de pulverização

A principal propriedade física que influencia na taxa de evaporação e deriva das gotas pulverizadas durante a aplicação de defensivos agrícolas é a tensão superficial (TS). Esse fenômeno é caracterizado pela formação de uma membrana elástica em suas extremidades. A TS está associada à força da ligação de hidrogênio, que é uma força intermolecular causada pela atração dos átomos de hidrogênios da água com os átomos de oxigênios das moléculas vizinhas. No entanto, a força de atração entre as moléculas de água na superfície da gota é menos intensa que a força de atração entre as moléculas abaixo da superfície. Isso ocorre por que essas últimas apresentam atração em todas as direções; isto significa que se atraem mutuamente com a mesma força. Já as moléculas presentes na superfície da gota apresentam desequilíbrio de forças na parte superior que promove a elasticidade denominada tensão superficial (BUSH, 2004).

A variação na temperatura do líquido promove alteração na energia cinética das moléculas, proporcionando redução do equilíbrio das forças e aumentando o potencial de evaporação. O uso de surfactantes, que interagem com as ligações

entre as pontes de hidrogênio, facilita o desprendimento das moléculas de água e facilita a evaporação. A adição desses produtos nas caldas de pulverização influencia na TS e promove a redução do diâmetro das gotas devido à menor resistência das forças de ligação entre as moléculas de água, que irá intensificar a deriva. Segundo Xu et al., (2010), para um mesmo volume de gota, é possível aumentar a área de cobertura em até 8 vezes com a quebra da sua tensão superficial, porém, nessa condição, a evaporação da gota ocorre com maior velocidade. Thebaldi et al., (2009) afirmam que o uso de adjuvantes aumenta o diâmetro da gota e, conseqüentemente, reduz a deriva das gotas.

2.1.2. Redução da evaporação e da deriva

As principais maneiras de reduzir a evaporação e a deriva das gotas durante a aplicação dos defensivos agrícolas são o correto ajuste da pressão de trabalho do pulverizador, as alterações nas características físico-químicas das caldas, as quais são influenciadas pelas formulações dos agrotóxicos, pelos tipos de adjuvantes multifuncionais adicionados à calda, bem como a seleção de pontas de pulverização adequadas a cada situação de trabalho e as condições meteorológicas. Esses parâmetros influenciam diretamente no tamanho das gotas, resultando no aumento ou na redução do risco de evaporação e deriva (OLIVEIRA, 2011).

A evaporação das gotas pulverizadas é influenciada pela TS de tal modo que o aumento da força de interação entre as moléculas e a concepção de uma capa ao redor das gotas possibilita minimizar a evaporação do líquido pulverizado. Gugliotti, (2014) desenvolveu um produto à base de pó que promove a formação de uma camada sobre a superfície da água que evita a evaporação superficial da água em até 50%.

A eficácia dos agrotóxicos está condicionada à área de espalhamento das gotas, ao tempo de permanência das gotas sobre a superfície da folha e ao uso de adjuvantes que reduzem a evaporação. Xu et al., (2010) observaram que, em caldas com adjuvante, mesmo com a evaporação da água, o agrotóxico permanece sobre a superfície da folha, especialmente em superfícies com excesso de cera. As superfícies foliares com ceras cuticulares são encontradas em todas as plantas, sendo essas ceras barreiras primárias contra a deposição, a retenção e a penetração das gotas. Yu et al., (2009) relataram que os adjuvantes

e as ceras cuticulares têm potencial de interação, que proporciona uma porta de entrada para pragas e patógenos após a completa secagem das gotas, o que sugere cautela no uso de tais substâncias na aplicação de defensivos agrícolas.

A utilização de surfactantes na calda de pulverização pode alterar a interação entre as gotas e a superfície da folha, condicionando menor ou maior absorção do agrotóxico pela planta. Segundo Xu et al., (2010), o aumento da concentração de surfactante de 0,01% para 1% promove maior absorção foliar de agrotóxicos devido à interação do adjuvante com a camada cuticular da folha. No entanto, para alguns agentes tensoativos, o aumento da concentração pode produzir efeito negativo sobre a absorção de pesticida quando a concentração for superior a um valor crítico. A permanência da gota sobre a superfície da folha promove injúria em razão da elevada concentração de óleo na calda e da alta radiação solar.

A eficácia do controle fitossanitário é resultado da escolha do espectro de gotas adequado e da prevenção de perdas obtidos com o uso de pontas de pulverização que produzem gotas grossas, como pontas com indução de ar, pontas de maior vazão, menor pressão de trabalho e menor rotação, se a ponta for centrífuga (ARVIDSSON et al., 2011; BUENO et al., 2013; COSTA et al., 2011; GIL et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2012; NASCIMENTO et al., 2013; NUYTTENS et al., 2009; ARVIDSSON et al., 2011; GANDOLFO et al., 2014). No entanto, os adjuvantes devem ser utilizados de maneira criteriosa pelo fato de as alterações proporcionadas na calda serem dependentes de sua formulação, visto que o aumento no diâmetro das gotas não é obtido em todos os adjuvantes (CHECHETTO et al., 2013; GANDOLFO et al., 2013; MADUREIRA et al., 2015); HILZ; VERMEER, 2013). Schampheleire et al., (2009) não observaram diferença na taxa de evaporação entre as formulações de agrotóxicos, e o ensaio foi realizado com 10 agrotóxicos, divididos em cinco classes de formulação (concentrado solúvel em água, pó molhável, concentrado emulsionável, granulado para suspensão e suspensão concentrada aquosa).

A utilização de assistência de ar sobre as pontas de pulverização é uma alternativa para a redução da deriva e para o aumento da penetração das gotas no dossel das plantas (BAUER; RAETANO, 2000; FOQUÉ; NUYTTENS, 2011). Entretanto, esse ar pode favorecer a evaporação das gotas, devido ao aquecimento do ar injetado, e promover a troca rápida do microclima ao redor da

gota. Desse modo, para evitar tais perdas, o resfriamento adiabático do fluxo de ar de pulverizadores pode ser uma solução (SASAKI, 2014; STANISLAVSKI et al., 2014).

2.2. Condições climáticas e contaminação na aplicação de agrotóxicos

A instabilidade das condições climáticas dificulta o manejo da pulverização agrícola, fazendo com que a aplicação para o controle de pragas e patógenos fique prejudicada. O monitoramento das condições climáticas e o ajuste adequado do espectro de gotas antes, durante e após as pulverizações dos defensivos agrícolas são cruciais para obtenção dos resultados esperados para determinado produto.

A aplicação de defensivos agrícolas deve ser realizada quando as folhas não apresentam molhamento excessivo devido ao orvalho ou precipitação, o que, em associação com a baixa temperatura e elevada umidade do ar, irá favorecer a deposição e absorção do produto pelas plantas. No período da manhã, das 7 às 10 horas, com temperaturas mais amenas (abaixo de 20°C), umidade relativa elevada (maior que 70%) e ventos inferiores a 5 km h⁻¹, são condições que favorecem a qualidade da aplicação de defensivos. Essas mesmas condições climáticas são observadas no período da tarde, após as 17 horas até o período noturno, o qual é o mais adequado para se fazer pulverização nas regiões delimitadas entre o trópico de capricórnio e o equador.

As condições climáticas para pulverização devem ser observadas em relação à pressão de vapor de cada produto (capacidade que o produto tem de sair do estado líquido para o de vapor), o que pode interferir na sua volatilização, fazendo com que o produto tenha baixa estabilidade e possa ser perdido mais rapidamente para o ambiente.

Na Tabela 2 são fornecidas as classes de gotas que devem ser pulverizadas nas diferentes condições climática.

Tabela 2 - Limites de temperatura e umidade relativa do ar para diferentes tamanhos de gotas

Fatores	Classes de gotas de acordo com as condições climáticas		
	Muito Finas	Finas ou Médias	Médias e Grossas
Temperatura	Abaixo de 25°C	25 a 28°C	Acima de 28°C
Umidade relativa	Acima de 70%	60 a 70%	Abaixo de 60%

Fonte: (ANTUNIASSI, 2009).

Xu et al., (2010) constataram que o tempo de redução do diâmetro inicial da gota até a sua extinção é dependente do seu diâmetro inicial. Para gotas com diâmetro de 600 μm , o tempo para sua extinção é de 25,3 segundos. Já, para gotas de 300 μm , o tempo para extinção da gota é de 2,6 segundos. Segundo Gil et al., (2008), as condições meteorológicas podem elevar o potencial de perdas por deriva e evaporação, com perdas de até 14,4% quando são utilizadas gotas extremamente finas. Cunha et al., (2008) observaram perdas por evaporação de 10% do volume aplicado devido à influência da troca de velocidade do vento. Portanto, em uma aplicação de defensivos agrícolas em que a gota tenha um percurso longo até o alvo, haverá maior propensão às perdas oriundas das alterações das condições climáticas, principalmente pelo deficit de pressão de vapor do ar e pelo desequilíbrio atmosférico. A evaporação da gota após sua deposição sobre a folha está associada à temperatura da planta, que pode proporcionar evaporação do líquido.

O potencial de contaminação do meio ambiente e dos seres humanos pelos agrotóxicos utilizados no controle de plantas daninhas, pragas e doenças nos diferentes estados agrícolas do Brasil é presumível, embora não se tenham estudos mais aprofundados sobre esses impactos. Na cidade de Lucas de Rio Verde (MT), o nível de contaminação das águas de poços artesianos, rios, córregos e águas pluviais já são alarmantes, dependendo de algumas formulações (MOREIRA et al., 2012). De acordo com Santos et al., (2010), a eficiência da deposição dos agrotóxicos no alvo raramente ultrapassa 50% em culturas anuais e 20% em culturas perenes.

No Brasil, a Portaria MS 2.914, de 12 de dezembro de 2011, que segue as recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS), estabelece como padrão de potabilidade de água para a atrazina o valor de 2 $\mu\text{g L}^{-1}$, para o endossulfan (alfa, beta e sais) 20 $\mu\text{g L}^{-1}$, para o metolaclopro 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ e para o

clorpirifós (+clorpirifós oxon) $30 \mu\text{g L}^{-1}$. Essa Portaria, entretanto, não estabelece limites para o flutriafol nem para a cipermetrina (BRASIL, 2011). No trabalho de Moreira et al., (2012), nas 58 amostras de água de chuva coletadas na região do Mato Grosso, foram detectados e quantificados altos níveis de resíduos de agrotóxicos como atrazina ($0,21$ a $75,43 \mu\text{g L}^{-1}$), metil paration ($0,71 \mu\text{g L}^{-1}$), malation ($4,37$ e $7,08 \mu\text{g L}^{-1}$), metolacloro ($0,11$ a $4,49 \mu\text{g L}^{-1}$), endosulfan alfa e beta ($0,5$ a $29,64 \mu\text{g L}^{-1}$), flutriafol ($0,27$ a $1,51 \mu\text{g L}^{-1}$) e endosulfan S ($2,0$ a $7,59 \mu\text{g L}^{-1}$). Apesar de algumas amostras coletadas terem apresentado concentrações abaixo dos limites estabelecidos pela legislação brasileira vigente, em relação à legislação da União Europeia, essas amostras estariam todas com concentração alta.

A legislação da União Europeia é mais restritiva e estabelece como valor paramétrico para resíduos de agrotóxicos em água potável para “cada agrotóxico isoladamente” (que não sejam o aldrin, o dieldrin, o heptacloro e o heptacloro epóxido, para os quais o valor estabelecido é de $1 \mu\text{g L}^{-1}$ para o somatório de todos os seus resíduos) o valor de $0,5 \mu\text{g L}^{-1}$ (AESAs, 2011). Portanto, apesar da baixa concentração de algumas formulações, é necessário analisar a capacidade de bioacumulação nos tecidos gordurosos dos organismos. Como exemplo, tem-se o uso agrícola do endosulfan, que está atualmente banido em mais de 62 países do mundo (MOREIRA, 2012).

Na região Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, o líquido perdido na evaporação das caldas utilizadas na aplicação de defensivos agrícolas pode ser depositado na atmosfera e transportado das áreas de cultivo até as áreas urbanas e também até áreas não cultivadas. Tal fato é particularmente importante quando consideramos que, nessas regiões, situam-se três dos mais importantes biomas brasileiros: o Pantanal, a Floresta Amazônica e o Cerrado, que podem estar recebendo esses resíduos carregados pelos ventos e pelas chuvas. Uma vez que a evaporação dos agrotóxicos promove a contaminação da água da chuva e que não existe um limite de segurança na vigência brasileira para a presença de resíduos de agrotóxicos em água pluvial, não é possível dimensionar o real impacto de tal via na deterioração da qualidade do ambiente, da saúde humana e da biodiversidade (BRASIL, 2010). Segundo Moreira, (2012), a volatilização de agrotóxicos usados nos processos agrícolas e sua precipitação através das chuvas provocam impactos em anfíbios em regiões de córregos e rios, sendo

observadas concentrações de endusofan de até 2,78 ng ml⁻¹ e concentração de mirex de 6,67 ng ml⁻¹ no sangue desses animais.

Mejia, (2015) observou problemas dermatológicos e abortos na Colômbia, devido à aplicação de glifosato com aeronaves agrícolas. Joode et al., (2016) constataram a contaminação de águas subterrâneas por mancozeb e manganês, aplicados por aeronaves, nas lavouras de banana, na Costa Rica.

A maioria dos países utiliza um Limite Máximo de Resíduos (LMR) para regulamentar o máximo de resíduos de agrotóxicos em mg ou kg presentes na alimentação humana ou animal, com base nas boas práticas agrícolas, para garantir a menor exposição possível dos consumidores a esses produtos (AESA, 2011). Os teores máximos de resíduos são derivados de cálculos estatísticos de campo. Uma dose aguda de referência e a ingestão diária aceitável são determinadas a partir dos dados toxicológicos (EFSA, 2011). Estes são comparados com padrões de consumo alimentar obtidos a partir de pesquisas de segurança especificadas pela *Food and Agricultural Organization of the United Nations* (FAO).

Na Tabela 3 são fornecidas exemplos da *commoditie* global sobre os limites máximos de resíduos estabelecidos para cada agrotóxico e mostra como são dispostas essas diferenças entre os países.

Tabela 3 – Limites de agrotóxicos (ppm) em grão de milho em diferentes regiões do mundo

Tipo de agrotóxico	Codes	CEE	USA	Canada	China	Japan	India	Austr.	África do sul
2,4-D	0,05	0,05	0,05	0,05	-	0,05	0,01	0,2	0,05
Antrazine	-	-	0,2	0,2	0,05	0,2	0	0,1	0,05
Glyphosate	5	1	5	3	1	1	5	5	5
Malathion	0,05	8	8	8	8	2	4	8	8

Fonte: (USDA, 2014), CEE = Comunidade Econômica Europeia.

Os agrotóxicos sistêmicos à base de neonicotinóides e fipronil têm uma alta pressão de vapor. Em geral, os valores variam entre $2,8 \times 10^{-8}$ e 0.002 mPa a 25°C. O baixo potencial de volatilização dessas substâncias indica que esses

pesticidas provavelmente só estão presentes sob a forma gasosa durante um curto período da aplicação (HANDFORD, 2015).

2.3. Tecnologia de aplicação de agrotóxicos

A tecnologia de aplicação de agrotóxicos consiste no emprego de todos os conhecimentos científicos que proporcionem a correta deposição do agrotóxico no alvo, em quantidade necessária, de forma econômica e com o mínimo de contaminação de outras áreas. O conceito de pulverização é definido como o ato físico-mecânico de transformar o líquido em partículas ou gotas, com a aplicação e deposição de gotas sobre um alvo desejado, com tamanho e densidade adequados ao objetivo proposto (MATUO et al., 1990).

A tecnologia de aplicação deve ser planejada de maneira responsável e sustentável, sempre visando minimizar o potencial de danos à saúde humana e animal e aos recursos naturais. Além disso, ela está relacionada aos parâmetros técnicos de pulverização a serem avaliados antes de iniciar o controle, seguindo algumas instruções. Na segurança das aplicações de produtos fitossanitários, muitos questionamentos ainda necessitam de respostas, as quais podem variar em função da legislação vigente em cada país. Para o uso racional de agrotóxicos, nos últimos anos, foram obtidos avanços nas formulações de defensivos agrícolas, como o uso de sensores, controladores e sistema de posicionamento global em máquinas e implementos agrícolas.

O estudo da aplicação de defensivos agrícolas é uma ciência multidisciplinar, o qual descreve sobre vários fatores e principalmente sobre os tipos de pulverização, como hidráulicos, hidropneumáticos, pneumáticos, eletrostáticos e centrífugos, sendo esses pulverizadores manuais ou tratorizados. O conhecimento geral baseia-se no uso correto de EPI (Equipamento de Proteção Individual), no conhecimento das formulações (suspensão concentrada, concentrado emulsionável, grânulo dispersos em água, pó solúvel, etc), dos tipos de pontas (leque simples, leque duplo, cone vazio, cone cheio, leque com indução de ar e etc), das condições climáticas no momento da pulverização, da toxicologia de agrotóxicos e dos fenômenos climáticos que atuam no tipo de pulverização.

Os fatores que são discutidos na qualidade da aplicação são as faixas de diâmetros de gotas produzidas por determinada ponta e a deposição do produto. Alguns parâmetros como diâmetro da mediana volumétrica, diâmetro da mediana

numérica, amplitude relativa, coeficiente de variação do espectro de gotas, perfil de distribuição, uniformidade de distribuição da calda, coeficiente de descarga da ponta, qualidade do material da ponta, regulagem e calibração do pulverizador também são evidenciados.

Patel et al., (2015) obtiveram maior deposição de líquido no alvo com gotas de 40 µm utilizando um sistema de pulverização eletrostático com bateria recarregável em relação à pulverização hidráulica. Em trabalho conduzido por Cunha et al. (2015), a uniformidade de distribuição da ponta de pulverização TVI apresentou coeficiente de variação de 18%, não tendo significância em três pressões de trabalho (400, 500 e 600 kPa), com altura da barra em 50 cm. Graig et al., (2014) adaptaram agulhas no cilindro do atomizador rotativo e conseguiram aumentar o diâmetro das gotas em até um terço e manter o diâmetro das gotas mais uniformes. Portanto, o conhecimento sobre a tecnologia de aplicação pode fazer com que se chegue ao objetivo esperado e melhorar a pulverização de agrotóxicos no Brasil, os quais são manejados de forma parcialmente incorreta.

2.4. Aviação agrícola

O surgimento da aeronave agrícola ocorreu em 1911, sendo criada pelo Engenheiro Florestal alemão Alfred Zimmermann. Em 1921, foi feita a primeira aplicação de inseticida sobre uma floresta em Ohio, nos Estados Unidos. A aviação agrícola, no Brasil, teve início em 19 de agosto de 1947, na região de Pelotas, Rio Grande do Sul, para o controle de gafanhotos que definhavam rapidamente as culturas da região. A aeronave utilizada foi um Muniz M-9, um biplano de fabricação nacional, que fora comandado por Clóvis Candiota, considerado o Patrono da Aviação Agrícola no Brasil.

Os aviões utilizados para pulverização agrícola atualmente são pequenos, leves, voam baixo e têm ótima manobrabilidade. No Brasil, existem cerca de 2.000 aeronaves divididas em três categorias: leve = PA-18 e similares; média = Ipanema e similares; pesada = Air Tractor e similares, sendo a capacidade do tanque variando de 750 L a 3.500 L.

A Empresa Brasileira de Aeronáutica (Embraer), fundada na década de 1970, é hoje a líder de mercado, quando se trata da produção de aeronaves agrícolas, correspondendo a 60% da frota nacional. Os principais nichos de mercado para a aviação agrícola são os localizados nos estados do Mato Grosso,

Goiás, Tocantins, Bahia, Pará, Paraná e São Paulo, caracterizados pelas grandes extensões de cultivo e por demandarem agilidade no processo de tratamento fitossanitário.

De acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), a demanda por profissionais qualificados para atuar na aplicação aérea de defensivos vem crescendo nos últimos anos, atingindo, no primeiro trimestre de 2015, um número de 1.516 pilotos agrícolas licenciados. O atrativo que faz jus ao crescimento da profissão nos últimos anos está associado à alta remuneração da carreira, podendo alcançar U\$ 474,86 por dia, no período da safra.

A obtenção da licença para pilotar aeronaves agrícolas exige curso básico na ANAC, com carga horária 185 horas, além de 400 horas adicionais na área de pulverização, fornecidas por empresas credenciadas ao Ministério da Agricultura (MAPA), e cursar tópicos específicos sobre meteorologia e toxicologia de agrotóxicos.

Segundo o presidente do Sindag – Sindicato Nacional das Empresas de Aviação Agrícola, Júlio Augusto Kampf, o país tende a se tornar, nos próximos anos, líder no segmento de aviação agrícola. Se o Brasil tem hoje uma grande demanda da pulverização aérea, é devido a sua alta capacidade de rendimento operacional e à eficácia nas grandes extensões de terra, embora este seja um sistema que trouxe polêmicas e discussões com pouco embasamento científico na área de perdas.

O conhecimento acerca da influência das condições atmosféricas sobre a evaporação dos defensivos agrícolas deve ser utilizado para a redução das perdas de agrotóxicos a níveis que não causem danos ao meio ambiente e à saúde humana. Dessa forma, a utilização de aeronaves é uma alternativa viável à aplicação tratorizada, por sua elevada capacidade operacional, possibilitando o controle de pragas e doenças em áreas extensas e em tempo hábil.

O uso de aeronaves em áreas agrícolas é intenso em diferentes atividades, como a aplicação de fertilizantes, a aplicação de defensivos agrícolas, a semeadura a lanço, o combate a incêndios e o combate a vetores. As aeronaves apresentam vantagens técnicas e econômicas, quando bem manejadas, como a redução do tempo de aplicação, redução da quantidade de veiculantes, não causam danos físicos à cultura e apresentam maior capacidade operacional, possibilitando a aplicação de defensivos agrícolas no momento correto e

oportuno. Além disso, a aplicação de defensivos agrícolas por meio de aeronaves exige pessoas com capacitação técnica presentes no momento da aplicação e aproveita melhor as condições climáticas. No entanto, esse tipo de aplicação apresenta algumas desvantagens, como alto risco de contaminação, utilização somente em áreas planas, mão de obra especializada, custo inicial elevado e altos riscos de acidentes (SANTIAGO, 2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Aplicação de Defensivos Agrícolas (LADA), pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa – MG. O experimento foi conduzido em uma câmara climática, com condições psicrométricas controladas, foi utilizado análise de variância com significância de 5% de probabilidade pelo teste t, com base no Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) e as médias quantitativas foram mensuradas por superfície de resposta. Essa estratégia experimental permitiu reduzir o número de ensaios, assegurando suporte estatístico para discussão dos resultados. Esse método estatístico é recomendado para experimentos com custos elevados e de difícil estabilização dos tratamentos para diminuição do erro experimental.

Para esse tipo de delineamento o número de ensaios é definido por: 2^k pontos fatoriais + 2 K pontos axiais + um número arbitrário de pontos centrais. O experimento foi composto por treze ensaios ao considerar cinco pontos centrais (Equações 1 e 2) (RODRIGUES, 2014).

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad (1)$$

em que,

α = variáveis independentes codificadas; e

k = número de fatores.

$$Y_{in} = \frac{2(X_{in} - X_i)}{R} \quad (2)$$

em que,

x_{in} = variável independente codificada;

Y_{in} = variável independente;

X_i = médias das variáveis; e

R = diferença entre maior e menor variável independente.

As variáveis independentes foram a vazão da ponta de pulverização (3,0; 3,58; 5,0; 6,42 e 7,0 L min⁻¹) e o deficit de pressão de vapor (7; 11,07; 21; 30,98 e 35 hPa) (Tabela 4 e 5).

Tabela 4 – Codificação dos ensaios de acordo com DCCR

Variáveis	Código	-1,41	-1	0	+1	+1,41
DPV (hPa)	X1	7	11,07	21	30,98	35
Vazão (L min ⁻¹)	X2	3	3,58	5	6,42	7

DPV – Déficit de pressão de vapor do ar (hPa); e, -1,41; -1; 0; +1; +1,41 – Variáveis codificadas.

Tabela 5 – Matriz de planejamento de acordo com o DCCR

Ensaio	Vazão	DPV	X _{i1}	X _{i2}
1	3,58	11,07	-1	-1
2	6,42	11,07	+1	-1
3	3,58	30,98	-1	+1
4	6,42	30,98	+1	+1
5	5	21	0	0
6	5	21	0	0
7	5	21	0	0
8	5	21	0	0
9	5	21	0	0
10	3	21	-1,14	0
11	7	21	+1,41	0
12	5	7	0	-1,41
13	5	35	0	+1,41

DPV – Déficit de pressão de vapor do ar (hPa); e, -1,41; -1; 0; +1; +1,41 – Variáveis codificadas.

Os parâmetros avaliados foram: gotas com diâmetro < 100 µm, 100 – 150 µm, 150 – 200 µm, 200 – 250 µm, 250 – 300 µm, 300 – 350 µm, 350 – 400 µm, 400 - 450 µm, 450 - 500 µm, > 500 µm, Dv₁₀, Dv₅₀, Dv₉₀, SPAN, perda real por evaporação e perda máxima por evaporação. Os procedimentos estatísticos foram realizados nos programas computacionais “R” e “Sigmaplot”.

3.1. Estrutura do simulador de pulverização aérea

O simulador utilizado nos experimentos foi constituído de um ventilador hidráulico axial e uma câmara climática (Figura 1).

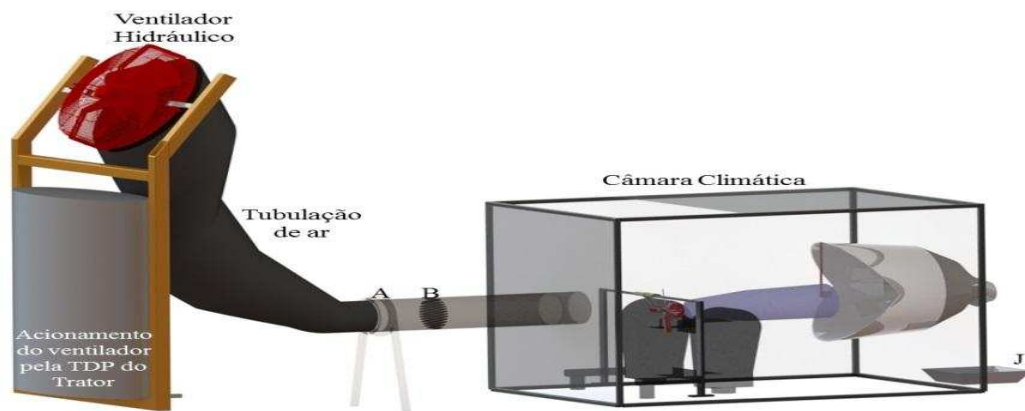


Figura 1 – Esquema do simulador para avaliação da pulverização aérea.

O ventilador foi acionado pela tomada de potência (TDP) de um trator agrícola de pneus, marca Massey Ferguson, modelo 265, com motor de 47 kw de potência. A TDP do trator foi mantida sob regime de rotação de 572 rpm. A rotação da TDP foi monitorada com o uso de um tacômetro a laser, Marca Instrutherm, modelo MTD – 2238A. O ventilador possuía diâmetro de 0,70 m e vazão de ar de $123 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, sob rotação de 5.878 rpm. O fluxo de ar produzido pelo ventilador foi canalizado por uma tubulação com 0,25 m de diâmetro e direcionado para a câmara climática, para simular o deslocamento de uma aeronave modelo Ipanema[®] a 150 km h^{-1} (Figura 2).

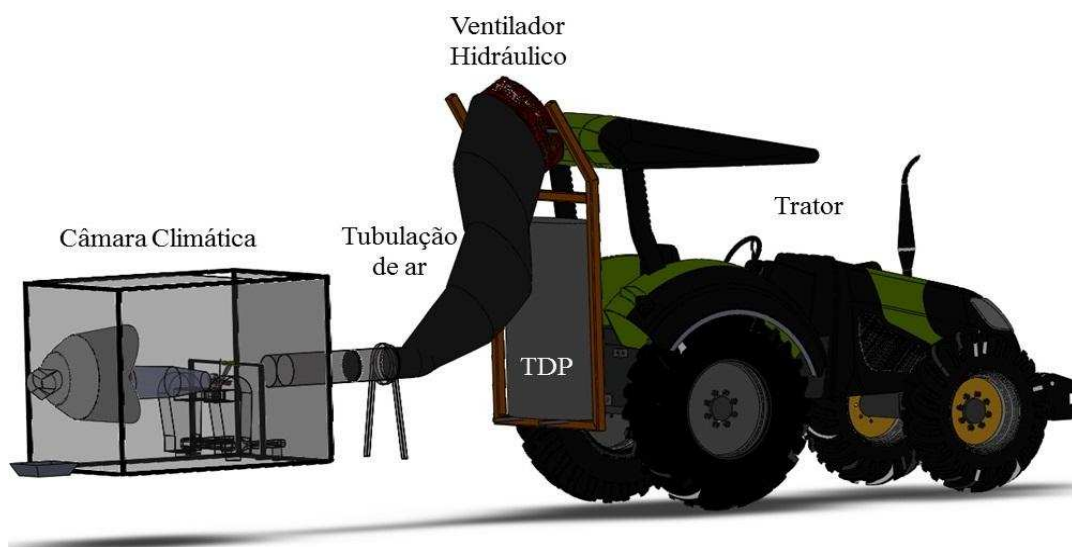
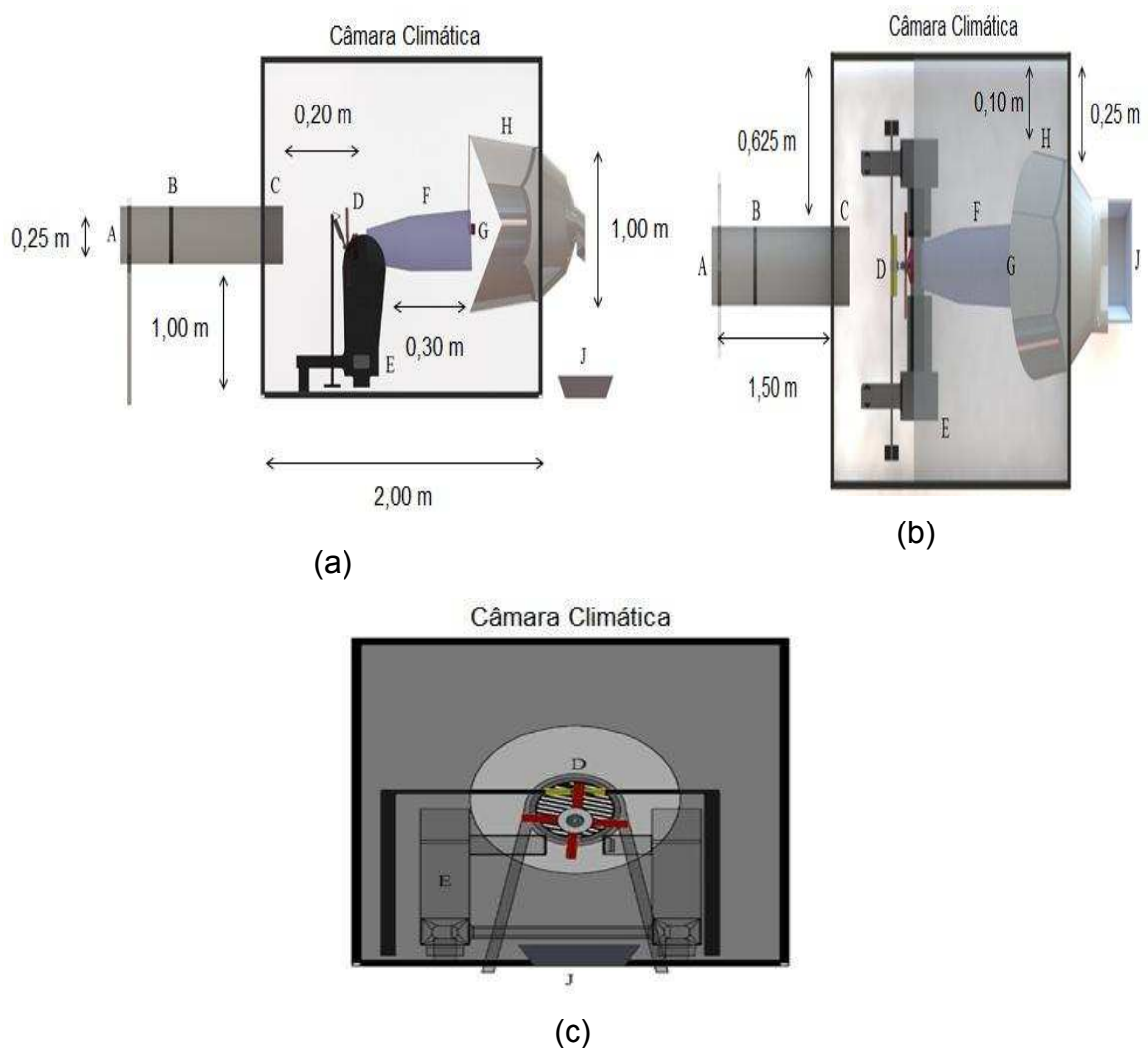


Figura 2 - Esquema do simulador de pulverização aérea acoplado ao trator, para acionar o ventilador com condução do ar ao túnel de vento.

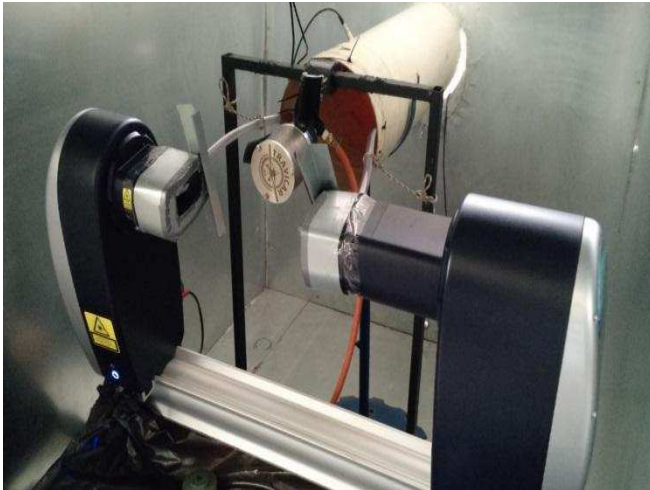
O túnel de vento foi construído de forma similar ao desenvolvido por Phillips e Miller (1999), utilizado para simular testes em condições de campo, conforme proposto por Gandolfo et al. (2013).

A câmara climática possui dimensões de 2,00 x 1,50 x 1,50 m, com a cobertura, o fundo e as laterais de chapa de metal zincado, com 2 mm de espessura na parte interna. A parte externa da câmara climática foi revestida com placa de isopor com espessura de 25,2 mm, para auxiliar a manutenção das condições psicrométricas. A estrutura de sustentação da câmara climática foi construída com armação de cantoneira de $\frac{3}{4}$ (Figuras 3 e 4).



A = Tubulação de entrada de ar, **B** = Homogeneizador de ar, **C** = Tubulação de saída de ar e sensor de umidade relativa e temperatura, **D** = Atomizador rotativo, **E** = Analisador de partículas a laser, **F** = Jato de pulverização, **G** = Sensor de umidade do ar, **H** = Cone para direcionamento de água e ar na saída da câmara climática, **J** = Coletor de água.

Figura 3 – Estrutura de simulação para pulverização aérea com câmara climática com vista lateral (a), vista superior (b) e vista frontal (c) da câmara climática.



(a)



(b)

Figura 4 – Atomizador rotativo da pulverização aérea (a) e saída de ar e do jato de pulverização (b).

O fracionamento da calda foi realizado por um atomizador rotativo, marca Traviar, modelo NC05165.2.2, com pá de 70 mm, tela de impacto com orifícios de 2 mm e válvula V.R.U com disco D-4, D-5, D-6, D-7 e D-8 fixado a um suporte metálico e distanciado de 0,3 m do analisador de partículas. O atomizador rotativo operou com angulação de 55° nas pás e rotação de 2.600 rpm, que foi monitorada com com uso de um tacômetro a laser, marca Instrutherm, modelo MTD – 2238A. O atomizador rotativo foi previamente caracterizado quanto à sua velocidade de rotação e ao espectro de gotas formadas. A caracterização foi realizada para a velocidade de rotação de 2.600 rpm, com deficit de pressão de vapor d’água de 0,84 kPa (Figura 5) (Traviar, 2012).

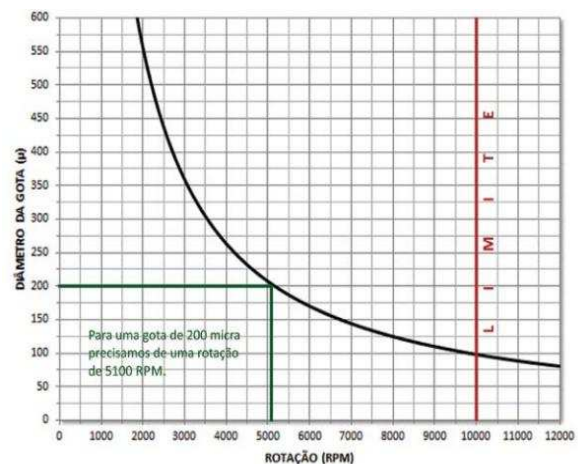
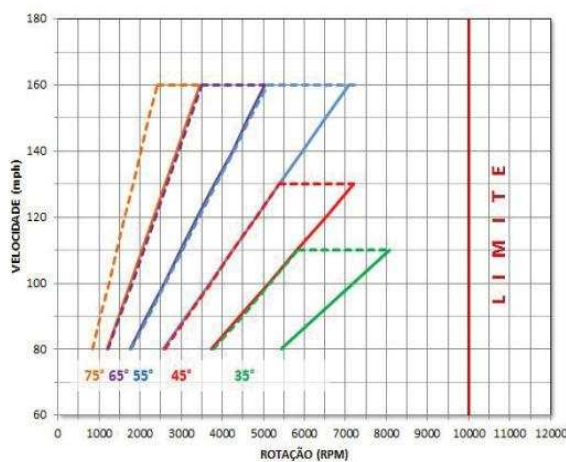


Figura 5 - Rotação do atomizador (rpm) em relação à velocidade de voo (mph) da aeronave para formação do espectro de gotas.

A calda de pulverização foi conduzida para o atomizador rotativo (Figura 6) com auxílio de uma bomba Yamaha, modelo S12. A vazão do atomizador foi controlada por meio da alteração da pressão de trabalho da bomba e pelos V.R.U's. A pressão de entrada da calda de pulverização no atomizador foi monitorada por um manômetro da marca Record, com precisão de 2 kPa, calibrado com auxílio de um aferidor de manômetros padrão Classe A3, instalado na tubulação de alimentação do atomizador (Travicar, 2012).

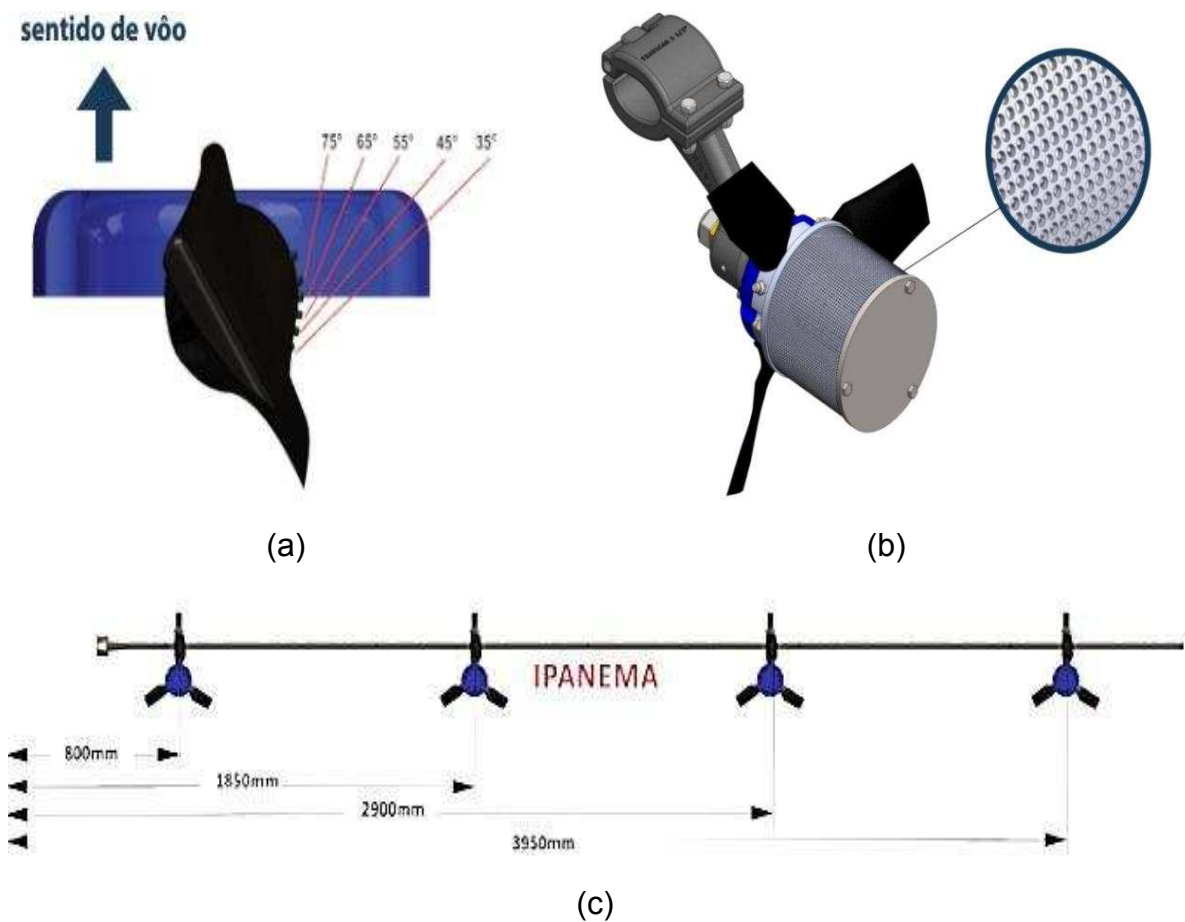


Figura 6 – Ângulo da pá (a), estrutura do atomizador rotativo (b) e distribuição do atomizador na barra de pulverização da aeronave Ipanema (c).

O jato de pulverização foi direcionado para o analisador de partículas, da marca Malvern Instruments Co., modelo Spraytech, objetivando a determinação do espectro de gotas. O analisador de partículas possui lente focal de 750 milímetros, feixe de luz infravermelha de 10 mm de diâmetro, comprimento de onda de 632,8 nm, taxa de aquisição de dados de 2,5 kHz e tempo de leitura de 5s. Esse equipamento mensurava o diâmetro das gotas por meio da difração na trajetória do feixe luminoso ao atingir as gotas o qual é inversamente proporcional

ao tamanho das gotas, ou seja, quanto menor é a partícula, maior é o grau de difração sofrido pelo feixe luminoso (MANUAL SPRAYTEC, 2010).

Previamente aos testes, o analisador de partículas foi calibrado para contabilizar as gotas com diâmetro entre 0,10 e 2.500 μm , alcançando, desse modo, maior detalhamento sobre o espectro de gotas formado. A pulverização foi realizada de modo que o jato atingisse transversalmente o feixe luminoso do analisador de partículas, permitindo a obtenção direta do espectro de gotas. Dessa forma, foram obtidos Dv_{10} ; Dv_{50} ; Dv_{90} , SPAN e porcentagem de gotas classificadas de acordo com seu diâmetro em intervalos de 50 μm a partir do diâmetro de 100 μm . As gotas com diâmetro menor que 100 μm e as gotas com diâmetro maior que 500 μm foram analisadas em classes maiores.

3.2. Determinação da curva característica do ventilador

A curva característica do ventilador foi determinada de acordo com a metodologia proposta pela AMCA (1985).

A determinação das pressões estática e dinâmica foi realizada por meio de um tubo de Pitot, com precisão de 4,9 kPa, instalado no túnel de vento à uma distância de 7,90 m da saída de ar do ventilador e interligado ao manômetro inclinado, marca Dwyer Instruments INC Michigan e modelo MM.400 (Figura 7), conforme proposto por Mesquita et al. (1985).

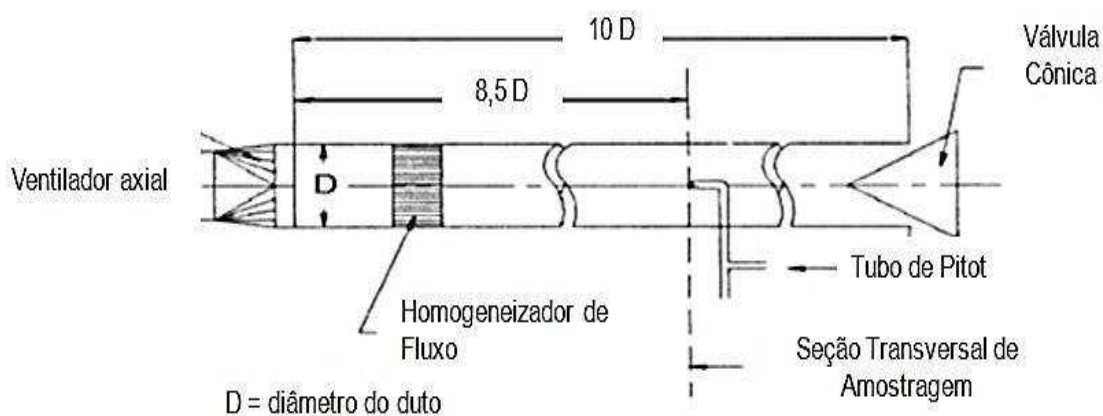


Figura 7 - Estrutura para avaliação do ventilador e construção da curva característica do ventilador (pressão, vazão e potência exigida).

As distâncias dos pontos de leitura das pressões estática e dinâmica no túnel de vento em relação ao centro da seção circular da saída de ar do ventilador foram determinadas de acordo com a Equação 3, Mesquita et al. (1985).

$$L_n = d \sqrt{\frac{2n - 1}{4N}} \quad (3)$$

em que,

L_n = distância do ponto de leitura em relação ao centro da seção circular da saída de ar do ventilador (mm);

d = diâmetro do ventilador (mm);

n = enésima área (mm^2); e

N = número de leituras.

As leituras das pressões estáticas e dinâmicas foram realizadas utilizando quatro vazões de ar definidas pela abertura da válvula cônica na saída do túnel de vento. As diferenças foram obtidas utilizando a válvula cônica totalmente fechada; aberta de 40 mm; aberta de 80 mm e totalmente aberta. A velocidade do ar foi determinada com base na leitura da pressão dinâmica realizada no túnel de vento (Equação 4), Mesquita et al. (1985).

$$v = \sqrt{2 g P_{\text{din}}} \quad (4)$$

em que,

v = velocidade do ar no túnel de vento (m s^{-1});

g = aceleração da gravidade (m s^{-2}); e

P_{din} = pressão dinâmica do ar no túnel de vento (mca).

A vazão média de ar no túnel de vento foi determinada de acordo com os valores médios da velocidade do ar (Equação 5), Mesquita et al. (1985).

$$Q_{\text{med}} = v_{\text{med}} A \quad (5)$$

em que,

Q_{med} = vazão média do ar no túnel de vento ($m^3 s^{-1}$);

v_{med} = velocidade média do ar no túnel de vento ($m s^{-1}$); e

A = área da seção transversal do túnel de vento (m^2).

A potência demandada para o acionamento do ventilador foi determinada de acordo com a pressão total e o peso específico do ar (Equação 6), Mesquita et al. (1985).

$$Pot = \gamma P_t Q_{med} \quad (6)$$

em que,

Pot = potência do ventilador (W);

P_t = pressão total do ar (mca); e

γ = peso específico do ar ($N m^{-3}$).

3.3. Determinação das condições psicrométricas no túnel de vento

A aquisição de dados simultâneos na agricultura leva a uma precisão e qualidade nos resultados estudados, com isso utiliza-se de sistema de baixo custo como as placas de Arduino.

O Arduino Duemilanove possui 14 pinos, divididos em entradas e saídas digitais, dos quais seis podem ser usados como saídas analógicas e seis como entradas analógicas, um cristal oscilador de 16 MHz, uma conexão USB, uma entrada para alimentação, um cabeçalho ICPS e um botão de reset. Para utilizá-lo, basta conectá-lo a um computador ou em uma bateria de corrente contínua (RENNA, 2015).

Cada entrada analógica do Arduino tem uma resolução de 10 bits. Por padrão, elas medem de 0 a 5 volts, embora seja possível mudar o limite superior (RENNA, 2013).

A placa pode operar com uma alimentação externa de 6 a 20 volts. Se a alimentação for superior a 12 volts, o regulador de voltagem pode superaquecer e avariar a placa. A alimentação recomendada é de 7 a 12 volts.

Na Tabela 6 são fornecidos os dados sobre as características técnicas de um Arduino (MANUAL ARDUINO, 2015).

Tabela 6 – Dados técnicos da placa Arduino duemilanove

Microcontrolador	ATmega328
Volts operacional	5 V
Volts alimentação	7 -12 V
Pinos I/O digitais	14
Pinos de entrada analógica	6
Corrente contínua por pino I/O	40 mA
Memória flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidade de clock	16 MHz

A placa Arduino Duemilanova é ideal para fazer a operação com o sensor capacitivo e resistivo VAISALA, o qual exige uma ligação a 5 V e entrada digital. O controlador tem boa comunicação com o computador e facilita o armazenamento de dados coletados pelo sensor no PC.

No trabalho de Maciel et al. (2016), com uso de sensores conectados ao Arduino, foi observado que o aumento das faixa de deficit de pressão de vapor do ar promoveu o aumento do Dv_{50} , Dv_{90} e SPAN.

O monitoramento das condições psicrométricas foi realizado na entrada e saída de ar da câmara climática. Na entrada da câmara climática, foi realizado mediante o uso de um sensor instalado na saída de ar do ventilador, em direção ao atomizador. Na saída da câmara climática, o sensor estava instalado posterior analisador de partículas. A pulverização era realizada quando os dois sensores de temperatura e umidade relativa do ar estavam em condições psicrométricas iguais.

Foram utilizados sensores de temperatura e umidade relativa do ar da marca Vaisala, modelo HMP60, com intervalo de medição de -40°C a 80°C e precisão de $0,4^{\circ}\text{C}$ para a temperatura, e intervalo de medição de 0 a 100% e precisão de 0,5% para a umidade relativa do ar. Os dados obtidos com o uso de sensores e um microcontrolador Arduino Duemilanove, modelo Atmega328, foi armazenados em um computador portátil, marca ASUS, modelo SonicMaster (Figura 8).

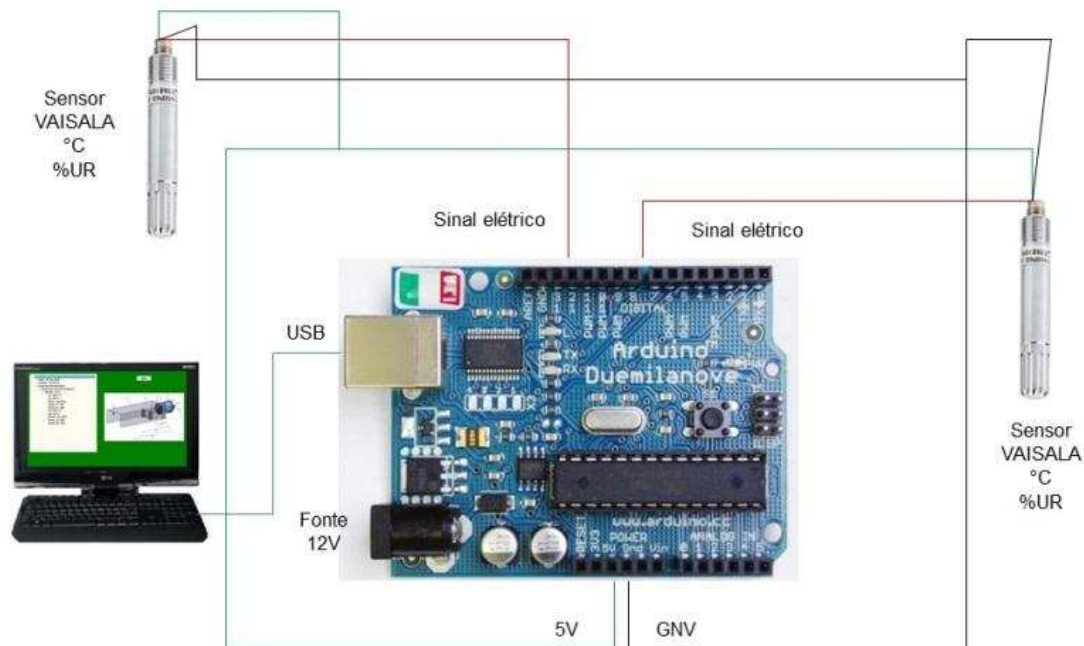


Figura 8 – Esquema do circuito ligado da placa arduino duemilanove com sensores.

Os sinais analógicos de tensão elétrica obtidos dos sensores foram convertidos em valores numéricos por meio da conversão analógica/digital de 10 bits do microcontrolador. Os valores de tensão elétrica foram convertidos em valores de temperatura e umidade relativa do ar (Equações 7 e 8).

$$t = -40 + 20 \left(\frac{5}{1023} \right) \text{sinal_tar} \quad (7)$$

em que,

t_{ar} = temperatura do ar (°C); e

sinal_tar = Sinal elétrico emitido pelo sensor de temperatura (V).

$$UR = 20 \left(\frac{5}{1023} \right) \text{sinal_UR} \quad (8)$$

em que,

UR = umidade relativa do ar (%); e

sinal_UR = Sinal elétrico emitido pelo sensor de Umidade relativa (V).

O deficit de pressão de vapor d'água (DPV) na câmara climática foi determinado por meio da diferença entre pressão de saturação e pressão parcial de vapor d'água no ar, de acordo com a Equação 9, proposta por Tetens (1930).

$$DPV = e_s - e_a \quad (9)$$

em que,

DPV = deficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (hPa);

e_s = pressão de saturação de vapor d'água no ar (hPa); e

e_a = pressão parcial de vapor d'água no ar (hPa);

A pressão de saturação de vapor d'água no ar foi determinada em função da temperatura da câmara climática antes e depois da pulverização (Equação 10), Tetens (1930).

$$e_s = 6,1078 (10)^{\frac{7,5 t}{237,3+t}} \quad (10)$$

em que,

e_s = pressão de saturação de vapor d'água no ar (hPa); e

t = temperatura do ar (°C).

A pressão parcial de vapor d'água no ar (e_a) foi determinada em função da umidade relativa do ar e da pressão de saturação de vapor d'água no ar (e_s), de acordo com a Equação 11, Tetens (1930).

$$e_a = \frac{UR e_s}{100} \quad (11)$$

em que,

e_a = pressão parcial de vapor d'água no ar (hPa);

UR = umidade relativa do ar (%); e

e_s = pressão de saturação de vapor d'água no ar (hPa).

Os diferentes DPVs foram obtidos com auxílio de um queimador a gás, instalado no ponto de sucção de ar do ventilador, que faz o aquecimento do ar e proporciona aumento do DPV na câmara climática.

No gráfico psicrométrico (Figura 9), foi demonstrado a faixa da pressão de vapor do ar utilizado no ensaio.

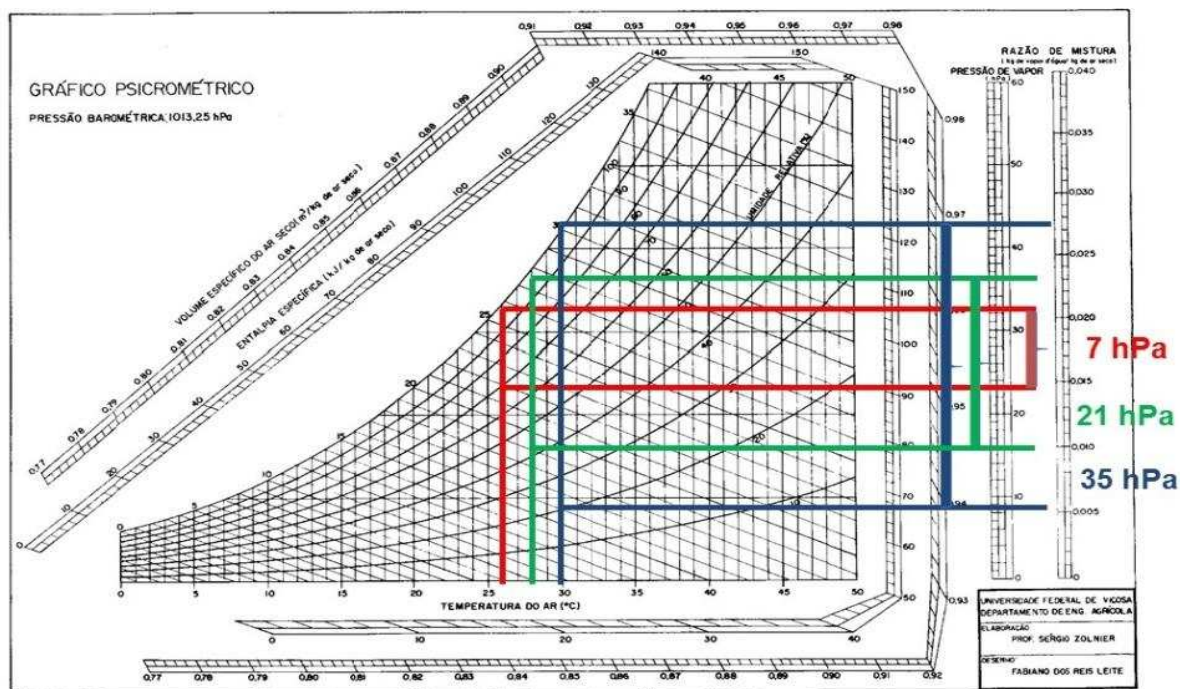


Figura 9 – Faixa de deficit de pressão de vapor do ar, o qual demonstra a variação do ambiente em ter capacidade de absorver vapor d'água da pulverização (ZOLNIER, 2010)

3.4. Espectro de gotas

Previamente à análise do espectro de gotas do atomizador rotativo, foram coletados os dados da vazão da calda de pulverização. A ponta foi avaliada em uma bancada de ensaio padronizada, de acordo com a norma ISO 5682-1 (1996), trabalhando a pressão de 137,89, 206,84 e 275,79 kPa e Unidade de Restrição Variável (V.R.U) (Figura 10), com quatro repetições. Para as leituras do espectro de gotas, foi montado um suporte para se adaptar o atomizador rotativo com distância de 0,3 m do analisador a laser modelo Spraytec, Malvern Instruments Co., Worcestershire, UK.

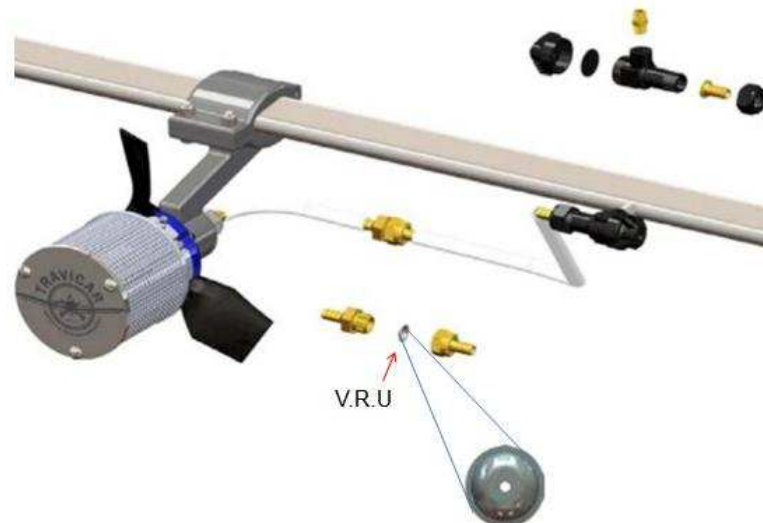


Figura 10 – Unidade de restrição variável (V.R.U) para controle da vazão

Os dados foram coletados somente após dois minutos de estabilização das condições psicrométricas.

3.5. Determinação do diâmetro da mediana volumétrica

O diâmetro da mediana volumétrica (DMV) foi determinado de acordo com a metodologia proposta por Camara et al. (2008), a partir do espectro de gotas obtido na leitura realizada pelo analisador de partículas, que ordena as gotas em ordem crescente de diâmetro e define o diâmetro da gota que divide o volume de líquido pulverizado em dois volumes iguais (Figura 11) (Ferreira e Machado, 2007).

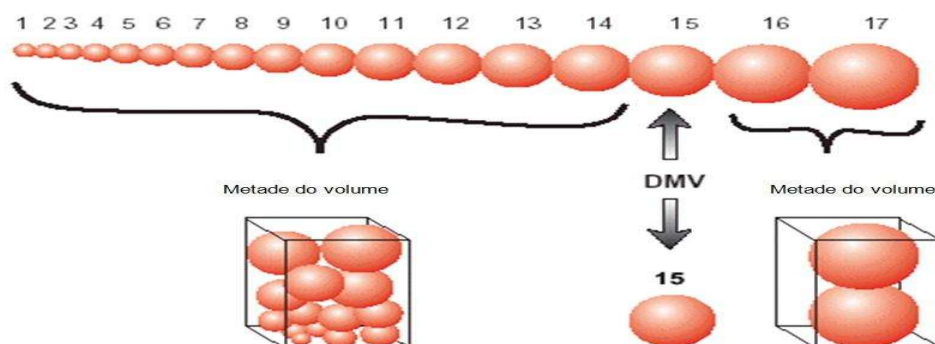


Figura 11 - Diâmetro da mediana volumétrica (Dv_{50}).

3.6. Amplitude relativa no diâmetro das gotas

A amplitude relativa no diâmetro das gotas produzidas por uma ponta de pulverização pode ser avaliada de acordo com o SPAN. Esse parâmetro relaciona

o diâmetro da gota onde se encontra 10% do volume pulverizado (Dv_{10}), o diâmetro da gota onde se encontra 90% do volume pulverizado (Dv_{90}) e o diâmetro da gota onde se encontra 50% do volume pulverizado (Dv_{50}). Quanto mais próximo de zero for o valor obtido para o SPAN, maior será a homogeneidade para os diâmetros das gotas. Na prática, considera-se que o conjunto de gotas é homogêneo quando o SPAN for menor que 1,4. A determinação do SPAN é feita de acordo com a Equação 12.

$$\text{SPAN} = \frac{Dv_{90} - Dv_{10}}{Dv_{50}} \quad (12)$$

em que,

SPAN = amplitude relativa das gotas;

Dv_{90} = diâmetro da gota onde se encontra 90% do volume pulverizado (μm);

Dv_{10} = diâmetro da gota onde se encontra 10% do volume pulverizado (μm); e

Dv_{50} = diâmetro da gota onde se encontra 50% do volume pulverizado (μm).

O SPAN e o diâmetro da mediana volumétrica devem ser analisados em conjunto, na caracterização da qualidade de uma aplicação, pois, isoladamente, o diâmetro da mediana volumétrica é um valor de referência que não indica a dispersão dos dados em torno de si.

3.7. Determinação das perdas por evaporação

A taxa de evaporação da água pulverizada foi determinada em função da vazão de ar do ventilador e da perda de líquido por evaporação (Equação 13).

$$T_t = Q \rho_t \quad (13)$$

em que,

T_t = taxa de evaporação da água (g s^{-1});

ρ_t = perda de líquido por evaporação (g m^{-3}); e

Q = vazão de ar do ventilador ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

A perda de líquido por evaporação foi determinada em função dos valores da umidade absoluta do vapor d'água no ar depois da pulverização e da umidade absoluta do vapor d'água no ar antes da pulverização (Equação 14).

$$\rho_t = \rho_{us} - \rho_u \quad (14)$$

em que,

ρ_t = perda de calda por evaporação (g m^{-3});

ρ_{us} = umidade absoluta do vapor d'água no ar após pulverização (g m^{-3}); e

ρ_u = umidade absoluta do vapor d'água no ar antes da pulverização (g m^{-3}).

A umidade absoluta do vapor d'água no ar após a pulverização foi determinada em função da pressão parcial de vapor d'água no ar após a pulverização dentro da câmara climática (Equação 15).

$$\rho_{us} = \frac{216,68 e_{as}}{T} \quad (15)$$

em que,

ρ_{us} = umidade absoluta do vapor d'água no ar depois da pulverização (g m^{-3});

e_{as} = pressão parcial de vapor d'água no ar após o analisador a laser (hPa); e

T = Temperatura do ar (K).

A umidade absoluta do vapor d'água no ar antes da pulverização foi determinada em função da pressão parcial de vapor d'água do ar antes da pulverização dentro da câmara climática (Equação 16).

$$\rho_u = \frac{216,68 e_a}{T} \quad (16)$$

em que,

ρ_u = umidade absoluta do vapor d'água no ar antes da pulverização (g m^{-3});

e_a = pressão parcial do vapor d'água do ar antes do atomizador rotativo (hPa); e

T = Temperatura do ar (K).

3.8. Determinação da evaporação da gota em superfície foliar

Esse estudo foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado com cinco deficits de pressão de vapor (7, 14, 21, 28 e 35 hPa), totalizando 5 tratamentos, com 2 repetições em uma sequência de 10 fotos analisadas dentro de cada repetição. Na análise de variância dos dados significativos a 5% de probabilidade pelo teste t, as médias quantitativas foram mensuradas por regressão quadrática.

No ensaio, as condições climáticas foram monitoradas e controladas pela câmara climática automatizada, que permitiu a manutenção da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente, além de recircular o ar. O controle das condições climáticas foi efetuado por ar-condicionado de 9.000 BTU acoplado à câmara, aquecedor/umidificador e um ventilador axial modelo DF 15.15, do fabricante Delta Frio, com velocidade do ar de $1,45 \text{ m s}^{-1}$.

A gota de pulverização depositada sobre a folha de café foi formada por meio de uma microseringa digital, com controle de volume de 0,1 a 1 μL , e a gota depositada sobre o alvo foi formada com o volume de 0,5 μL para todos os tratamentos.

Foi utilizada uma câmara digital microscópica com zoom de 200 vezes, modelo Digital Microscope HD color CMOS sensor. Esse microscópio contava com uma câmara acoplada e conectada ao ultrabook ASUS, modelo SonicMaster, com tela touch screen. O microscópio foi colocado dentro da câmara climática sobre uma mesa na qual era posicionada a folha de café com a gota depositada (Figura 12). Após a estabilização da câmara climática nas condições desejadas, a folha de café com a gota em sua superfície foi colocada dentro da câmara; o *software* ManyCam realizava a aquisição das imagens e do tempo de evaporação. Os dados adquiridos foram divididos em 50 imagens pelo *software* Photo Scape V3.7, sendo, na sequência, analisadas no *software* IMAGE J 5.0, que determinava a área da gota até o final da evaporação. A área da gota em pixel era convertida em milímetros pela régua de Calibração Ruler.

Na Figura 12 observa-se a estrutura na qual foi desenvolvido o experimento para avaliação do tempo de evaporação.

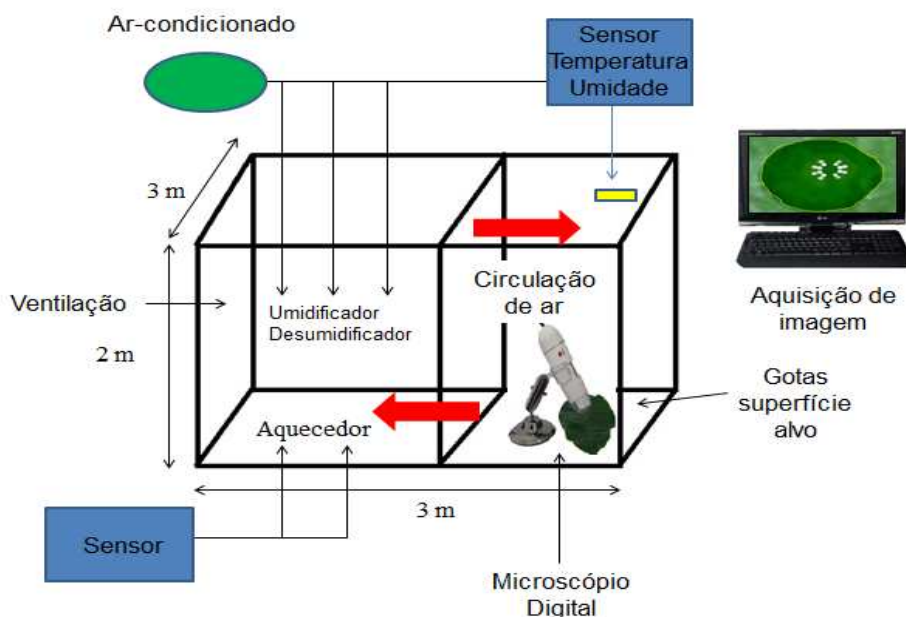


Figura 12 – Desenho esquemático da câmara climática e do sistema de avaliação da gota em superfície foliar para evaporação da gota.

Após a análise da área das gotas pelo o *software* IMAGE J, os dados foram tabulados em planilha eletrônica Microsoft Excel e feitas as análises estatísticas com o uso do programa computacional SigmaPlot Versão 10.0 (2015). Os parâmetros avaliados foram a área de cobertura da gota em relação ao tempo de evaporação e o tempo de evaporação de cada gota em diferentes deficits de pressão de vapor do ar.

3.9. Estimativa de deriva pelo *software* DRFITSIM e análise da velocidade terminal da gota influenciada pela evaporação

A estimativa da deriva foi realizada pelo *software* DRIFTSIM, desenvolvido pela Ohio University (USA), que permite a análise das gotas considerando o índice de deriva de 1 a 9, em relação à distância percorrida pela gota. Na simulação, foram utilizados diâmetros de gotas de 100, 200, 300, 400 e 500 μm , nas vazões $3,58 \text{ L min}^{-1}$ e $7,0 \text{ L min}^{-1}$, velocidade do ar de 5 km h^{-1} , altura de lançamento da gota de 2 m em relação à copa da planta, nos deficits de pressão de vapor de 7; 11,07; 21; 30,98 e 35 hPa. Os valores de deriva estimados pelo *software* foram apresentados por meio da análise de variância dos dados significativos a 5% de probabilidade pelo teste t, e as médias quantitativas foram mensuradas por regressão quadrática e linear, em função do diâmetro das gotas e do DPV para cada vazão utilizada no experimento.

A determinação da velocidade terminal da gota foi realizada por meio da Equação 17, apresentada por Bird et al. (1960).

$$V_t = \left[\frac{(0,072^5 (\rho_g - \rho_f)^5 g^5 d_g^8)}{\rho_f^2 \mu^3} \right]^{1/7} \quad (17)$$

em que,

ρ_g = massa específica da gota (kg m^{-3});

ρ_f = massa específica do ar (kg m^{-3});

g = aceleração da gravidade (m s^{-2});

d_g = diâmetro da gota (m); e

μ = viscosidade absoluta do ar ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

A distância de deposição das gotas foi determinada usando-se as Equações 17 e 18.

$$X = Y \frac{V_h}{V_t} \quad (18)$$

em que,

X = distância de deposição (m);

Y = altura de queda da gota (m);

V_h = velocidade do vento (m s^{-1}); e

V_t = velocidade terminal da gota (m s^{-1}).

Os valores da distância de deposição foram obtidos por meio do programa computacional DRIFITSIM, que estima a distância de deposição de gotas em função da altura de queda, temperatura ambiente, umidade relativa, velocidade terminal e velocidade do vento (ZHU et al., 1994).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Curva característica do ventilador

A câmara climática foi mantida estabilizada durante 30 minutos para todos DPVs (7; 11,07; 21; 30,98 e 35 hPa). A temperatura da água pulverizada foi de 25,6°C e sua tensão superficial foi 71,95 mN m⁻¹. A curva característica do ventilador foi definida de acordo com a vazão do ar e o cone totalmente aberto, em relação à potência de acionamento do ventilador e à pressão estática do ar (Figura 13).

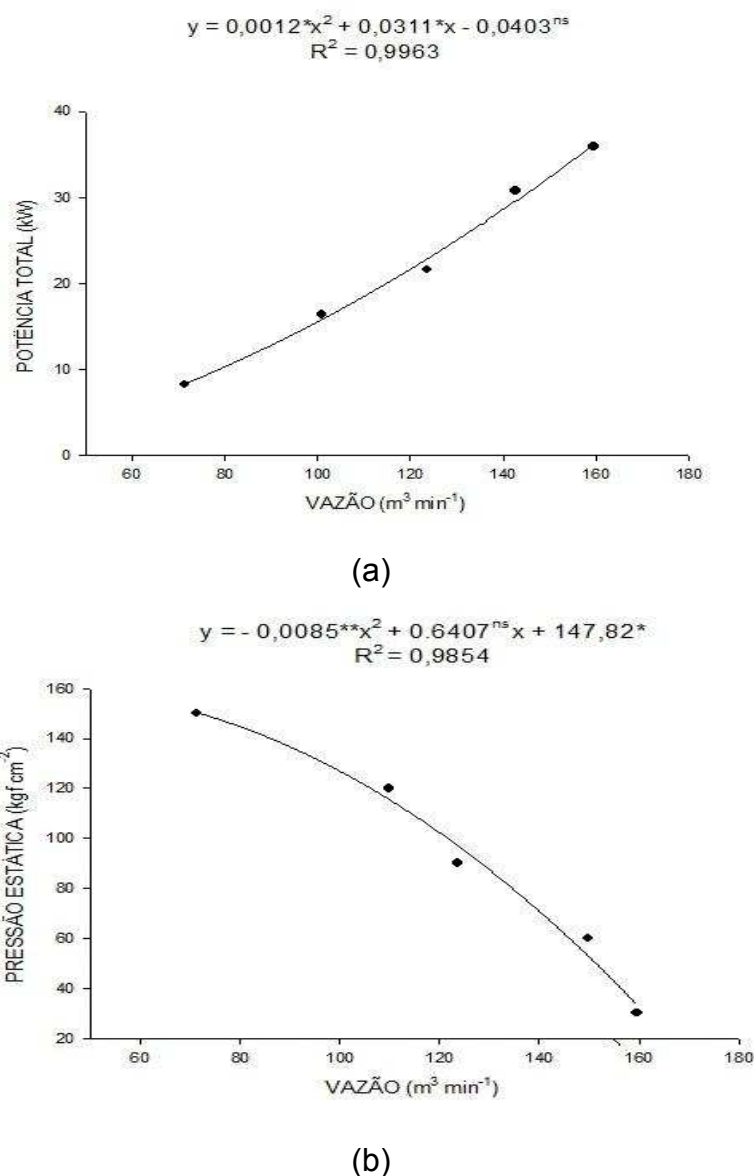


Figura 13 - Curva de calibração do ventilador em função da vazão de ar, da potência de acionamento (a) e da pressão estática do ar (b).

O experimento foi realizado empregando-se vazão de ar do ventilador igual a $123 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, que demandou potência de 18,18 kW para seu acionamento e proporcionou pressão estática do ar de 90 kgf cm^{-2} . O manômetro utilizado para a determinação da pressão da água direcionada ao atomizador rotativo foi aferido em relação ao manômetro padrão classe A3 (Figura 14).

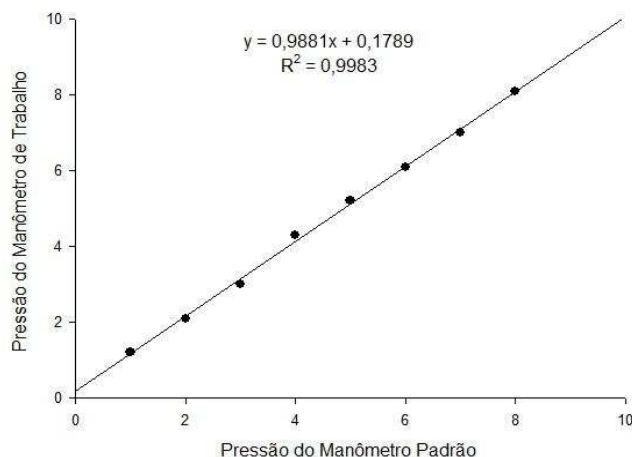


Figura 14 – Curva de calibração do manômetro utilizado na determinação da pressão da calda direcionada ao atomizador rotativo.

4.1.1. Caracterização do atomizador rotativo em laboratório

A caracterização do espectro de gotas do atomizador rotativo analisado em laboratório apresentou classificação dentro da faixa de gotas finas, médias e grossas, a partir da normativa ANSI; ASAE S572.1 (2009) e ISO 5682.1 (1996). O atomizador rotativo foi caracterizado pelo seu espectro de gotas formado na pulverização em todas as faixas de diâmetro de gotas, em virtude do seu mecanismo de fragmentação da gota ser centrífugo, o qual pode ter em altas rotações (7.000 rpm), gotas muito finas e, em baixas rotações (1.000 rpm), gotas grossas.

A vazão do atomizador rotativo é dependente do limitador de vazão, e para cada V.R.U as vazões se mantiveram constantes (Quadro 1), atendendo às normas EN 12761-2 (2001), na qual a variação de uma repetição para outra permaneceu abaixo de 10% em relação à vazão fornecida pelo fabricante.

Quadro 1 – Vazão do atomizador rotativo em diferentes pressões

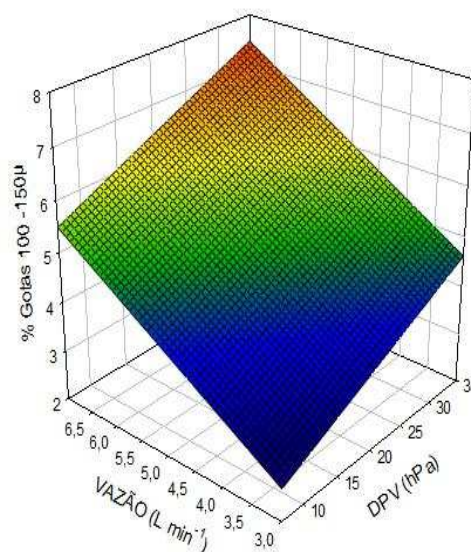
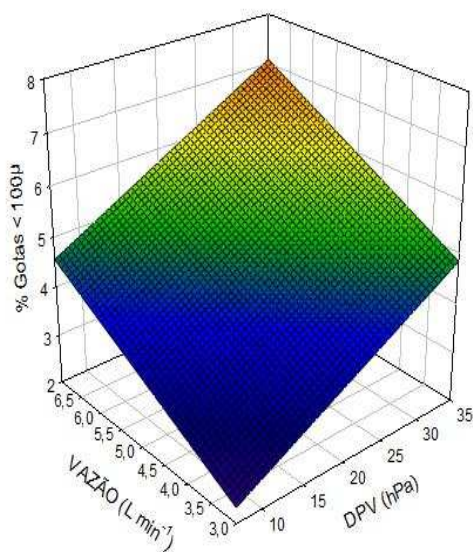
V.R.U	Vazão (L min ⁻¹)		
	Pressão		
	138 kPa	206 kPa	276 kPa
D-4	1,91	2,70	3,59
D-5	3,22	3,62	5,92
D-6	4,10	6,30	8,80
D-7	6,53	9,82	12,32
D-8	7,82	11,31	17,42

V.R.U = Limitador de vazão.

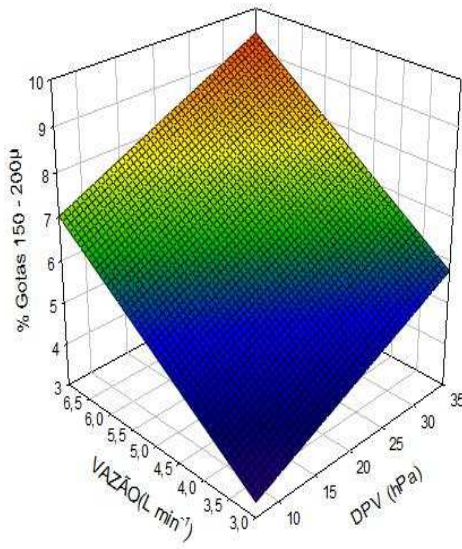
4.1.2. Espectro de gotas proporcionadas pelo atomizador rotativo em diferentes deficits de pressão de vapor e vazão do atomizador

A vazão de calda e o DPV apresentaram efeito linear e positivo sobre a porcentagem de gotas nas diferentes classes de diâmetro, exceto para a classe de 150 - 200 µm, na qual não houve influência do DPV sobre a porcentagem de gotas, em razão que nesta classe de diâmetro a proporção da superfície e do volumes da gota são próximas (Figura 15).

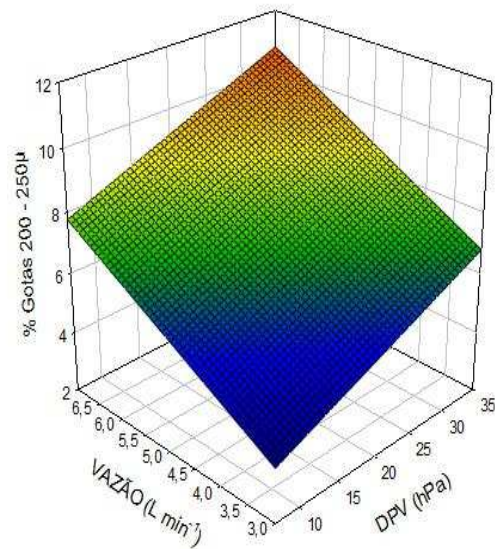
$$\% < 100\mu = 0,09011DPV^* + 0,56031VAZ\tilde{A}O^{**} (R^2 = 0,9487) \quad \% 100 - 150\mu = 0,07059DPV^{***} + 0,7136VAZ\tilde{A}O^{**} (R^2 = 0,9453)$$



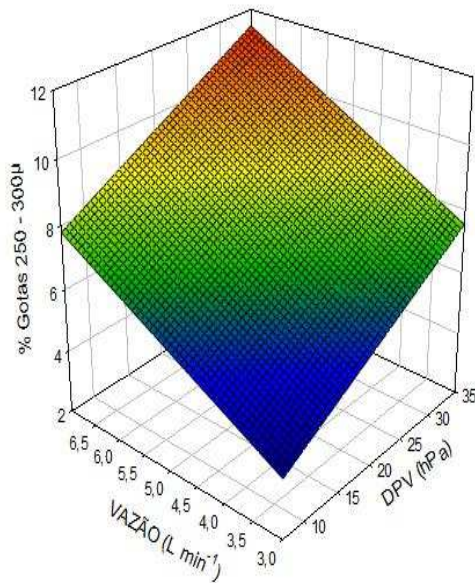
$$\% \text{ 150 - 200}\mu = 0,08587\text{DPV}^{\text{ns}} + 0,9167\text{VAZÃO}^{\text{**}} \quad (R^2 = 0,9359)$$



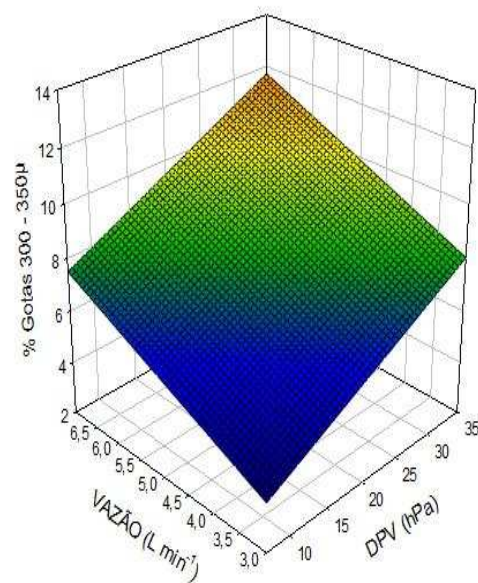
$$\% \text{ 200 - 250}\mu = 0,1059\text{DPV}^{\text{***}} + 1,000\text{VAZÃO}^{\text{**}} \quad (R^2 = 0,9427)$$



$$\% \text{ 250 - 300}\mu = 0,1314\text{DPV}^{\text{*}} + 0,9818\text{VAZÃO}^{\text{**}} \quad (R^2 = 0,9482)$$

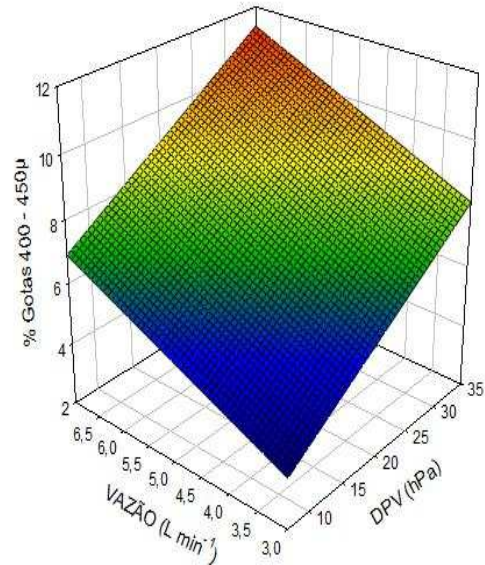
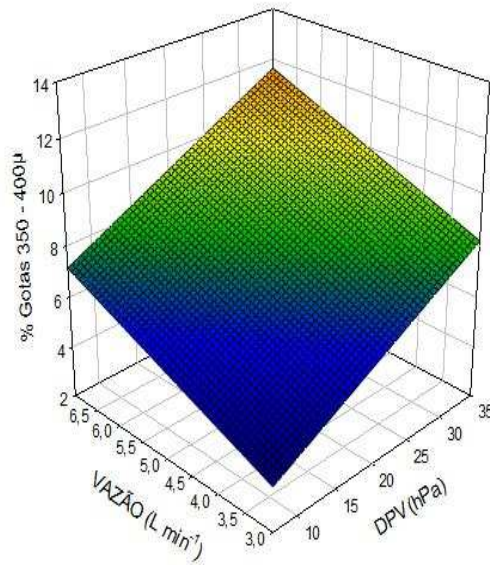


$$\% \text{ 300 - 350}\mu = 0,1504\text{DPV}^{\text{*}} + 0,9207\text{VAZÃO}^{\text{**}} \quad (R^2 = 0,9513)$$



$$\% \text{ 350 - 400}\mu = 0,1602\text{DPV}^* + 0,8606\text{VAZÃO}^{**} \quad (R^2 = 0,9534)$$

$$\% \text{ 400 - 450}\mu = 0,1598\text{DPV}^* + 0,8252\text{VAZÃO}^{**} \quad (R^2 = 0,9537)$$



$$\% \text{ 450 - 500}\mu = 0,1497\text{DPV}^* + 0,8210\text{VAZÃO}^{**} \quad (R^2 = 0,9510)$$

$$\% > 500\mu = 0,1089\text{DPV}^{****} + 6,5879\text{VAZÃO}^{**} \quad (R^2 = 0,9481)$$

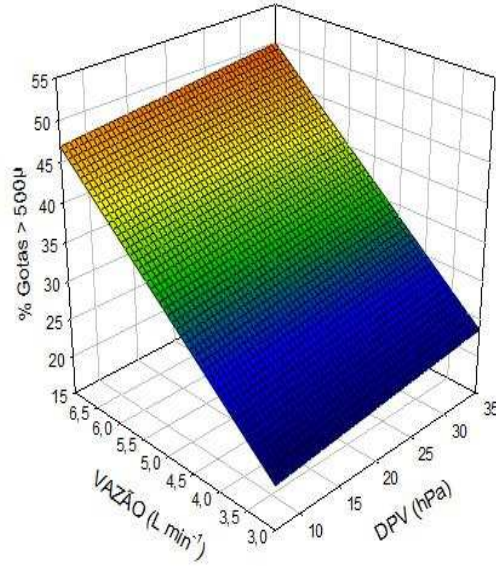
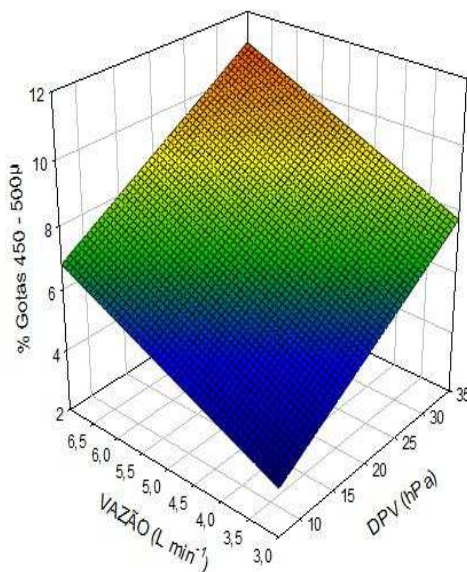


Figura 15 – Espectro de gota variando de 100 μm para de 500 μm , divididos em faixa de 50 μm , em diferentes vazões e deficit de pressão de vapor do ar (DPV), **1%, *5%, ***10%, ****15% e ^{ns} não significativo pelo teste t.

O aumento da vazão de calda e do DPV proporciona acréscimo no número de gotas nas classes de diâmetro. Em vazões mais altas, sob as mesmas condições de fragmentação da água, o maior volume de calda fracionada promove um aumento no número de gotas. O aumento do DPV promove a evaporação das gotas em todas as classes de diâmetro. Dessa forma, ocorre a

migração das gotas para uma classe de menor diâmetro, tornando-as mais suscetíveis à deriva e evaporação. Para as gotas de diâmetro acima de 500 μm , observou-se efeito mais pronunciado da vazão sobre o aumento da porcentagem de gotas dessas classes, em função que a quantidade de líquido pulverizado é maior e a rotação do atomizador era igual. Pode ser observado que, nessa classe, que abrange gotas com diâmetro de 500 μm a 2.500 μm , as gotas são menos suscetíveis à redução de seu diâmetro por efeito do DPV, em razão da menor área de superfície de contato gota/ar em relação ao volume da gota.

Ao avaliar o efeito dos diferentes deficits de pressão de vapor sobre o diâmetro das gotas em condições psicrométricas controladas, observou-se que o DPV não teve significância, em razão que o Dv_{10} , Dv_{50} e Dv_{90} é um conjunto de diâmetro de gotas avaliado em relação ao volume, já Maciel (2013) observou que, em condições de DPV elevado, ocorre o aumento do Dv_{50} , a evaporação das gotas finas e a redução do diâmetro das gotas grossas, estreitando o Dv_{50} em uma faixa menor de diâmetro e, conseqüentemente, obtendo espectro mais homogêneo, devido ter trabalhado com ponta de pulverização hidráulica de espectro muito fino.

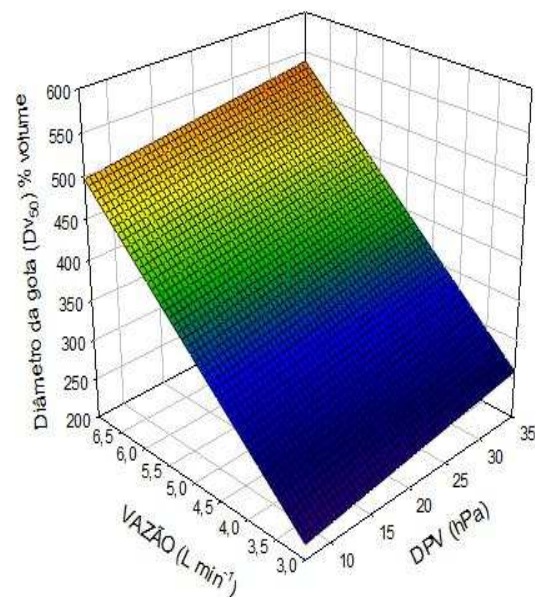
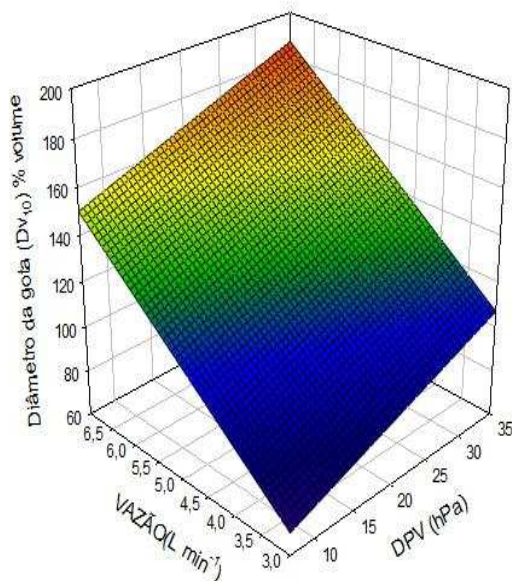
A aplicação de defensivos agrícolas em baixos volumes deve ser realizada com metodologias de controle da evaporação das gotas por meio da substituição da água por outro solvente ou pela adição de aditivos na calda de pulverização. Neste trabalho observou-se que a evaporação da água na pulverização aéreo é significativa, devido as condições físicas da calda que não são favoráveis para este tipo de perdas. Segundo Milhome et al., (2009), na avaliação da evaporação de uma calda, deve ser considerado o efeito dos solventes presentes nos agrotóxicos, em razão da possibilidade de o produto alterar sua pressão de vapor e, dessa forma, influenciar a evaporação das gotas. Yu et al., (2009) observaram redução de 29% na evaporação de gotas em uma calda com inseticida e surfactante para gotas de 343 μm . Os surfactantes diminuem a tensão superficial e aumentam a área de contato da gota com o ar atmosférico. A perda por evaporação é maior normalmente em caldas com surfactantes devido à maior troca de calor entre o líquido e o ar, em virtude da maior área de cobertura. Dentre os surfactantes, os produtos organossiliconados apresentam maior potencial de evaporação das gotas quando comparados aos óleos vegetais, em

razão dos organossiliconados terem pressão de vapor maior (XU et al., 2009; XU et al., 2010; ZHU et al., 2008; GIMENES et al., 2013 e VILELA et al., 2012).

Com base na Figura 16 observa-se que o DPV não apresentou efeito significativo sobre diâmetro da gota para Dv_{10} , Dv_{50} e Dv_{90} , apesar de a evaporação diminuir o diâmetro das gotas, que implicaria na redução dos valores desses parâmetros. A migração das gotas para uma classe de menor diâmetro manteve os valores de Dv_{10} , Dv_{50} e Dv_{90} . Por outro lado, o aumento da vazão da calda acresce o número de gotas dentro das classes de diâmetros, e isso alterou os valores desses parâmetros devido à evaporação ser mais pronunciada em gotas de menores diâmetros, proporcionando maior incremento de gotas nas classes de maior diâmetro.

$$Dv_{10} = 1,3293DPV^{ns} + 20,1043VAZÃO * (R^2 = 0,9404)$$

$$Dv_{50} = 1,4602DPV^{ns} + 69,5286VAZÃO * (R^2 = 0,9406)$$



$$Dv_{90} = 8,2630DPV^{ns} + 115,5969VAZÃO^{**} (R^2 = 0,9314)$$

$$SPAN = 0,03267DPV^* + 0,1821VAZÃO^{**} (R^2 = 0,9372)$$

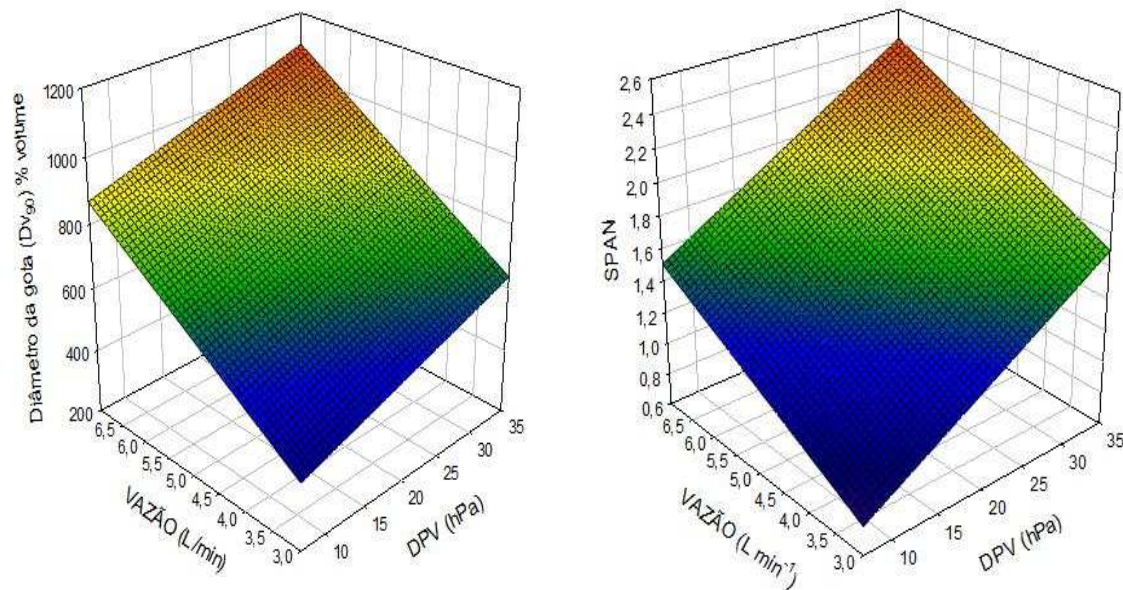


Figura 16 – Variação do Dv_{10} , Dv_{50} , Dv_{90} e SPAN, em relação à vazão da calda e o deficit de pressão de vapor do ar (DPV), **1%, *5%, e ^{ns} não significativo pelo teste t.

O Dv_{10} é influenciado pela evaporação, fazendo com que o SPAN aumente em até 46,6%. O Dv_{90} é influenciado pelo aumento da vazão, fazendo com que o SPAN aumente em até 42,2%. O espectro de gotas é o principal problema para ser controlado na pulverização para redução de perdas por evaporação e deriva, vimos que a formação do espectro de gotas do atomizador rotativo apresenta um efeito significativo quando observa-se a vazão e o diâmetro de gotas formados. Portanto, algumas estratégias ou projetos de sistemas que reduza o efeito climático sobre a água pulverizada é importante para o setor agrícola, exemplo é a preservação da gota fina apresentada no trabalho de Sasaki (2014) no qual desenvolveu sistema de resfriamento do ar reduzindo o potencial evaporativo de 32,8% para 14,99%. Esse sistema aumenta a eficácia da aplicação e preserva as gotas com menores diâmetros, tendo uma melhora na deposição no terço inferior das culturas herbáceas.

A vazão e o DPV apresentaram efeito linear e positivo sobre o SPAN. Dessa forma, o aumento da vazão de calda e do DPV proporcionam acréscimo no número de gotas dentro de cada classe de diâmetro. Conseqüentemente o aumento da vazão proporcionar incremento nos Dv_{10} , Dv_{50} e Dv_{90} , sendo este

acréscimo maior para o Dv_{90} , em relação ao Dv_{10} , em razão do elevado número de gotas maiores que $500 \mu\text{m}$. E a combinação do Dv_{90} , Dv_{10} e Dv_{50} altera os valores de SPAN.

Ao trabalhar com maior DPV, ocorre diminuição do Dv_{10} em relação ao Dv_{90} pelo fato de as gotas de menor diâmetro e serem mais suscetíveis à evaporação por sua maior relação superfície/volume, contribuindo para o aumento do SPAN.

O espectro de gotas formado pelos atomizadores rotativos como observados nas figuras anteriores, tem boa homogeneidade no espectro de gotas nos diferentes classes de diâmetros. A pulverização aérea com atomizadores rotativos produzem normalmente gotas muito finas, o qual tem grande influencia nas perdas por deriva e evaporação. Em outros trabalhos empregando-se gotas finas para a pulverização observa-se que é possível efetuar a aplicação reduzindo alguns problemas. A utilização de pulverizadores pneumáticos e hidropneumáticos proporciona menor perda de produto por evaporação quando a operação é realizada em condições de deficit de pressão de vapor d'água inferiores a 10 hPa (MANHANI, 2011 e ALVARENGA, 2012). Já no trabalho de Raetano (2011) sugere que a aplicação de defensivos agrícolas deve ser realizada em temperaturas entre 15 e 30°C e umidade relativa do ar superior a 55% . Mas se observar a aplicação de defensivos agrícolas nas condições físicas do sistema, a pulverização deve ser baseada no déficit de pressão de vapor d'água, que irá levar em consideração a combinação da temperatura e umidade relativa em uma faixa mais ampla de seus valores.

4.1.3 Perdas por evaporação em diferentes déficits de pressão de vapor e vazão da ponta

A vazão não apresentou efeito significativo sobre a perda real e a perda máxima de calda pulverizada, ao passo que o DPV apresentou efeito linear e positivo sobre esses parâmetros (Figura 17). O ambiente tem capacidade de suporte de vapor d'água limitado à condição psicrométrica do ar e, quando ocorre a evaporação em um determinado DPV, observa-se que, mesmo com o aumento, a vazão e o número de gotas dentro de determinada classe de diâmetro, a evaporação não tem maior expressividade.

$$\% \text{ Perdas por evaporação Real} = 0,2612X^{**} + 0,3655Y^{ns} \quad (R^2 = 0,8795) \quad \% \text{ Perdas por evaporação Máx.} = 0,4102X^* + 0,3565Y^{ns} \quad (R^2 = 0,9158)$$

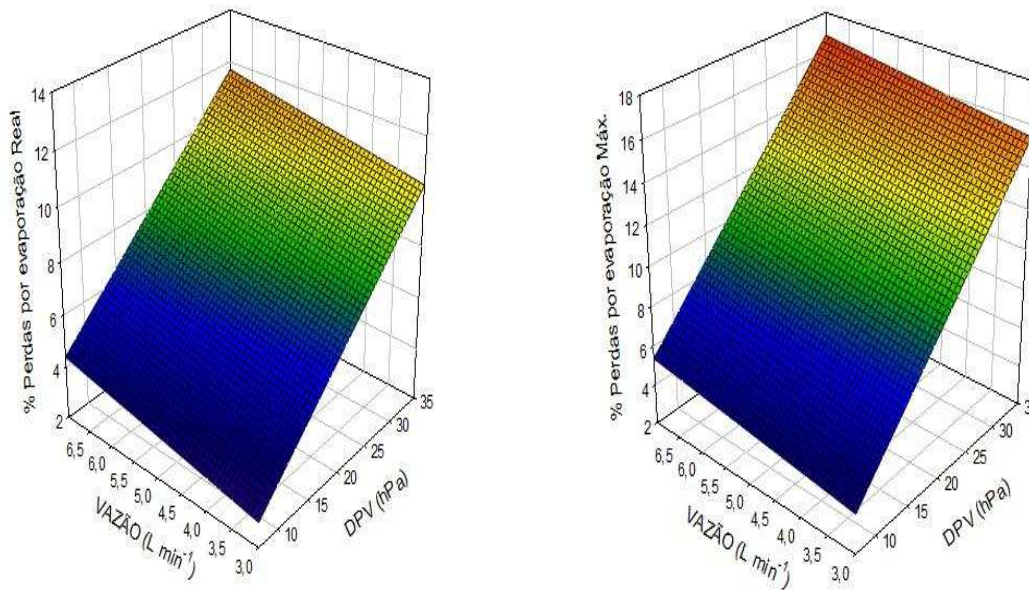


Figura 17 – Perda real e perda máxima de calda por evaporação em função da vazão e do deficit de pressão de vapor do ar (DPV), **1%, *5%, e ^{ns} não significativo pelo teste t, X = DPV e Y = VAZÃO.

As perdas por evaporação variam de 3 a 17% do volume total pulverizado quando o DPV é elevado de 7 para 35 hPa.

Ao ampliar o DPV, promove-se aumento nas perdas reais e máximas por evaporação, em razão da maior capacidade do ambiente em absorver água da pulverização. No DPV de 35 hPa, a perda por evaporação máxima chegou a 17% do volume de calda pulverizada. Em aplicações aéreas, a tendência é de que a perda máxima por evaporação apresente valor superior, devido ao espectro de gotas finas, à altura de lançamento das gotas, à velocidade de deslocamento da aeronave e à maior distância percorrida pela gota para alcançar o alvo que a expõe por mais tempo ao efeito evaporativo do ar atmosférico. Lorenzini (2013), validou uma modelagem de evaporação de gotas de irrigação relacionando diâmetro da gota, velocidade de queda da gota, velocidade do vento, radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, e em seu trabalho constatou que as perdas podem chegar até 44% do volume de uma gota com diâmetro de 1 mm.

A escassez na disponibilidade da água é um problema que o setor agrícola já enfrenta na atualidade com possibilidade de intensificar em um futuro próximo. A aplicação de defensivos agrícolas por meio de aeronaves pode reduzir significativamente o volume de calda pulverizada. No entanto, esta via de controle

fitossanitário deve ser utilizada de maneira criteriosa, de maneira que não cause danos à saúde humana e ao meio ambiente devido às perdas que ocorrem durante a aplicação.

4.2. Perdas por evaporação da gota depositada em superfície foliar

A redução da tensão superficial de uma gota de pulverização depositada sobre a folha de uma cultura fará que a mesma se espalhe formando uma película sobre a superfície, em razão disso esta gota terá um acréscimo na área de contato e maior influencia do ambiente. O tempo de evaporação da gota pode-se relacionar com a quebra da tensão superficial, pelo fato de que, quando uma molécula de água é rompida, suas ligações de ponte de hidrogênio fazem com que as moléculas fiquem mais propensas a se desprenderem das outras moléculas e serem perdidas para o ambiente.

No Quadro 2 é demonstrada a análise de variância do tempo de evaporação da gota sobre a superfície foliar.

Quadro 2 - Análise de variância do tempo de evaporação da água em relação ao DPV

V	G.L	SQ	QM	F
Regressão	2	107,62	53,81	23,43**
Residual	2	4,59	2,29	
Total	4	112,21	28,06	

**Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de regressão quadrática.

No trabalho de Zhu et al. (2008), o tempo de evaporação e a área molhada das gotas individuais a partir de gotas com diâmetros de 246 e 886 μm com surfactantes em condições de umidade relativa entre 30% e 90% foram medidos com imagens sequenciais em condições laboratoriais controladas, e concluíram que o aumento da área molhada da gota, reduz o tempo de evaporação da gota. Já em outro trabalho do mesmo autor, uma gota de 343 μm com surfactante, na folha de macieira a 60% de umidade relativa, o tempo de evaporação diminuiu de 70 para 50 segundos, e a área molhada aumentou de 0,366 para 0,890 mm^2 .

Nas Figuras 18 e 19 são apresentados a redução do tempo de evaporação da gota e a área de contato da gota em superfície foliar dependente do deficit de pressão de vapor do ar.

$$Y = 0,0247^{***}x^2 - 1,46^{***}x + 26,46^* (R^2 = 0,9591)$$

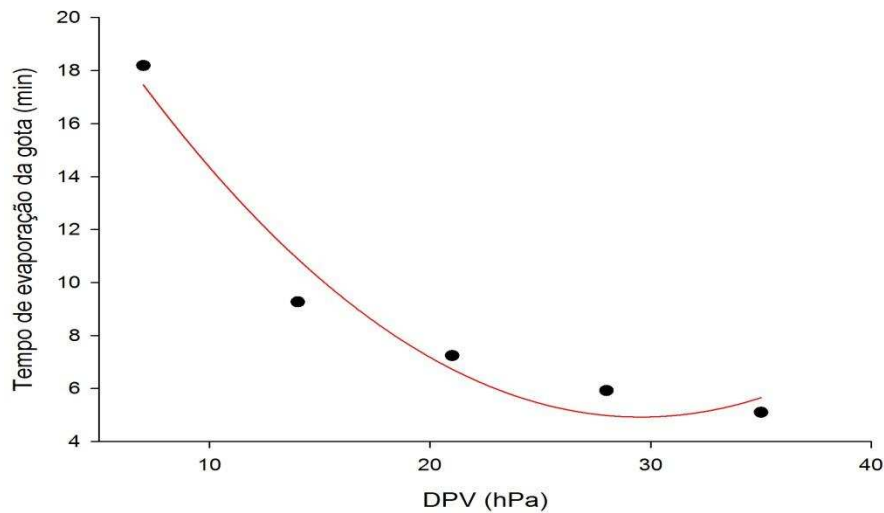


Figura 18 - Tempo de evaporação da gota em relação ao déficit de pressão de vapor do ar. Significativo a ***1%.

No Quadro 3 é apresentada a relação do tempo de evaporação da gota em superfície foliar quando utiliza-se a fórmula estimada da Figura 18.

Quadro 3 – Estimativa do tempo de evaporação das gotas de 0,5 µL em função do déficit de pressão (DPV) de vapor do ar

DPV (hPa)	Tempo de evaporação (min)
10	14,33
20	7,14
30	4,89

De acordo com o Quadro 3 sob o DPV de 10 hPa, que é considerado ideal para aplicação de defensivos agrícolas, a evaporação de uma gota com volume de 0,5 µL ocorre em 14,33 minutos. No entanto, o tempo de absorção de muitos agrotóxicos pelas plantas é superior a esse tempo. Devido a isso podem estar sendo indicadas superdosagens de defensivos agrícolas para compensação das perdas por evaporação e deriva da calda de pulverização.

O DPV reduziu o tempo de evaporação em até 34% em relação à pulverização quando é feita do DPV 10 para 30 hPa.

Na Figura 19 foi apresentado o tempo de evaporação da gota e a redução de sua área de cobertura em relação ao déficit de pressão de vapor do ar. Nos DPV's de 7 e 14 hPa o tempo de evaporação da gota não é influenciado pela sua área molhada em gotas com volume de 0,5 µL. Herbil (2015) constatou que a

forma que a gota adquire após ser depositada sobre a folha influencia o tempo de evaporação da gota.

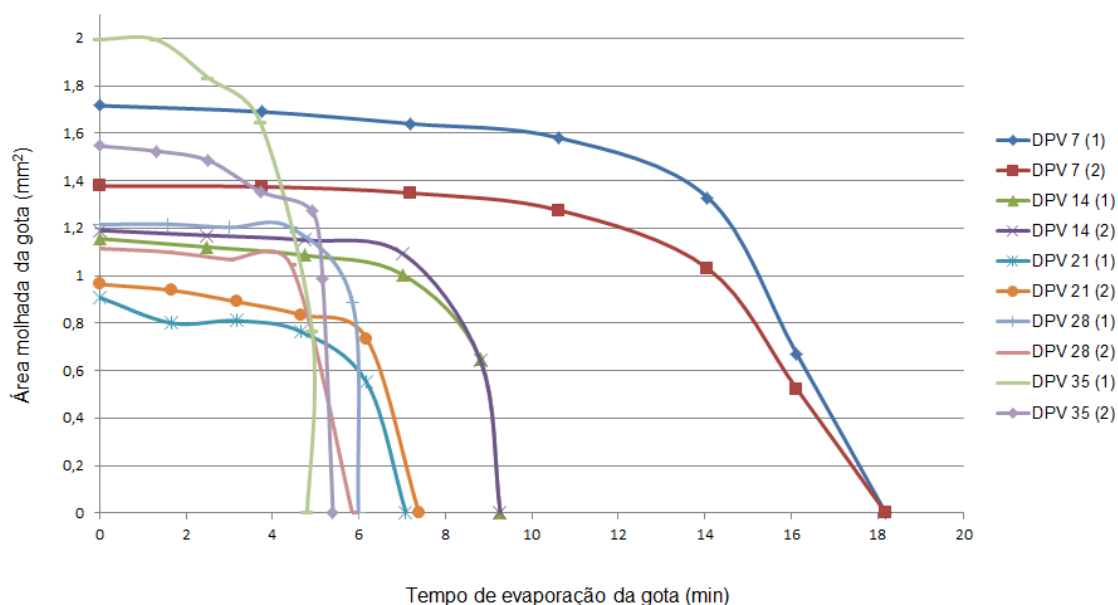


Figura 19 – Tempo de evaporação da gota e redução de sua área de cobertura em relação ao deficit de pressão de vapor do ar.

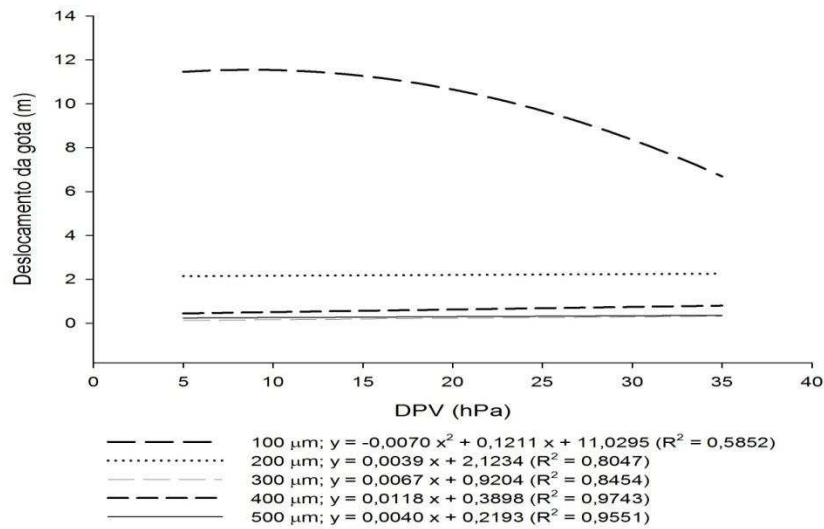
No trabalho desenvolvido por Sasaki et al. (2016), os pesquisadores avaliaram o efeito das condições psicrométricas do ar e da pressão de trabalho sobre o espectro de gotas de um pulverizador turboatomizador e observaram que, utilizando o bico JSF 110-02, a dada pressão de operação, houve redução do diâmetro de gotículas, para cada aumento de 1 hPa no DPV, as magnitudes de redução do diâmetro das gotas foram de aproximadamente 1,514 μm . Esta redução do diâmetro de gotas como visto na figura 18 não apresenta significância em relação ao tempo de evaporação quando a gota esta depositada, o diâmetro da gota só terá influencia em DPV maiores que 14 hPa.

A alteração do ângulo de contato da gota de 30% para a área de contato de 22% com a superfície foliar pode proporcionar até 50% de perdas por evaporação, dependendo da constituição da epiderme foliar (XU et al., 2010).

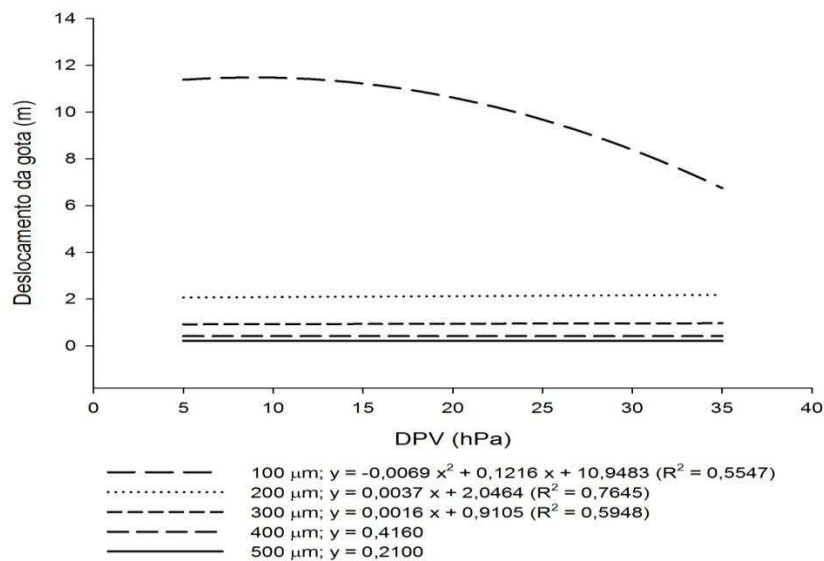
4.3. Perdas por deriva em diferentes diâmetros de gotas por influências do deficit de pressão de vapor do ar

Na Figura 20 é apresentada a deriva das gotas formadas pelo atomizador rotativo em relação ao déficit de pressão de vapor do ar e para as vazões de

calda de pulverização a $3,58 \text{ L min}^{-1}$ e 7 L min^{-1} , (Figura 19a e 19b), respectivamente.



(a)



(b)

Figura 20 – Análise computadorizada da deriva em relação ao espectro de gotas formado na pulverização aérea em diferentes déficits de pressão de vapor do ar, deslocamento das gotas com vazão de $3,58 \text{ L min}^{-1}$ (a) e deslocamento da gota com vazão de $7,00 \text{ L min}^{-1}$ (b).

O deficit de pressão de vapor influencia a deriva das gotas pulverizadas, principalmente para gotas com diâmetro menor que $200 \mu\text{m}$. Observa-se, na Figura 20, que a curva é decrescente para a deriva com gotas de diâmetro de $100 \mu\text{m}$, pelo fato de o programa Driftsim relatar que, em determinados déficits de

pressão de vapor do ar certa porcentagem do volume de gotas de 100 μm já evaporaram antes de ocorrer o fenômeno da deriva. Para as gotas com diâmetro maior que 100 μm e menor que 500 μm observa-se que o aumento do DPV intensifica seu deslocamento. Este fato ocorre devido à diminuição do diâmetro da gota e conseqüentemente sua maior propensão em ser transportada pelo vento.

O aumento de vazão de calda proporciona acréscimo no número de gotas dentro de determinadas classes de diâmetro de gotas. Dessa forma, o potencial de deriva das gotas pulverizadas é maior na vazão de 7,0 L min^{-1} . Além disso, sob DPV de 35 hPa a diminuição da gota devido a evaporação provoca a migração das gotas para classes de menor diâmetro.

Na aplicação de defensivos agrícolas por meio de aeronaves a deriva é agravada pela utilização de gotas menores que 500 μm em distâncias de pulverização de até 5 metros em relação ao solo. Ademais, a variação na direção do deslocamento da massa de ar no ambiente pode provocar a má distribuição da calda na lavoura com subdosagem do ingrediente ativo que pode desenvolver resistência em patógenos e plantas daninhas. Sendo assim, a minimização da deriva é dependente do conhecimento de ferramentas que reduzam o potencial de deslocamento das gotas. Ru et al. (2014), concluíram que para reduzir a deriva notificou pela densidade de gotas que houve um aumento de 20 para 42 gotas cm^{-2} quando utilizava a pulverização aérea eletrostática em relação a pulverização aérea com atomizador rotativo.

A redução do diâmetro de gotas em razão da evaporação no momento da pulverização pode provocar, em segundo plano, o aumento de perdas por deriva, ocasionando a contaminação de outras lavouras vizinhas e provocando a má-distribuição de calda na lavoura, aumentando o risco de resistência de doenças, pragas e plantas daninhas.

Normalmente, a campo, ocorre uma “deriva técnica”, de maneira que os atuais equipamentos de pulverização, mesmo com calibração, temperatura e ventos ideais, deixem 32% dos agrotóxicos pulverizados retidos nas plantas; outros 49% vão para o solo e 19% vão pelo ar, para outras áreas circunvizinhas da aplicação (CHAIM, 2004). As gotas derivadas da pulverização aérea com deslocamento do avião a 5 m do solo e velocidade do vento de 3 m s^{-1} pode proporcionar, em média, 28% de perdas da pulverização total (XINYU et al. 2014).

As elevadas perdas de agrotóxicos no ambiente não geram apenas problemas sociais, mas também elevados gastos econômicos, em virtude da aplicação inadequada. Com a deficiência do manejo do uso de defensivos agrícolas, pode haver redução da produção com conseqüente queda do retorno financeiro.

5. CONCLUSÕES

A câmara climática manteve as condições de déficit de pressão de vapor do ar constante durante 30 minutos para todos os ensaios.

O simulador de pulverização aérea proporcionou deslocamento da aeronave a 150 km h^{-1} , proporcionando espectro de gotas igual à pulverização aérea a campo.

O espectro de gotas produzido pelo atomizador rotativo é mais homogêneo para a vazão de $3,58 \text{ L min}^{-1}$ que apresenta SPAN de 0,4 no DPV de 7 hPa. O aumento da vazão proporciona acréscimo médio de 43% na faixa do espectro de gotas em determinadas classes de diâmetro. O déficit de pressão de vapor do ar é o principal fator que influencia na evaporação e deriva, aumentando as perdas para o ambiente.

As perdas por deriva e evaporação são elevadas para pulverização aérea, portanto, este método de aplicação de agrotóxicos deve-se ser monitorado constantemente e devem ser criadas leis que definam as condições psicrométricas que possibilitam a utilização de aeronaves.

O tempo de evaporação de uma gota reduz 81%, quando o déficit de pressão de vapor do ar é aumentado de 7 para 35 hPa. O pequeno aumento da vazão aérea de cobertura da gota em superfície foliar de uma mesma calda em até $0,4 \text{ mm}^2$ não é significativo para aumentar a evaporação.

O aumento da vazão de $3,58 \text{ L min}^{-1}$ para 7 L min^{-1} aumenta o potencial de deriva, em razão do aumento do número de gotas em até 43%, dentro da mesma classe de diâmetro. As gotas com diâmetro até $100 \text{ }\mu\text{m}$ apresentam deslocamento máximo de 12 metros em DPV de 7 hPa. As gotas nas faixas de diâmetro de 100, 200, 300, 400 e $500 \text{ }\mu\text{m}$ sofrem aumento na deriva quando o DPV é aumentado de 7 para 35 hPa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA. **União Europeia**. Diretiva 98/83/CE do Conselho da União Europeia de 5/12/1998 Relativa à Qualidade da Água Para Consumo Humano. Bruxelas: União Europeia; 1998. [acessado 2015 nov 9]. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1998:330:0032:0054:PT:pdf>.

ANTUNIASSI, U. R. Conceitos básicos da tecnologia de aplicação de defensivos para a cultura da soja. **Boletim de pesquisa de Soja** 2009. Rondonópolis, v. 13, p. 299-317, 2009.

AIR MOVING AND CONDITIONING ASSOCIATION, INC – AMCA. **Laboratory Methods of Testing Fans for Rating – ANSI/AMCA Standard 210-99**. Arlington Heights, 2000. 69 p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. **Spray nozzle classification by droplet spectra – ANSI/ASAE S572.1**. St. Joseph, 2009. 4 p.

ALVARENGA, C. B. **Automatização de um pulverizador hidropneumático visando o controle do espectro de gotas em função do Deficit de Pressão de Vapor d'água no ar**. 2012. 119f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

ALVARENGA, C. B.; CUNHA, J. P.A. R. Aspectos qualitativos da avaliação de pulverizadores hidráulicos de narra na região de Uberlândia, Minas Gerais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n.3, p. 555-562, 2010.

ARVIDSSON, T.; BERGSTRÖM, L.; KREUGER, J. Spray drift as influenced by meteorological and technical factors. **Pest Management Science**, Chichester, v. 67, p. 586-598, 2011.

BAUER, F. C.; RAETANO, C. G.; Assistência de ar na deposição e perdas de produtos fitossanitários em pulverizações na cultura da soja. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 2, p. 271-276, abr/jun. 2000.

BEDOS, C.; ROUSSEAU-DJABRI, M. F.; LOUBET, B.; DURAND, B.; FLURA, D.; BRIAND, O.; BARRIUSO, E. Fungicide volatilization measurements: inverse modeling, role of vapor pressure, and state of foliar residue. **Environmental Science & Technology**, Iowa City, v. 44, n. 7, p. 2522-2528, 2010.

BERG, F.; KUBIAK, R.; BENJEY, W. G.; MAJEWSKI, M. S.; YATES, S. R.; REEVES, G. L.; SMELT, J. H.; LINDEN, A. M. A. Emission of pesticides into the air. *Water, Air and Soil Pollution*, New York, v. 115, p. 195, 218, 1999.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transporte phenomena**, New York: Wiley, 780. 1960.

BOEHNCKE, A.; SIEBERS, J.; NOLTING, H. G. Investigations of the evaporation of selected pesticides from natural and model surfaces in field and laboratory. **Chemosphere**, v. 21, n. 9, p. 1109-1124, 1990.

BUENO, M. R.; CUNHA, J. P. A. R.; ALVES, G. S. Deposição de calda na aplicação aérea e terrestre de fitossanitário na cultura da batata. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 6, p. 1210-1222, nov/dez. 2013.

BONMATIN, J. M.; GIORIO, C.; GIROLAMI, V.; GOULSON, D.; KREUTZWISER, D. P.; KRUPKE, C.; LIESS, M.; LONG, E.; MARZARRO, M.; MITCHELL, E. A. D.; NOOME, D. A.; SIMON-DELISO, N.; TAPPARO, A.. Environmental fate and exposure; neonicotinoids and fipronil. **Environ Sci Pollut Res**, ISSN: 0944-1344, v. 22, p. 35- 67, 2015.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Portaria MS 2.914 de 4 de dezembro de 2011. Brasília: Ministério da Saúde; 2001. [acessado 2015 fev 1]. Disponível em: http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Portaria_MS_2914-11.pdf

BUSH, J. W. M. MIT Lecture Notes on Surface Tension, lecture 5. 2004, **Massachusetts Institute of Technology**. Disponível: <http://web.mit.edu/1.63/www/Lec-notes/Surfacetension/Lecture5.pdf>, Acessado em 1 de Abril, 2016.

CAMARA, F. T.; SANTOS, J. L.; SILVA, E. A.; FERREIRA, M. C. Distribuição volumétrica e espectro de gotas de bicos hidráulicos de jato plano de faixa expandida XR 11003. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 740-749, 2008.

CARNEIRO, FERREIRA, F. (Org.). **Dossiê ABRASCO: um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde**. Rio de Janeiro: EPSJV; São Paulo: Expressão Popular, 2015.

CARLSEN, S. C. K. SPLIID, N. H.; SVENSMARK, B. Drift of 10 herbicides after tractor spray application. 1. Secondary drift (evaporation). **Chemosphere**, Philadelphia, v. 64, p. 787-794, 2006a.

CARLSEN, S. C. K.; SPLIID, N. H.; SVENSMARK, B. Drift of 10 herbicides after tractor spray application. 2. Primary drift (droplet drift). **Chemosphere**, Philadelphia, v. 64, p. 778-786, 2006b.

CHAIM, Aldemir. Tecnologia de aplicação de agrotóxicos: fatores que afetam a eficiência e o impacto ambiental. In: SILVA, Célia Maria Maganhotto de Souza; FAY, Elisabeth Francisconi (Orgs.). **Agrotóxicos & ambiente**. Brasília: Embrapa; 2004. p. 317.

CHECHETTO, R. G.; ANTUNIASSI, U. R.; MOTA, A. A. B.; CARVALHO, F. K.; SILVA, A. C. A.; VILELA, C. M. Influência de pontas de pulverização e adjuvantes no potencial de redução de deriva em túnel de vento. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 1, p. 37-46, jan/fev. 2013.

CHECHETTO, R. G. **Métodos de coleta de deposição para ensaios de deriva em aplicações aéreas**. 2015. 80f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – UNESP, Botucatu-SP, 2015.

COSTA, A. C. P. R.; MARTINS, D.; COSTA, N. V.; PEREIRA, M. R. R.; SILVA, J. I. C. Desempenho de pontas de pulverização na deposição de gotas de

pulverização na cultura do amendoim. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, suplemento 1, p. 1745-1758, 2011.

CUNHA, J. P. A. R. et al. Efeito de pontas de pulverização no controle químico da ferrugem da soja. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 283-291, abr./jun. 2008.

CUNHA, J. P. A. R.; RUAS, R. A. A.; TEIXEIRA, M. M. Distribuição volumétrica de pontas de pulverização de jato cônico vazio com indução de ar analisada em mesa de prova e simulação computadorizada. **Epagri**, v. 54, n. 311, p. 40 – 46, 2007.

CRAIG, I. P.; HEWITT, A.; TERRY, H. Rotary atomizer design requirements for optimum pesticide. *Crop Protection* v. 66, p. 34 – 39, 2014.

DURIGAN, J. C.; CORREIA, N. B. Efeitos de adjuvantes na aplicação e eficácia de herbicidas. In: VARGAS. L.; ROMAN, E. S. **Manual de manejo e controle de plantas daninhas**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008, p. 133-171.

EFSA (2013e) Evaluation of the FERA study on bumble bees and consideration of its potential impact on the EFSA conclusions on neonicotinoids. *EFSA J* 11(6):3242, 20 pp. www.efsa.europa.eu/efsajournal. Acesso 21 Junho 2014.

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

ERBIL, H. Y. Control of stain geometry by drop evaporation of surfactant containing dispersions, **Elsevier**, v.222, n. 275 – 290, 2015.

EUROPEAN STANDARD – EN. Agricultural and forestry machinery. Sprayers and liquid fertilizer distributors. **Environmental protection. Part 2: Field crop sprayers** – EN 12761-2. Brussels, 2001. 18 p.

FERRREIRA, L. R.; FERREIRA, F. A.; MACHADO, A. F. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. **Tópico em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: Editora UFV, 2007. Cap. 8, p. 325-367, 2007.

FOQUÉ, D.; NUYTENS, D. Effect of air support and spray angle on coarse droplet sprays in ivy pot plants. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 54, n. 2, p. 409-416, 2011.

GANDOLFO, M. A.; CHECHETTO, R. G.; CARVALHO, F. K.; GANDOLFO, U. D.; MORAES, E. D. Influência de pontas de pulverização e adjuvantes na deriva em caldas com glyphosate. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 474-480, jul-set, 2013.

GANDOLFO, M. A.; CARVALHO, F. K.; CHECHETTO, R. G.; GANDOLFO, U. D.; MORAES, E. D. Effect of working pressure at different spray nozzle on drift quantification in wind tunnel. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 1, p. 66-73, jan/fev. 2014.

GIMENES, M. J.; ZHU, H.; RAETANO, C. G.; OLIVEIRA, R. B. Dispersion and evaporation of droplets amended with adjuvants on soybeans. **Crop Protection**, Philadelphia, v. 44, p. 84-90, 2013.

GIL, E.; BALSARI, P.; GALLART, M.; LLORENS, J.; MARUCCO, P.; ANDERSEN, P. G.; FÀBREGAS, X.; LLOP, J. Determination of drift potential of different flat fan nozzles on a boom sprayer using a test bench. **Crop Protection**, Philadelphia, v. 56, p. 58-68, 2014.

GIL, Y. Influence of micrometeorological factors on pesticide loss to the air during vine spraying: data analysis with statistical and fuzzy inference models. **Biosystems Engineering, Columbus**, 100(2), 184-197, 2008.

GUGLIOTTI, M. **Redução da evaporação de água por filme monomoleculares** 2014, Disponível: http://www.crq4.org.br/informativomat_1227, Acesso:15 de junho de 2016.

GRISOLIA, C. K. Agrotóxicos, mutações, câncer e reproduções – Riscos ao homem e ao meio ambiente, pela avaliação de genotoxicidade, carcinogenicidade e efeitos sobre reprodução. **Editora UnB**, Brasília – DF, 2005, p. 329.

HEALTH, J.; AHMAD, A.; LEAHEY, J. P. A simple procedure to measure the volatility of agrochemicals from the soil and leaf surfaces. **Brighton Crop Protection Conference – Pest and Diseases**, v. 7, p. 835-840, 1992.

HILZ, E.; VERMEER, A. W. P. Spray drift review: the extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction. **Crop Protection**, Philadelphia, v. 44, p. 75-83, 2013.

HOFFMANN, W. C.; FRITZ, B. K.; FAROOQ, M.; WALKER, T. W.; CZACZYK, Z.; HORNSBY, J.; BONDS, J. A. Evaluation aerial spray technologies for adult mosquito control application. **Journal of plant protection research**, v. 53, n. 3, 2013.

INTERNATIONAL LABOR ORGANIZATION (ILO). World day for safety and health at work: a background paper. Geneva: **International Labour Office**, 2005. p. 7.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **Equipment for crop protection – Spraying equipment – Part 1: Test methods for sprayer nozzles**. ISO 5682-1, Geneva, 1996. 5p.

JIAO, L.; DONG, D.; FENG, H.; ZHAO, X.; CHEN, L. Monitoring spray drift in aerial spray application based on infrared thermal imaging technology. **Computers and electronics in agriculture**, v. 121, p. 135 – 140, 2016.

JOODE, B. V.W.; BARBEAU, B.; BOUCHARD, M.; MORA, A. M.; SKYTT, A.; CÓRDOBA, L. QUESADA, R.; LUNDH, T.; LINDH, C. H.; MERGLER, D. Manganese concentrations in drinking water from villages near banana plantations with aerial mancozeb spraying in Costa Rica: results from the infants environmental health study. **Environmental pollution**, v. 215, p. 247 – 257, 2016.

JUNIOR S. T. D.; FERREIRA, M. C.; LASMAR, O. Physical characteristics of oily spraying liquids and droplets formed on coffee leaves and glass surfaces, **Revista Engenharia Agrícola**, v 35, n 3, p. 588 – 600, 2015.

KUBIAK, R.; MAURER, T.; EICHHORN, K. W. A new laboratory model for studying the volatilization of pesticides under controlled conditions. **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 132, p. 115-123, 1993.

LIN, H.; ZHOU, H.; XU, L.; ZHU, H.; Effect of surfactante concentration on the spreading properties of pesticide droplets on eucalyotus leaves. **Biosystems Engineering**, v. 43, p. 42 – 49, 2016.

LORENZINI, G.; SARO, O. Thremal fluid dynamics modelling of a water droplet evaporating air, **International Journal of Heat and Mass Transfer** , v. 62, p. 323-335, 2013.

MACIEL, C. F. S. **Perdas de agrotóxicos por evaporação em função das condições psicrométricas do ar**. 2013. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

MACIEL, C. F. S.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C.; ZOLNIER, S.; CECON, P. R. Droplet spectrum at diferente vapour pressure déficits. **Ciência Agronômica**, v. 47, n. 1, p. 41 – 46, 2016.

MADUREIRA, R. P.; RAETANO, C. G.; CAVALIERI, J. D. Interação pontasadjuvantes na estimativa do risco potencial de deriva de pulverizações. **Agriambi**, Campina Grande, v. 19, n. 2, p. 180-185, 2015.

MANHANI, G.G.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C.; ZOLNIER, S.; SASAKI, R. S. Developing a system to control the air flow of a pneumatic sprayer. **Bioscience Journal**, v.29, n.3, p. 667-675, 2013.

MANHANI, G. G. **Automatização de pulverizador pneumático visando à eficiência da aplicação e redução de impactos ambientais**. 2011. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

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

MEJIA, A. C. D.; The health consequences of aerial spraying of illicit crops: the case of colombia. **Center for global development**, 2015.

MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI, N. **Engenharia de ventilação industrial**. São Paulo: Convênio Cetesb/Ascetesb, 1985. 442p.

MILHOME, M. A. L.; SOUZA, D. O. B.; LIMA, F. A. F.; NASCIMENTO, R. F. Avaliação do potencial da contaminação de águas superficiais e subterrâneas por pesticidas aplicados na agricultura do Baixo Jaguaribe, CE. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 363-372, jul/set. 2009.

MOREIRA, J. C.; PERES, F. SIMÕES, A. C.; PIGNAT, W. A.; DORES, E. C.; DORES E. C.; VIEIRA, S. N.; STRUSSMANN, C. MOTT, T. Contaminação de águas superficiais e de chuva por agrotóxicos em uma região do estado do Mato Grosso, **Ciência & saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1557 – 1568, 2012.

NASCIMENTO, J. M.; GAVASSONI, W. L.; SOUZA, C. M. A.; BACCHI, L. M. A.; SERRA, A. P.; ZACCARON, M. L. Pontas de pulverização e horários de aplicação no controle químico de ferrugem asiática da soja. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 2037-2048, set/out. 2013.

NUYTTENS, D.; TAYLOR, W. A.; SCHAMPHELEIRE, M.; VERBOVEN, P. DEKEYSER, D. Influence of nozzle type and size on drift potential by means of different wind tunnel evaluation methods. **Biosystems Engineering**, Philadelphia, v. 103, p. 271-280, 2009.

NUYTTENS, D.; SCHAMPHELEIRE, M.; VERBOVEN, P. SONCK, B. Comparison between indirect and direct spray drift assessment methods. **Biosystems Engineering, Philadelphia**, v. 105, p. 2-12, 2010.

OLIVEIRA, V. A. B.; OLIVEIRA, G. M.; GIGLIOTI, E. A.; IGARASHI, W. T.; SAAD, O. J. G. A. Desempenho de bicos rotativos e hidráulicos na aplicação aérea de fungicidas em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava-PR, v. 4, n.3, p.111-122, 2011.

OZKAN, H. E. Effects of major variables on drift distances of spray droplets. **Food, Agricultural and Biological Engineering**. AEX 525-98, 1998.

OZKAN, H. E. **New nozzles for spray drift reduction**. Ohio, USA: Ohio State University, 2000. (Boletim 816-00). Disponível em: <http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0523.html>. Acesso em 24 mar. 2011.

PATEL, M. K.; SAHOO, H.K.; NAYAK, M. K.; KUMAR, A.; CHANSHYAM, C.; KUMAR, A. Electrostatic nozzle: new trends in agricultural pesticides s'raying. **EFES**, ISSN:2348 – 8379, 2015

PHILLIPS, J. C.; MILLER, P. C. H. Field and wind tunnel measurements of the airborne spray volume downwind of single flat-fan nozzles. **Journal of Agricultural Engineering Reserch**, v. 72, n. 2, p. 161-170, 1999.

USDA United States Department of Agriculture. 2014. **Pesticide MRL** database. [acessado 2015 nov 9]. Available from: <http://www.mrldatabase.com/>.

RAETANO, C. G. Introdução ao estudo da tecnologia de aplicação de produtos fitossanitário. In: ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. (Org.). **Tecnologia de aplicação para cultura anuais**. Passo Fundo: Aldeia Norte; Botucatu: FEPAF, 2011. Cp. 1. P15-26.

REIS, E. F.; QUEIROZ, D. M.; CUNHA, J. P. A. R.; ALVES, S. M. F. Qualidade da aplicação aérea líquida com uma aeronave agrícola experimental na cultura da

soja (*Glycine Max L.*). **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.30, n.5, p.958-966, set./out. 2010.

RENNA, R. B. ; BRASIL, R. D. R.; CUNHA, T. E. B.; BEPPU, M. M.;FONSECA, E. G. P.; Introdução ao kit de desenvolvimento Arduino. **Universidade Federal Fluminense**, Niterói – RJ, p, 79, 2013.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Agrotec Tecnologia Agrícola e Industrial Ltda. **Atomizador micronair AU 5000 – Manual de operação e catálogo de peças**. Manual de orientação. Rio Grande do Sul, 2000, 53 p. (Séries Manual).

RODRIGO, H. J.; COSTA, R. F.; RIBEIRO, J. B.; FILHO, J. D. C. S.; RUIVO, M. L. P.; JÚNIOR, J. A. S. Variabilidade sazonal da condutância estomática em um ecossistema de manguezal amazônico e suas relações com as variáveis meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n. 2, p. 189-196. 2011.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F.; Planejamentos de experimentos e otimização de processos. **Cárta Editora**, Campinas – SP, 2014, 357 p.

RÜDEL, H. Volatilisation of pesticides from soil and plant surfaces. **Chemosphere**, Philadelphia, v. 35, p. 143-152, 1997.

RU, Y.; ZHOU H.; SHU, C. Deposition evaluation of aerial electrostatic spraying system assembled in fixed wing. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 30, n. 5, p. 751-757, (doi: 10.13031/aea.30.10797), 2014.

SANTIAGO, H. **Pulverização aérea com adição de adjuvante para o controle da lagarta falsa medideira (*Pseudoplusia includens*)**. 2013. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

SASAKI, R. S.; TEIXEIRA, M. M.; ALVARENGA, C. B.; QUIRINO, A. L. S.; TIBURCIO, R. A. S. Uniformidade de distribuição volumétrica de pontas de

pulverização hidráulica em diferentes condições operacionais. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 6, p. 541-547, nov/dez. 2011.

SASAKI, R. S.; **Resfriamento adiabático do ar para reduzir perdas por evaporação em pulverização com assistência de ar na barra**. 2014. 87f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

SASAKI, R. S.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C.; ZOLNIER, S.; MACIEL, C. F. S.; ALVARENGA, C. B. Droplets spectrum of air-assisted boom sprayers 57 under different environmental and operational conditions. **Agriambi**, Campina Grande, v. 20, n. 1, p. 92-96, 2016.

SCHAMPHELEIRE, M.; NUYTTENS, D.; BAETENS, K.; CORNELIS, W.; GABRIELS, D.; SPANOGHE, P. Effects on pesticides spray drift of the physicochemical properties of the spray liquid. **Precision Agriculture**, v. 10, p. 409-420, 2009.

SNOO, G. R. Unsprayed field margins: effects on environment, biodiversity and agricultural practice. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v. 46, n. 1, p. 151-160, 1999.

STANISLAVSKI, W. M.; ANTUNIASSI, U. R.; CHECHETTO, R. G. Air flow humidification for air-assisted boom sprayer. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 1, p. 48-56, jan/fev. 2014

STEFANELO, M. S.; BRUNO G. SARI, B. G.; LENZ, G.; ARRÚÉ, A.; PES, M. P.; COSTA, I. F. D. Caracterização da pulverização de fungicida na cultura do trigo com pontas hidráulicas e atomizadores rotativos de discos. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.34, n.5, p. 1012-1018, set./out. 2014.

TRAVICAR. **Catálogo de pontas aéreas**. Disponível: <http://www.travicar.com.br/pdf/IPANEMA-2012.pdf>. Acessado: em 10 março de 2016.

TEPPER, G. **Weather essentials for pesticide application**, Grains Research and Development Corporation, 28 de maio 2012, Disponível: <https://grdc.com.au/Resources/Bookshop/2015>. Acessado em 16 abril 2015.

TETENS, O Ubercinige meteorologische Begriffe. **Journal of Geophysics**, n. 6, p. 297-309, 1930.

THEBALDI, M. S.; REIS, E. F. DOS; GRATÃO, P. T. S.; SANTANA, M S. Efeito da adição de adjuvante na redução de deriva em pontas de pulverização tipo cone vazio. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, Havana , v. 18, n. 2, 2009.

VIERO. G. M.; CAMPONOGARA, S.; VAZ, M. R. C.; COSTA, V. Z.; BECK, C. L. C. Risk society: the use of pesticides and implications for the health of rural workers. **Esc. Anna Nery**, Rio de Janeiro, n. 20, v. 1, p 99 – 105, (2016).

VILELA, C. M. **Evaporação de gotas de caldas contendo fungicidas e adjuvantes depositadas em superfície**. 2012. 62f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciência Agrônômica da UNESP – Campus de Botucatu, Botucatu, SP, 2012.

XINYU, X.; KANG, T.; WEICAI, Q. LAN, Y. ZHANG, H. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field. **Int J. Agric. & Biol Eng**, Beijing – China, v. 7, n. 4, 2014.

XU, L.; ZHU, H.; OZKAN, H. E.; BAGLEY, W. E.; KRAUSE, C. R. Droplet evaporation and spread on waxy and hairy leaves associated with type and concentration of adjuvants. **Pest Management Science**, Chichester, v. 67, n. 7, p. 842-851, 2011.

XU,L.; ZHU, H.; OZKAN, H. E.; THISTLE, H. W. Evaporation rate and development of wetted area of water droplets with and without surfactant at different locations on waxy leaf surfaces. **Biosystems Engineering**, v.106, p.58-67, 2010.

YU, Y.; ZHU, H.; OZKAN, H. E.; DERKSEN, R. C.; KRAUSE, C. R. Evaporation and deposition coverage area of droplets containing insecticides and spray additives on hydrophilic, hydrophobic, and crabapple leaf surfaces. **Transactions of the ASAE**, v.52, p.39-49, 2009.

ZHU, H.; REICHARD, D. L.; FOX, R. D.; BRAZEE, R. D.; OZKAN, H. E. Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 37, n. 5, p. 1401-1407, 1994.

ZHU, H. et al. Influence of spray additives on droplet evaporation and residual patterns on wax and wax-free surfaces. **ASABE Paper** No. 083752, St. Joseph, June 2008.