

CHRISTIAM FELIPE SILVA MACIEL

**PERDA POR EVAPORAÇÃO DURANTE A PULVERIZAÇÃO
HIDRÁULICA EM DIFERENTES CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS**

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

M152p
2016 Maciel, Christiam Felipe Silva, 1986-
Perda por evaporação durante a pulverização hidráulica em
diferentes condições meteorológicas / Christiam Felipe Silva Maciel. -
Viçosa, MG, 2016.
x, 58f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Mauri Martins Teixeira.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.51-58.

1. Produtos químicos agrícolas - Aplicação - Influência do clima.
2. Pulverização. 3. Evaporação. 4. Equipamentos agrícolas. I.
Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II.
Título.

CDD 22. ed. 631.3

CHRISTIAM FELIPE SILVA MACIEL

**PERDA POR EVAPORAÇÃO DURANTE A PULVERIZAÇÃO
HIDRÁULICA EM DIFERENTES CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS**

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.

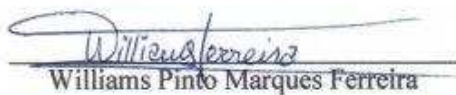
APROVADA: 03 de junho de 2016.



Domingos Sárvio Magalhães Valente



Paulo Marcos de Barros Monteiro



Williams Pinto Marques Ferreira



Haroldo Carlos Fernandes
(Coorientador)



Mauri Martins Teixeira
(Orientador)

“Sábio é aquele que conhece os limites da própria ignorância.”

Sócrates

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Jesus Cristo, por me permitirem mais este aprimoramento do meu conhecimento.

Aos meus pais, pela minha criação e educação, fatores primordiais para formação da minha personalidade e para as conquistas que tenho adquirido ao longo de minha vida.

À minha amada Sheila, pelo amor, carinho, apoio e conselhos a mim oferecidos.

Ao professor Mauri, pela oportunidade, orientação, conselhos e confiança nos trabalhos realizados durante minha passagem pela pós-graduação.

Aos professores Haroldo, Sérgio e Cecon, pelos ensinamentos e orientações que foram fundamentais no desenvolvimento dos meus trabalhos.

A todos os amigos do Laboratório de Mecanização Agrícola, pela amizade, convivência, churrascos e pela grande ajuda prestada sempre quando foi necessitada.

Aos funcionários do DEA, pela presteza nos serviços solicitados.

Aos companheiros da república Jogatina, pelos anos de amizade e companheirismo.

E, por fim, à Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização do doutorado e ao CNPq e à CAPES por me concederem bolsas de estudo.

BIOGRAFIA

Christiam Felipe Silva Maciel é filho de Ermano Peixoto Maciel e Maria das Dores Silva Maciel. Natural da cidade de Piranga – MG, nasceu em 20 de dezembro de 1986. Caçula da família, é irmão de Zenália, William e Natália. Viveu em Piranga até completar o Ensino Médio e em março de 2005 mudou para Viçosa – MG para começar os estudos no curso de Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa. Após formar em janeiro de 2010, mudou para Loudon – NH, Estados Unidos, em março deste mesmo ano para realização de estágio na empresa Pleasant View Gardens, onde permaneceu até fevereiro de 2011. Em agosto de 2011, ingressou no mestrado do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, o qual finalizou em julho de 2013, ao defender a dissertação intitulada por “Perda por evaporação na pulverização em função das condições psicrométricas do ar”. Em agosto seguinte, iniciou o doutorado em Engenharia Agrícola, também pela UFV, submetendo-se à defesa de tese em junho de 2016.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE QUADROS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Perdas por evaporação na aplicação de agrotóxicos	3
2.2. Perdas por deriva na aplicação de agrotóxicos	5
2.3. Influências das propriedades físico-químicas e das formulações dos agrotóxicos nas perdas por evaporação	8
2.4. Métodos para redução de perdas por deriva e evaporação.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1. Desenvolvimento do sistema experimental para análise do espectro de gotas em diferentes condições meteorológicas.....	12
3.1.1. Montagem do sistema operacional.....	18
3.1.2. Velocidades do ar fornecidas pelo ventilador axial	21
3.1.3. Obtenção dos déficits de pressão de vapor para climatização da câmara climática	24
3.1.4. Caracterização do espectro de gotas e da vazão real da ponta de pulverização em laboratório.....	25
3.2. Determinação do espectro de gotas em diferentes déficits de pressão de vapor e velocidades do ar.....	27
3.3. Desenvolvimento do sistema experimental para quantificação das perdas por evaporação em diferentes condições meteorológicas	28
3.4. Perdas por evaporação em diferentes condições meteorológicas	29
3.5. Análise Estatística	32

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1. Caracterização do espectro de gotas e da vazão real da ponta de pulverização em laboratório	35
4.2. Espectro de gotas em diferentes déficits de pressão de vapor e velocidades do ar.....	37
4.3. Perdas da pulverização por evaporação em diferentes condições meteorológicas	43
4.3.1. Volume real de ar que interage com as gotas pulverizadas	43
4.3.2. Perdas por evaporação em diferentes condições meteorológicas	45
5. CONCLUSÕES	50
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema experimental montado para caracterização do espectro de gotas em diferentes condições psicrométricas.....	13
Figura 2 – Conjunto moto-bomba.	13
Figura 3 – Ponta hidráulica de pulverização Jacto JSF-11002.	14
Figura 4 – Estrutura utilizada para análise de espectro de gotas das pontas de pulverização hidráulica.	14
Figura 5 – Construção da câmara climática.	16
Figura 6 – Sensores de temperatura e UR.	17
Figura 7 – Vista interna da câmara climática com destaque para o analisador de partículas e o bico de pulverização.	19
Figura 8 – Vista interna da câmara climática com todos os equipamentos.	19
Figura 9 – Túnel de vento acoplado à câmara climática.	20
Figura 10 – Croqui padrão do túnel de vento utilizado para testes em ventiladores .	22
Figura 11 – Sistema experimental montado para quantificação das perdas por evaporação em diferentes condições psicrométricas.....	29
Figura 12 – Estimativa do comportamento do espectro de gotas em função dos valores de déficit de pressão de saturação de vapor d’água (DPV) e das velocidades do ar..	38
Figura 12 – Continuação	39
Figura 13 – Imagens obtidas a partir de filmagens laterais do cenário de pulverização com uso de um pulverizador hidráulico de barras.	44
Figura 14 – Estimativas de perdas e estimativas de perdas máximas possíveis por evaporação, em função das condições meteorológicas avaliadas e duas velocidades de deslocamento do trator.	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Frequências configuradas no inversor para fornecer as velocidades de ar utilizadas durante o experimento.	23
Quadro 2 – Codificação dos ensaios de acordo com DCCR.....	33
Quadro 3 – Esquema dos ensaios de acordo com o DCCR.	34
Quadro 4 – Espectro de gotas da ponta JFS-11002.....	35
Quadro 4 – Continuação.....	35

RESUMO

MACIEL, Christiam Felipe Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2016. **Perda por evaporação durante a pulverização hidráulica em diferentes condições meteorológicas.** Orientador: Mauri Martins Teixeira. Coorientadores: Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier e Paulo Roberto Cecon.

As preocupações sobre a segurança no momento da aplicação de agrotóxicos induzem diversos estudos sobre perdas do produto químico aplicado. Dentre estas perdas, a evaporação e a deriva ganham destaques, sendo que as condições meteorológicas adversas favorecem estas perdas. Com estas preocupações, objetivou-se avaliar a interferência das condições meteorológicas no espectro de gotas produzido pela pulverização hidráulica e estimar as perdas por evaporação durante o trajeto das gotas pulverizadas até o alvo em diferentes condições meteorológicas. Para realização dos trabalhos, um sistema experimental foi construído. Para a análise do espectro de gotas, o sistema foi constituído por: analisador de partículas, ponta hidráulica (Jacto JSF 11002), pulverizador estacionário, aquecedor a gás, túnel de vento, câmara climática, com o objetivo de manter uma condição psicrométrica interna similar ao ar que saía do túnel de vento, bojo e sensores de temperatura e UR. Para a quantificação das perdas, o sistema experimental foi similar, entretanto, sem o analisador de partículas. As condições meteorológicas para ambos os trabalhos foram compreendidas pelos déficits de pressão de vapor (DPV) de 5; 9,4; 20; 30,6 e 35 hPa e velocidades do ar de 2; 3,6; 7,4; 11,2 e 12,8 km h⁻¹. As estatísticas dos trabalhos foram realizadas através do Delineamento Composto Central Rotacional e os dados foram relacionados por meio da Metodologia de Superfície de Resposta. O vento provoca tão acentuada deriva das gotas finas, que afeta consideravelmente o comportamento de todo o espectro de gotas, além de atenuar o efeito do DPV. No entanto, pode-se concluir que gotas mais grossas também podem ser influenciadas pelo vento. O vento favorece a maiores perdas por evaporação, apesar de o DPV ser a variável mais importante neste processo físico. As perdas por evaporação são menores do que o potencial evaporativo do ar. Contudo, há perdas em todas as condições meteorológicas estudadas, mesmo nas consideradas mais favoráveis à pulverização, e em condições piores, foram observadas perdas de até 30%. Assim, deve-se buscar horários do dia com condições meteorológicas mais adequadas, com valores baixos de DPV, para reduzir ao máximo as perdas durante o percurso ponta-alvo.

ABSTRACT

MACIEL, Christiam Felipe Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2016. **Evaporation losses during hydraulic spraying in different meteorological conditions.** Adviser: Mauri Martins Teixeira. Co-advisers: Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier and Paulo Roberto Cecon.

Concerns about security at the time of pesticides application induce several studies of pesticides losses. Within these losses, evaporation and drift are very important, and adverse meteorological conditions favor these losses. The objective of this study is the interference of meteorological conditions on droplets spectrum produced by hydraulic spraying and estimate evaporation losses during the course of sprayed droplets until the target in different meteorological conditions. To carry out these works, an experimental system was built. For the droplet spectrum analysis, the system consisted of: particle size analyzer, nozzle (Jacto JSF 11002), stationary sprayer, gas heater, wind tunnel, climate chamber, for the purpose of maintain an internal psychometric condition similar to the air that was coming out of the wind tunnel, bowl and temperature and RH sensors. To quantify the losses, the experimental system was similar, but without the particle analyzer. The meteorological conditions for both works were comprised by vapor pressure deficits (VPD) of 5, 9.4, 20, 30.6 and 35 hPa and air velocities of 2, 3.6, 7.4, 11.2 and 12.8 km h⁻¹. The work statistics were carried out by using the Central Composite Rotational Design and data were related through the Response Surface Methodology. The wind causes so pronounced drift of the finest droplets that affects the behavior of the entire droplets spectrum, in addition to attenuate the effect of VPD. However, it can be concluded that drift may act on the coarsest droplets. The wind favors higher evaporation losses; however, the VPD is the most important variable on this physical process. Evaporation losses are smaller than the air evaporative potential. However, there are losses in all meteorological conditions studied, even in the most favorable conditions considered to spray, and in the worst conditions, it was observed losses up to 30%. Thus, it is recommended to seek times of the day with appropriate weather conditions, with low values of VPD, to minimize losses during nozzle-target path.

1. INTRODUÇÃO

A pulverização de agrotóxicos para controle de pragas, doenças e plantas daninhas é uma etapa primordial na agricultura atual. O sucesso na produção de produtos agrícolas em larga escala é totalmente dependente da qualidade das pulverizações, sendo que a aplicação dos agrotóxicos feita sem critérios técnicos gera prejuízos sociais, econômicos e ambientais.

A aplicação de agrotóxicos sem critérios técnicos pode ser considerada aquela na qual não houve qualquer preocupação com a definição da quantidade de produto químico utilizado no controle fitossanitário e, também, com a condição meteorológica no momento da aplicação. Apesar do conhecimento desses fatores no ambiente acadêmico, muitos agricultores ainda desconhecem a importância do uso correto da aplicação de agrotóxicos.

Condições meteorológicas adversas podem gerar perdas consideravelmente elevadas durante a pulverização, as quais são decorrentes da deriva e/ou evaporação das gotas pulverizadas. A deriva ocorre quando as gotas são arrastadas pelo vento para fora do alvo. Já na evaporação é a perda que ocorre pela vaporização das gotas durante o percurso da ponta até o alvo, ou mesmo após a deposição no alvo devido ao elevado déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV).

As gotas arrastadas podem ser depositadas dentro da própria área de produção agrícola e, assim, não ocasionar intoxicação ou poluição ambiental. Contudo, o local onde estas gotas deveriam ter sido depositadas pode ter o controle fitossanitário prejudicado. No entanto, dependendo de fatores como velocidade do vento e tamanho de gotas, estas podem sair da área tratada e, deste modo, contaminar cursos d'água,

animais silvestres, pessoas que habitam na vizinhança da área tratada, dentre outras consequências.

A evaporação das gotas pode agravar ainda mais os problemas provocados pela deriva. Condições psicrométricas do ar não favoráveis à pulverização, proporcionados por altos DPV, ocasionam evaporação total das gotas. Com isso, o produto químico presente nas gotas pode contaminar o vapor d'água presente na atmosfera que irá se transformar em água de chuva e, conseqüentemente, contaminar todo o meio ambiente. A evaporação pode também reduzir o tamanho das gotas e deixá-las mais propensas à deriva.

Problemas sociais e ambientais não são os únicos problemas referentes às perdas por evaporação e deriva dos agrotóxicos aplicados na lavoura. Problemas econômicos também são resultantes de uma aplicação inadequada. Com deficiência no controle fitossanitário devido às perdas, a produção agrícola poderá cair e, assim, menor será o retorno financeiro desta atividade para os agricultores. Deste modo, o agricultor corre sério risco de não conseguir lucro suficiente para pagar as dívidas assumidas para esta produção agrícola.

A importância das perdas por evaporação e deriva na pulverização agrícola obriga constantes estudos deste tema, os quais têm o intuito de trazer respostas à sociedade quanto à segurança da aplicação de agrotóxicos, além de buscar pela definição, de forma mais precisa, dos melhores momentos para esta aplicação. Com estas mesmas preocupações, objetivou-se, com este trabalho, avaliar a interferência das condições meteorológicas (vento, temperatura e umidade relativa do ar) no espectro de gotas produzido pela pulverização hidráulica e estimar as perdas por evaporação durante o trajeto das gotas pulverizadas até o alvo em diferentes condições meteorológicas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Perdas por evaporação na aplicação de agrotóxicos

As perdas por evaporação durante a aplicação de agrotóxicos são consideradas uma das principais perdas que ocorrem nesta etapa da produção agrícola. Assim, para evitá-las, as condições psicrométricas do ar devem ser constantemente monitoradas durante as pulverizações, com valores recomendados de temperatura do ar inferiores a 30 °C e de umidade relativa superiores a 55% (ANDEF, 2004; RAETANO, 2011). No entanto, tem sido observado que muitos agricultores não consideram as condições meteorológicas no momento da aplicação, sendo que em algumas regiões o percentual de agricultores com este comportamento chega a ser de 80% (ALVARENGA; CUNHA, 2010; TOBI et al., 2011).

As condições psicrométricas são tão importantes que trabalhos mostram que o tempo para a evaporação das gotas aumenta exponencialmente com o aumento da umidade relativa do ar, com registro de valores que chegam a 153% quando se aumenta a UR de 30 para 90% (YU et al., 2009a; YU et al., 2009b). Além destas condições, o tamanho das gotas também tem grande influência sobre estas perdas (XU et al., 2010; YU et al., 2009a; YU et al., 2009b). Yu et al. (2009b) mostraram que o tempo de evaporação pode ser elevado em torno de 9,2 vezes quando o diâmetro da gota é aumentado em 3,6 vezes. Estes fatos revelam que estas duas variáveis devem sempre ser muito bem monitoradas, uma vez que podem ditar o sucesso da aplicação.

A contínua falta de monitoramento das condições psicrométricas pode levar a perdas elevadíssimas, as quais podem alcançar valores aproximados de até 25% do total do produto aplicado (BERG et al., 1999; CARLSEN et al., 2006a). Contudo, Berg

et al. (1999) afirmaram que perdas de 50% ou mais também ocorrem em alguns casos, os quais dependem das propriedades do produto químico, técnica de aplicação, condições meteorológicas, dentre outros fatores. Estas observações deixam bem claro que as perdas por evaporação são problemas sérios que provavelmente acontecem em grande escala na maioria das propriedades agrícolas.

Com a ocorrência de perdas do produto aplicado, menor será a quantidade de agrotóxico que atinge o alvo e, possivelmente, haverá redução da eficácia do controle fitossanitário. Fato relatado em diversos trabalhos, ao se comparar diferentes horários de aplicação, há indicação de que a deposição do produto químico diminuiu significativamente à medida que o déficit de pressão é aumentado (ALVARENGA et al., 2013; BALAN et al., 2008; NASCIMENTO et al., 2012).

A evaporação altera todo o espectro das gotas pulverizadas quando estas ainda estão no ar, o qual já foi demonstrado tanto por meio do uso de etiquetas hidrossensíveis (ALVARENGA et al., 2013; ALVARENGA et al., 2014), quanto por aparelhos analisadores de partículas à laser (MACIEL et al., 2016; SASAKI et al., 2016). Este efeito é muito preocupante, uma vez que ao sofrer redução de tamanho, a gota pode ser carregada por longas distâncias através do fluxo de ar (MATTHEWS, 2000).

Além das gotas que estão em trajeto até o alvo, aquelas já depositadas também são grande fonte de perdas por evaporação. A evaporação acumulada durante 24 h pode atingir percentuais de 60% (BERG et al., 1999), em alguns casos 80% (CARLSEN et al., 2006a) e em casos mais graves, os quais dependeram do produto químico aplicado, chegaram a representar 99% do volume total depositado (RÜDEL, 1997). Assim, mesmo após as gotas atingirem o alvo, o tratamento fitossanitário tem grandes chances de ficar prejudicado.

2.2. Perdas por deriva na aplicação de agrotóxicos

Juntamente com a evaporação, a deriva provoca muitas perdas durante as aplicações de agrotóxicos. Juntas, estas perdas podem ser elevadas, com valores que atingem os 45% do volume total aplicado (CHAIM et al., 1999). Uma das principais variáveis que influenciam a deriva é a velocidade do vento e, consequentemente, sob maiores valores dessa variável, maior será a deriva (CARLSEN et al., 2006b; NUYTTENS et al., 2006). Deste modo, durante as pulverizações, a velocidade do vento deve estar situada entre 3 e 7 km h⁻¹, tolerando-se velocidades de até 10 km h⁻¹, exceto para aplicação de herbicidas (ANDEF, 2004; RAETANO, 2011).

Além da velocidade do vento, outras variáveis também estão muito relacionadas à deriva, como: espectro do tamanho de gotas (ARVIDSSON et al., 2011; GIL et al., 2014; NUYTTENS et al., 2010), altura da barra de pulverização (ARVIDSSON et al., 2011; SASAKI et al., 2011), velocidade do trator (ARVIDSSON et al., 2011) e até mesmo DPV (ARVIDSSON et al., 2011; CARLSEN et al., 2006b; NUYTTENS et al., 2006). Com tantas variáveis influenciando o destino da gota em suspensão no ar, o aplicador de agrotóxicos deve estar sempre atento a estas condições para minimizar ao máximo as perdas durante o período de aplicação do produto.

O espectro de gotas é largamente utilizado para prever o potencial risco de deriva caso haja pulverização com determinado tipo de ponta. Gil et al. (2014) constataram que o uso dos parâmetros Dv10 (diâmetro da gota, abaixo da qual, se encontra 10% do volume total de líquido pulverizado), DMV (diâmetro da gota, abaixo da qual, se encontra 50% do volume total de líquido pulverizado), Dv90 (diâmetro da gota, abaixo da qual, se encontra 90% do volume total de líquido pulverizado) ou %V<100 (fração do volume compreendido por gotas menores que 100 µm) são

grandes indicadores deste potencial risco de deriva. No entanto, Arvidsson et al. (2011) concluíram que o parâmetro %V<100 é um indicador mais eficiente que o próprio DMV.

Através do uso do espectro de gotas para indicar o potencial risco de deriva, Nuyttens et al. (2010) foram menos rigorosos e reduziram a faixa de tamanho de gotas mais propensas à deriva, assim, concluíram que a fração do volume de gotas menores que 75 µm é o melhor indicador para definir este potencial. Ao considerar este parâmetro, conseqüentemente, menor porcentagem do volume pulverizado estará mais suscetível à deriva do que quando se toma por base a fração %V<100 µm. Porém, ambas as situações mostram que quanto mais gotas finas forem produzidas na pulverização, maior o risco de deriva na aplicação.

Fator muitas vezes ignorado no estudo de perdas por deriva, o DPV tem grandes influências sobre a deriva. Baixas umidades relativas do ar (UR) e altas temperaturas reduzem o diâmetro das gotas pela evaporação, o que diminui a velocidade terminal e, conseqüentemente, deixa-as mais suscetíveis à deriva (HOLTERMAN, 2003). Estes fatos explicam resultados encontrados por Carlsen et al. (2006b) e Nuyttens et al. (2006), os quais estudaram condições meteorológicas que influenciam o risco de deriva, e observaram maior ocorrência de deriva em condições críticas de UR e temperatura do ar.

Com o intuito de aumentar a capacidade operacional da aplicação de agrotóxicos, muitos aplicadores aumentam consideravelmente a velocidade do trator. Contudo, esta prática pode favorecer perdas por deriva, uma vez que o fluxo de ar induzido pelo movimento do trator leva a uma dispersão das pequenas gotas (ARVIDSSON et al., 2011). Deve-se, também, estar atento à altura correta da barra de pulverização e mantê-la sempre na altura ideal de trabalho, ou se possível, operá-la em

alturas reduzidas quando as pontas hidráulicas permitem. Esta prática é necessária porque à medida que se aumenta a distância entre a ponta e o alvo, maior será a influência do vento sobre as gotas e, conseqüentemente, maior a tendência de deriva (SASAKI et al., 2011).

2.3. Influências das propriedades físico-químicas e das formulações dos agrotóxicos nas perdas por evaporação

As propriedades físico-químicas dos produtos podem influenciar positivamente ou negativamente nas perdas por evaporação. Diversas propriedades físico-químicas influenciam a evaporação do produto químico, contudo, a pressão de vapor é a propriedade mais relatada na literatura científica (BASILE et al., 1986; BEDOS et al., 2002; BEDOS et al., 2010; CARLSEN et al., 2006a; KUBIAK et al., 1993; RÜDEL, 1997). Entretanto, outras propriedades também são citadas como influentes diretos ou indiretos no favorecimento da evaporação, como: constante da lei de Henry, sorção, solubilidade, coeficiente de partição n-octanol/água, tensão superficial e degradação (BEDOS et al., 2002; BEDOS et al., 2010; BOEHNCKE et al., 1990; HEALTH et al., 1992; KUBIAK et al., 1993; SANDERS; SEIBER, 1983; TAYLOR, 1978).

A pressão de vapor é a principal propriedade da molécula a ser utilizada no cálculo da volatilização para prever a entrada da mesma na atmosfera em concentrações significativas (SILVA; FAY, 2004). Agrotóxicos com ingredientes ativos compostos por altos valores de pressão de vapor (heptachlor, trifluralin e lindane) apresentam alta taxa de volatilização, em contrapartida, a volatilização de agrotóxicos com valores baixos (dieldrin, eldrin e DDT) ocorrem em taxas reduzidas (NASH, 1983). No entanto, em alguns casos, a evaporação do produto químico não é simplesmente correlacionada à pressão de vapor, e outras propriedades, como a sorção, devem ser consideradas (BEDOS et al., 2010; CARLSEN et al., 2006a; HEALTH et al., 1992).

A adsorção do produto químico nas folhas das plantas é um parâmetro importantíssimo e deve ser sempre levado em consideração no processo de

volatilização. As perdas por evaporação de produtos das folhas são mais elevadas do que as do solo, e isto se deve ao fato de que a capacidade de adsorção do solo é superior a das folhas (BEDOS et al., 2002; HEALTH et al., 1992). Além da sorção do produto químico, a constante da lei de Henry também é muito importante, e de acordo com Jury et al. (1983), a duração, a intensidade e o tempo do processo de volatilização depende muito desta variável.

Os agrotóxicos podem ser encontrados em diferentes formulações no mercado, e estudos têm mostrado que estes podem influenciar ou não na evaporação. Rüdel (1997), ao avaliar a volatilização de cinco agrotóxicos, atribuiu uma volatilização menor do que o esperado para o produto químico “lindane” por este estar formulado em suspensão concentrada, enquanto que as outras formulações eram concentrados emulsionáveis. Gish et al. (1995), ao conduzir experimentos com “atrazine” e “alachlor” nas formulações originais e em formulação encapsulada de amido, constataram menores volatilizações do produto encapsulado.

Outros trabalhos, como os realizados por Schamphelire et al. (2009) e YU et al. (2009a), não encontraram diferença significativa no tipo de formulação, o que gera certa divergência em futuras conclusões. Schamphelire et al. (2009), ao trabalharem com dez diferentes agrotóxicos, com dois agrotóxicos para cada uma das cinco principais formulações (concentrado emulsionável, suspensão concentrada, concentrado solúvel em água, granulado para suspensão aquosa e pó molhável), não encontraram diferenças significativas entre as taxas de evaporação para estes diferentes tipos de formulação. Yu et al. (2009a), ao verificarem a evaporação de gotas em diferentes superfícies, perceberam que o tipo e a concentração dos agrotóxicos utilizados não influenciaram significativamente o tempo de evaporação de gotas de água, de água misturada com redutor de deriva e água com surfactante.

2.4. Métodos para redução de perdas por deriva e evaporação

Indiscutivelmente, a melhor maneira para se evitar as perdas por deriva e evaporação e, conseqüentemente, evitar os possíveis prejuízos sociais, econômicos e ambientais, é realizar as pulverizações dos agrotóxicos com respeito às condições meteorológicas locais. No entanto, fatores como baixo rendimento operacional de máquinas e grandes áreas agrícolas impossibilitam as pulverizações sempre em períodos favoráveis e, assim, há a necessidade de adotar métodos para reduzir ao máximo as perdas por deriva e evaporação.

A escolha correta das pontas de pulverização pode prevenir as perdas por evaporação e deriva e, deste modo, garantir a eficácia do controle fitossanitário. A utilização de tipos de pontas que produzem gotas grossas, como pontas com indução de ar, ajuda a evitar estas perdas e garantir o controle (ARVIDSSON et al., 2011; BALAN et al., 2008; BUENO et al., 2013; COSTA et al., 2011; GIL et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2012; NASCIMENTO et al., 2013; NUYTTENS et al., 2009). Assim como o tipo, pontas com vazões nominais maiores produzem gotas mais grossas que pontas do mesmo tipo com vazão nominal menor (NUYTTENS et al., 2009). Além do tipo e da vazão nominal da ponta, a pressão também tem papel importante na geração do espectro de gotas e na prevenção de tais perdas (ARVIDSSON et al., 2011; GANDOLFO et al., 2014).

Os adjuvantes são largamente empregados hoje na agricultura para diversos fins, contudo, muitos destes produtos têm sido empregados para reduzir a deriva e têm mostrado eficientes (CHECHETTO et al., 2013; GANDOLFO et al., 2013; MADUREIRA et al., 2015). No entanto, estes produtos podem apresentar certa interação com as pontas hidráulicas, fazendo com que dependendo da ponta

empregada, o adjuvante possa aumentar o risco de deriva do produto químico ao invés de reduzir (GANDOLFO et al., 2013; SASAKI et al., 2013). Assim como ocorre para os adjuvantes, o tipo da formulação também pode favorecer a produção de gotas mais grossas (HILZ; VERMEER, 2013).

Outro método muito empregado na redução de perdas é a utilização da assistência de ar sobre as pontas de pulverização, o qual reduz significativamente a deriva e aumenta a penetração de gotas no dossel das plantas em relação a equipamentos sem assistência a ar (BAUER; RAETANO, 2000; FOQUÉ; NUYTENS, 2011). Entretanto, este ar injetado sobre a pulverização pode favorecer a evaporação das gotas, deste modo, com o intuito de evitar tais perdas, tecnologias vêm sendo desenvolvidas para promover o resfriamento adiabático do fluxo de ar de pulverizadores com assistência de ar (SASAKI, 2014; STANISLAVSKI et al., 2014).

No trabalho desenvolvido por Sasaki (2014), o autor procurou diferentes meios para realizar o resfriamento adiabático, e como resultado, obteve o sistema mais eficiente àquele empregado por nebulizadores que pulverizavam as gotas mais finas. Por meio dos resultados apresentados nos trabalhos citados anteriormente, observa-se, mais uma vez, que quanto menores as gotas, maior a evaporação e, consequentemente, maiores são as perdas. Com isso, a busca da pulverização de gotas mais grossas pode evitar elevadas perdas por evaporação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os trabalhos foram realizados no Laboratório de Aplicação de Defensivos Agrícolas, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e localizado no campus de Viçosa, Minas Gerais.

Para estudar a interferência das condições meteorológicas no espectro de gotas e estimar as perdas por evaporação durante o trajeto das gotas pulverizadas até o alvo em diferentes condições meteorológicas, foi necessário implementar um sistema experimental para a obtenção das condições desejadas e coleta dos dados.

3.1. Desenvolvimento do sistema experimental para análise do espectro de gotas em diferentes condições meteorológicas

O sistema experimental, construído para a análise do espectro de gotas em diferentes déficits de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV) e velocidades do ar, foi constituído pelos seguintes componentes: analisador de partículas a laser, ponta hidráulica de pulverização, conjunto moto-bomba, aquecedor a gás, câmara climática, túnel de vento, o qual foi composto por ventilador axial, homogeneizador de ar e tubulação de PVC, bojo e por sensores de temperatura e umidade relativa do ar (FIGURA 1).

O conjunto moto-bomba (FIGURA 2) foi utilizado para realizar as pulverizações necessárias. Este apresenta uma bomba de pistões (S-12, Yamaho) que trabalha a 800 rpm, com vazão nominal de 12 L min^{-1} , potência de 0,75 a 1,12 kW e pressão máxima de 3516 kPa. A bomba foi acionada por um motor elétrico (F56H, Weg) com rotação de 3570 rpm e potência de 1,5 kW.

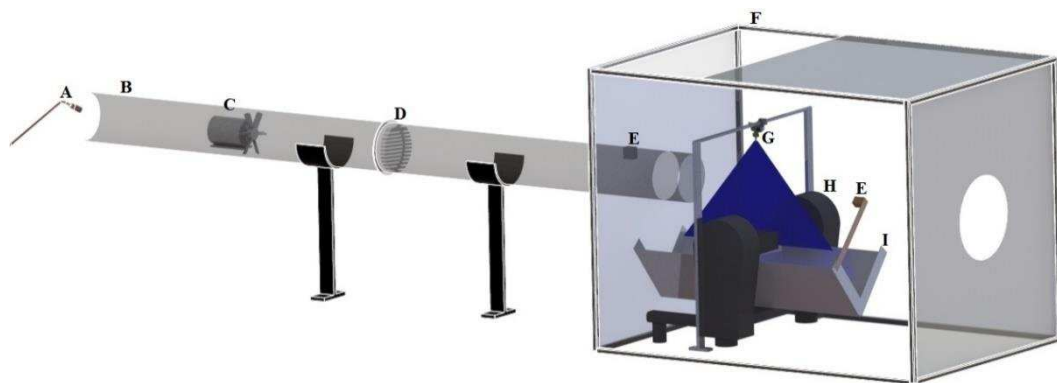


Figura 1 – Sistema experimental montado para caracterização do espectro de gotas em diferentes condições psicrométricas. (A) aquecedor a gás; (B) túnel de vento; (C) ventilador axial; (D) homogeneizador de ar; (E) sensores; (F) câmara climática; (G) ponta de pulverização; (H) analisador de partículas; e (I) bojo.



Figura 2 – Conjunto moto-bomba.

A ponta hidráulica utilizada durante o trabalho foi o modelo Jacto JSF-11002 (FIGURA 3). Esta ponta é do tipo leque simples, fabricada em plástico de alta resistência a desgaste e apresenta vazão nominal de $0,8 \text{ L min}^{-1}$. A barra de pulverização foi montada sobre uma estrutura metálica e esta era composta por um bico de pulverização, o qual foi conectado a uma válvula reguladora para manter a pressão de trabalho sempre a 300 kPa. O manômetro para verificação da pressão de

trabalho ficava localizado na tubulação que interligava o pulverizador estacionário à barra de pulverização.



Figura 3 – Ponta hidráulica de pulverização Jacto JSF-11002.

O analisador de partículas a laser (Spraytec, Malvern Instruments Ltd), o qual apresenta lente focal de 750 mm, foi empregado para avaliação do espectro de gotas produzido pela ponta hidráulica (FIGURA 4).

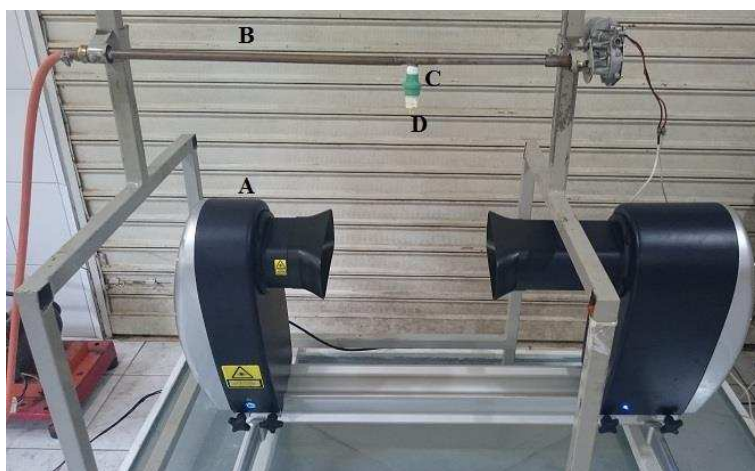


Figura 4 – Estrutura utilizada para análise de espectro de gotas das pontas de pulverização hidráulica. (A) analisador de partículas a laser; (B) barra de pulverização; (C) válvula reguladora de pressão; e (D) ponta de pulverização.

O túnel de vento foi composto por um ventilador axial com diâmetro de 0,25 m, o qual foi utilizado para simular o vento durante as pulverizações. Além disso, o túnel

de vento também foi composto por um homogeneizador de ar e um tubo de PVC com o mesmo diâmetro do ventilador e 2,5 m de comprimento. O homogeneizador de ar foi necessário para garantir velocidades de ar similares ao longo do perfil de deslocamento. O tubo de PVC teve a função de direcionar o fluxo de ar para o interior da câmara climática, além de fixar o homogeneizador e o primeiro sensor conjugado de temperatura e umidade relativa.

Um aquecedor a gás foi utilizado no sistema experimental para obtenção dos valores de DPV necessários para implementação dos tratamentos, e este foi posicionado na entrada de ar do túnel de vento. Para evitar que a chama do aquecedor alcançasse o ventilador, foi construído um túnel de chapa de aço com 1,00 m de comprimento e acoplado na entrada de ar do ventilador.

Na extremidade de saída de ar do túnel de vento, foi construída uma câmara climática, a qual tinha o objetivo de manter a condição psicrométrica interna similar ao ar que provinha do túnel de vento. Deste modo, garantia-se que as trocas de calor com as gotas pulverizadas fossem feitas por fluxos de ar que estivessem sempre nos valores de DPV desejados. A câmara climática apresentava dimensões de: 2,0 m de comprimento, 1,4 m de largura e 1,5 m de altura. A estrutura foi feita de cantoneiras metálicas e as laterais foram fechadas por chapa de aço galvanizada, além de um isolamento térmico constituído por placas de isopor com espessura de 2,5 cm. A parte superior da câmara, exatamente acima do analisador de partículas e do bico de pulverização, foi vedada com dupla camada de vidro para que fosse possível a observação do comportamento do sistema operacional (FIGURA 5).



(a)



(b)

Figura 5 – Construção da câmara climática. (a) Estrutura de cantoneiras; (b) Câmara fechada, excetuando o local para colocação dos vidros.

Conjuntos de sensores de temperatura e umidade relativa do ar foram utilizados para determinar os valores de DPV. O primeiro par de sensor conjugado de temperatura e umidade relativa do ar (HMP60, Vaisala) (FIGURA 6.a) foi posicionado próximo da extremidade de saída de ar do túnel de vento. Assim, este sensor tinha a função de medir a condição psicrométrica do ar que saía do túnel e, consequentemente, seguia para o interior da câmara climática. Este sensor conjugado apresentava um sensor do tipo RTD para medição de temperatura e um sensor capacitivo para medição da umidade relativa.

O segundo par foi composto por outro sensor HMP60 e por um termômetro digital constituído por um termopar do tipo K (TD-890, ICEL) (FIGURA 6.b), os quais foram instalados no interior da câmara climática. Estes sensores tinham o objetivo de verificar se o ar interno apresentava as mesmas condições psicrométricas do fluxo de ar que saía do túnel de vento. Desse modo, as pulverizações eram realizadas somente após a homogeneização e estabilização de ambos os sensores. A escolha pela utilização do termopar foi devido a capacidade deste sensor em responder a variações de

temperatura mais rapidamente que o sensor RTD. No entanto, como o sensor RTD é mais exato e preciso que o termopar, aquele foi utilizado como sensor referência.



(a)



(b)

Figura 6 – Sensores de temperatura e UR. (a) Sensor conjugado de temperatura e UR; (b) Termômetro digital.

Os sensores HMP60 apresentam intervalos de medição de temperatura e umidade relativa situados, respectivamente, entre -40 e 60 °C e 0 e 100%. Já o termopar do tipo K, sensor que utiliza os metais níquel e cromo na sua composição, apresenta intervalo de medição de temperatura entre -100 e 1300 °C. Os sinais analógicos de tensão elétrica emitidos pelos sensores conjugados foram convertidos em sinais digitais por meio de um microcontrolador (ATmega328 Duemilanove, Arduino) e, posteriormente, enviados a um computador com sistema serial de transmissão de dados. Os sinais de tensão elétrica foram convertidos em valores de temperatura e umidade relativa do ar por meio do desenvolvimento de algoritmos, que também foram utilizados para o cálculo dos respectivos valores de DPV.

3.1.1. Montagem do sistema operacional

Após a construção da câmara climática, dois orifícios foram abertos para a passagem do fluxo de ar. O orifício para a entrada do fluxo de ar apresentou diâmetro de 0,25 m, para permitir o acoplamento do tubo de PVC, enquanto que o orifício de saída apresentou diâmetro de 0,45 m, para evitar a restrição de saída do fluxo do interior da câmara e, com isso, prevenir compressão do ar.

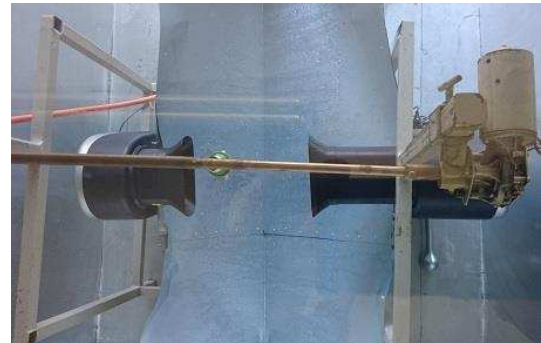
O bico de pulverização foi posicionado a 0,38 m distante da extremidade e 0,09 m acima da tubulação de PVC. A ponta foi fixada exatamente sobre o analisador de partículas, a 0,50 m de altura do feixe de laser. Para permitir a análise do espectro de gotas, a ponta de pulverização precisou ser orientada de modo que o jorro passasse transversalmente sobre o feixe de laser e, conseqüentemente, longitudinalmente ao fluxo de ar oriundo do túnel de vento. O jorro não poderia passar transversalmente pelo fluxo de ar porque, deste modo, as gotas iriam se chocar com a lente do analisador de partículas e, conseqüentemente, interfeririam na análise dos dados. Com estas configurações, pôde-se observar a influência da deriva e evaporação sobre o espectro de gotas (FIGURA 7).

Abaixo da ponta do bico de pulverização, foi colocado um bojo feito de aço galvanizado com 1,25 m de comprimento para coletar o jorro pulverizado e eliminar o líquido para fora câmara. O líquido eliminado era todo recolhido por bandejas plásticas. Ao final do bojo, foi construída uma estrutura para instalação do segundo conjunto de sensores, a qual ficou a uma distância de 0,70 m do bico. Esta estrutura era composta por uma caixa de acrílico envolta por um tecido e por uma fita de chapa galvanizada para dar suporte à caixa. O tecido foi usado como proteção para impedir

o contato das gotas d'água com os sensores eletrônicos. O próprio vento do sistema criava uma circulação de ar forçada através da caixa (FIGURA 8).



(a)



(b)

Figura 7 – Vista interna da câmara climática com destaque para o analisador de partículas e o bico de pulverização. (a) Vista frontal; (b) Vista superior através dos vidros.



Figura 8 – Vista interna da câmara climática com todos os equipamentos.

Por fim, o túnel de vento foi montado e, posteriormente, acoplado à câmara climática (FIGURA 9). A tubulação de PVC apresentou 0,16 m de comprimento no interior da câmara, e distante em 0,66 m do piso da câmara. Deste modo, o ponto central da tubulação ficou 0,785 m distante do piso, 0,285 m acima do feixe do laser, 0,215 m abaixo da ponta de pulverização e 0,38 m distante da ponta. No interior desta tubulação, foram instalados o homogeneizador de ar e os primeiros sensores. O homogeneizador foi construído com chapas de aço galvanizado e posicionado a 0,875 m do ventilador, conforme recomendado pelo padrão da ANSI/AMCA 210-99 (2000). O sensor conjugado foi instalado no interior de uma caixa de acrílico e a 0,37 m do final da tubulação. No início do túnel de vento, foi posicionado o aquecedor a gás utilizado para climatizar o ar nas condições requeridas (FIGURA 9).



Figura 9 – Túnel de vento acoplado à câmara climática.

3.1.2. Velocidades do ar fornecidas pelo ventilador axial

O ventilador utilizado no túnel de vento teve sua curva característica obtida por Sasaki (2014), assim, somente as velocidades desejadas na condução do experimento foram analisadas. Como o ventilador apresentava vazão de ar muito elevada, foi necessária a redução da entrada de ar por meio do uso de um diafragma, o qual já estava presente no próprio ventilador. O motor do ventilador foi conectado a um inversor de frequência para permitir a variação da rotação. Assim, com o intuito de variar as velocidades do ar, manteve-se o diafragma sempre com abertura fixa, sendo alterada somente a frequência do inversor.

A abertura ideal do diafragma foi determinada com base na menor velocidade do ar necessária para realização do experimento. Para isto, fixou-se a frequência do inversor em 10 Hz e variou-se a abertura do diafragma até a obtenção da velocidade mínima desejada. No entanto, para a definição dos valores intermediários a serem utilizados no delineamento seguido neste trabalho, a velocidade máxima precisava ser conhecida, portanto, após obtenção da velocidade mínima, manteve-se o diafragma com a mesma abertura e determinou-se a velocidade máxima colocando-se o inversor de frequência a 60 Hz. Com os valores de velocidade do ar mínima e máxima, tornou-se possível a determinação das velocidades intermediárias de acordo com o delineamento estatístico utilizado no trabalho.

As velocidades do ar foram aferidas de acordo com a metodologia estabelecida pelo padrão americano ANSI/AMCA 210-99 (2000). Nesta metodologia, deve-se construir o túnel de vento com comprimento equivalente a dez vezes o diâmetro do ventilador, o qual deve estar associado a um tubo homogeneizador de fluxo de ar e a um controlador de vazão, através de uma válvula cônica na saída do duto (FIGURA

10). A constatação da velocidade do ar deveria ser feita com o uso de um tubo de Pitot, no entanto, o ventilador com a entrada de ar reduzida fornecia baixa vazão de ar, assim, foi utilizado um manômetro de fio quente (TAFR-180, Instrutherm).



Figura 10 – Croqui padrão do túnel de vento utilizado para testes em ventiladores (Fonte: Mesquita et al., 1985).

Como o controlador de vazão é necessário somente para definição da curva característica do ventilador, este não foi usado para obtenção das velocidades do ar. Contudo, o túnel de vento estava acoplado à entrada de ar da câmara climática. Isto foi feito, porque se houvesse definido as velocidades do ar sem a presença da câmara ao final do túnel, poderia haver alterações na velocidade após o acoplamento. O tubo homogeneizador utilizado foi o mesmo descrito no item 3.1.1. O anemômetro foi instalado a 2,13 m do ventilador, distância na qual seria instalado o tubo de Pitot.

Para determinar o número necessário de pontos de leitura de velocidades, a seção transversal da tubulação ser dividida em áreas iguais, conforme descrito por Mesquita et al. (1985). Nesse caso, para o ventilador com diâmetro de 0,25 m, são recomendados seis pontos de leituras na seção longitudinal e seis leituras na seção vertical do tubo. Com o objetivo de localizar esses pontos de medição na seção transversal, foi utilizada a Equação 1.

$$L_n = d \sqrt{\frac{2n-1}{4N}} \quad \text{Eq. 1}$$

em que

L_n = distância dos pontos de leitura em relação ao centro da seção circular (mm);

d = diâmetro do ventilador (mm);

n = enésima área (mm²); e,

N = número de leituras.

Os valores lidos de velocidade do ar nos doze pontos tiveram a sua média calculada, e assim, foi definido o valor da velocidade do ar para cada frequência do inversor. Ao final da definição, as velocidades do ar corresponderam às frequências de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 – Frequências configuradas no inversor para fornecer as velocidades de ar utilizadas durante o experimento.

Velocidade do ar (km h ⁻¹)	Frequência do inversor (Hz)
2,0	10,0
3,6	19,5
7,4	37,0
11,2	53,0
12,8	60,0

3.1.3. Obtenção dos déficits de pressão de vapor para climatização da câmara climática

O DPV foi obtido através dos valores de temperatura e umidade relativa do ar e calculado a partir da equação proposta por Tetens (1930). Primeiramente, calculou-se a pressão de saturação de vapor d'água no ar (e_s), posteriormente, a pressão parcial de vapor d'água (e_a) e, por fim, encontrou-se o déficit de pressão através da diferença de ambas pressões.

Para o cálculo de e_s , foi levado em consideração somente o valor da temperatura do ar, conforme a Equação 2.

$$e_s = 6,108 (10)^{\frac{7,5 t}{237,3 + t}} \quad \text{Eq. 2}$$

em que

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

t = temperatura do ar (°C).

A determinação do valor de e_a foi feita a partir da umidade relativa do ar e do valor de e_s (Equação 3).

$$e_a = \frac{UR e_s}{100} \quad \text{Eq. 3}$$

em que

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

UR = umidade relativa do ar (%).

Finalmente, o DPV foi obtido pela diferença entre e_s e e_a , como relatado anteriormente (Equação 4).

$$DPV = e_s - e_a \quad \text{Eq. 4}$$

em que

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

A alteração das condições psicrométricas do ar, que entrava pelo túnel de vento, foi feita pelo aquecedor a gás colocado na entrada do túnel. Os DPV utilizados durante o experimento foram: 5; 9,4; 20; 30,6 e 35 hPa.

Como mencionado anteriormente, para a medição das condições psicrométricas do ar, foi utilizado sensores de temperatura e umidade relativa do ar ao final do túnel de vento e no interior da câmara climática.

3.1.4. Caracterização do espectro de gotas e da vazão real da ponta de pulverização em laboratório

Anteriormente à instalação dos equipamentos de pulverização e do analisador de partículas no interior da câmara climática, a ponta hidráulica Jacto JSF-11002 teve o seu espectro de gotas caracterizado através do analisador de partículas. Esta ponta foi previamente escolhida devido ao conhecimento prévio que esta apresentava espectro constituído por gotas finas. Para uma confirmação, após a caracterização do espectro, foi comparado o resultado obtido com o gráfico de referência para classificação de espectro de gotas fornecido pelos padrões da ANSI/ASAE S572.1 (2009).

Para realizar a caracterização, o analisador de partículas foi configurado para contabilizar gotas de 2,0 a 2000 μm na taxa de aquisição de 2,5 kHz e tempo de leitura de 2,0 segundos. O estudo do espectro de gotas foi compreendido pelos seguintes parâmetros: diâmetro da gota que divide a população de gotas, ordenadas

crescentemente, em duas metades iguais em volume de líquido pulverizado (diâmetro da mediana volumétrica ou DMV); diâmetro da gota, abaixo da qual, se encontra 10 % do volume total de líquido pulverizado (Dv_{10}); diâmetro da gota, abaixo da qual, se encontra 90 % do volume total de líquido pulverizado (Dv_{90}); amplitude relativa ou índice Span; porcentagem do volume pulverizado composta por gotas menores que 100 μm ($\%V < 100$), com diâmetro entre 100 e 200 μm ($100 < \%V < 200$), entre 200 e 300 μm ($200 < \%V < 300$), entre 300 e 400 μm ($300 < \%V < 400$), entre 400 e 500 μm ($400 < \%V < 500$), entre 500 e 600 μm ($500 < \%V < 600$) e, finalmente, por gotas maiores que 600 μm ($\%V > 600$).

A ponta JSF-11002 foi posicionada a 0,30 m de distância em relação ao feixe luminoso emitido pelo analisador de partículas, altura que é recomendada pelos padrões da ANSI/ASAE S572.1 (2009). Para garantir que todo o jorro passasse transversalmente sobre o feixe luminoso e, deste modo, fosse totalmente analisado, a ponta foi instalada em uma barra rígida de pulverização que apresentava, ao final da linha, um motor elétrico, o qual permitia a linha de pulverização girar em torno do eixo (FIGURA 4). A pressão de trabalho utilizada foi de 300 kPa.

Esta análise foi repetida cinco vezes para minimização de erros. Com o intuito de evitar interferências pelas condições psicrométricas do ar, esta caracterização foi realizada com temperatura do ar inferior a 22 °C e umidade relativa do ar superior a 80%.

A vazão da ponta hidráulica também precisou ser aferida, uma vez que pode haver variação com o valor fornecido pelo fabricante. Para tal, a vazão foi medida durante um período de 60 segundos a 300 kPa, com o uso de provetas graduadas. Este procedimento foi repetido três vezes.

3.2. Determinação do espectro de gotas em diferentes déficits de pressão de vapor e velocidades do ar

Após a montagem completa do sistema experimental, iniciou-se a coleta de dados para determinar o espectro de gotas produzido pela ponta JSF-11002 alterando-se os DPV e as velocidades do ar. Para simular a calda de pulverização, foi utilizada somente água pura.

Quanto à configuração do analisador de partículas, foi mantida a mesma configuração utilizada na caracterização do espectro de gotas em laboratório. Entretanto, como já mencionado no item 3.1.1, a ponta hidráulica foi mantida a 0,50 m de altura do feixe luminoso do analisador. A ponta também não foi girada para a análise de todo o jorro, fato que seria prejudicado pelo deslocamento do ar. A pressão de trabalho foi sempre mantida a 300 kPa pela válvula reguladora acoplada ao bico.

As pulverizações somente eram realizadas quando ambos os sensores, presentes na tubulação e no interior da câmara, indicavam as mesmas condições psicrométricas, significando que o sistema experimental estava homogêneo e estabilizado. Previamente às pulverizações, a água a ser pulverizada era aquecida à mesma temperatura do sistema operacional através de um ebulidor elétrico, sendo a temperatura monitorada por um termômetro de mercúrio. Após cada pulverização realizada, a câmara climática era aberta para secagem do bojo, além do piso e das paredes.

3.3. Desenvolvimento do sistema experimental para quantificação das perdas por evaporação em diferentes condições meteorológicas

A quantificação das perdas por evaporação em diferentes condições meteorológicas foi realizada por meio de um sistema experimental muito similar ao utilizado para análise do espectro de gotas. Enquanto que o sistema experimental para análise do espectro de gotas foi constituído pelo analisador de partículas a laser, ponta hidráulica de pulverização, conjunto moto-bomba, aquecedor a gás, câmara climática, túnel de vento, bojo e sensores de temperatura e umidade relativa do ar, para a quantificação das perdas por evaporação, o analisador de partículas a laser foi removido do sistema.

Para o primeiro trabalho, os sensores instalados no interior da câmara somente tinham a função de monitorar as condições psicrométricas previamente às pulverizações. Contudo, neste segundo trabalho, estes sensores também serviram para o monitoramento após as pulverizações, uma vez que as alterações nas condições psicrométricas após os eventos de pulverização foram utilizadas para quantificação das perdas por evaporação.

Outra modificação na montagem do sistema experimental foi em relação à disposição da ponta de pulverização. Esta foi mantida na mesma localização, no entanto, a orientação do jorro foi alterada. Neste segundo trabalho, o jorro esteve perpendicular ao fluxo de ar, o que favoreceu a melhor interação entre o fluxo de ar e as gotas pulverizadas (FIGURA 11).

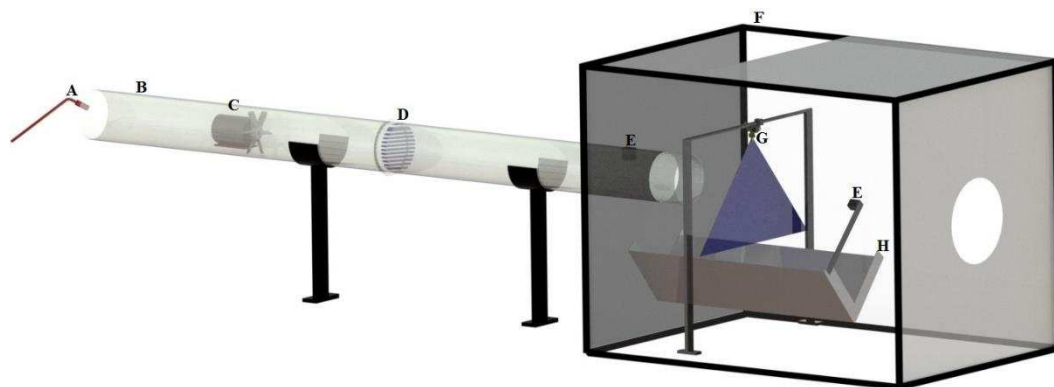


Figura 11 – Sistema experimental montado para quantificação das perdas por evaporação em diferentes condições psicrométricas. (A) aquecedor a gás; (B) túnel de vento; (C) ventilador axial; (D) homogeneizador de ar; (E) sensores; (F) câmara climática; (G) ponta de pulverização; e (H) bojo.

3.4. Perdas por evaporação em diferentes condições meteorológicas

A quantificação das perdas por evaporação foi feita nas mesmas condições psicrométricas, velocidades do ar e pressão de trabalho utilizadas durante a análise do espectro de gotas em diferentes condições meteorológicas. A calda de pulverização também foi simulada com água pura previamente aquecida à temperatura do sistema experimental. Anteriormente às pulverizações, o sistema experimental tinha as suas condições psicrométricas homogeneizadas, o qual era monitorado pela estabilização de ambos os sensores.

As pulverizações foram mantidas ao longo de todo o tempo necessário para a coleta de dados pelos sensores instalados no interior da câmara climática. Após os eventos de pulverização, havia alteração das condições psicrométricas do ar e esta foi utilizada para o cálculo da quantificação das perdas por evaporação. Assim como no primeiro experimento, ao término de cada coleta de dados, a câmara climática era aberta para secagem do bojo, além do piso e das paredes.

Para o cálculo da quantificação das perdas por evaporação, primeiramente foi calculada a umidade absoluta do ar previamente às pulverizações, conforme Equação 5 (VIANELLO; ALVES, 2012).

$$\rho_{vi} = \frac{216,68 e_i}{T} \quad \text{Eq. 5}$$

em que

ρ_{vi} = umidade absoluta do ar previamente às pulverizações ($\text{g}_{\text{vapor d'água}} \text{m}_{\text{ar}}^{-3}$);

e_i = pressão de vapor d'água no ar antes dos eventos de pulverização (hPa); e,

T = temperatura do ar (K).

A umidade absoluta do ar à temperatura de bulbo úmido (Equação 6), assim como a umidade absoluta do ar após a ocorrência dos eventos de pulverização (Equação 7) também foram calculadas. A umidade absoluta do ar à temperatura de bulbo úmido foi necessária, uma vez que a partir desta pode-se determinar a perda máxima possível por evaporação para cada condição psicrométrica, ao considerar o resfriamento evaporativo até a saturação do ar. Com a umidade absoluta do ar após a pulverização, foi possível estimar as perdas por evaporação.

$$\rho_{vs} = \frac{216,68 e_s}{T} \quad \text{Eq. 6}$$

em que

ρ_{vs} = umidade absoluta do ar à temperatura de bulbo úmido ($\text{g}_{\text{vapor d'água}} \text{m}_{\text{ar}}^{-3}$); e,

e_s = pressão de vapor d'água no ar à temperatura de bulbo úmido (hPa).

$$\rho_{vf} = \frac{216,68 e_f}{T} \quad \text{Eq. 7}$$

em que

ρ_{vf} = umidade absoluta do ar após a ocorrência dos eventos de pulverização ($\text{g}_{\text{vapor d'água}} \text{m}_{\text{ar}}^{-3}$); e,

e_s = pressão de vapor d'água no ar após a pulverização (hPa).

A perda máxima possível por evaporação citada anteriormente, caracteriza uma situação onde houvesse certa quantidade de evaporação do líquido, que, por consequência, saturaria o ar próximo à região pulverizada. Deste modo, a UR nas imediações alcançaria 100% após a ocorrência da pulverização.

De posse dos valores de umidade absoluta percorridas anteriormente, foram calculadas, respectivamente, por meio das Equações 8 e 9, as perdas por evaporação de líquido ocorridas durante as pulverizações e as perdas máximas possíveis.

$$P = \left(\frac{\rho_{vf} - \rho_{vi}}{Q_T} \right) 100 \quad \text{Eq. 8}$$

em que

P = perda por evaporação do líquido pulverizado (%);

ρ_{vf} = umidade absoluta no ar após a pulverização ($\text{g}_{\text{vapor d'água}} \text{m}_{\text{ar}}^{-3}$); e,

Q_T = umidade total durante o período de ocorrência da pulverização ($\text{g}_{\text{vapor d'água}} \text{m}_{\text{ar}}^{-3}$).

$$P_M = \left(\frac{\rho_{vs} - \rho_{vi}}{Q_T} \right) 100 \quad \text{Eq. 9}$$

em que

P_M = perda máxima por evaporação do líquido pulverizado (%); e,

ρ_{vs} = umidade absoluta de saturação no ar à temperatura de bulbo úmido, o qual foi determinado previamente às pulverizações ($\text{g}_{\text{vapor d'água}} \text{m}_{\text{ar}}^{-3}$).

A umidade total durante o período de ocorrência da pulverização (Q_T) foi obtida com base na quantidade de água pulverizada por metro cúbico de ar, a qual interage com o ar nas imediações durante um minuto de pulverização. Neste trabalho, foram consideradas duas velocidades de deslocamento do trator utilizadas na aplicação de agrotóxicos, 6 e 12 km h⁻¹. Deste modo, foi obtida a Equação 10:

$$Q_T = \frac{Q_p}{v \cdot h \cdot f} \cdot \frac{60}{1000} \quad \text{Eq. 10}$$

em que

Q_p = vazão da ponta de pulverização (g_{H2O} min⁻¹);

v = velocidade do trator (km h⁻¹);

h = altura da barra de pulverização (m); e,

f = faixa de pulverização (m).

Esta última equação foi deduzida ao considerar-se que, durante um minuto de ocorrência do evento de pulverização, determinado volume de ar interagiu e trocou calor com as gotas, o que resultou na evaporação do líquido aplicado. Portanto, para deduzir o volume de ar, utilizou-se a altura e a faixa de pulverização de uma ponta, além da distância percorrida pelo trator durante um minuto.

3.5. Análise Estatística

Os dados obtidos, tanto na determinação do espectro de gotas e quanto na quantificação das perdas por evaporação em diferentes condições meteorológicas, foram analisados utilizando o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), o qual foi desenvolvido para reduzir o número de unidades experimentais e, assim,

maximizar a realização dos ensaios. Este delineamento possui características que buscam o ponto que dê a resposta ótima e, então, comparar a parte do delineamento, que consiste dos pontos axiais, com o objetivo de avaliar a parte curvilínea aí existente, de forma a chegar à solução ótima, que maximiza os resultados do sistema (MATEUS et al., 2001)

Para este delineamento, o número de ensaios é definido por: 2^k pontos fatoriais + $2k$ pontos axiais + um número arbitrário de pontos centrais. Como ambos os experimentos realizados apresentaram dois fatores (DPV e velocidade do ar), o delineamento foi composto por treze ensaios ao considerar cinco pontos centrais. Os ensaios formados no DCCR estão apresentados nos Quadros 2 e 3.

Quadro 2 – Codificação dos ensaios de acordo com DCCR.

Variáveis	Código	-1,41	-1	0	+1	+1,41
DPV (hPa)	x ₁	5	9,4	20	30,6	35
V _{ar} (km h ⁻¹)	x ₂	2	3,6	7,4	11,2	12,8

DPV – Déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (hPa);

V_{ar} – Velocidade do ar (km h⁻¹); e,

-1,41; -1; 0; +1; +1,41 – Variáveis codificadas.

A codificação das variáveis dos pontos axiais foi feita seguindo a Equação 11 e, para os pontos fatoriais e centrais, a codificação foi feita de acordo com a Equação 12.

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad \text{Eq. 11}$$

em que

α = variável independente codificada; e,

k = número de fatores.

$$x_{in} = \frac{2 (X_{in} - \bar{X}_i)}{R} \quad \text{Eq. 12}$$

em que

x_{in} = variável independente codificada;

X_{in} = variável independente;

$\bar{X}_i$ = média das variáveis; e,

R = diferença entre maior e menor variável independente.

Quadro 3 – Esquema dos ensaios de acordo com o DCCR.

Ensaio	DPV (hPa)	V _{ar} (km h ⁻¹)	x _{1i}	x _{2i}
1	9,4	3,6	-1	-1
2	30,6	3,6	+1	-1
3	9,4	11,2	-1	+1
4	30,6	11,2	+1	+1
5	5	7,4	-1,41	0
6	35	7,4	+1,41	0
7	20	2,0	0	-1,41
8	20	12,8	0	+1,41
9	20	7,4	0	0
10	20	7,4	0	0
11	20	7,4	0	0
12	20	7,4	0	0
13	20	7,4	0	0

DPV – Déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (hPa);

V_{ar} – Velocidade do ar (km h⁻¹); e,

x_{1i}, x_{2i} – Códigos das variáveis.

Enfim, os dados coletados foram relacionados por meio da Metodologia de Superfície de Resposta e os modelos estatísticos foram escolhidos com base no coeficiente de determinação (R²).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização do espectro de gotas e da vazão real da ponta de pulverização em laboratório

O espectro de gotas analisado em laboratório para caracterização da ponta hidráulica JSF-11002 está apresentado no Quadro 4. Durante as análises, foram respeitadas as condições psicrométricas recomendadas pelas normativas ANSI/ASAE S572.1 (2009) e ISO 5682.1 (1996). Assim, a análise foi realizada somente em temperaturas inferiores a 23 °C e UR superior a 75%. Os parâmetros $500 < \%V < 600$ e $\%V > 600$ foram omitidos do Quadro 4, porque esta ponta hidráulica não produz gotas nestes espectros.

Quadro 4 – Espectro de gotas da ponta JFS-11002.

Dv10 (μm)	DMV (μm)	Dv90 (μm)	Span	$\%V < 100$
70,4	145,6	296,9	1,556	25,74

Dv10 – diâmetro da gota, abaixo da qual, se encontra 10% do volume total de líquido pulverizado;
DMV – diâmetro da gota, abaixo da qual, se encontra 50% do volume total de líquido pulverizado;
Dv90 – diâmetro da gota, abaixo da qual, se encontra 90% do volume total de líquido pulverizado;
Span – amplitude relativa; e,
 $\%V < 100$ – fração do volume compreendido por gotas menores que 100 μm .

Quadro 4 – Continuação.

$100 < \%V < 200$	$200 < \%V < 300$	$300 < \%V < 400$	$400 < \%V < 500$
44,01	19,10	6,93	4,22

$100 < \%V < 200$ – fração do volume compreendido por gotas entre 100 e 200 μm ;
 $200 < \%V < 300$ – fração do volume compreendido por gotas entre 200 e 300 μm ;
 $300 < \%V < 400$ – fração do volume compreendido por gotas entre 300 e 400 μm ; e,
 $400 < \%V < 500$ – fração do volume compreendido por gotas entre 400 e 500 μm .

Com base nos parâmetros Dv_{10} , DMV e Dv_{90} , pôde-se conferir a classificação da ponta de pulverização quanto ao espectro de gotas produzido a partir do gráfico de referência da ANSI/ASAE S572.1 (2009). De acordo com este gráfico, todos os três parâmetros encontram-se dentro da faixa de gotas finas e, portanto, esta ponta hidráulica apresenta gotas assim classificadas.

A vazão real constatada para esta ponta de pulverização foi de $0,860 \text{ L min}^{-1}$, a qual atende à normativa EN 12761-2 (2001), onde é estipulado que a variação da vazão deve estar abaixo de 10% em comparação ao valor fornecido pelo fabricante. Deste modo, foi adotada a vazão de $0,860 \text{ L min}^{-1}$ para dedução da umidade total durante o período de ocorrência da pulverização.

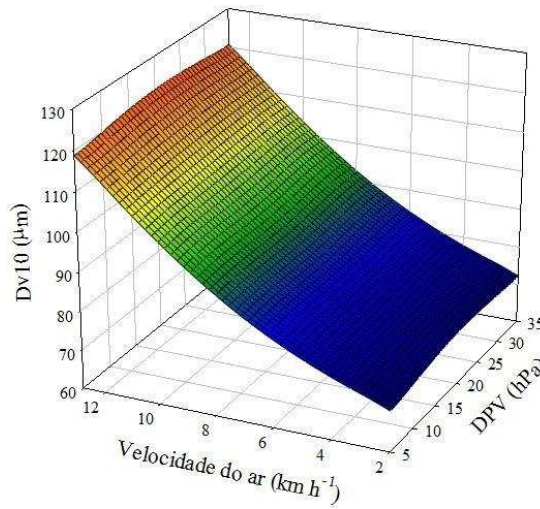
4.2. Espectro de gotas em diferentes déficits de pressão de vapor e velocidades do ar

O espectro de gotas da ponta JSF 11002 avaliado pelo analisador de partículas em diferentes valores de DPV e velocidades do ar está apresentado na Figura 12. Como pode ser observado, o DPV somente foi significativo para os parâmetros $200 < \%V < 300$ e $300 < \%V < 400$. Apesar de ter mostrado pequena influência sobre o espectro observado neste trabalho, o aumento do DPV reduz o diâmetro das gotas e, conseqüentemente, eleva a deriva na pulverização (ARVIDSSON et al., 2011; CARLSEN et al., 2006b; HOLTERMAN, 2003; NUYTTENS et al., 2006).

Os parâmetros Dv_{10} , DMV e $100 < \%V < 200$ tiveram seus valores primordialmente elevados com o aumento da velocidade do ar. Os parâmetros Dv_{90} , $Span$ e $\%V < 100$ resultaram em uma redução de seus valores com o aumento da velocidade do ar. Em relação à faixa de $200 < \%V < 300$, esta apresentou incremento de valor com o aumento da velocidade do ar e redução do DPV. Para $300 < \%V < 400$, houve redução de seus valores com o aumento tanto da velocidade do ar quanto do DPV. Já o parâmetro $400 < \%V < 500$, o qual é constatado na análise do espectro em laboratório, não foi observado neste estudo, o que pode ser resultante da análise localizada em pequena faixa do jorro, diferentemente da realizada para caracterização da ponta.

O parâmetro Dv_{10} é muito influenciado pela $\%V < 100$, principalmente ao se tratar de pontas que produzem gotas finas. Assim, ao se constatar uma grande redução no parâmetro $\%V < 100$ ocorre, inevitavelmente, aumento do Dv_{10} . Este fato é observado nos dados apresentados nas Figuras 12.a e 12.e, uma vez que houve diminuição da quantidade de gotas muito finas pela ação do vento. Deste modo,

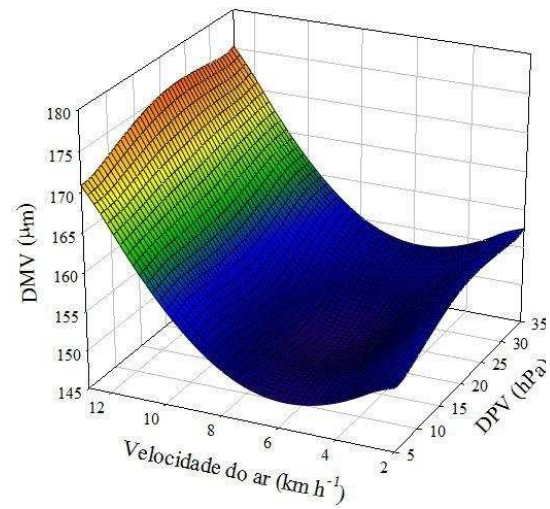
verifica-se, também, que quanto menor for o Dv10 obtido de uma ponta, maior será a produção de gotas finas por esta.



$$\text{Dv10} = 71,4842 + 0,0016^{\text{ns}} \text{DPV}^2 + 0,3028^{**} V^2$$

$$R^2 = 0,9511$$

(a)

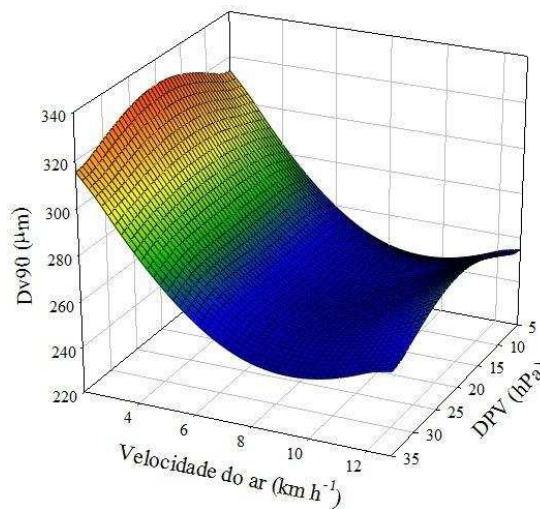


$$\text{DMV} = 171,8523 - 0,3760^{\text{ns}} \text{DPV} - 7,1988^{**} V$$

$$+ 0,0131^{\text{ns}} \text{DPV}^2 + 0,5972^{**} V^2$$

$$R^2 = 0,8289$$

(b)

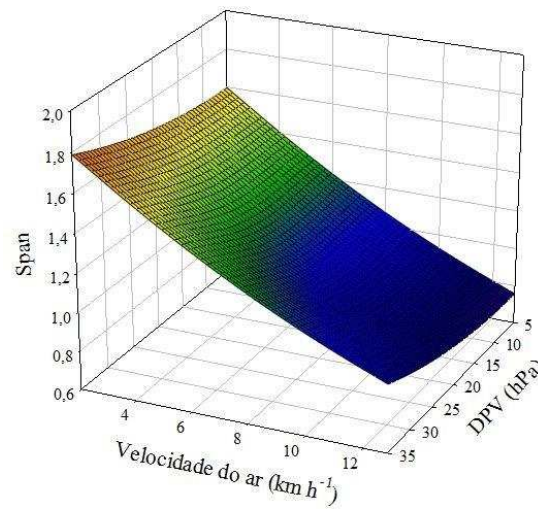


$$\text{Dv90} = 371,8303 + 0,8064^{\text{ns}} \text{DPV} - 28,7151^{**} V$$

$$- 0,0189^{\text{ns}} \text{DPV}^2 + 1,5715^{**} V^2$$

$$R^2 = 0,9076$$

(c)



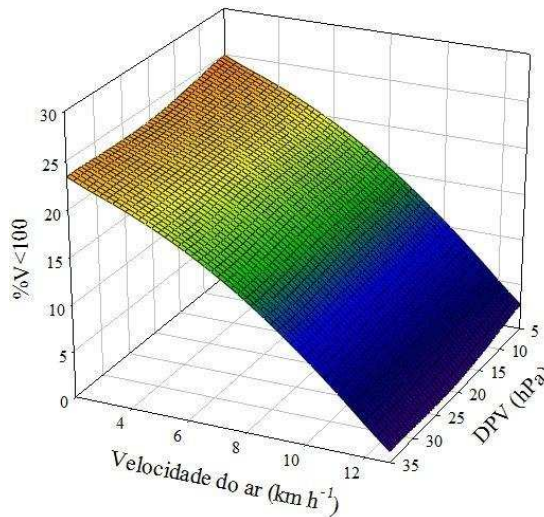
$$\text{Span} = 1,9631 - 0,0125^{\text{ns}} \text{DPV} - 0,1376^{*} V +$$

$$0,0005^{\text{ns}} \text{DPV}^2 + 0,0040^{\text{ns}} V^2$$

$$R^2 = 0,8824$$

(d)

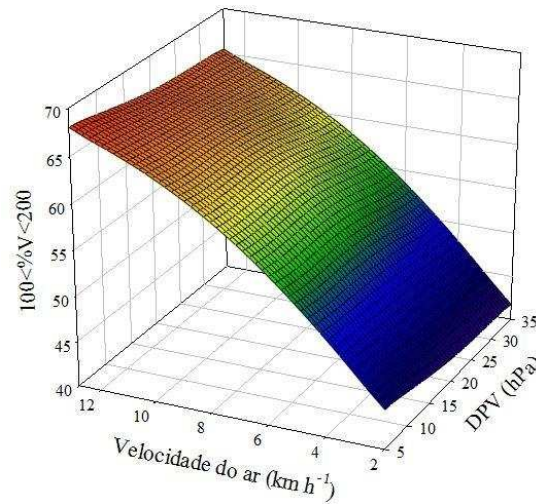
Figura 12 – Estimativa do comportamento do espectro de gotas em função dos valores de déficit de pressão de saturação de vapor d'água (DPV) e das velocidades do ar. (a) Dv10; (b) DMV; (c) Dv90; e (d) Span.



$$\%V<100 = 24,4226 - 0,0013^{ns} DPV^2 - 0,1390^{**} V^2$$

$$R^2 = 0,9479$$

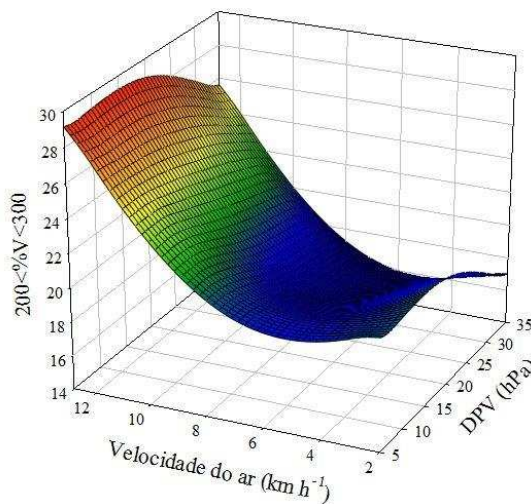
(e)



$$100<\%V<200 = 33,9542 + 0,0788^{ns} DPV + 4,6435^{**} V - 0,0041^{ns} DPV^2 - 0,1654^{\circ} V^2$$

$$R^2 = 0,8915$$

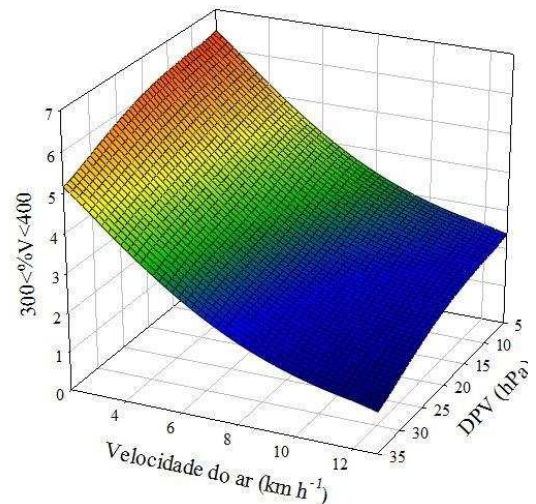
(f)



$$200<\%V<300 = 26,5818 - 0,1189^* DPV - 2,3368^{**} V + 0,2115^{**} V^2$$

$$R^2 = 0,9093$$

(g)



$$300<\%V<400 = 8,6531 - 0,440^* DPV - 0,9238^{**} V + 0,0369^* V^2$$

$$R^2 = 0,8818$$

(h)

**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t. °Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t. ^{ns}Não significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

Figura 12 – Continuação. (e) %V<100 μm; (f) 100<%V<200 μm; (g) 200<%V<300 μm; e (h) 300<%V<400 μm.

A redução do parâmetro $\%V<100$ ocorreu devido ao arrasto das gotas finas provocado pelo aumento da velocidade do vento. Esse comportamento foi bem significativo, o qual resultou em queda de aproximados 24% para valores inferiores a 1% deste parâmetro e, assim, mostra a alta suscetibilidade das gotas finas ao transporte pelo vento. A elevada deriva das gotas finas confirma os resultados encontrados por Arvidsson et al. (2011) e Gil et al. (2014), os quais concluíram que o parâmetro $\%V<100$ é um ótimo indicador de potencial de deriva, melhor até que o DMV, que é muito utilizado para predição destas perdas.

A drástica redução do parâmetro $\%V<100$, ao aumentar a velocidade do ar de 2,0 para 12,8 km h⁻¹, praticamente representa eliminação total das gotas menores que 100 μ m. Isto é tão significativo que afeta consideravelmente o comportamento de todos os outros parâmetros, principalmente do Dv10, como já mencionado. Por conseguinte, atenua o efeito do DPV no espectro das gotas, o qual apresentou baixa relevância neste trabalho, mas já teve sua importância comprovada em outros estudos (ALVARENGA et al., 2014; MACIEL et al., 2016; SASAKI et al., 2016).

O DMV (Figura 12.b) teve ligeira redução sob velocidades do ar baixas, porém grande aumento com a elevação dessa variável. O incremento do DMV com o aumento da velocidade, assim como o ocorre para o Dv10, é devido à redução da quantidade de gotas pequenas, uma vez que este parâmetro também é bastante influenciado por $\%V<100$. No entanto, o DMV, além da influência da $\%V<100$, é dependente das outras classes de tamanhos superiores, o que pode explicar a redução inicial dos seus valores.

Com relação aos parâmetros $100<\%V<200$ e $200<\%V<300$ (Figuras 12.f e 12.g, respectivamente), houve incremento de valores com o aumento da velocidade do ar. Esta elevação aconteceu, como já mencionado anteriormente, devido ao arrasto das

gotas menores que 100 μm . Provavelmente, algumas gotas, cujos diâmetros estão situados nestas faixas, também foram arrastadas. Contudo, após eliminação quase que total das gotas finas, as gotas compreendidas dentro de faixas de tamanho superiores passaram a corresponder a uma porcentagem maior do volume total pulverizado.

O comportamento das gotas compreendidas no parâmetro $300 < \%V < 400$ (Figura 12.h) mostra claramente que as mais grossas também são arrastadas pelo movimento do ar, além de serem evaporadas com o aumento do DPV. Como resultado, tem-se uma redução do valor do parâmetro Dv_{90} com o aumento da velocidade do ar, já que este parâmetro está totalmente associado às gotas mais grossas do espectro. Entretanto, o Dv_{90} não foi influenciado pelo DPV.

Diferentemente ao apresentado por $100 < \%V < 200$ e $200 < \%V < 300$, as gotas situadas na faixa $300 < \%V < 400$ foram reduzidas com o aumento da velocidade do ar. Como este parâmetro apresenta volume muito baixo de gotas já em velocidades baixas, a deriva correspondente não permitiu que a eliminação das gotas finas fosse suficiente para elevar sua porcentagem sobre o volume total. Assim, esta eliminação favoreceu somente às outras duas faixas de volume de gotas.

Além das gotas situadas na faixa de $300 < \%V < 400$, as compreendidas no parâmetro $200 < \%V < 300$ também diminuíram com o aumento do DPV. A constatação da influência do DPV somente sobre as gotas mais grossas do espectro pode ter alguns motivos, e um destes pode estar associado a um fenômeno observado por Maciel et al. (2016) e Sasaki et al. (2016). Estes autores mostraram que com o aumento do DPV eleva-se o volume de gotas evaporadas, o qual acarreta deslocamento das classes de diâmetro formadas. Assim, as gotas que pertenciam à classe de $300 < \%V < 400$ reduzem de tamanho e passam a pertencer à classe de $200 < \%V < 300$, e assim por diante.

A significância do DPV, somente para a faixa do espectro de $200 < \%V < 300$, acontece, então, porque não houve evaporação o suficiente de gotas compreendidas na faixa de $300 < \%V < 400$ para, desse modo, suprir as que sofreram redução de diâmetro. No caso do parâmetro $300 < \%V < 400$, não há gotas mais grossas que as compreendidas nesta faixa para suprir a redução do tamanho das gotas e atenuar o efeito do DPV sobre este parâmetro. Além disso, o elevado arrasto das gotas mais finas com o aumento da velocidade do ar pode estar minimizando a ação do DPV sobre os outros parâmetros, como já citado.

O índice Span tem a finalidade de mostrar a qualidade da pulverização do espectro, assim, quanto menor o valor deste parâmetro, mais homogêneas são as gotas (SASAKI et al., 2013). Entretanto, a diminuição do valor do Span (Figura 12.d) observado nesta análise não significa produção de um espectro de gotas mais homogêneo com o aumento da velocidade do ar. Este resultado confirma mais uma vez que há eliminação das gotas mais finas por deriva e, portanto, o espectro passa a ser formado por uma faixa mais estreita de diâmetro de gotas.

4.3. Perdas da pulverização por evaporação em diferentes condições meteorológicas

4.3.1. Volume real de ar que interage com as gotas pulverizadas

Para definição do volume real de ar que envolve as gotas pulverizadas, filmagens laterais foram feitas nas velocidades de 6 e 12 km h⁻¹, com o intuito de observar o comportamento das gotas após a pulverização (Figuras 13.a e 13.b). Durante a obtenção destas imagens, as condições meteorológicas apresentaram temperatura máxima de 27 °C, umidade relativa mínima de 65% e vento entre 3 e 4 km h⁻¹.

Como pode ser visto na Figura 13.b, quando foi utilizada a velocidade do trator de 12 km h⁻¹, percebe-se que as gotas sofrem arrasto devido ao deslocamento do conjunto trator-pulverizador. Assim, a altura a ser utilizada no cálculo da umidade total durante o período de ocorrência da pulverização foi superior à altura da barra. Este fato corrobora com o observado por Arvidsson et al. (2011), os quais afirmam que o fluxo de ar induzido pelo movimento de avanço do conjunto trator-pulverizador leva ao arrasto das gotas de menor diâmetro.

Para o estabelecimento desta altura, a imagem foi analisada no software MatLab para a identificação de abrangência das gotas. Com esta análise, constatou-se que as gotas alcançaram altura aproximada de 0,20 m superior à barra de pulverização. Assim, na equação para cálculo da umidade total durante o período de ocorrência da pulverização foi considerado o valor 0,70 m para a altura de barra.



(a)



(b)

Figura 13 – Imagens obtidas a partir de filmagens laterais do cenário de pulverização com uso de um pulverizador hidráulico de barras. (a) velocidade: 6 km h^{-1} ; e (b) velocidade: 12 km h^{-1} .

Ao se avaliar a Figura 13.a, observa-se que na pulverização com o trator na velocidade de 6 km h^{-1} , as gotas não sofreram o mesmo arrasto como foi observado para a velocidade de 12 km h^{-1} . Deste modo, para a velocidade menor, utilizou-se a altura de 0,50 m, a qual é correspondente à altura da barra durante as pulverizações convencionais.

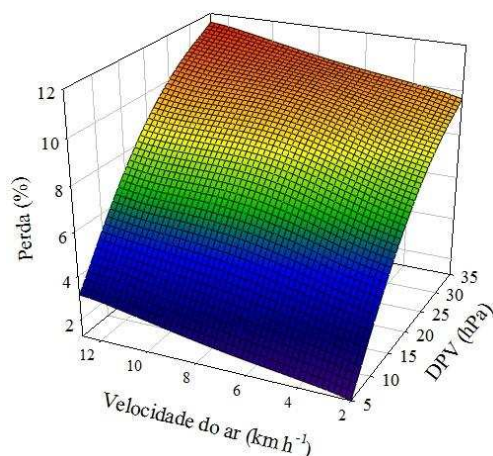
4.3.2. Perdas por evaporação em diferentes condições meteorológicas

As estimativas de perdas e estimativas de perdas máximas possíveis por evaporação durante o processo de pulverização, nas condições meteorológicas avaliadas e para as duas velocidades de deslocamento do trator, estão apresentadas na Figura 14.

A Figura 14.a ilustra as estimativas de perdas por evaporação em diferentes condições meteorológicas ao pulverizar com a ponta JSF11002 a 300 kPa e ao simular a velocidade do trator a 6 km h⁻¹. Nestas condições, as perdas alcançaram aproximadamente 11% do total pulverizado. Como pode ser observado, as variações de DPV e velocidade do ar interferiram na evaporação, no entanto, o DPV foi o efeito mais significativo e proeminente.

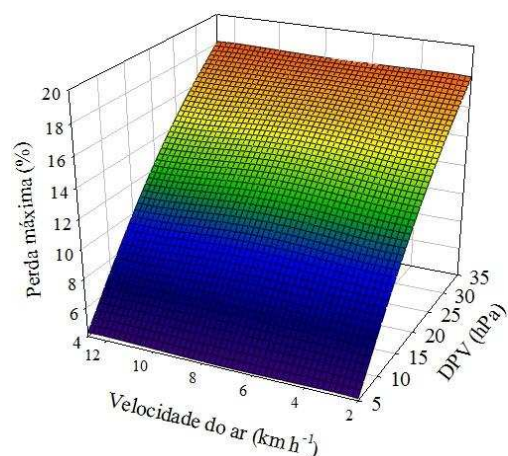
Na Figura 14.c, tem-se as estimativas de perdas por evaporação com a velocidade do trator a 12 km h⁻¹. Similarmente ao ocorrido para a velocidade de 6 km h⁻¹, ambas as variáveis influenciaram as perdas evaporativas, entretanto, o efeito do DPV foi mais acentuado. Em contraste, a perda foi quase três vezes maior, com valores superiores a 30% do volume total pulverizado, apesar de a velocidade do trator ter sido apenas duas vezes maior.

A dedução para a quantificação da perda foi feita ao considerar o volume de ar que interage com as gotas. Assim, ao se alterar a velocidade de 6 para 12 km h⁻¹, sem variar a vazão da ponta, o que, conseqüentemente, reduz pela metade o volume de calda aplicada, obtém-se o dobro de volume de ar para o mesmo volume de água. Esse aumento na proporção do volume de ar/água, já é suficiente para duplicar as perdas. Porém, a 12 km h⁻¹ houve arrasto das gotas, o qual aumentou ainda mais o volume de ar e, devido a isto, as perdas nesta velocidade praticamente triplicaram.



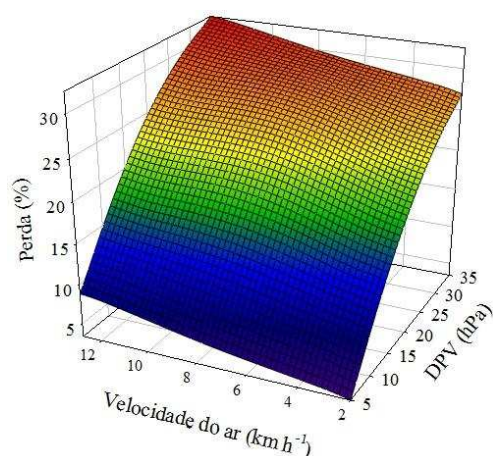
$$\begin{aligned} \text{Estimativa de perda a } 6 \text{ km h}^{-1} = & -3,4584 + \\ & 0,6545^{**} \text{ DPV} + 0,5055^{*} V - 0,0093^{**} \text{ DPV}^2 - \\ & 0,0219^{\circ} V^2 \\ R^2 = & 0,9841 \end{aligned}$$

(a)



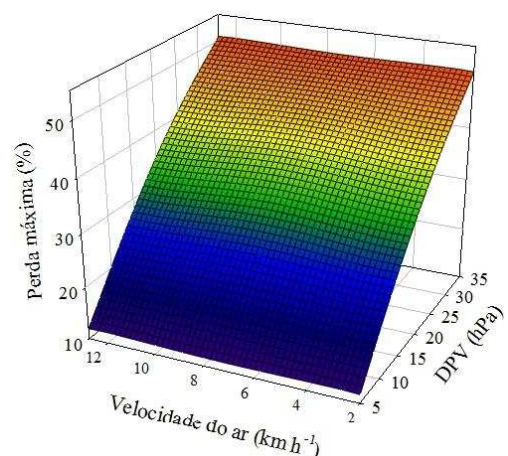
$$\begin{aligned} \text{Estimativa de perda máx. a } 6 \text{ km h}^{-1} = & -0,6291 + \\ & 0,7849^{**} \text{ DPV} + 0,2725^{*} V - 0,0081^{**} \text{ DPV}^2 - \\ & 0,0176^{*} V^2 \\ R^2 = & 0,9972 \end{aligned}$$

(b)



$$\begin{aligned} \text{Estimativa de perda a } 12 \text{ km h}^{-1} = & -9,6973 + \\ & 1,8335^{**} \text{ DPV} + 1,4173^{*} V - 0,0261^{**} \text{ DPV}^2 - \\ & 0,0615^{\circ} V^2 \\ R^2 = & 0,9841 \end{aligned}$$

(c)



$$\begin{aligned} \text{Estimativa de perda máx. a } 12 \text{ km h}^{-1} = & -1,7594 \\ & + 2,1975^{**} \text{ DPV} + 0,7625^{*} V - 0,0226^{**} \text{ DPV}^2 - \\ & 0,0494^{*} V^2 \\ R^2 = & 0,9972 \end{aligned}$$

(d)

**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t. °Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

Figura 14 – Estimativas de perdas e estimativas de perdas máximas possíveis por evaporação, em função das condições meteorológicas avaliadas e duas velocidades de deslocamento do trator. (a) Estimativa de perdas a 6 km h⁻¹; (b) Estimativa de perdas máximas a 6 km h⁻¹; (c) Estimativa de perdas a 12 km h⁻¹; e (d) Estimativa de perdas máximas a 12 km h⁻¹.

Com este comportamento observado, evidencia que a busca pelo aumento na capacidade operacional da pulverização eleva as perdas por evaporação até o expressivo valor de 30%. No entanto, esta não é a única variável que favorece maiores perdas. Carlsen et al. (2006a) calcularam perdas que oscilaram de 0 a 25% do total pulverizado, cuja variação foi explicada pela alteração na pressão de vapor do produto químico aplicado. Assim, as perdas ainda podem ultrapassar os 30% constatados, caso haja utilização de produtos químicos que aumentam a pressão de vapor da calda de pulverização.

Como também pode ser visto na Figura 14, ao pulverizar durante condições favoráveis à aplicação de agrotóxicos, também se observa perdas por evaporação, embora possam ser consideradas irrelevantes. Para a adoção da velocidade do trator igual a 6 km h^{-1} a perda mínima ocorrida foi de aproximadamente 0,50%, enquanto a 12 km h^{-1} , o valor mínimo foi de aproximadamente 1,41%. Isto ocorre porque somente na condição com DPV igual a 0 hPa não ocorrerá evaporação (MACIEL, 2013), uma vez que o ambiente estará totalmente saturado por vapor d'água.

Ao se observar as Figuras 14.b e 14.d, percebe-se que as condições psicrométricas durante a realização do trabalho possibilitariam perdas superiores às realmente constatadas. Para a velocidade do trator de 6 km h^{-1} , a perda máxima possível para a condição mais drástica foi de aproximadamente 18%, enquanto que para 12 km h^{-1} , o valor máximo possível seria superior a 49%. Deste modo, conclui-se que a maior perda observada foi de aproximadamente 40% menor que a máxima possível em ambas as velocidades de deslocamento do trator.

Uma possível explicação para este acontecimento é o diâmetro de gotas produzido pela ponta hidráulica. Apesar do espectro produzido pela ponta JSF 11002 ser classificado como gotas finas, o diâmetro proporcionado na pulverização não é

suficiente para evaporar as gotas a ponto de saturar o ar. Sasaki (2014) somente encontrou boa eficiência, para um sistema de resfriamento adiabático do fluxo de ar de um pulverizador com assistência de ar, ao empregar nebulizadores com Dv10, DMV e Dv90 de 25,22, 46,33 e 84,16 μm , respectivamente. Consequentemente, o uso de pontas com espectro formado por gotas mais grossas pode reduzir a evaporação e, por fim, diminuir as perdas durante as pulverizações.

Em trabalho realizado por Maciel (2013), mesmo ao realizar pulverizações em condições com DPV igual a 51,6 hPa, foram encontradas perdas por evaporação inferiores a 27%. Contudo, foi utilizada a ponta Lurmark LD11002, a qual apresenta gotas mais grossas ao visar a redução da deriva. Nascimento et al. (2012), ao realizar trabalhos em condições de campo, constataram que a pulverização com gotas maiores proporciona maior deposição do líquido nas folhas em horários com maior DPV, em relação a pulverizações com gotas finas. Portanto, este fato revela a menor eficiência do ar em evaporar gotas com maior diâmetro.

O aumento progressivo das perdas ao se elevar o DPV explica diversos resultados encontrados por diferentes autores, os quais obtiveram redução da deposição de produto químico com o aumento do DPV (ALVARENGA et al., 2013; BALAN et al., 2008; NASCIMENTO et al., 2012). Este comportamento ocorre porque, à medida que se aumenta o DPV, menor é a quantidade de vapor d'água presente no ar e, consequentemente, maior é o potencial para a absorção de água.

A velocidade do ar, apesar de ser significativa na quantificação das perdas, praticamente não alterou as perdas máximas possíveis ao fixar o DPV e adotar os valores de 6 ou 12 km h^{-1} . Este fato sugere que o vento não tem relação direta com a evaporação das gotas, mas somente o DPV. No entanto, para as perdas observadas, a velocidade do ar não foi irrelevante. Assim, acredita-se que o vento pode favorecer a

troca de calor entre o ar e as gotas por meio da renovação do ar nas imediações das pulverizações, o que, conseqüentemente, incrementa as perdas.

O limite de temperatura e UR especificado na literatura é, respectivamente, máxima de 30 °C e mínima de 55% (ANDEF, 2004; RAETANO, 2011) e, deste modo, tem-se um DPV de 19,1 hPa. Este valor, combinado à velocidade do vento mínima exigida para a pulverização, que é 3 km h⁻¹ (ANDEF, 2004; RAETANO, 2011), proporciona perdas iguais a aproximadamente 7 e 19,5%, respectivamente, nas velocidades do trator de 6 e 12 km h⁻¹. Se o vento estiver a 10 km h⁻¹, ou seja, no limite máximo, as perdas sobem para 8,5 e 23,5%. Portanto, se o aplicador de agrotóxicos tem a intenção de pulverizar no limite da condição psicrométrica, deve, ao menos, conduzir o trator em velocidade mais reduzida para evitar perdas maiores.

Como em qualquer condição psicrométrica ocorrerão perdas por evaporação das gotas, torna-se necessário, ao aplicar os agrotóxicos no campo, adotar recomendações específicas para localidades com condições climáticas particulares, principalmente para as caracterizadas por ventos fortes e baixos valores de DPV nos horários próximos ao meio-dia. Outro ponto a se considerar, é que perdas após a deposição das gotas no alvo também são observadas (BERG et al., 1999; CARLSEN et al., 2006a; GIMENES et al., 2013; RÜDEL, 1997; XU et al., 2011). Desta forma, é essencial buscar horários do dia com condições meteorológicas mais adequadas para reduzir ao máximo as perdas durante o percurso das gotas da ponta até o alvo, assim como reduzir as prováveis perdas após a deposição.

5. CONCLUSÕES

A velocidade do ar provoca deriva tão acentuada das gotas finas, que afeta consideravelmente o comportamento de todo o espectro de gotas, além de atenuar o efeito do DPV.

O incremento da velocidade do ar induz elevado arrasto das gotas menores que 100 μm e, conseqüentemente, aumenta os valores dos parâmetros Dv_{10} , DMV , $100 < \%V < 200$ e $200 < \%V < 300$. Em contraste, ocorre redução do parâmetro $\%V < 100$.

O arrasto das gotas compreendidas no parâmetro $300 < \%V < 400$ mostra que as gotas mais grossas também podem ser influenciadas pelo vento, com uma redução do valor de Dv_{90} .

Com este trabalho, foi possível estimar as perdas por evaporação durante a pulverização. Foi observado que o vento favorece a maiores perdas por evaporação, apesar de que o DPV seja a variável mais importante neste processo físico.

O aumento da velocidade do trator também favorece a maiores perdas por evaporação ao aumentar o volume de ar que interage com as gotas pulverizadas.

As perdas por evaporação são menores do que o potencial evaporativo do ar. Contudo, há perdas em todas as condições meteorológicas estudadas, mesmo nas consideradas mais favoráveis à pulverização. Assim, deve-se buscar horários do dia com condições meteorológicas mais adequadas, com valores baixos de DPV, para reduzir ao máximo as perdas durante o percurso das gotas da ponta até o alvo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIR MOVING AND CONDITIONING ASSOCIATION, INC – AMCA. **Laboratory Methods of Testing Fans for Rating – ANSI/AMCA Standard 210-99**. Arlington Heights, 2000. 69 p.
- ALVARENGA, C. B.; CUNHA, J. P. A. R. Aspectos qualitativos da avaliação de pulverizadores hidráulicos de barra na região de Uberlândia, Minas Gerais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 555-562, 2010.
- ALVARENGA, C. B.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; SIQUEIRA, D. L.; SASAKI, R. S.; RODRIGUES, D. E. Déficit de pressão de vapor d'água no ar na distribuição de líquido utilizando um pulverizador hidropneumático. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v. 56, n. 2, p. 81-87, abr/jun. 2013.
- ALVARENGA, C. B.; TEIXEIRA, M. M.; ZOLNIER, S.; CECON, P. R.; SIQUEIRA, D. L.; RODRIGUES, D. E.; SASAKI, R. S.; RINALDI, P. C. N. Efeito do déficit de pressão de vapor d'água no ar na pulverização hidropneumática em alvos artificiais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 182-193, jan/feb. 2014.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. **Spray nozzle classification by droplet spectra – ANSI/ASAE S572.1**. St. Joseph, 2009. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA VEGETAL – ANDEF. **Manual de Tecnologia de Aplicação de Produtos Fitossanitários**. 1ª edição, Campinas: Linea Creativa, 2004. 50 p.
- 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.
- BALAN, M. G.; ABI-SAAB, O. J. G.; SILVA, C. G.; RIO, A. Deposição da calda pulverizada por três pontas de pulverização sob diferentes condições meteorológicas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 2, p. 293-298, abr/jun. 2008.

- BASILE, M.; SENESI, N.; LAMBERTI, F. A study of some factors affecting volatilization losses of 1,3-Dichloropropene (1,3-D) from soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 17, p. 269-279, 1986.
- BAUER, F. C.; RAETANO, C. G.; Assistência de ar na deposição e perdas de produtos fitossanitários em pulverizações na cultura da soja. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 2, p. 271-276, abr/jun. 2000.
- BEDOS, C.; CELLIER, P.; CALVET, R.; BARRIUSO, E.; GABRIELLE, B. Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from soils and plants: overview. **Agronomie**, Thiverval-Grignon, v. 22, n. 1, p. 21-33, 2002.
- 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.
- 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.
- 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, A.; CASTRO, V. L. S. S.; CORRALES, F. M.; GALVÃO, J. A. H.; CABRAL, O. M. R.; NICOLELLA, G. Método para monitorar perdas na aplicação de agrotóxicos na cultura de tomate. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 5, p. 741-747, maio 1999.
- CHECHETTO, R. G.; ANTUNIASI, 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.
- 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.
- 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.
- 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.; 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.
- 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**, Fortaleza, v. 44, n. 3, p. 474-480, jul/set. 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.

- 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.
- GISH, T. J.; SADEGHI, A.; WIENHOLD, J. Volatilization of alachlor and atrazine as influenced by surface litter. **Chemosphere**, v. 31, n. 4, p. 2971-2982, 1995.
- 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.
- HOLTERMAN, H. J. **Kinetics and evaporation of water drops in air**. Wageningen: IMAG. 2003. 67 p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **Equipment for crop protection – Spraying equipment – Part 1: test methods for sprayer nozzles – ISO 5682-1**. Geneva, 1996. 5 p.
- JURY, W. A.; SPENCER, W. F.; FARMER, W. J. Behavior assessment model for trace organics in soil. I. Model description. **Journal of Environmental Quality**, v. 12, p. 558-564. 1983.
- KÖPPEN, W. **Climatología: Con un estudio de los climas de la Tierra**. México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478 p.
- 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.
- MACIEL, C. F. S. **Perda de agrotóxicos por evaporação em função das condições psicrométricas do ar**. 2013. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

- MACIEL, C. F. S.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C.; ZOLNIER, S.; CECON, P. R. Droplets spectrum at different vapour pressure deficits. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 1, p. 41-46, 2016.
- MADUREIRA, R. P.; RAETANO, C. G.; CAVALIERI, J. D. Interação pontas-adjuvantes na estimativa do risco potencial de deriva de pulverizações. **Agriambi**, Campina Grande, v. 19, n. 2, p. 180-185, 2015.
- MATEUS, N. B.; BARBIN, D.; CONAGIN, A. Viabilidade de uso do delineamento composto central. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 6, p. 1537-1546, 2001.
- MATTHEWS, G. A. **Pesticide application methods**. London: Blackwell Science, 3rd Edition. 2000. 448 p.
- MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI, N. **Engenharia de ventilação industrial**. São Paulo: Convênio Cetesb/Ascetesb, 1985. 442 p.
- NASCIMENTO, A. B.; OLIVEIRA, G. M.; BALAN, M. G.; HIGASHIBARA, L. R.; ABI-SAAB, O. J. G. Deposição de glifosato e utilização de adjuvante para diferentes pontas de pulverização e horário de aplicação. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 5, n. 2, p. 105-110, mai/ago. 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.
- NASH, R. G. Comparative volatilization and dissipation rates of several pesticides from soil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 31, p. 210-217, 1983.
- NUYTTENS, D.; SCHAMPHELEIRE, M.; STEURBAUT, W.; BAETENS, K.; VERBOVEN, P.; NICOLAÏ, B.; RAMON, H.; SONCK, B. Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers, Part1: Meteorological conditions. **Aspects of Applied Biology**, Warwick, v. 77, p. 1-8, 2006.

- 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.
- 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.
- RAETANO, C. G. Introdução ao estudo da tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários. In: ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. (Org.). **Tecnologia de aplicação para culturas anuais**. Passa Fundo: Aldeia Norte; Botucatu: FEPAF, 2011. cap. 1, p. 15-26.
- RÜDEL, H. Volatilisation of pesticides from soil and plant surfaces. **Chemosphere**, Philadelphia, v. 35, p. 143-152, 1997.
- SANDERS, P. F.; SEIBER, J. N. A chamber for measuring volatilization of pesticides from model soil and water disposal systems. **Chemosphere**, v. 12, n. 7/8, p. 999-1012, 1983.
- SASAKI, R. S. **Resfriamento adiabático do ar para reduzir perdas por evaporação em pulverização com assistência de ar na barra**. 2014. 102 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- 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.; TEIXEIRA, M. M.; ALVARENGA, C. B.; SANTIAGO, H.; MACIEL, C. F. S. Spectrum of droplets produced by use of adjuvants. **Idesia**, Arica, v. 31, n. 1, p. 27-33, jan/abr. 2013.
- 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

- under different environmental and operational conditions. **Agriambi**, Campina Grande, v. 20, n. 1, p. 92-96, 2016.
- SCHAMPHELEIRE, M.; NUYTENS, 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.
- SILVA, C. M. M. S.; FAY, E. F. **Agrotóxicos & Ambiente**. Brasília: Embrapa, 2004. 400p.
- 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.
- TAYLOR, A. W. Post application volatilization of pesticides under field conditions. **Journal of Air Pollution Control Association**, v. 28, 922-927, 1978.
- TETENS, V. O. Über einige meteorologisch. **Zeitschrift Geophysic**, Wurzburg, v. 6, p. 297-309, 1930.
- TOBI, I.; SAGLAM, R.; KUP, F.; SAHIN, H.; BOZDOGAN, A. M.; PISKIN, B.; SAGLAM, C. Determination of accuracy level of agricultural spraying application in Sanliurfa/Turkey. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 6, n. 28, p. 6064-6072, nov. 2011.
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Editora UFV, 2012. 460 p.
- 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 surfactants at different locations on waxy leaf surfaces. **Biosystems Engineering**, Philadelphia, v. 106, n. 1, p. 58-67, mar. 2010.

- YU, Y.; ZHU, H.; FRANTZ, J. M.; REDING, M. E.; CHAN, K. C.; OZKAN, H. E.
Evaporation and coverage area of pesticide droplets on hairy and waxy leaves.
Biosystems Engineering, Philadelphia, v. 104, n. 3, p. 324-334, set. 2009a.
- 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 ASABE, St. Joseph, v. 52, n. 1, p. 39-49, 2009b.