

ROBSON SHIGUEAKI SASAKI

**RESFRIAMENTO ADIABÁTICO DO AR PARA REDUZIR PERDAS POR
EVAPORAÇÃO EM PULVERIZAÇÃO COM ASSISTÊNCIA DE AR NA
BARRA**

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
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S252r
2014

Sasaki, Robson Shigueaki, 1986-

Resfriamento adiabático do ar para reduzir perdas por
evaporação em pulverização com assistência de ar na barra /
Robson Shigueaki Sasaki. – Viçosa, MG, 2014.

xiv, 87f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Mauri Martins Teixeira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.76-87.

1. Produtos químicos agrícolas - Aplicação. 2. Pulverização.
3. Resfriamento adiabático. 4. Máquinas Agrícolas.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.

II. Título.

CDD 22. ed. 632.95

ROBSON SHIGUEAKI SASAKI

**RESFRIAMENTO ADIABÁTICO DO AR PARA REDUZIR PERDAS POR
EVAPORAÇÃO EM PULVERIZAÇÃO COM ASSISTÊNCIA DE AR NA
BARRA**

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: 30 de maio de 2014.



Lino Roberto Ferreira



Rogério Faria Vieira



Haroldo Carlos Fernandes
(Coorientador)



Gilton José Rodrigues



Mauri Martins Teixeira
(Orientador)

“ Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si”

Ayrton Senna

AGRADECIMENTOS

Agradeço a deus, que me deu forças para buscar mais uma conquista.

A meus pais, Helio Sasaki e Amélia Sasaki, e aos meus irmãos Jeffer Sasaki e Thiago Sasaki, pelo apoio, incentivo e carinho e que foram imprescindíveis para contornar os obstáculos até a conquista.

Ao professor orientador Mauri Martins Teixeira, pela paciência, ajuda e compreensão.

Aos amigos do Laboratório de Tecnologia de Aplicação de Defensivos Agrícolas que sempre estiveram presentes na execução deste trabalho.

A todos os amigos da área de Mecanização Agrícola.

A querida Laurie Midori pelo apoio e paciência ao longo desta jornada.

Aos professores Haroldo Carlos Fernandes e Sérgio Zolnier, pelo apoio, incentivo e auxílio na execução deste trabalho.

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

Ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de cursar a Pós Graduação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fapemig pelo suporte financeiro deste trabalho.

BIOGRAFIA

Robson Shigueaki Sasaki, filho de Helio Sasaki e Amélia Sasaki, nasceu em São Gotardo –MG, no dia 8 de março de 1986. Ingressou no curso de Agronomia, pela Universidade Federal de Viçosa no ano de 2005, que concluiu em janeiro de 2010, e em março deste mesmo ano, iniciou o curso de pós graduação a nível de mestrado, no Departamento de Engenharia Agrícola, finalizando no final de 2011. Logo em seguida, no ano de 2012 iniciou o curso de pós-graduação em nível de doutorado, finalizando no ano de 2014.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE QUADROS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
1) INTRODUÇÃO GERAL	1
2) REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Perdas por evaporação durante a aplicação de agrotóxicos	3
2.2. Sistemas de resfriamentos adiabáticos empregados no setor agrícola	4
2.3. Espectro de gotas	8
2.4. Fatores que afetam o tamanho das gotas durante a pulverização	9
2.5. Assistência de ar na barra	10
3) MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1. Avaliação do desempenho do ventilador	13
3.2. Caracterização da ponta hidráulica JSF 11002	16
3.3. Efeito das condições psicrométricas do ar no espectro de gotas durante a aplicação de agrotóxicos	17
3.4. Estimativas de perdas por evaporação em pulverizadores com assistência de ar na barra	19
3.5. Desenvolvimento de um sistema de resfriamento adiabático para pulverizador com assistência de ar	21
3.5.1. Nebulizadores sob baixa pressão com ajuste da quantidade de água aplicada pela alteração da pressão de trabalho	22
3.5.2. Resfriamento adiabático com nebulizadores sob baixa pressão e alteração do volume de água através um sistema intermitente automatizado	26
3.5.3. Resfriamento adiabático com o uso de placas de celulose	27
3.5.4. Resfriamento adiabático com o uso de nebulizadores de alta pressão e alteração do volume por meio do número de nebulizadores	29
3.6. Efeito do uso do sistema de resfriamento adiabático nos parâmetros técnicos da pulverização	30
4) RESULTADOS E DISCUSSÕES	33

4.1. Curva característica do ventilador	33
4.2. Caracterização da ponta hidráulica JSF 11002.....	34
4.3. Efeito das condições psicrométricas do ar no espectro de gotas durante a aplicação de agrotóxicos	39
4.4. Estimativas de perdas por evaporação em pulverizadores com assistência de ar na barra	46
4.5. Desenvolvimento de um sistema de resfriamento adiabático para pulverizadores com assistência de ar.....	48
4.5.1. Nebulizadores de baixa pressão com ajuste da quantidade de água aplicada pela pressão de trabalho.....	48
4.5.2. Resfriamento adiabático com nebulizadores sob baixa pressão e alteração do volume de líquido através um sistema intermitente automatizado	53
4.5.3 Resfriamento adiabático com o uso de placas de celulose	57
4.5.4. Resfriamento adiabático com o uso de nebulizadores de alta pressão e alteração do volume por meio do número de nebulizadores	61
4.6. Efeito do sistema de resfriamento adiabático nos parâmetros técnicos da pulverização.....	65
5) CONCLUSÕES	75
6) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de resfriamento adiabático do ar	5
Figura 2. Sistemas de resfriamento evaporativo indireto	6
Figura 3. Protótipo utilizado nos ensaios.	12
Figura 4. Duto de ar para testes em ventiladores	13
Figura 5. Análise do espectro de gotas.....	17
Figura 6. Protótipo utilizado para avaliação de sistemas de resfriamento adiabáticos para pulverizadores.	22
Figura 7. Sistema eletrônico para controle da injeção intermitente de água.....	26
Figura 8. Frequência operacional da válvula solenoide estabelecida pelo microcontrolador Arduino.....	27
Figura 9. Sistema de resfriamento adiabático evaporativo por placas de celulose. ...	28
Figura 10. Leituras do espectro de gotas no analisador a laser	31
Figura 11. Curva característica do ventilador.	33
Figura 12. Calibração do manômetro.....	35
Figura 13. Características do espectro de gotas proporcionado por pontas JSF 11002 em diferentes pressões de trabalho. (A) $DV_{0,1}$; (B) $DV_{0,5}$; (C) $DV_{0,9}$ e (D) Índice Span.....	36
Figura 14. Porcentagem do volume que compõe o espectro da ponta JSF 11002	38
Figura 15. Efeito da pressão de trabalho e do DPV sobre os parâmetros	40
Figura 16. Estimativa do índice Span proporcionada pela ponta JSF 11002 sob diferentes pressões de trabalho e DPV.....	41
Figura 17. Efeito da pressão de trabalho e do DPV na porcentagem do volume de gotas com diâmetro menor que 100 μm proporcionado pela ponta hidráulica JSF 11002.....	42
Figura 18. Estimativa da porcentagem do volume de líquido que compõe o espectro de gotas proporcionado pela ponta JSF 11002.....	45
Figura 19. Potencial de perdas por evaporação na aplicação de agrotóxicos com assistência de ar na barra para uma vazão de ar de 30,15 $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$	46
Figura 20. Espectro de gotas proporcionado pelo nebulizador CoolNet Pro™ em diferentes condições operacionais.....	49

Figura 21. Porcentagem do volume que compõe classes do espectro de gotas proporcionados pelo nebulizador CoolNet Pro™ em diferentes condições operacionais.....	50
Figura 22. Eficiência do resfriamento evaporativo com placas porosas, sendo posicionadas à barlavento (A) e sota-vento (B) do ventilador.....	59
Figura 23. Análise conjunta do potencial de redução do DPV dos diferentes sistemas de resfriamentos adiabáticos testados.	64
Figura 24. Estimativa do tamanho de gotas proporcionado pela ponta JSF 11002 sem o uso do sistema de resfriamento adiabático.....	66
Figura 25. Estimativa das porcentagens dos volumes das gotas que compõe o espectro proporcionado pela ponta JSF 11002, em diferentes condições de pressão e DPV.....	68
Figura 26. Estimativa dos diâmetros das gotas proporcionada pela ponta JSF 11002 com o uso do sistema de resfriamento adiabático.....	70
Figura 27. Estimativa da porcentagem do volume menor que 100 µm proporcionado pela ponta JSF 11002 com o uso do sistema de resfriamento adiabático.....	71
Figura 28. Condições psicrométricas do ar com e sem o uso do sistema de resfriamento adiabático.....	72
Figura 29. Estimativa da porcentagem do volume que compõe o espectro da ponta JSF 11002 com o uso do sistema de resfriamento adiabático.....	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Condições psicrométricas do ar	19
Quadro 2. Média da vazão de líquido proporcionado por pontas JSF 11002 em quatro pressões de trabalho	35
Quadro 3. Médias da temperatura e umidade relativa do ar durante os ensaios com o sistema de resfriamento adiabático com nebulizadores de baixa pressão.....	39
Quadro 4. Vazão de líquido dos nebulizadores CoolNet ProTM em diferentes condições operacionais.....	48
Quadro 5. Quantidade média de líquido requerido para o umedecimento do ar (80%) em diferentes condições psicrométricas.....	51
Quadro 6. Condições operacionais e quantidade de água aplicada no sistema de resfriamento adiabático sob baixa pressão.....	51
Quadro 7. Valores médios das condições psicrométricas do ar antes e após o resfriamento com nebulizadores operando sob baixa pressão	52
Quadro 8. Médias da vazão de líquido pulverizado com uso do sistema intermitente	54
Quadro 9. Valores médios das condições psicrométricas do ar e da quantidade de líquido aplicado com o uso do sistema intermitente	55
Quadro 10. Média das condições psicrométricas do ar antes e após o sistema de resfriamento adiabático intermitente.....	56
Quadro 11. Valores médios das condições psicrométricas do ar, com o uso do sistema de resfriamento adiabático empregando-se placas porosas, posicionadas a barlavento do sistema de ventilação.....	58
Quadro 12. Valores médios das condições psicrométricas do ar com o uso do sistema de resfriamento adiabático com placas porosas posicionadas a sota-vento do sistema de ventilação.....	58
Quadro 13. Valores médios da vazão de líquido proporcionados pelos nebulizadores operados sob alta pressão	61
Quadro 14. Espectro de gotas proporcionado pelo nebulizador sob alta pressão	61
Quadro 15. Valores médios das condições psicrométricas do ar antes do resfriamento e quantidade de água necessária e aplicada para o resfriamento à alta pressão.....	62
Quadro 16. Condições psicrométricas do ar após o resfriamento adiabático com nebulizadores de alta pressão	62

Quadro 17. Valores médios das condições psicrométricas do ar, sem o uso do sistema de resfriamento adiabático durante as avaliações do espectro de gotas.....	65
Quadro 18. Valores médios das condições psicrométricas do ar com o uso do sistema de resfriamento adiabático durante as avaliações do espectro de gotas.....	65

RESUMO

SASAKI, Robson Shigueaki, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2014. **Resfriamento adiabático do ar para reduzir perdas por evaporação em pulverização com assistência de ar na barra.** Orientador: Mauri Martins Teixeira. Coorientadores: Haroldo Carlos Fernandes e Sérgio Zolnier.

A aplicação de agrotóxicos quando realizadas em elevada temperatura e baixa umidade relativa pode acarretar a evaporação da gota. Conseqüentemente há perdas de produto para o meio ambiente causando poluição ambiental. Empregando-se pulverizadores hidráulicos com assistência de ar na barra, as perdas podem ser agravadas, uma vez que o fluxo de ar ao se deparar com as gotas pulverizadas promove a transferência de calor e de massa da gota para o ar. Objetivou-se com este trabalho, avaliar o efeito das condições psicrométricas do ar nos parâmetros técnicos da pulverização, desenvolver e avaliar diferentes sistemas de resfriamentos adiabáticos com potencial uso na aplicação de agrotóxicos para reduzir as perdas por evaporação, bem como avaliar o efeito do uso do sistema de resfriamento adiabático nos parâmetros técnicos da pulverização. Todo o ensaio foi realizado a partir do desenvolvimento de um protótipo, dotado de ventilador axial, de homogeneizador de fluxo, de sensores conjugados de temperatura e de umidade relativa, de ponta hidráulica, e de sistema de aquecimento do ar a gás. Com o sistema montado, e com o auxílio de um analisador a laser (modelo Spraytec, Malvern Instruments Co., Worcestershire, UK) avaliou-se a ponta hidráulica JSF 11002 quanto aos parâmetros ($DV_{0,1}$, $DV_{0,5}$, $DV_{0,9}$, Span, %V<100, 100<%V<200, 200<%V<300, 300<%V<400, 400<%V<500 e 500<%V<600 μm , em quatro condições psicrométricas do ar (7, 14, 21 e 28 hPa). Posteriormente, prosseguiram-se as avaliações do melhor método de resfriamento adiabático a ser empregado na aplicação de agrotóxicos. Avaliaram-se quatro sistemas de resfriamento evaporativo: 1) nebulizadores de baixa pressão; 2) sistema de nebulização intermitente dotado de pontas de baixa pressão; 3) placas de celulose e 4) nebulizadores de alta pressão. De posse do melhor sistema de resfriamento adiabático, avaliou-se o efeito do uso desse sistema quanto aos parâmetros técnicos da pulverização em quatro condições psicrométricas do ar (9, 17, 25 e 32 hPa). As diferentes condições psicrométricas do ar acarretaram perdas por evaporação durante as pulverizações. Utilizando-se a ponta JSF 11002 para uma dada pressão de trabalho a cada incremento de 1 hPa no DPV houve redução do

diâmetro das gotas na ordem de 0,0759; 0,518 e 1,514 μm para os parâmetros de $DV_{0,1}$; DMV e $DV_{0,9}$, respectivamente. Com o aumento do DPV durante as pulverizações, ocorre um deslocamento das classes de tamanho de gotas que compõe o espectro. Aumentando-se o potencial evaporativo do ar, elevam-se o volume de gotas pertencente às classes: $\% V < 100$; $100 < \%V < 200$ e $200 < \%V < 300 \mu\text{m}$, e concomitantemente, reduz o volume das classes de $300 < \%V < 400$; $400 < \%V < 500$ e $500 < \%V < 600 \mu\text{m}$ que compõem o espectro. O potencial evaporativo do ar chegou a 39% do volume total pulverizado. O melhor sistema de resfriamento adiabático com potencial uso na aplicação de agrotóxico, foram os nebulizadores de alta pressão. Estes, além de proporcionar redução do DPV de até 19,7 hPa, não apresentou problemas quanto ao escorrimento de líquidos e queda na velocidade do ar. O sistema de resfriamento adiabático, durante as pulverizações, reduziu as perdas por evaporação.

ABSTRACT

SASAKI, Robson Shigueaki, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2014. **Air adiabatic cooling to reduce spray evaporation losses in spraying with air assisted boom.** Adviser: Mauri Martins Teixeira. Co-advisers: Haroldo Carlos Fernandes and Sérgio Zolnier.

Pesticides application in high temperature and low relative humidity may cause droplet evaporation. Consequently there are product losses to environment, which may cause environmental pollution. Using hydraulic sprayers with air assisted spraying boom the losses may be aggravated, once air flux when faces the sprayed droplets promotes heat and mass transfer from droplet to air. This work aimed to evaluate the effect of air psychrometric conditions on the spraying technical parameters; to develop and to evaluate different adiabatic cooling systems with potential use in pesticides application to reduce evaporation loss; and to evaluate the effect of using the adiabatic cooling system on the spraying technical parameters. The entire essay was done from the development of a prototype, which was equipped with an axial fan, a flux homogenizer, temperature and relative humidity probes, hydraulic spray nozzle and gas heating system to warm up the air flux. With the assembled system and the aid of a laser analyzer (model Spraytec, Malvern Instruments Co., Worcestershire, UK) the hydraulic nozzle JSF 11002 was evaluated in relation to the parameters $DV_{0.1}$, $DV_{0.5}$, $DV_{0.9}$, Span, $\%V < 100$, $100 < \%V < 200$, $200 < \%V < 300$, $300 < \%V < 400$, $400 < \%V < 500$ and $500 < \%V < 600$ μm , in four air psychrometric conditions (7, 14, 21 and 28 hPa). Afterwards, evaluations for the best adiabatic cooling method to be used for pesticides application were followed. Four evaporative cooling systems were evaluated: 1) low pressure nebulizers; 2) intermittent nebulizing system equipped with low pressure nozzles; 3) cellulose plates and 4) high pressure nebulizers. Having the best adiabatic cooling system, it was evaluated the effect of using this system in relation to spraying technical parameters in four air psychrometric conditions (9, 17, 25 and 32 hPa). The different psychrometric conditions caused evaporation losses during the sprayings. Using the spray nozzle JSF 11002 for a certain working pressure at each increase of 1 hPa in VPD there was a reduction of the droplet diameter at the order of 0.0759; 0.518 and 1.514 μm for $DV_{0.1}$; DMV e $DV_{0.9}$ parameters, respectively. With the increase of VPD during the sprayings occurred a displacement in droplets size class

which compounds the spectrum. The increasing of air evaporative potential, increases the volume of droplets belonging to the classes of $\%V < 100$; $100 < \%V < 200$ and $200 < \%V < 300$ μm , and simultaneously reduces the volume of the classes of $300 < \%V < 400$; $400 < \%V < 500$ and $500 < \%V < 600$ μm which compound the spectrum. The air evaporative potential has reached 39% of the total sprayed volume. The best adiabatic cooling system with potential to be used in pesticide application was the high pressure nebulizers. This system proportioned reduction of VPD up to 19.7 hPa and did not present problems in relation to liquid runoff and air speed fall. Adiabatic cooling system during the sprayings reduced evaporation losses.

1) INTRODUÇÃO GERAL

A demanda mundial por alimentos tem crescido de forma exponencial, e concomitantemente surge o desafio na área agrícola de aumentar a produção de maneira sustentável. Logo, os agrotóxicos são primordiais para o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, auxiliando a produção no campo. No entanto os agrotóxicos devem ser empregados com a técnica adequada visando os mínimos impactos ambientais possíveis.

A correta identificação do problema, a seleção do produto e da máquina, a regulagem e calibração dos equipamentos, bem como as condições meteorológicas no momento da aplicação são fatores primordiais e que definem a qualidade de uma aplicação.

Com relação às condições meteorológicas deve-se atentar principalmente ao déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV) e a velocidade do vento no momento da pulverização. O DPV define o potencial risco de perdas por evaporação das gotas. Quanto maior o valor de DPV maiores são as chances de perdas de líquido para o meio ambiente. A velocidade do vento influencia a magnitude de deriva das gotas.

Recomenda-se, sempre que possível, realizar as pulverizações nas primeiras horas da manhã ou ao entardecer, período em que há baixo DPV, e as perdas por evaporação são amenizadas. Entretanto, em campo, devido à pressão dos patógenos e/ou pragas nem sempre consegue-se realizar ou esperar a condição meteorológica ótima para uma pulverização. Por isso, algumas tecnologias têm sido desenvolvidas para minimizarem as perdas de produto para o meio ambiente.

Dentre essas tecnologias destacam-se o uso da eletrônica embarcada como o controle automático do espectro de gotas de acordo com as condições psicrométricas do ar, barras de luzes, controle automático das secções da barra, aplicação à taxa variável e assistência de ar na barra.

A assistência de ar junto à barra de pulverização tem por finalidade produzir um jato de ar com alta velocidade, com o auxílio de um ventilador axial, direcionando as gotas para o alvo. A vantagem desse sistema é a redução das perdas por deriva. Entretanto, observa-se que pesquisas envolvendo essa tecnologia têm apresentado controvérsias, quanto aos resultados. Há relatos de pesquisas em que a

corrente de ar auxiliou na deposição de líquido sobre o alvo (GUPTA et al., 2012; CHRISTOVAM et al., 2010). Entretanto, Foqué e Nuyttens (2011) constataram que dependendo da configuração do pulverizador com a assistência de ar na barra, houve a tendência de aumentar a deriva na pulverização.

A possível causa de divergência de resultados é devido ao fato de que a assistência de ar aliada às condições meteorológicas extremas, ou seja, alta temperatura e baixa umidade relativa favorecem a evaporação das gotas, uma vez que o fluxo de ar ao se deparar com as gotas pulverizadas promove a transferência de calor e massa da gota para o ar.

Para contornar as dificuldades encontradas com o uso de assistência de ar em pulverizadores hidráulicos de barras, pode-se empregar um sistema para modificar as condições psicrométricas do ar, anteriormente, ao contato das gotas pulverizadas, visando reduzir as perdas por evaporação e aumentar a eficiência da pulverização.

Uma alternativa para modificar as condições psicrométricas do fluxo de ar é o uso de sistemas de resfriamento adiabático evaporativo do ar.

O resfriamento evaporativo é um processo de transferência de calor e massa baseado na alteração do conteúdo de calor sensível em calor latente. O ar não saturado reduz a sua temperatura e fornece o calor sensível que se transforma em calor latente para a evaporação da água. A transformação de calor sensível em calor latente resulta em decréscimo de temperatura do bulbo seco com acréscimo da umidade relativa.

Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar quanto aos parâmetros técnicos da pulverização em pulverizadores com assistência de ar na barra, estimar as possíveis perdas de líquido por evaporação durante a aplicação de agrotóxicos, desenvolver e avaliar sistemas de resfriamento adiabático a ser empregado em pulverizadores hidráulicos com assistência de ar na barra e avaliar o efeito do uso do sistema de resfriamento adiabático nos parâmetros técnicos da pulverização.

2) REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Perdas por evaporação durante a aplicação de agrotóxicos

Diversas pesquisas têm relatado o efeito das condições psicrométricas do ar sobre as pulverizações. Balan et al. (2008) avaliaram a variação da deposição da calda de pulverização em várias condições de temperatura e umidade relativa do ar (horário do dia). Esses autores utilizaram três modelos de pontas hidráulicas: JA-1 (gotas muito finas a finas); ADI -03 (gotas médias a grossas); BJ-03 (gotas grossas a muito grossas). Os autores verificaram redução significativa na deposição de líquido à medida que a temperatura aumentou e a umidade relativa diminuiu, com a ponta JA-1.

De acordo com Balan et al. (2008), em condição meteorológica extrema, houve redução de 100% na quantidade de líquido depositado no alvo. Ao utilizarem as pontas ADI - 03 e BJ – 03, constataram que não houve alteração significativa de deposição de líquido com a variação da temperatura e umidade relativa do ar. Nascimento et al. (2012) avaliaram o efeito da temperatura e umidade relativa do ar na deposição de herbicida e também constataram redução da deposição de líquido quando se empregou gotas finas. Donkersley e Nuyttens (2011) relataram que a temperatura e umidade relativa do ar afetam a taxa de evaporação das gotas.

Ao avaliar um pulverizador hidropneumático, Alvarenga et al. (2013b) estudaram a influência do déficit de pressão de vapor d'água no ar nos parâmetros da pulverização produzida pela ponta de jato cônico vazio JA-2 (1.055 kPa), na cultura da laranja e constataram que, em condições ideais, ou seja, baixo DPV (<10 hPa), em média a deposição foi de 2,6 $\mu\text{L cm}^{-2}$; reduzido para 1,2 e 1,0 $\mu\text{L cm}^{-2}$, quando se aumentou o valor de DPV para 14,5 e 21 hPa respectivamente.

Yu et al. (2009) avaliaram o tempo de evaporação das gotas em diferentes superfícies, caldas de pulverização e condições psicrométricas do ar utilizando-se de uma câmara com ambiente controlado. Observaram que quando a umidade relativa aumentou de 30 para 90%, o tempo de evaporação de uma gota de 343 μm contendo água mais inseticida em superfície hidrofílica aumentou em aproximadamente 153%

(45 para 114 s), 137% (68 para 161 s) em superfície hidrofóbica e 95% (44 para 86 s) em folhas de maçã, respectivamente.

Semelhantemente ao trabalho de Yu et al. (2009), Xu et al. (2010) constataram redução no tempo de evaporação de gotas conforme reduziu o seu diâmetro. Para uma determinada superfície, gotas com diâmetro de 600 μm o tempo foi de 25,3 s, já para gotas de 300 μm reduziu para 2,6 s.

Yu et al. (2009b), estudaram as taxas de evaporação de gotas, encontraram que a evaporação após a deposição das gotas em superfícies foliares cerosa e pilosa é fortemente influenciada pela adição de aditivos à pulverização, pelo tamanho de gotas e pela umidade relativa.

Gil et al. (2008) em um estudo do efeito das condições meteorológicas do ar quanto ao potencial risco de perdas de agrotóxicos para o meio ambiente, constataram que dependendo das condições de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, as perdas foram de até 14,4% trabalhando-se com gotas extremamente finas.

Em um estudo, do potencial risco de deriva de agrotóxicos, Cunha (2008), constatou que a deriva é fortemente influenciada pela velocidade do vento e espectro de gotas, e, dependendo das condições em que é realizada a pulverização, 10% do volume total aplicado são perdidos por evaporação das gotas.

2.2. Sistemas de resfriamentos adiabáticos empregados no setor agrícola

O arrefecimento evaporativo é, essencialmente, um processo de saturação adiabática, isto é, entalpia constante. O ar não saturado reduz a sua temperatura, fornecendo o calor sensível que transforma em calor latente para a evaporação da água (GÓMEZ et al., 2010).

Para realizar o resfriamento adiabático do ar utilizam-se sistemas de resfriamento evaporativo direto, ou seja, o ar é resfriado por contato direto com uma superfície líquida ou com uma superfície sólida molhada (Figura 1), ou ainda através de *sprays*.

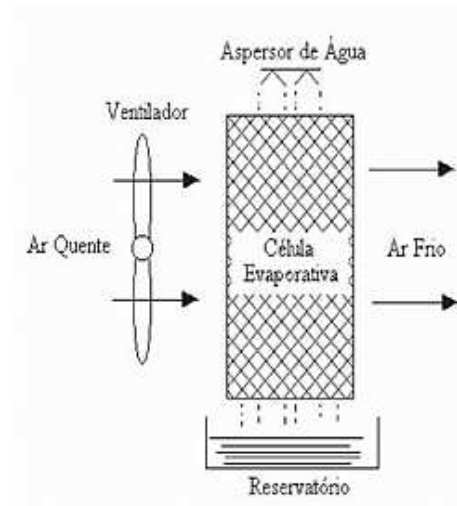
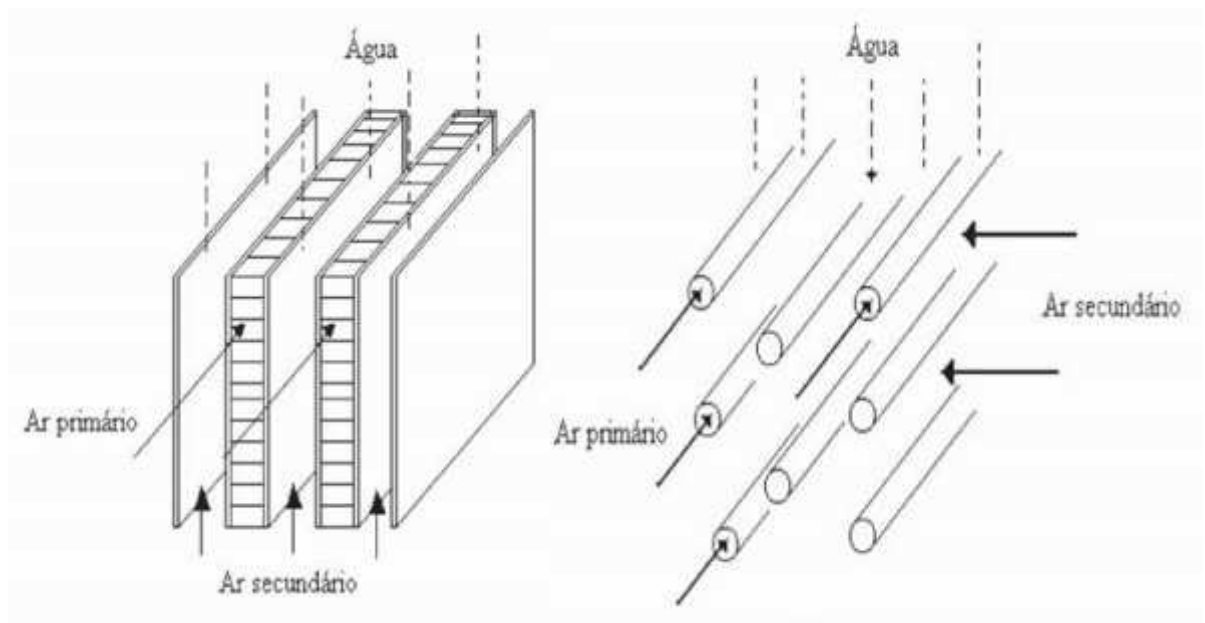


Figura 1. Sistema de resfriamento adiabático do ar (Fonte: Camargo, 2004).

Os sistemas de resfriamento evaporativos diretos são classificados em “misting” (nebulização de baixa a média pressão), “fogging” (nebulização a alta pressão), “sprinkling” (aspersão). A diferença entre os sistemas “misting” e “fogging” é basicamente o tamanho das gotas (PERISSINOTTO et al., 2007). Existe ainda, os sistemas do tipo placa-exaustora (*pad-fan*), o qual baseia-se em um processo de umidificação adiabática que consiste em forçar, por meio de exaustores, a passagem do ar externo a um painel de material poroso umedecido com água (STEIDLE NETO; ZOLNIER, 2010).

Existem outros métodos de resfriamento evaporativo do ar como o indireto, mas trata-se de um processo não adiabático. O ar a ser resfriado (ar primário) transfere o calor para uma corrente de ar secundária ou para um líquido, que foram resfriados evaporativamente. Diferentemente do método direto, a entalpia do ar do lado seco, é reduzida. Os métodos indiretos mais usuais são do tipo placa ou tubo (Figura 2).



(A)

(B)

Figura 2. Sistemas de resfriamento evaporativo indireto. (A) Placas; (B) Tubos. (Fonte: Camargo, 2004)

Há casos em que o método de resfriamento evaporativo adiabático é insuficiente para que se consiga a condição climática ideal. Por isso, empregam-se o resfriamento em dois ou três estágios, que combinam os métodos de resfriamento direto e indireto.

O resfriamento adiabático é um conceito muito empregado em resfriamentos de aviários, casa de vegetação e galpões agrícolas. Em locais com elevadas temperaturas e climas secos, o processo de resfriamento evaporativo é a técnica mais efetiva e econômica para condicionamento do ar (ALODAN; AL-FARAJ, 2005).

Em casa de vegetação, Shamshiri e Ismail (2012) avaliaram o desempenho de sistemas de ventilação e ventilação associado ao resfriamento com placas porosas na produção de tomate nas planícies da Malásia. Os autores constataram que o sistema de resfriamento evaporativo adiabático pode reduzir a temperatura do ar de 25 para 20 °C elevando a umidade do ambiente para até 100%.

Outro trabalho realizado em casa de vegetação por Steidle Neto e Zolnier (2010), o qual analisaram um sistema de resfriamento adiabático evaporativo do tipo painel – exaustor (*pad-fan*), obtiveram redução da temperatura do ar de até 11,4 °C, e eficiência de resfriamento de até 81%.

Na criação de aves, Dagtekin et al. (2009) avaliaram o sistema de resfriamento evaporativo por meio de placas porosas. O galpão foi dotado de placas de celulose CELdek® com 100 mm de espessura, e tamanho de 2,6 x 1,9 m. Os autores constataram eficiência de resfriamento entre 69 e 72%, e redução da temperatura entre 4,4 e 7,3 °C. Os autores relatam ainda, que o sistema foi ineficiente em condições de elevada umidade relativa do ar.

Lertsatitthanakorn et al. (2006) investigaram a viabilidade de se utilizar um sistema de resfriamento evaporativo adiabático em um galpão de bicho da seda. Utilizaram o método de resfriamento adiabático direto do ar por meio de placas porosas. Constataram que, enquanto as condições psicrométricas do ar externo permaneceram com temperatura de 32 °C e umidade relativa de 33%, no interior do galpão, com o sistema ligado, tais condições foram modificadas para 22 °C e 82%, respectivamente.

Na aplicação de agrotóxicos Gurgacz (2013) testou o desempenho de uma barra auxiliar de aplicação de água, sobreposta à barra de pulverização da calda, para reduzir as perdas de defensivos durante as aplicações. O autor verificou que com o aumento da quantidade de água na barra auxiliar houve a tendência de aumentar a deposição de líquido no alvo, demonstrando o efeito de redução da evaporação durante a pulverização. A barra auxiliar promoveu também, maior uniformidade de distribuição de líquido no alvo.

Ainda na aplicação de agrotóxicos, Stanislavski (2012) desenvolveu um sistema de umidificação do fluxo de ar em um pulverizador com assistência de ar na barra. O autor relata que o sistema desenvolvido foi capaz de reduzir em média 2,52 °C a temperatura do ar e aumentar a umidade relativa em 6,6% quando o sistema de umidificação permaneceu ligado. Entretanto, o autor afirma que a umidificação do fluxo de ar causou molhamento do duto e escorrimento de água no centro da barra de pulverização, o que pode ser um complicador para o uso do sistema na aplicação de agrotóxicos.

2.3. Espectro de gotas

A classificação da população de gotas em classes de tamanhos é denominada de espectro de gotas. Na aplicação de agrotóxicos, independentemente do sistema empregado para realizar a fragmentação do líquido, as gotas formadas não são homogêneas, ou seja, não apresentam o mesmo diâmetro. Para caracterizá-las, devem-se utilizar parâmetros técnicos como $DV_{0,1}$; $DV_{0,5}$; $DV_{0,9}$ e Amplitude relativa (Span).

O $DV_{0,1}$ representa o diâmetro de gota em que 10% do volume do líquido pulverizado é constituído de gotas menores que esse valor. O $DV_{0,9}$, representa o tamanho de gotas no qual 90% do volume do líquido pulverizado é constituído de gotas menores que esse valor. Em pulverização, os parâmetros $DV_{0,1}$ e $DV_{0,9}$ devem ser analisados em conjunto para permitir a estimativa da amplitude relativa ou índice Span, o qual determina a homogeneidade do espectro.

O $DV_{0,5}$ é conhecido como diâmetro da mediana volumétrica (DMV). Corresponde ao diâmetro da gota que divide uma população de gotas em duas partes de volumes iguais. Este é o principal parâmetro técnico utilizado para caracterizar o tamanho das gotas em uma pulverização.

Baseado no DMV, a norma ASAE S-572 (1999) classifica a população de gotas em classes de tamanho. Quando o DMV for abaixo de 100 μm é classificado em gotas muito fina (MF), entre 100 e 175 μm gotas finas (F), entre 175 e 250 μm gotas médias (M), entre 250 e 375 μm gotas grossa (G), entre 375 e 450 μm gotas muito grossas (MG) e finalmente quando o DMV apresentar valor maior que 450 μm o espectro é classificado em extremamente grossa (EG).

Pode-se dizer que na aplicação de agrotóxico, o tamanho das gotas é um dos principais parâmetros que determinam a eficiência da aplicação e, conseqüentemente, a eficácia de controle. Opiniões semelhantes foram expressadas por Yu et al. (2009).

Gotas pequenas tendem a aumentar a cobertura do alvo, conforme constatado por Wolf et al. (2009) e Lenz et al. (2011). No entanto, a fração de gotas com diâmetros abaixo de 100 μm pode favorecer a deriva (ARVIDSSON et al., 2011) e se evaporarem em condições de alta temperatura e baixa umidade relativa do ar. Quando as gotas são grandes há a preocupação de perdas por escorrimento do líquido sobre a folha, reduzindo-se assim a eficácia de controle da praga (LEŠNIK et al.,

2005). De uma forma geral, recomenda-se que as gotas pulverizadas sejam suficientemente grandes para não se perderem por evaporação, e pequenas o suficiente para fornecerem uma boa cobertura do alvo (REICHARD et al., 1977; NASCIMENTO et al., 2012).

Além dos parâmetros citados, existem outros parâmetros que podem caracterizar o espectro, destacando-se o uso da porcentagem do volume de líquido pulverizado compostas por gotas com diâmetro abaixo de 100 μm ($\%V < 100 \mu\text{m}$), por gotas com diâmetro entre 100 e 200 μm ($100 < \%V < 200 \mu\text{m}$), por gotas com diâmetro entre 200 e 300 μm ($200 < \%V < 300 \mu\text{m}$), por gotas com diâmetro entre 300 e 400 μm ($300 < \%V < 400 \mu\text{m}$), por gotas com diâmetro entre 400 e 500 μm ($400 < \%V < 500 \mu\text{m}$), por gotas com diâmetro entre 500 e 600 μm ($500 < \%V < 600 \mu\text{m}$) e por gotas com diâmetro maior que 600 μm ($\%V > 600 \mu\text{m}$). A porcentagem do volume de gotas com diâmetro menor que 100 μm , geralmente, predizem o risco de deriva (BUENO et al., 2013b). Entretanto, outras classes de porcentagem do volume de gotas são poucos usuais para caracterizar o espectro. É importante frisar que existem condições operacionais onde a ponta pode apresentar o mesmo DMV, com percentuais de classes de gotas com volumes diferenciados.

2.4. Fatores que afetam o tamanho das gotas durante a pulverização

As características operacionais dos equipamentos que alteram o tamanho das gotas são bem conhecidas, destacando-se a pressão de trabalho em equipamentos hidráulicos e a vazão de ar ou líquido em pulverizadores pneumáticos.

Diversas pesquisas demonstram que na pulverização de agrotóxicos por meio de equipamentos hidráulicos, com o aumento da pressão de trabalho ocorre redução no diâmetro das gotas pulverizadas (BUENO et al., 2013a; GABRIEL; BAIO, 2013; ALVARENGA et al., 2012; VIANA et al., 2010).

Na pulverização pneumática, Manhani et al. (2013) verificaram que a redução da vazão de ar na entrada do ventilador, aumentou-se o diâmetro das gotas pulverizadas.

Outros fatores, porém pouco estudados, podem alterar o tamanho das gotas pulverizadas. As gotas durante o seu trajeto podem sofrer fortes influências das condições psicrométricas do ar alterando o seu diâmetro. Maciel (2013) trabalhou em ambiente controlado visando averiguar o efeito déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar no diâmetro das gotas pulverizadas. Constatou que em condições com elevado DPV aumentou o DMV, e as perdas por evaporação chegaram a 27%.

Todavia, Ranz e Marshall (1952) propuseram um modelo matemático para estimar o decréscimo das gotas em função do tempo (Equação 1).

$$\frac{dd_{\mu}}{dt} = - \left(0,358 \frac{\Delta p}{d_{\mu}} \right) [2 + 0.124 (v_s d_{\mu})^{\frac{1}{2}}] \quad (1)$$

em que

d_{μ} = diâmetro da gota (μ);

Δp = déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (Pa); e

v_s = velocidade de sedimentação da gota ($m s^{-1}$).

Observa-se, pelo modelo de Ranz e Marshall (1952), que taxa de redução do diâmetro da gota ao longo do tempo é função do DPV e do seu diâmetro. Quanto maior o DPV e menor o diâmetro da gota maior é a taxa de redução do seu diâmetro.

2.5. Assistência de ar na barra

Em pesquisas que envolvem o sistema de injeção de ar na barra em pulverizadores hidráulicos, tem-se observado resultados divergentes. Gupta et al. (2012) por meio de alvos artificiais, avaliaram o efeito do fluxo de ar quanto a capacidade de penetração das gotas sob o alvo em condições ambientais controladas. Constataram que a assistência de ar pode ser benéfica, e ocorre maior penetração da gota no interior das folhagens das plantas. Bauer et al. (2008) avaliaram diferentes pontas hidráulicas (AXI 11002 e JA-2) quanto a deposição de calda na cultura da soja, com e sem assistência de ar junto a barra. Observaram que o sistema de

assistência de ar aumentou a deposição na parte inferior da planta. Resultados semelhantes foram obtidos por Baesso et al. (2011), na cultura do feijão.

Christovam et al. (2010) analisaram diferentes técnicas de pulverização da soja. Verificaram que, ao se utilizar a assistência de ar na barra de pulverização, esta contribuiu para aumentar a deposição de líquido. Obtiveram maior deposição na parte superior da planta. Piché et al. (2000) avaliaram o potencial de deriva de um pulverizador hidráulico de barra, com e sem assistência de ar. Verificaram que a deriva reduz drasticamente ao se utilizar a assistência de ar, quando comparado ao sistema convencional. Ade e Rondelli (2007) compararam três sistemas de pulverização (convencional, com assistência de ar na parte superior e inferior da planta), quanto à deposição de líquido, na cultura da batata. Ao final, verificaram que a assistência de ar aumentou em média 12% na deposição de líquido comparado ao sistema convencional.

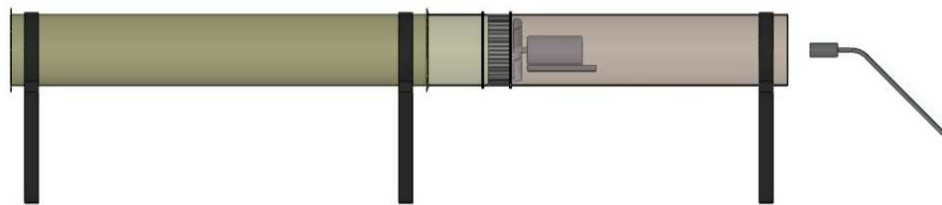
Raetano e Bauer (2004) avaliaram diferentes técnicas de pulverização no feijoeiro e observaram que a assistência de ar em um pulverizador hidráulico de barra não proporcionou aumento de deposição de líquido, tanto na parte superior, como na parte inferior da planta. Foqué e Nuyttens (2011) analisaram o efeito da assistência de ar e ângulo de pulverização em plantas ornamentais, e constataram que dependendo da configuração do pulverizador, houve tendência de aumentar a deriva na pulverização.

Baesso et al. (2010) avaliaram o efeito da assistência de ar na uniformidade de distribuição de líquido. Utilizaram duas pontas hidráulicas (JA-4 e AXI 11004). Observaram que, para a ponta JA-4, quanto menor a velocidade do ar menor foi o coeficiente de variação dos dados obtidos da distribuição volumétrica transversal de líquido. Com a ponta AXI 11004, o resultado foi inverso, quanto maior a velocidade do ar, menor foi o coeficiente variação dos dados obtidos.

3) MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecanização Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Todos os ensaios foram realizados por meio do desenvolvimento de um protótipo (Figura 3), constituído de um ventilador, associado a um homogeneizador de fluxo, de sensores de temperatura e umidade relativa conjugados, além de um de microcontrolador conectado a um computador.



(A)



(B)

Figura 3. Protótipo utilizado nos ensaios. (A) Vista Lateral; (B) Vista Cavaleira.

O protótipo construído possui comprimento total de 3,5 m, com uma tubulação metálica de um metro instalada antes do ventilador e outra de PVC com comprimento de 2,5 m, após o ventilador. Todo o circuito possui diâmetro de 0,25 m. O movimento do ar foi proporcionado por um ventilador axial (Modelo 10, Rolfes Manufacturing Co., Iowa, EUA), com diâmetro de 0,25 m, o qual foi acionado por um motor monofásico, 110V, 5,6 A, com potência de 0,19 kW.

3.1. Avaliação do desempenho do ventilador

No desenvolvimento do protótipo, o ventilador foi previamente avaliado quanto à vazão e velocidade do ar. Neste ensaio, utilizou-se o método americano estabelecido pela Air Moving and Conditions Association - AMCA (1985). De acordo com esta norma, deve-se construir um túnel de vento, com comprimento equivalente a dez vezes o diâmetro do ventilador, 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 4).



Figura 4. Duto de ar para testes em ventiladores (Fonte: Mesquita et al., 1985).

O tubo homogeneizador foi construído com chapas de aço galvanizado conforme recomendadas por Silva et al. (2008). Esse tubo foi posicionado a 1,25 m do ventilador. No túnel de vento, à distância de 2,13 m, foi instalado um tubo de Pitot interligado a um manômetro inclinado (modelo MM. 400, Dwyer Instruments INC, Michingan, USA) com precisão de 0,5 mmCH₂O. Posteriormente, determinaram-se as pressões estáticas e dinâmicas.

Para determinar o número necessário de pontos de leitura de pressões na seção transversal em dutos circulares, conforme proposto por Mesquita et al. (1985), a seção transversal foi dividida em equiáreas. Nesse caso para um ventilador com diâmetro de 0,25 m, recomendam-se seis pontos de leituras na longitudinal e seis leituras na vertical do tubo. Com o objetivo de localizar esses pontos de medição na seção transversal, utilizou-se a Equação (2).

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

em que

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

d = diâmetro do ventilador (mm);

n = é a enésima área; e,

N = número de leituras.

As leituras de pressões foram realizadas nas referidas posições, utilizando-se seis aberturas da válvula cônica (totalmente fechada; aberturas de 0,03; 0,06; 0,09; 0,12 m e totalmente aberta).

De posse das leituras de pressão dinâmica, calcularam-se as velocidades do ar (Equação 3).

$$v = \sqrt{2 g P_{\text{din}}} \quad (3)$$

em que

v = velocidade do ar (m s^{-1});

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

P_{din} = pressão dinâmica (mmH_2O).

Com os valores médios de velocidade do ar calcularam-se as vazões médias do ar (Equação 4).

$$Q_{\text{med}} = v_{\text{med}} A \quad (4)$$

em que

Q_{med} = vazão média do ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

v_{med} = velocidade média do ar (m s^{-1}); e

A = área da secção transversal (m^2).

Determinou-se também a potência exigida pelo ventilador, por meio da Equação (5).

$$\text{Pot} = \gamma P_t Q_{\text{med}} \quad (5)$$

em que

Pot = potência do ventilador (W);

Pt = pressão total (mcH₂O); e

γ = peso específico do fluido (N m⁻³).

Durante os ensaios, com o auxílio de dois sensores conjugados de temperatura e umidade relativa do ar (modelo Humitter 50Y, Vaisala Inc., Woburn, MA, USA), foram monitoradas as condições psicrométricas do ar ambiente e do ar proveniente da saída do túnel de vento. Esses sensores operam na faixa de medição de temperatura e umidade relativa do ar entre -40 e 60 °C e 0 e 100%, respectivamente. Os sinais analógicos de tensão elétrica, proporcionados pelo sensor conjugado, foram convertidos em valores numéricos, utilizando-se a conversão analógica/digital de 10 bits do microcontrolador (modelo Duemilanove, Arduino, Strambino, Itália). Essa configuração fornece 1024 (2¹⁰) valores decimais para sinais analógicos variando de 0 a 5 VDC. O microcontrolador foi conectado ao computador por um sistema serial de transmissão de dados, utilizando-se o protocolo RS 232. Os valores de tensão elétrica foram convertidos em valores de temperatura e umidade relativa, tendo como base as Equações (6) e (7).

$$t = -40 + 20 \left(\frac{5}{1023} \right) VD_t \quad (6)$$

em que

t = temperatura do ar (°C); e

VD_t = valor decimal proveniente da conversão analógica/digital do sinal de temperatura do ar, variando de 0 a 1023.

$$UR=20 \left(\frac{5}{1023} \right) VD_{UR} \quad (7)$$

em que

UR = umidade relativa do ar (%); e

VD_{UR} = valor decimal proveniente da conversão analógica/digital do sinal de umidade relativa do ar, variando de 0 a 1023.

Todo o procedimento deste ensaio foi realizado em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. A média dos dados obtidos foi utilizada para demonstrar a curva característica do ventilador.

3.2. Caracterização da ponta hidráulica JSF 11002

Durante a condução dos diferentes experimentos, optou-se por utilizar pontas hidráulicas do tipo leque (modelo JSF 11002, Jacto, Pompéia, Brasil).

Inicialmente, o desempenho das pontas foi avaliado em termos de vazão de líquido e espectro de gotas. Para a coleta dos dados de vazão, montaram-se as pontas em uma bancada de ensaio padronizada de acordo com a norma ISO 5682-1 (1996), onde foram obtidas as vazões de líquido sob as pressões de 200, 300, 400 e 500 kPa, com quatro repetições.

Posteriormente, prosseguiu-se ao ensaio do espectro de gotas. Para tal, montou-se uma estrutura com tubos de Metalon (3x3 cm) com dimensões de 0,70 x 0,82 x 0,71 m (altura x largura x profundidade). A essa estrutura foi afixada uma barra de pulverização com movimento rotativo de 180° de modo a garantir a análise de todo o jorro de pulverização. Para realizar esse movimento, em uma das extremidades da barra instalou-se um motoredutor elétrico (modelo CEP, Bosch, Campinas, Brasil) de 12 V e torque máximo de 48 Nm, acionado por chave elétrica (liga/desliga), instalada na barra de pulverização. Nas proximidades da ponta hidráulica, instalou-se um manômetro (FL 52, Farmabrás, São Paulo, Brasil) com precisão de 20 kPa calibrado com o auxílio de um aferidor de manômetros, padrão Classe A3.

Com a estrutura montada, e com o auxílio de um analisador de partículas em tempo real (modelo Spraytec, Malvern Instruments Co., Worcestershire, UK), dotado

de lente focal de 750 mm, e configurado para contabilizar gotas de 0,10 a 2500 μm , com taxa de aquisição de 2,5 kHz e tempo de leitura de 1,5 s, realizaram-se as análises do espectro de gotas.

Para análise do ensaio foi empregado um delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e com cinco repetições. Os parâmetros técnicos da pulverização avaliados foram: $DV_{0,1}$, $DV_{0,5}$, $DV_{0,9}$, Índice Span, porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro menor que 100, entre 100 e 200, entre 200 e 300, entre 300 e 400, entre 400 e 500, entre 500 e 600, e, maior que 600 μm , nas pressões de 200, 300, 400 e 500 kPa. As leituras foram obtidas a distância de 0,5 m do feixe de luz do analisador de partículas.

Os dados foram submetidos a análise de variância, por meio do software Sisvar, versão 5.3, e os gráficos de regressão plotados por meio do software Microsoft Excel 2010®.

3.3. Efeito das condições psicrométricas do ar no espectro de gotas durante a aplicação de agrotóxicos

De acordo com o protótipo desenvolvido e com o intuito de verificar o efeito da temperatura do ar no espectro de gotas, instalou-se uma ponta JSF 11002 na saída do túnel de vento (Figura 5).

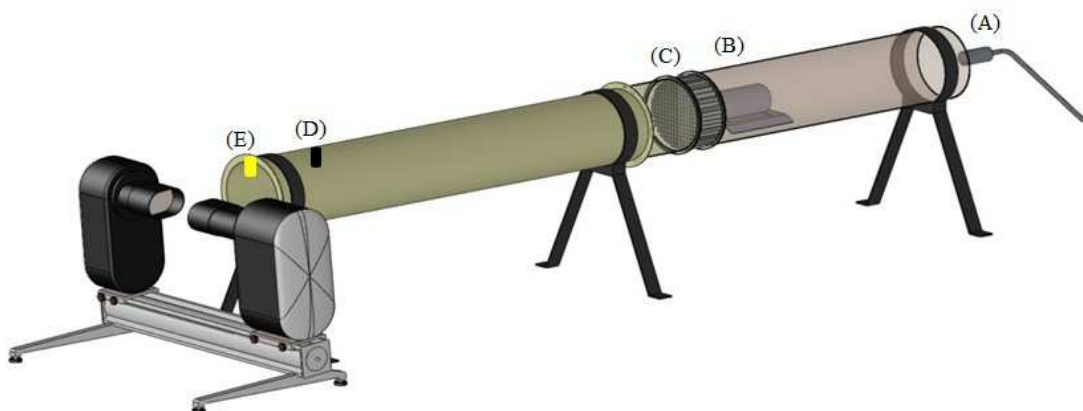


Figura 5. Análise do espectro de gotas. (A) aquecedor a gás; (B) ventilador; (C) homogeneizador de ar; (D) sensor de temperatura e umidade relativa; (E) ponta hidráulica.

A ponta hidráulica foi alimentada por uma bomba hidráulica de pistão (modelo S-25, Yamaho Incoprom Pulverizadores LTDA, Diadema, Brasil) com rotação de 70 a 900 RPM e pressão máxima de 3516 kPa. Essa bomba foi acionada por motor elétrico, marca WEG, com rotação de 3570 RPM e potência de 1,5 kW. Nas proximidades da ponta hidráulica instalou-se um manômetro.

Uma vez instaladas as pontas hidráulicas, a uma distância de 0,5 m do raio a *laser* (modelo Spraytec, Malvern Instruments Co., Worcestershire, UK) foram determinados estes parâmetros técnicos da pulverização: $DV_{0,1}$; $DV_{0,5}$; $DV_{0,9}$; Índice Span; porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro menor que 100, entre 100 e 200, entre 200 e 300, entre 300 e 400, entre 400 e 500, entre 500 e 600, e, maior que 600 μm , nas pressões de 200, 300, 400 e 500 kPa.

Com o sistema montado, conduziu-se um experimento em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial (4x4), déficit de pressão de saturação do vapor d'água no ar (7; 14; 21 e 28 hPa) e pressões de trabalho (200, 300, 400 e 500 kPa), com oito repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância. Desdobraram-se as interações, independente da significância do teste F. Posteriormente, prosseguiu-se a análise de regressão, sendo os modelos escolhidos conforme o comportamento dos dados, bem como a significância dos coeficientes das equações (β) pelo teste t a 1, 5 e 10% de probabilidade e pelo coeficiente de determinação. Os dados foram analisados por meio do software Sisvar, versão 5.3, e os gráficos de regressão plotados por meio do software SigmaPlot versão 12.

Para alterar as condições ambientais, atuou-se no sistema de aquecimento do ar do protótipo. As condições psicrométricas foram monitoradas pelos sensores, os quais emitiam sinal elétrico proporcional à temperatura e umidade relativa do ar naquele instante. Esses sinais, foram interpretados pelo microcontrolador e armazenados por meio do computador. Para realizar todo esse processo elaborou-se um algoritmo de modo que os sinais de temperatura e umidade relativa fossem automaticamente transformados em déficit de pressão de vapor d'água no ar, conforme equações proposta por Tetens (1930), descritas por Vianello e Alves (2012). Visando minimizarem os erros, somente dois minutos após a estabilização das condições psicrométricas do ar é que se tomaram os dados.

3.4. Estimativas de perdas por evaporação em pulverizadores com assistência de ar na barra

Com base no protótipo desenvolvido e devidamente ensaiado, calculou-se o potencial máximo de perdas por evaporação durante a aplicação de agrotóxico, em pulverizadores com assistência de ar na barra.

Utilizaram-se os dados psicrométricos do ar do item 3.3 e adicionou uma condição extrema do ar, conforme Quadro 1.

Quadro 1. Condições psicrométricas do ar

DPV (hPa)	Temperatura média do ar (°C)	Umidade relativa média do ar (%)
7	22,4	67
14	25,9	55
21	28,1	41
28	31,8	39
35	35,0	30

De acordo com os dados psicrométricos do ar, inicialmente determinaram-se as pressões de saturação do vapor d'água no ar, e as pressões parciais de vapor d'água no ar. Posteriormente, calcularam-se a umidade absoluta do ar, conforme Equação 8.

$$\rho_v = \frac{216,68 e}{T} \quad (8)$$

em que

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

ρ_v = umidade absoluta do vapor d'água no ar ($\text{g}_{\text{vapor d'água}} \text{m}^{-3}_{\text{de ar}}$); e

T = Temperatura (K).

Considerando-se um processo de evaporação das gotas pulverizadas totalmente adiabático, o ar possui potencial máximo para chegar à umidade relativa

de 100%, na sua respectiva temperatura, ou seja, na pressão de saturação do vapor d'água à temperatura de bulbo úmido (e_{su}).

Com os dados iniciais e com auxílio do software Microsoft Excel®, desenvolveu-se uma planilha interativa, conforme proposta por Silva et al. (2008), onde a temperatura do ar foi progressivamente reduzida, mantendo-se constante o valor de entalpia, até que se alcançou um ponto de estado, cujo valor da umidade foi de 100%, na sua respectiva temperatura. Com base na temperatura de bulbo úmido (T_{bu}), determinaram-se os valores de pressão de saturação de vapor d'água no ar a temperatura de bulbo úmido (e_{su}) para cada condição. Em seguida, determinou-se a umidade absoluta de saturação do vapor d'água no ar (Equação 9).

$$\rho_{vsu} = \frac{216,68 e_{su}}{T} \quad (9)$$

em que

e_{su} = pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura de bulbo úmido (hPa);

ρ_{vsu} = umidade absoluta de saturação do vapor d'água no ar ($g_{\text{vapor d'água}} m^{-3}_{\text{de ar}}$).

De posse da umidade absoluta e da umidade absoluta de saturação do vapor d'água no ar à temperatura de bulbo úmido, calculou-se, por meio da Equação 10, o potencial evaporativo do ar em condições adiabáticas, o qual representa a perda de líquido por evaporação.

$$\xi = \rho_{vsu} - \rho_v \quad (10)$$

em que

ξ = potencial de perdas de agrotóxicos por evaporação ($g m^{-3}$).

Com os dados da vazão de ar proporcionado pelo ventilador, ajustaram-se as perdas para as condições realizadas nos ensaios (Equação 11).

$$\Pi = Q \xi \quad (11)$$

em que

Π = taxa de evaporação (g s^{-1}); e

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

Por fim, com base na Equação 12, foram determinadas as perdas percentuais (%) por evaporação com base no volume aplicado pela ponta hidráulica JSF 11002, operando nas pressões de 200, 300, 400 e 500 kPa.

$$\text{Potencial de perdas por evaporação (\%)} = \frac{\Pi}{q} 100 \quad (12)$$

em que

q = vazão de líquido (mL s^{-1}).

3.5. Desenvolvimento de um sistema de resfriamento adiabático para pulverizador com assistência de ar

De acordo com o protótipo montado, procedeu-se ao desenvolvimento e à avaliação de quatro sistemas de resfriamento evaporativo adiabático a ser empregado na pulverização de agrotóxicos, visando minimizar as perdas por evaporação, durante as pulverizações de campo.

O sistema de resfriamento adiabático foi composto por um aquecedor de ar, ventilador axial, homogeneizador de fluxo de ar, sistema de resfriamento adiabático e dois sensores de temperatura e umidade relativa do ar (Figura 6).

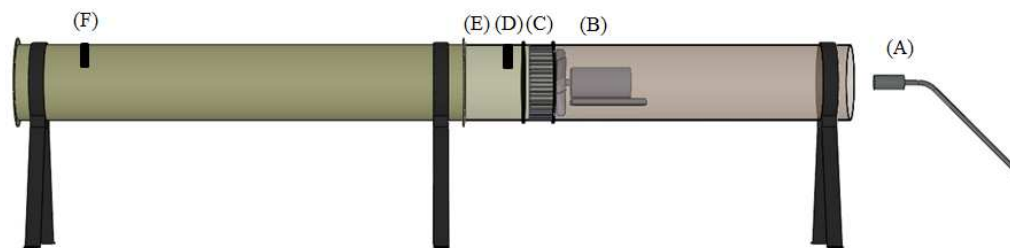


Figura 6. Protótipo utilizado para avaliação de sistemas de resfriamento adiabáticos para pulverizadores. (A) sistema a gás para aquecimento do ar; (B) ventilador; (C) homogeneizador de ar; (D) sensor de temperatura e umidade relativa antes do resfriamento; (E) sistema de resfriamento adiabático; (F) sensor de temperatura e umidade relativa após o resfriamento.

As condições psicrométricas do ar foram medidas com dois sensores conjugados de temperatura e umidade relativa (modelo Humitter 50Y, Vaisala Inc., Woboum, MA, USA). Um sensor foi posicionado logo após o ventilador para monitorar as condições iniciais e o outro, após o sistema de resfriamento adiabático. Ambos os sensores foram alojados em uma estrutura de acrílico, envolto com um tecido, com circulação de ar forçada, imposto pelo próprio sistema.

Testaram-se quatro sistemas de resfriamento adiabático: 1) resfriamento adiabático com nebulizadores de baixa pressão e alteração do volume de acordo com a pressão de trabalho; 2) resfriamento adiabático com nebulizadores de baixa pressão e alteração do volume por meio de um sistema intermitente automatizado; 3) resfriamento adiabático com o uso de placas de celulose antes e após o ventilador; 4) resfriamento adiabático com o uso de nebulizadores de alta pressão e alteração do volume por meio do número de nebulizadores ligados.

3.5.1. Nebulizadores sob baixa pressão com ajuste da quantidade de água aplicada pela alteração da pressão de trabalho

Um sistema de resfriamento adiabático do ar foi instalado após o ventilador. O sistema foi composto por reservatório de água, registro de controle de vazão e pressão, nebulizadores (modelo CoolNet ProTM, Netafim, Ribeirão Preto, Brasil) com vazão de líquido entre 5,5 e 7,5 L h⁻¹, e faixa de pressão de trabalho entre 200 e 700 kPa. Os nebulizadores foram instalados no tubo de PVC a 0,4 m do ventilador e

acionados por bomba hidráulica (modelo S-25, Yamaho Incoprom Pulverizadores LTDA, Diadema, Brasil) com rotação entre 70 e 900 RPM e pressão máxima de 3516 kPa. Essa bomba foi acionada por um motor elétrico, marca WEG, com rotação de 3570 RPM e potência de 1,5 kW. Inicialmente, avaliaram-se os nebulizadores quanto à vazão de líquido e espectro de gotas.

Para a avaliação da vazão de líquido, o nebulizador foi instalado em uma bancada de ensaios padronizadas de acordo com as normas ISO 5682-1. Determinaram-se as vazões de líquidos nas pressões de 200, 300, 400, 500 e 600 kPa. Para cada pressão de trabalho, selecionaram-se três nebulizadores, de mesmo modelo, que foram devidamente identificados. Com o auxílio de uma proveta com exatidão de 20 mL, coletou-se o líquido por um minuto. Estes mesmos aspersores foram ensaiados quanto ao espectro de gotas ($DV_{0,1}$, $DV_{0,5}$, $DV_{0,9}$, índice Span, porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro menor que 50, entre 50 e 100, entre 100 e 150, entre 150 e 200, e, maior que 200 μm), conforme metodologia citada no item 3.2. A cada procedimento, realizaram-se quatro repetições para cada espécime, totalizando 12 repetições a cada pressão estudada.

Com os aspersores ensaiados, prosseguiu ao desenvolvimento do sistema de resfriamento adiabático. A quantidade de água injetada foi em função da vazão de ar do ventilador e das condições psicrométricas do ambiente, ou seja, das condições de umidade e temperatura antes e após o resfriamento. Neste caso, o ajuste da quantidade de água se deu pela pressão de trabalho.

Com os valores de temperatura impostos pelos sensores antes do resfriamento, foram calculadas as pressões de vapor d'água no ar (e_s) (Equação 13).

$$e_s = 6,1078 \times 10^{[(7,5t)/(237,3+t)]} \quad (13)$$

em que

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

t = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

De posse dos valores da pressão de saturação do vapor d'água no ar e da umidade relativa do ar, foram calculadas as pressões parciais de vapor d'água no ar (e) com base na Equação 14.

$$e = \frac{UR e_s}{100} \quad (14)$$

em que

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

UR = Umidade relativa (%).

Com os dados de pressão parcial de vapor d'água no ar e da temperatura, foi determinada a umidade absoluta do vapor d'água (ρ_v) no ar, conforme a Equação 15.

$$\rho_v = \frac{216,68 e}{T} \quad (15)$$

em que

ρ_v = umidade absoluta do ar ($\text{g}_{\text{vapor d'água}} \text{m}^{-3} \text{de ar}$); e

T = Temperatura (K).

Os mesmos cálculos foram realizados para condições hipotéticas após o resfriamento. A variação da umidade absoluta do ar foi obtida considerando-se os limites impostos pelas condições psicrométricas do ar no estado inicial, caracterizado pela temperatura e umidade relativa, e pelas condições psicrométricas do ar no estado final, previamente determinado para o ar chegar à umidade relativa de 80%, na sua respectiva temperatura. Foi necessário obter os dados de temperatura de bulbo úmido do ar externo (t_{bu80}^{ext}) que foram estimados pelo método iterativo descrito por Silva et al. (2008). Conforme proposto pelos autores, a temperatura de bulbo úmido do ar (t_{bu}^{ext}) foi progressivamente reduzida, mantendo-se constante o valor de entalpia, até que se alcançou um ponto de estado com valor de umidade relativa de 80%. De posse dos valores iniciais (1) e finais (2) da temperatura e umidade do ar, foi determinada a variação da umidade absoluta do ar ($\Delta\rho_v$) com a Equação 16.

$$\Delta\rho_v = \rho_{v2} - \rho_{v1} \quad (16)$$

em que

$\Delta\rho_v$ = variação da umidade absoluta do ar após o acionamento do sistema de resfriamento ($\text{g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{m}^{-3}_{\text{ar}}$);

ρ_{v2} = umidade absoluta do ar após o resfriamento evaporativo ($\text{g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{m}^{-3}_{\text{ar}}$); e

ρ_{v1} = umidade absoluta do ar ambiente ($\text{g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{m}^{-3}$).

Com os dados da vazão de ar do ventilador e com a variação da umidade absoluta, foi possível determinar a quantidade de água necessária para que ocorra o resfriamento do ar até o valor limite de umidade relativa de 80%. Assim, a quantidade de água aplicada foi determinada pela Equação 17.

$$m_{\text{água}} = \frac{Q \Delta\rho_v}{60} \quad (17)$$

em que

$m_{\text{água}}$ = massa de água a ser aplicada para proporcionar o resfriamento evaporativo do ar ($\text{g}_{\text{água}} \text{min}^{-1}$); e

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

Finalmente, avaliaram-se a redução na temperatura do ar, o incremento da umidade relativa, a redução do potencial evaporativo do ar e a porcentagem da massa de água evaporada, por meio da Equação (18).

$$\xi = 100 - \left(\frac{m_{\text{col}}}{m_{\text{ev}}} 100 \right) \quad (18)$$

em que

ξ = água evaporada (%);

m_{ev} = massa de água evaporada (g s^{-1}); e

m_{col} = massa de água não evaporada (g s^{-1}).

Para o cálculo da variável ξ , a massa de água evaporada foi encontrada pela diferença entre a quantidade de líquido aplicado menos a quantidade de líquido coletado ao final do túnel de vento.

Este ensaio foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, com cinco condições iniciais (DPV) e com cinco repetições por tratamento, onde aplicou-se o teste t de *Student*, para amostras pareadas, com hipótese de nulidade $\mu_{\text{antes}} = \mu_{\text{depois}}$ e hipótese alternativa $\mu_{\text{antes}} < \mu_{\text{depois}}$, ao nível de 1% de probabilidade.

3.5.2. Resfriamento adiabático com nebulizadores sob baixa pressão e alteração do volume de água através um sistema intermitente automatizado

Após a implementação do protótipo experimental, o sistema de resfriamento adiabático evaporativo foi controlado por meio de um sistema eletrônico com injeção intermitente de água.

O sistema foi composto por uma válvula solenoide (modelo EVA 02, Emicol, Itu, Brasil) com pressão máxima de trabalho de 800 kPa, 127V, um microcontrolador Arduino (modelo Duemilanove, Arduino, Strambino, Itália), um relé para acionar a válvula (modelo HJR – 3FF, Zuch®) 5 VDC, 127 VAC e 10 A, e um nebulizador de baixa pressão, marca (modelo CoolNet Pro™, Netafim, Ribeirão Preto, Brasil), ensaiados conforme descritos no item 3.5.1 (Figura 7).

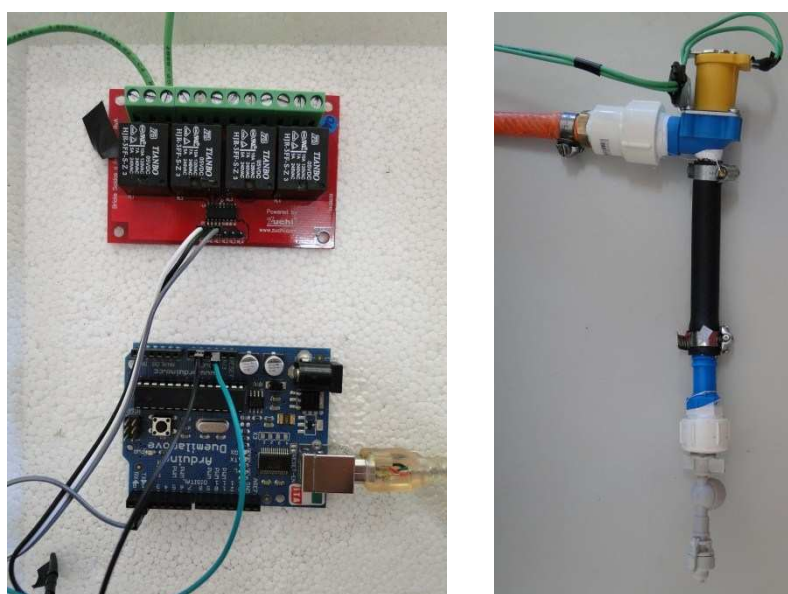


Figura 7. Sistema eletrônico para controle da injeção intermitente de água.

Com o circuito eletrônico montado, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem C, cujo algoritmo tinha por objetivo estabelecer os intervalos de tempo apropriados para o acionamento da válvula solenoide (Figura 8).

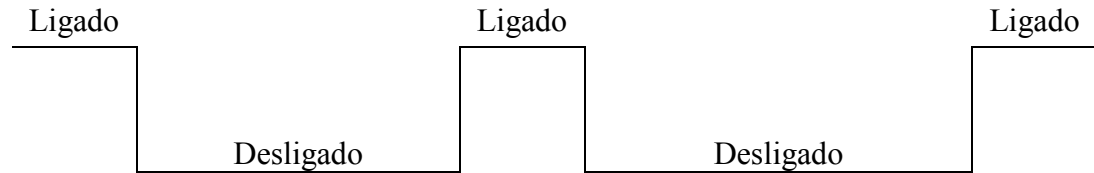


Figura 8. Frequência operacional da válvula solenoide estabelecida pelo microcontrolador Arduino.

O algoritmo foi elaborado de forma que a válvula permanecesse 100, 75, 50 e 25% do tempo ligado. Realizou-se um ensaio para estabelecer a frequência de oscilação para as referidas aberturas.

Posteriormente, ensaiou-se o sistema quanto à quantidade de líquido aplicado nas diferentes aberturas, com pressão de trabalho de 600 kPa. De posse desses valores e com base no dimensionamento do item 3.5.1, calculou-se e adequou-se a quantidade de líquido a ser empregado no sistema de resfriamento adiabático do ar nas diferentes condições ambientais.

Com o objetivo de averiguar qual a melhor frequência de trabalho nas diferentes condições ambientais, optou-se por realizar os ensaios em quatro diferentes condições ambientais (DPV) e em todas as frequências de oscilações (100; 75; 50 e 25%).

O experimento foi conduzido em esquema fatorial (4x4), em delineamento inteiramente casualizado. Os fatores foram constituídos de quatro valores de DPV e quatro frequências da válvula solenoide, com quatro repetições por tratamento.

De posse dos dados, aplicou-se o teste t de *Student*, para amostras pareadas, com hipótese de nulidade $\mu_{\text{antes}} = \mu_{\text{depois}}$ e hipótese alternativa $\mu_{\text{antes}} < \mu_{\text{depois}}$, ao nível de 1% de probabilidade.

3.5.3. Resfriamento adiabático com o uso de placas de celulose

De acordo com o ventilador avaliado no item 3.1, desenvolveu-se um sistema de resfriamento por meio de uma placa porosa de celulose. O sistema é composto por

uma luva de PVC, marca Tigre, com diâmetro de 250 mm, o qual foi totalmente preenchida com a placa de celulose da marca CELdek®, com espessura de 150 mm. Essas placas são fabricadas com uma mistura de celulose e fibra de vidro. Elas são altamente hidrocópias e tratadas quimicamente para evitar o apodrecimento e a decomposição (Figura 9).



Figura 9. Sistema de resfriamento adiabático evaporativo por placas de celulose.

Para realizar o molhamento da placa de celulose, realizaram-se três furos na parte superior da luva de PVC, onde foram instalados três aspersores (modelo 1.0, Lurmark, New Brighton, EUA). Os aspersores foram acionados por meio de uma bomba hidráulica (modelo S-25, Yamaho Incoprom Pulverizadores LTDA, Diadema, Brasil) com rotação de 70 a 900 RPM e pressão máxima de 3516 kPa. Essa bomba foi acionada por motor elétrico, marca WEG, com rotação de 3570 RPM e potência de 1,5 kW. Esses aspersores foram devidamente avaliados quanto à vazão de líquido e espectro de gotas, conforme metodologia já descrita no item 3.5.1, sob pressão de trabalho de 300 kPa. Na parte inferior da luva de PVC, instalou-se um dreno para retirar o excesso de água.

Para identificar a melhor posição do sistema de resfriamento adiabático, instalaram-se as placas porosas antes (barlavento) e após (sota-vento) o ventilador, e verificaram-se a eficiência de resfriamento dos sistemas. Quando a placa foi posicionada a barlavento ao sistema de ventilação, retirou-se o sistema de aquecimento do ar. Diante da restrição imposta pela placa, com o auxílio de um anemômetro de fio quente (modelo TAR-176, Instrutherm®, São Paulo, Brasil), com escala de medição entre 0,4 a 12 m s⁻¹, resolução de 0,01 m s⁻¹ e precisão de ±2%,

subdividiu-se a área da secção tubular em oito equiáreas e mediu-se a velocidade do ar com o sistema instalado.

Foram realizados dois ensaios independentes, com a placa porosa à frente e atrás do sistema de ventilação. Cada ensaio foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (DPV) e com quatro repetições por tratamento. Com o sistema de resfriamento posicionado a barlavento do ventilador, o ensaio foi realizado nas condições ambientais do ar, com DPV de 7; 11; 17 e 19 hPa. Quando posicionado a sotavento do ventilador, foi realizado sob os DPV de 10; 25; 45 e 60 hPa. A cada tomada de dados, ligaram-se os microaspersores por um período de 30 s, certificando-se o completo molhamento das placas porosas, para o início da coleta de dados. De acordo com os dados obtidos aplicaram-se o teste t de *Student*, para amostras pareadas, com hipótese de nulidade $\mu_{\text{antes}} = \mu_{\text{depois}}$ e hipótese alternativa $\mu_{\text{antes}} < \mu_{\text{depois}}$, ao nível de 1% de probabilidade.

Ao final, avaliaram-se a redução do DPV e, por meio da Equação 19, proposta pela American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE, 1996) calculou-se a eficiência do sistema de resfriamento.

$$\eta = \left(\frac{t_{\text{bs}}^{\text{ext}} - t_{\text{bs}}^{\text{resf.}}}{t_{\text{bs}}^{\text{ext}} - t_{\text{bu}}^{\text{ext}}} \right) 100 \quad (19)$$

em que

η = eficiência de resfriamento evaporativo do ar (%);

$t_{\text{bs}}^{\text{ext}}$ = Temperatura de bulbo seco do ar externo (°C);

$t_{\text{bs}}^{\text{resf.}}$ = Temperatura de bulbo seco do ar resfriado (°C); e

$t_{\text{bu}}^{\text{ext}}$ = Temperatura de bulbo úmido do ar externo (°C).

3.5.4. Resfriamento adiabático com o uso de nebulizadores de alta pressão e alteração do volume por meio do número de nebulizadores

Da mesma forma que nos itens anteriores, desenvolveu-se um sistema de resfriamento adiabático com o uso de nebulizadores de alta pressão. A quantidade de

água dimensionada para o sistema de resfriamento adiabático foi de acordo com o número de nebulizadores.

O sistema é composto por um circuito hidráulico de alta pressão, nebulizadores da marca Umibrisa, fabricados em Inox, dotados de um sistema antigotejo e engate rápido. Os nebulizadores foram acionados por uma bomba de alta pressão (modelo Gong, Interpump®, Sant’Ilario d’Enza, Itália) com vazão máxima de 7 L min⁻¹ e pressão de 16000 kPa. A bomba foi acionada por motor elétrico monofásico, 127V, com potência de 1,5 kW, 60 Hz e 14,7 A.

Próximo aos nebulizadores, instalou-se um manômetro com faixa de medição de pressão entre 0 e 6000 kPa, e um sistema de ajuste de pressão, composto por uma conexão em aço formato “T” e um retorno com um registro de agulha de alta pressão.

Os nebulizadores, inicialmente, foram ensaiados quanto à vazão de líquido, com o auxílio de uma proveta graduada com exatidão de 2 mL. Tomaram-se as vazões utilizando-se 1, 2, 3, 4, 5 e 6 nebulizadores. Posteriormente, conforme metodologia citada no item 3.2, ensaiaram-se os nebulizadores quanto ao espectro de gotas.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (4 DPV – 9,2; 23,4; 37,4 e 52,8 hPa) e com quatro repetições por tratamento. Todos os ensaios foram realizadas a pressão de trabalho de 3000 kPa.

Ao final, avaliaram-se a redução do DPV. Aplicaram-se o teste t de *Student*, para amostras pareadas, com hipótese de nulidade $\mu_{\text{antes}} = \mu_{\text{depois}}$ e hipótese alternativa $\mu_{\text{antes}} < \mu_{\text{depois}}$, ao nível de 1% de probabilidade.

3.6. Efeito do uso do sistema de resfriamento adiabático nos parâmetros técnicos da pulverização

De acordo com o protótipo descrito anteriormente e de posse do melhor método de resfriamento adiabático, prosseguiram-se as avaliações do efeito do uso do sistema de resfriamento adiabático nos parâmetros técnicos da pulverização, sob diferentes condições ambientais.

O protótipo é composto por um sistema de aquecimento do ar a gás, ventilador, homogeneizador de fluxo, sensor de temperatura e umidade relativa, sistema de resfriamento adiabático com o uso de nebulizadores sob alta pressão, e um segundo sensor de temperatura e umidade relativa, conforme já descritos anteriormente.

O experimento foi realizado utilizando-se uma ponta hidráulica (modelo JSF 11002, Jacto, Pompéia, Brasil) a qual foi instalada na saída do protótipo a uma distância de 0,5 m do analisador de partículas em tempo real (modelo Spraytec, Malvern Instruments Co., Worcestershire, UK) (Figura 10).



Figura 10. Leituras do espectro de gotas no analisador a laser.

O experimento foi conduzido esquema fatorial triplo (2 X 4 X 4), em delineamento inteiramente casualizado. Os fatores foram constituídos pelo sistema de resfriamento adiabático ligado e desligado, quatro déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar – 9; 17; 25 e 32 hPa e quatro pressões de trabalho – 200; 300; 400 e 500 kPa, com cinco repetições por tratamento. Os parâmetros técnicos da pulverização avaliados foram $DV_{0,1}$, $DV_{0,5}$, $DV_{0,9}$, Índice Span, porcentagem do volume pulverizado composta por gotas com diâmetro menor que 100, entre 100 e 200, entre 200 e 300, entre 300 e 400, entre 400 e 500, entre 500 e 600, e, maior que 600 μm .

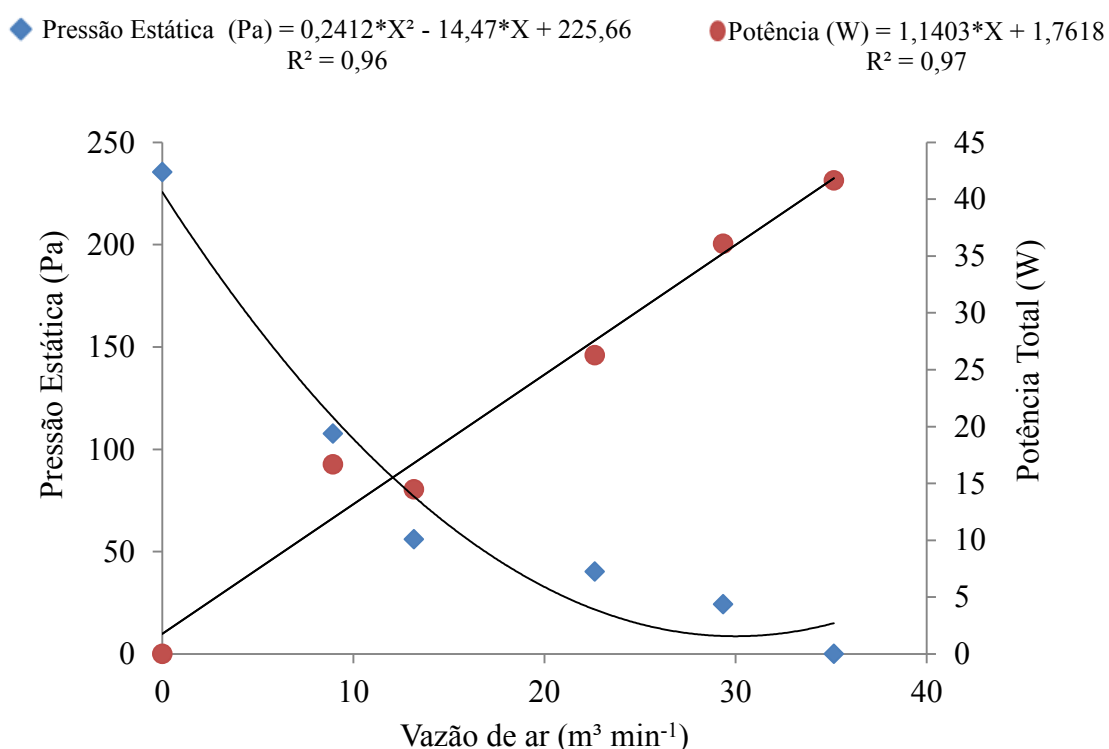
Com o uso do sistema de resfriamento adiabático, adequou-se e ajustou-se a quantidade de líquido de acordo com o número de nebulizadores, conforme descrito no item 3.5.1. Para minimizar os erros, após a estabilização da condição psicrométrica do ar externo, ligou-se o sistema de resfriamento adiabático, por um período de 1 min, prosseguindo-se a calibração do analisador a laser, e início da tomada de dados.

Os dados foram submetidos à análise de variância, optando-se pelo desdobramento da interação independente da significância do teste F. Posteriormente, foi realizada a análise de regressão, adotando-se os modelos mais apropriados, conforme o comportamento dos dados obtidos, bem como a significância dos coeficientes das equações (β) pelo teste t de *Student* a 1, 5 e 10% de probabilidade e pelo coeficiente de determinação. Todas as análises estatísticas foram realizadas pelo software Sisvar, versão 5.3, e os gráficos de regressão plotados por meio do software SigmaPlot versão 12.

4) RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Curva característica do ventilador

A vazão de ar do ventilador com o cone totalmente aberto foi $35,15 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ e demandou potência de $41,64 \text{ W}$. Com o decréscimo da vazão de ar, ocorreu aumento da pressão estática e redução da potência demandada (Figura 11).



*Vazão de ar $\text{m}^3 \text{ min}^{-1}$

Figura 11. Curva característica do ventilador.

Durante a avaliação do ventilador, as condições psicrométricas do ambiente permaneceram entre $21,3$ e $25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e 55 e 62% , respectivamente, para a temperatura e umidade relativa do ar. O presente ventilador ocasionou pequeno aumento da temperatura do ar de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Em pulverizadores dotados de ventiladores, deve-se considerar o aquecimento provocado pelo atrito das pás do ventilador com o ar. No presente caso, a pouca alteração na temperatura do ar é explicado pelo fato de se utilizar um ventilador do tipo axial, com diâmetro relativamente pequeno, onde o sentido de deslocamento do

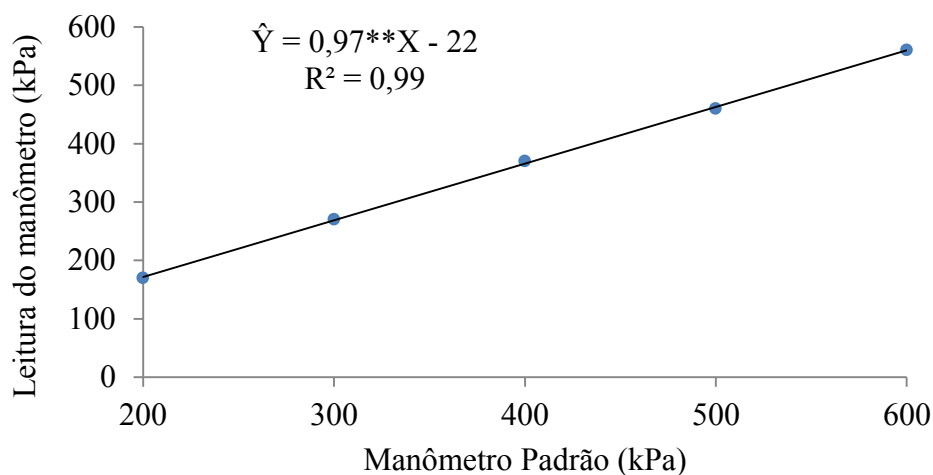
ar de entrada e saída se dá na mesma direção, razão pela qual o atrito do ar com as pás do ventilador foi minimizado, não alterando tanta a sua temperatura.

Porém, ao se empregar ventiladores do tipo radial, onde as pás são distribuídas radialmente em um rotor, de modo que ao girar, o fluxo de ar se move do centro para as extremidades, aumenta o contato das pás do ventilador com o ar, ocorrendo um maior incremento da temperatura, comparado aos ventiladores axiais. Na secagem de grãos, diversas pesquisas demonstram esse aumento da temperatura do ar proporcionado pelos ventiladores (LASSERAN, 1981; RANGEL, 1994; TRIGO et al., 1997). Na pulverização de agrotóxicos, Manhani (2011) trabalhou com um pulverizador pneumático e constatou o aquecimento do ar de até 10,3 °C.

Sempre que possível, na aplicação de agrotóxicos empregando-se equipamentos de jato transportado, este aquecimento deve ser levado em consideração, mesmo em equipamentos com ventiladores axiais, pois geralmente trabalham com alta rotação e vazão de ar. Há casos ainda, em que o ventilador dos pulverizadores é acionado hidráulicamente. Neste caso, deve-se atentar para a temperatura do óleo, pois ela pode alterar a rotação do sistema (UMEZU; CAPPELLI, 2006; OLIVA et al., 2001) e transferir calor para o ar.

4.2. Caracterização da ponta hidráulica JSF 11002

O manômetro utilizado apresentou elevada exatidão. Ele diferiu em, no máximo, 30 kPa em relação ao manômetro padrão classe A3 (Figura 12).



**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 12. Calibração do manômetro.

Em campo, é comum observar erros no uso dos manômetros. Siqueira e Antuniassi (2011), em um projeto de inspeção periódica de pulverizadores, constataram irregularidades de até 25% quanto ao seu funcionamento. Na aplicação de agrotóxico, sempre que possível, o manômetro deve estar calibrado e em condições de funcionamento, visto que erros na regulagem da pressão de trabalho podem alterar o volume aplicado, o espectro de gotas, perfil e uniformidade de distribuição de líquido proporcionado pelas pontas hidráulicas, reduzindo-se, assim, a qualidade na aplicação de agrotóxicos.

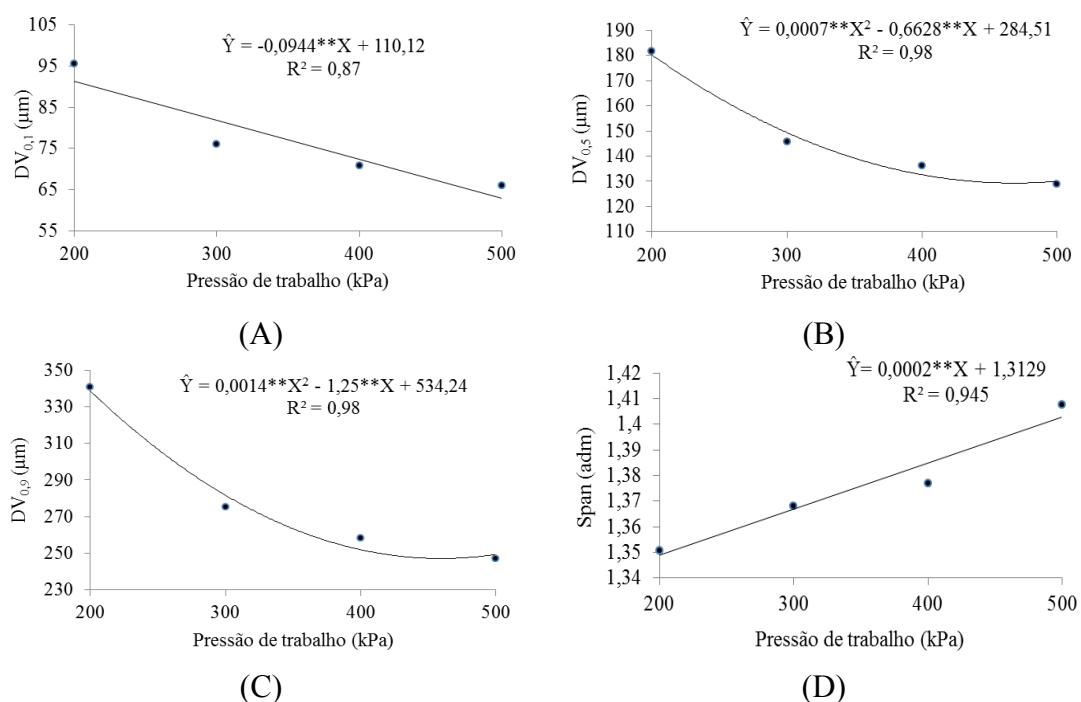
À medida que se elevou a pressão de trabalho houve aumento da quantidade de líquido aplicado pelas pontas JSF 11002 na proporção de aproximadamente 0,0015 L para cada kPa de incremento na pressão de trabalho (Quadro 2). Rodrigues et al. (2012) observaram o mesmo comportamento com pontas do tipo cone da série JA.

Quadro 2. Média da vazão de líquido proporcionado por pontas JSF 11002 em quatro pressões de trabalho

Pressão de trabalho (kPa)	Vazão de líquido (L min ⁻¹)
200	0,618
300	0,800
400	0,940
500	1,055

Todas as pontas testadas apresentaram qualidade quanto às vazões de líquido produzidas, e estavam em conformidade com a norma ISO 10625 (2005).

Houve redução do diâmetro das gotas com o aumento da pressão de trabalho (Figura 13). Com a variação da pressão de trabalho, a ponta hidráulica proporcionou espectro de gotas, com DMV classificados entre médias (175 e 250 μm) e fina (100 e 175 μm).



**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 13. Características do espectro de gotas proporcionado por pontas JSF 11002 em diferentes pressões de trabalho. (A) $DV_{0,1}$; (B) $DV_{0,5}$; (C) $DV_{0,9}$ e (D) Índice Span.

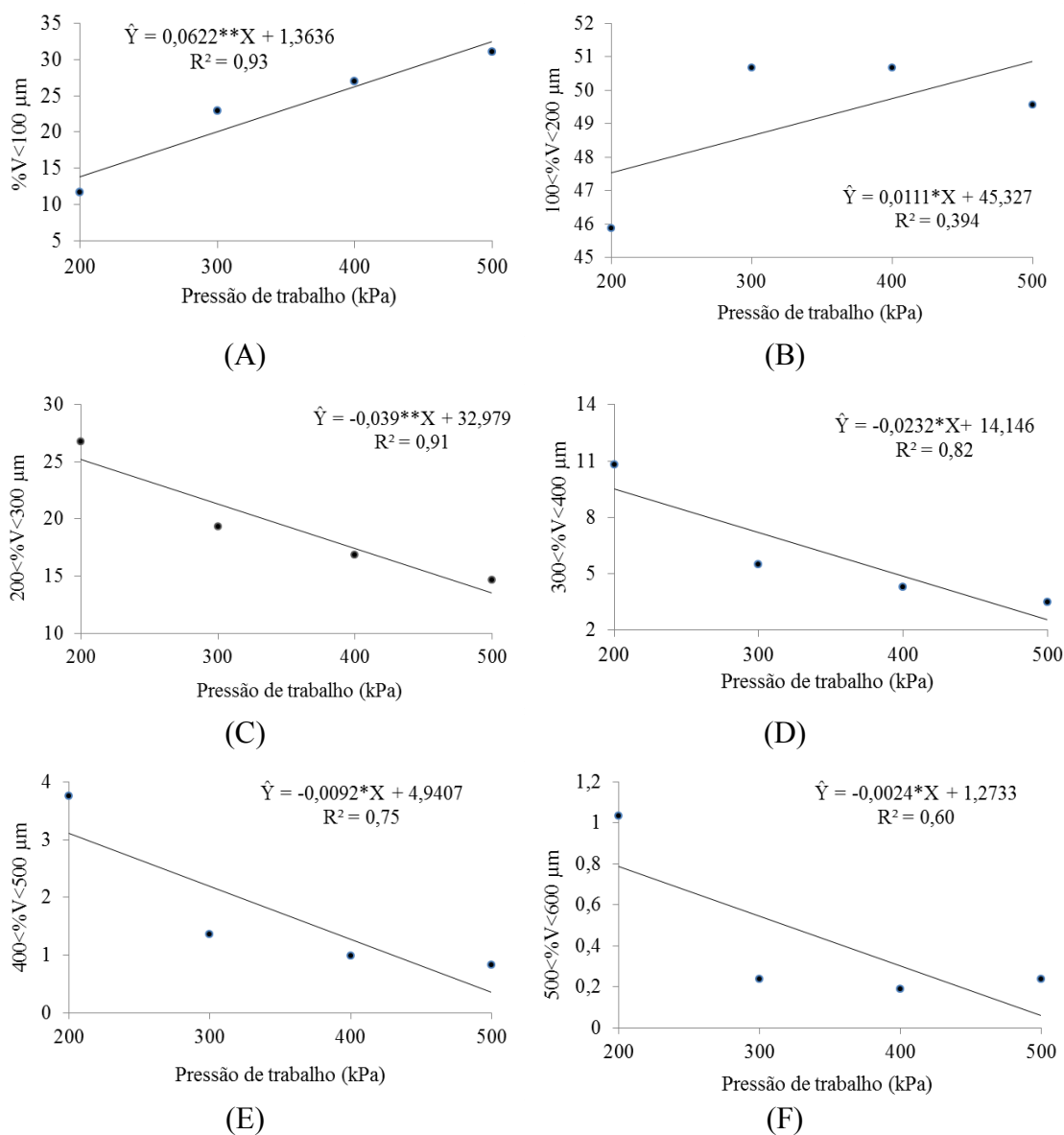
As características do espectro de gotas sob diferentes pressões de trabalho foram semelhantes às obtidas por Czaczyk et al. (2012) na avaliação de pontas de indução de ar.

Na aplicação de agrotóxicos, o espectro de gotas é um dos parâmetros mais importantes a serem considerados, pois determina a cobertura do alvo e o potencial risco de perdas por deriva, evaporação e escorrimento. De certa forma, quanto menor o diâmetro das gotas, maiores são a cobertura do alvo, quando a aplicação é realizada sob condições ambientais ótimas. Gulart et al. (2013) obtiveram maior controle de doenças no trigo, com a utilização de pontas com espectro de gotas finas.

Por outro lado, gotas finas podem acarretar perdas para o meio ambiente. Quanto maior o percentual do volume de gotas com diâmetro reduzido maior o potencial risco de deriva (NUYTTENS et al., 2010; NUYTTENS et al., 2011; QUIRINO; TEIXEIRA, 2013; GIL et al., 2014).

Quanto mais homogêneo o espectro, ou seja, quanto mais próximo de zero for o valor do índice Span, maiores são as chances de realizar uma boa aplicação. Com o aumento da pressão de trabalho, houve a tendência de aumentar o valor do índice Span, uma vez que gotas menores são formadas, ao se elevar a pressão de trabalho. Bueno et al. (2013a) obtiveram os mesmos resultados com a ponta AD-IA 11002.

Quanto maior a pressão de trabalho, maior a porcentagem do volume de gotas com diâmetro menor que 100 μm e com diâmetro entre 100 e 200 μm . Com exceção da porcentagem do volume de gotas com diâmetro maior que 600 μm , que não apresentou um ajuste do modelo de regressão, para as demais classes houve a tendência de redução da porcentagem do volume de líquido com o incremento na pressão de trabalho (Figura 14). A porcentagem do volume caracterizado por gotas com diâmetro menor que 100 μm (%V<100 μm) é utilizada para predizer o risco de deriva durante a aplicação de agrotóxicos. A porcentagem do volume de gotas com diâmetro maior que 600 μm (%V>600 μm) indica o potencial risco de perdas por escorrimento, sendo que as demais classes de gotas, atualmente, são pouco discutidas.



**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 14. Porcentagem do volume que compõe o espectro da ponta JSF 11002. (A) %V < 100; (B) 100 < %V < 200; (C) 200 < %V < 300; (D) 300 < %V < 400; (E) 400 < %V < 500; (F) 500 < %V < 600.

A ponta hidráulica JSF 11002, apresentou elevada porcentagem do volume de gotas com diâmetro de até 300 μm. Na seleção de uma ponta hidráulica, sempre que possível, deve-se considerar as classes de tamanhos de gotas que caracterizam o espectro. O parâmetro DMV revela o tamanho das gotas, entretanto, pode haver casos em que pontas de pulverização apresentam DMV semelhantes com porcentagem de volume pulverizado em classes distintas de diâmetros de gotas.

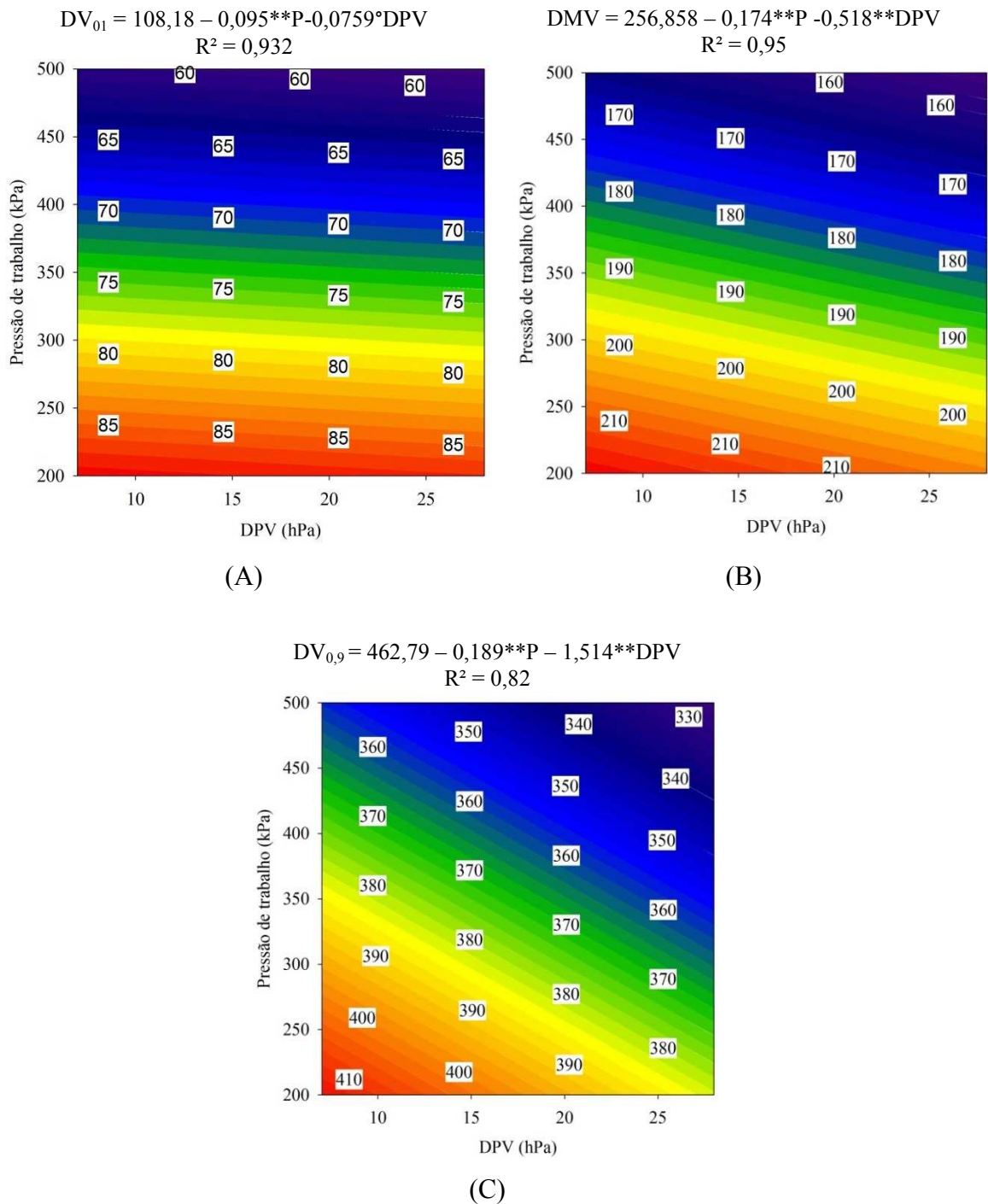
4.3. Efeito das condições psicrométricas do ar no espectro de gotas durante a aplicação de agrotóxicos

Os valores médios da temperatura e da umidade relativa do ar dos diferentes tratamentos encontram-se no Quadro 3.

Quadro 3. Médias da temperatura e umidade relativa do ar durante os ensaios com o sistema de resfriamento adiabático com nebulizadores de baixa pressão

DPV (hPa)	Temperatura média do ar (°C)	Umidade relativa média do ar (%)
7	22,4	67
14	25,9	55
21	28,1	41
28	31,8	39

O $DV_{0,1}$ foi reduzido com o incremento da pressão de trabalho. Na pressão de 200 kPa, o $DV_{0,1}$ apresentou valor de 93,98 μm , o qual foi reduzido para 68,39 μm quando a pressão aumentou para 500 kPa. Esse efeito da pressão na redução deste parâmetro também foram constatados por Bueno et al. (2013a) com pontas hidráulicas do tipo leque (AD IA 11002 e AD IA 11004) e por Cunha et al. (2007) para as pontas da série API 11002 e 11004 e para as pontas antideriva da série ADI 11002. Da mesma forma, verificou-se que à medida que se elevou o DPV houve redução deste parâmetro na ordem de 0,08 μm a cada 1 hPa incrementado no DPV. Alvarenga et al. (2014), avaliaram o efeito do DPV na deposição de líquido em alvos artificiais. Constataram redução de 89 para 73 μm no $DV_{0,1}$, com o aumento do déficit de pressão de vapor de 7,6 para 17,6 hPa, corroborando com este resultado (Figura 14). Similarmente ao encontrado para o $DV_{0,1}$ houve redução do DMV e $DV_{0,9}$ com o aumento da pressão de trabalho e do DPV (Figura 15). O espectro apresentou variação de gotas entre finas e médias.



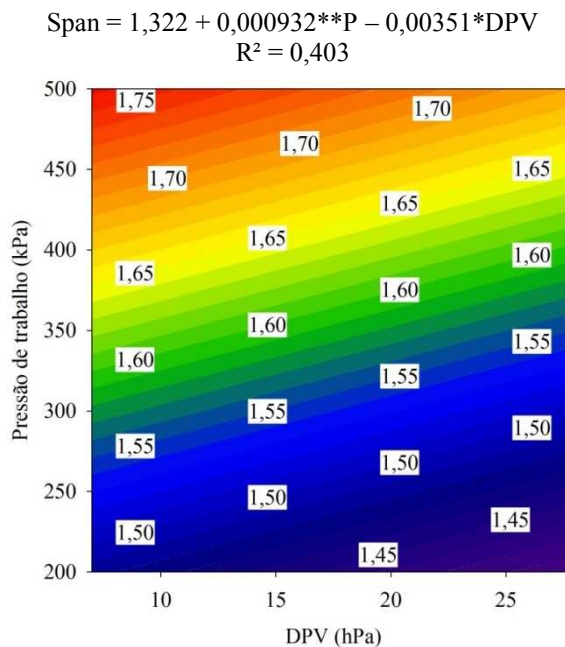
**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.; ⁰ Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

Figura 15. Efeito da pressão de trabalho e do DPV sobre os parâmetros (A) $DV_{0,1}$, (B) DMV e (C) $DV_{0,9}$, proporcionados pela ponta JSF 11002.

Os resultados demonstram o efeito do DPV nos parâmetros técnicos da pulverização $DV_{0,1}$; DMV e $DV_{0,9}$. Houve redução do diâmetro das gotas, com o incremento dos valores de DPV. As reduções do diâmetro das gotas demonstram o efeito de evaporação durante o percurso da gota entre a ponta e o alvo. Alvarenga et

al. (2014), também, constataram esta relação, com o sistema hidropneumático. Resultados opostos foram encontrados por Maciel (2013), que observou aumento no diâmetro das gotas com o aumento do DPV, entretanto, diferentemente deste trabalho, utilizou-se o sistema de fragmentação hidráulica sem a assistência de ar.

Ao correlacionar os parâmetros $DV_{0,1}$, $DV_{0,5}$ e $DV_{0,9}$, obtém-se o índice Span, que permite estimar o quão homogêneo está o espectro. Com o aumento da pressão, ocorreu aumento deste índice. Contudo, com o aumento do DPV, houve a tendência de sua redução (Figura 16). Isto se deve ao fato de que, com a extinção de gotas pelo efeito da evaporação, tende a estreitar a faixa do espectro, como relatado por Alvarenga et al. (2014).



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

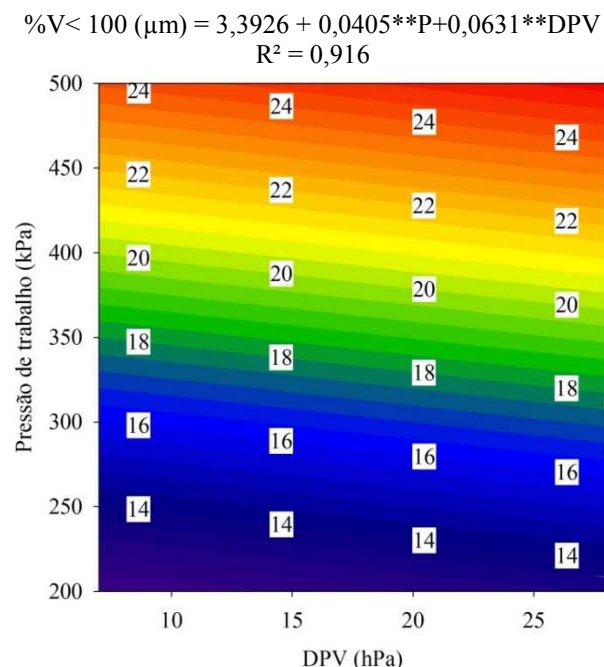
Figura 16. Estimativa do índice Span proporcionada pela ponta JSF 11002 sob diferentes pressões de trabalho e DPV.

Na aplicação de agrotóxico, o índice Span não deve ser desconsiderado visto que é um indicativo da dispersão do tamanho das gotas. Ou seja, o DMV estima o tamanho da gota utilizado e juntamente com o índice Span, verifica o grau da homogeneidade das gotas formadas. De certa forma, valores mais próximos de zero para o índice Span, caracterizam que o espectro está mais homogêneo. Os valores

obtidos para este índice podem ser considerados satisfatórios, visto que, na aplicação hidráulica, Minguela e Cunha (2010) recomendam valores inferiores a 1,4.

Similarmente, observou-se que os efeitos do DPV foram mais proeminentes a pressões mais baixas, ou seja, na pressão de 200 kPa, conforme aumentou a pressão de trabalho, o efeito do DPV foi amenizado.

Quanto à porcentagem do volume que compõe o espectro, com o aumento da pressão de trabalho, houve redução do diâmetro das gotas, aumentando-se assim a porcentagem do volume de gotas com diâmetro menor que 100 µm. Com o aumento do DPV ocorreu um pequeno aumento na porcentagem do volume desta classe (Figura 17).



**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 17. Efeito da pressão de trabalho e do DPV na porcentagem do volume de gotas com diâmetro menor que 100 µm proporcionado pela ponta hidráulica JSF 11002.

O efeito da pressão na porcentagem do volume de gotas com diâmetro menor que 100 µm ($\%V < 100 \mu\text{m}$) também foi detectado por Alvarenga et al. (2012) e Viana et al. (2010).

A porcentagem do volume de gotas com diâmetro menor que 100 µm é um dos melhores parâmetros para prever o potencial risco de deriva durante a

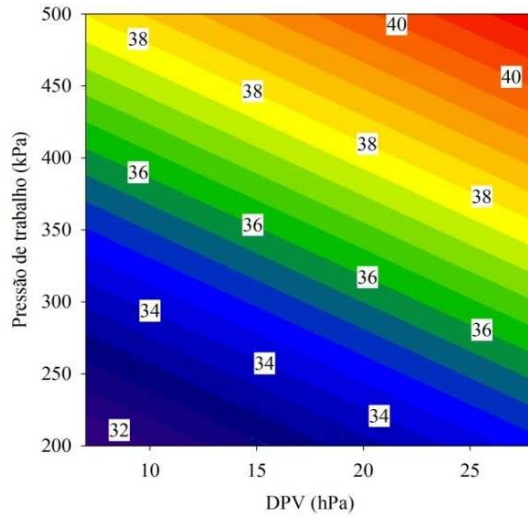
aplicação de agrotóxicos (ARVIDSSON et al., 2011; BUENO et al., 2013b). Não existe valor-padrão indicativo de risco de deriva ou de aplicação segura, entretanto, valores abaixo de 15% de volume de gotas com diâmetro inferior a 100 μm são mais adequados para aplicações seguras ambientalmente, com menor risco de deriva (BUENO et al., 2013b).

O aumento da porcentagem do volume de gotas com diâmetro menor do que 100 μm com o incremento do DPV pode elevar o risco de deriva. Arvidsson et al. (2011) estudaram as influências das condições meteorológicas na deriva de agrotóxicos. Verificaram aumento de 0,2% na deriva das gotas para cada grau centígrado ($^{\circ}\text{C}$) de incremento na temperatura do ar. Schampheleire et al. (2009), pesquisaram estratégias para a redução da deriva, e, constataram que altas temperaturas (26,2 $^{\circ}\text{C}$) e baixa umidade relativa (58,5%) aumentaram a deriva das gotas, em comparação com outras condições consideradas ideais, como temperatura de 14,7 $^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de 87,6%.

Na avaliação das demais porcentagens de volume de líquido que compõe o espectro das gotas, com o aumento da pressão de trabalho elevou a porcentagem de gotas que pertencem à classe com diâmetro de até 300 μm . Após esta classe de gotas, a pressão acarretou o efeito inverso, ou seja, reduziu a porcentagem do volume de gotas. Comportamento semelhante à pressão foi verificado para o DPV, à medida que elevou o DPV, verificou-se redução do diâmetro das gotas e alteração das classes que compõe o espectro (Figura 18).

$$100 < \%V < 200 = 26,189 + 0,0216**P + 0,147**DPV$$

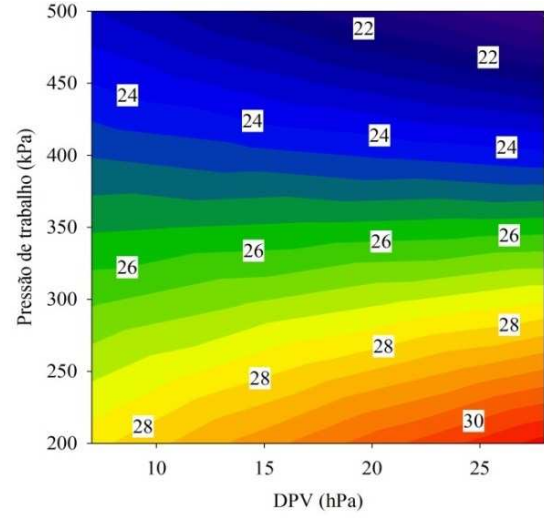
$$R^2 = 0,56$$



(A)

$$200 < \%V < 300 = 28,677 - 0,00923**P + 0,3264*DPV - 0,000894**(P*DPV)$$

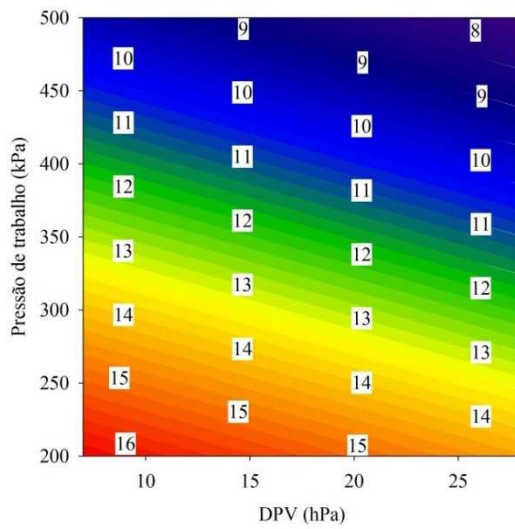
$$R^2 = 0,71$$



(B)

$$300 < \%V < 400 = 21,583 - 0,0228**P - 0,0924**DPV$$

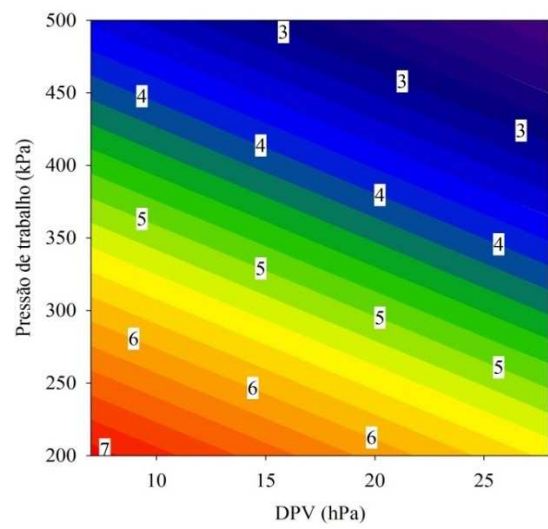
$$R^2 = 0,861$$



(C)

$$400 < \%V < 500 = 9,9694 - 0,0118**P - 0,0738**DPV$$

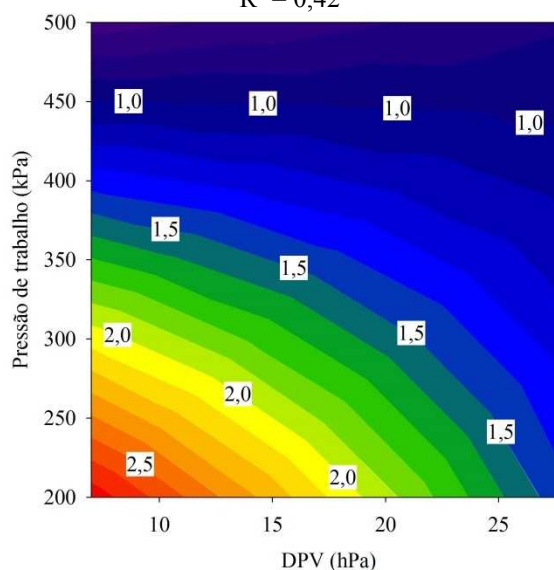
$$R^2 = 0,68$$



(D)

$$500 < \%V < 600 = 4,971 - 0,008797**P - 0,11376**DPV + 0,0002497**(P*DPV)$$

$$R^2 = 0,42$$



(E)

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

Figura 18. Estimativa da porcentagem do volume de líquido que compõe o espectro de gotas proporcionado pela ponta JSF 11002. (A) $100 < \%V < 200$; (B) $200 < \%V < 300$; (C) $300 < \%V < 400$; (D) $400 < \%V < 500$; (E) $500 < \%V < 600$ μm .

As condições psicrométricas do ar, no momento da aplicação, acarretam em perdas por evaporação e alteram imediatamente os parâmetros técnicos da pulverização. Existe um deslocamento de classes das respectivas porcentagens de volumes de líquido com o aumento do DPV. Conforme a temperatura do ar aumentou e a umidade relativa do ar diminuiu, aumentam-se as perdas por evaporação, acarretando a redução no diâmetro das gotas, fazendo com que ocorra a mudança de classe das gotas. Todas as gotas que compõe o espectro podem evaporar. As maiores gotas ($\%V > 300$ μm), ao evaporarem, passam a compor as classes das menores gotículas ($\%V < 300$ μm). Este fato também foi constatado por Maciel (2013), trabalhando com a ponta LD 11002.

Em pulverização de campo, observa-se pouca atenção quanto às condições meteorológicas do ar no momento da aplicação. Entretanto, é importante destacar que estas condições podem acarretar perdas da ordem de até 27% do volume aplicado (MACIEL, 2013). Conseqüentemente, há redução da eficácia de controle e no aumento da poluição do meio ambiente. Para contornar os obstáculos impostos

pelas condições meteorológicas, os agricultores aumentam o volume de pulverização. Essa medida, na prática, pode ser uma solução, mas na realidade, causa maiores perdas de agrotóxicos para o meio ambiente, aumenta os resíduos nos alimentos e custo de produção e reduz a capacidade operacional dos equipamentos de pulverização.

4.4. Estimativas de perdas por evaporação em pulverizadores com assistência de ar na barra

O potencial máximo de perdas por evaporação, chegou próximo de 40% do volume de líquido aplicado, quando se realiza a pulverização com DPV de 35 hPa (Figura 19).

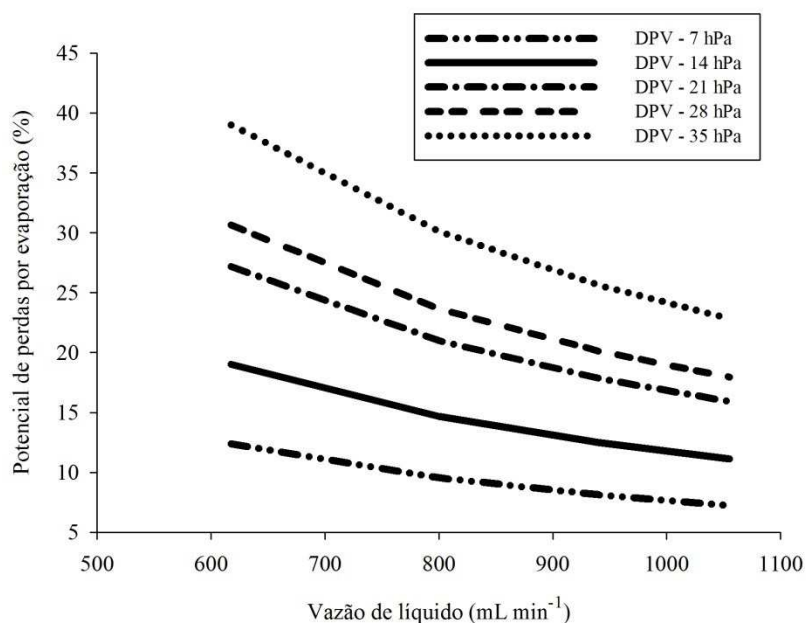


Figura 19. Potencial de perdas por evaporação na aplicação de agrotóxicos com assistência de ar na barra para uma vazão de ar de 30,15 m³ min⁻¹.

O potencial de evaporação de líquido é afetado pela vazão de ar do ventilador e pelas condições psicrométricas do ar. Para uma determinada condição de temperatura e umidade relativa do ar, a taxa de evaporação é fixa, ou seja, para a condição de menor DPV (7 hPa), a taxa de evaporação é da ordem de 1,27 g s⁻¹. Com o aumento do DPV, essa taxa é elevada a 4,01 g s⁻¹. Em uma avaliação inicial, a

concepção é que a evaporação é reduzida com o aumento da vazão de líquido. Entretanto, esta taxa não é alterada e, somente, em termos percentuais é reduzida, visto que aumentou a quantidade de líquido pulverizado.

Durante a aplicação de agrotóxicos, a temperatura e a umidade relativa do ar afetam a taxa de evaporação das gotas, opiniões semelhantes foram expressadas por Donkersley e Nuyttens (2011). Chaim et al. (1999), avaliaram o potencial de perdas na cultura do feijão e tomate, e constataram que as perdas variaram entre 44 e 88%, dependendo do porte da cultura. Estas perdas também foram ocasionadas pela influência do vento, acarretando o fenômeno da deriva.

A correta aplicação de agrotóxico é uma atividade complexa, uma vez que envolve as características da praga e/ou doença, a seleção do produto a ser aplicado, as características, calibração e regulagem das máquinas, a habilidade do operador, bem como as condições meteorológicas reinantes no momento da aplicação. Levando-se em consideração todos esses fatores, é possível lograr uma boa aplicação.

Apesar de se conhecer os parâmetros que afetam a qualidade da pulverização, muitas vezes tem sido ignorado alguns deles. Alvarenga e Cunha (2010), em um projeto de inspeção periódica de pulverizadores, constataram que em 70% dos casos o fator meteorológico não é considerado durante uma pulverização.

Para contornar os problemas advindos das condições meteorológicas do ar durante as pulverizações, recomenda-se adequar o tamanho das gotas pulverizadas no momento da aplicação. Em condições psicrométricas extremas, deve-se aumentar o diâmetro das gotas pulverizadas, para reduzir as perdas por evaporação. Entretanto, se realizado de maneira incorreta, aumentam-se as chances de perdas por escorrimento, resíduo nos alimentos, contaminação ambiental e do operador.

4.5. Desenvolvimento de um sistema de resfriamento adiabático para pulverizadores com assistência de ar

4.5.1. Nebulizadores de baixa pressão com ajuste da quantidade de água aplicada pela pressão de trabalho

O resfriamento adiabático por baixa pressão é caracterizado por trabalhar a pressões entre 300 e 410 kPa com gotas de tamanho entre 50 e 100 μm .

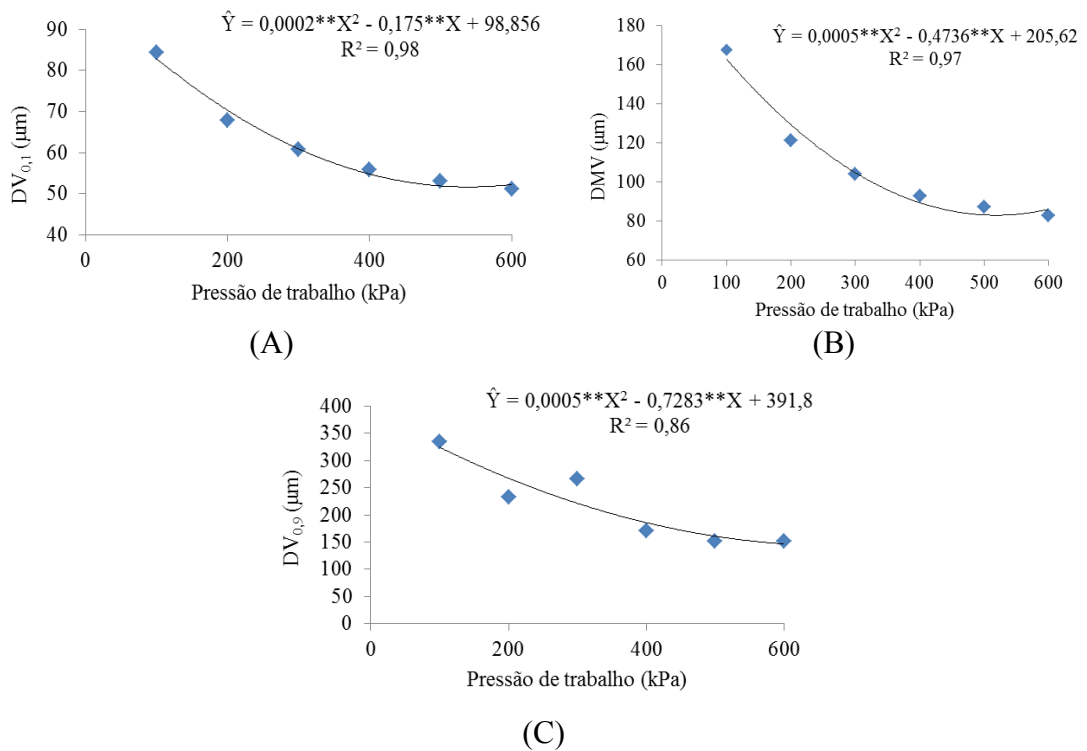
Durante os ensaios com os nebulizadores, levando-se em conta a vazão de líquido, observou-se que a vazão foi dependente da pressão de trabalho (Quadro 4).

Quadro 4. Vazão de líquido dos nebulizadores CoolNet Pro™ em diferentes condições operacionais

Pressão de trabalho (kPa)	Vazão de líquido (L min^{-1})
100	0,082
200	0,104
300	0,126
400	0,146
500	0,159
600	0,176
700	0,190

A determinação da vazão de líquido proporcionado pelos nebulizadores é importante em projetos de resfriamento adiabáticos, principalmente para determinar o número de nebulizadores ou a pressão de trabalho.

Na caracterização dos nebulizadores, quanto ao espectro de gotas, constatou-se comportamento semelhante às pontas hidráulicas de pulverização. Com o aumento da pressão de trabalho ocorreu redução no diâmetro das gotas. Conseqüentemente há redução em todos os parâmetros avaliados, como $DV_{0,1}$; $DV_{0,5}$, e $DV_{0,9}$. (Figura 20). Quanto ao índice Span, não houve uma relação clara entre esse parâmetro e a pressão de trabalho. Logo, não ocorreu um ajuste de um modelo de regressão adequado. Entretanto, o máximo valor deste índice foi de 1,48, o que demonstra alto grau de homogeneidade das gotas.

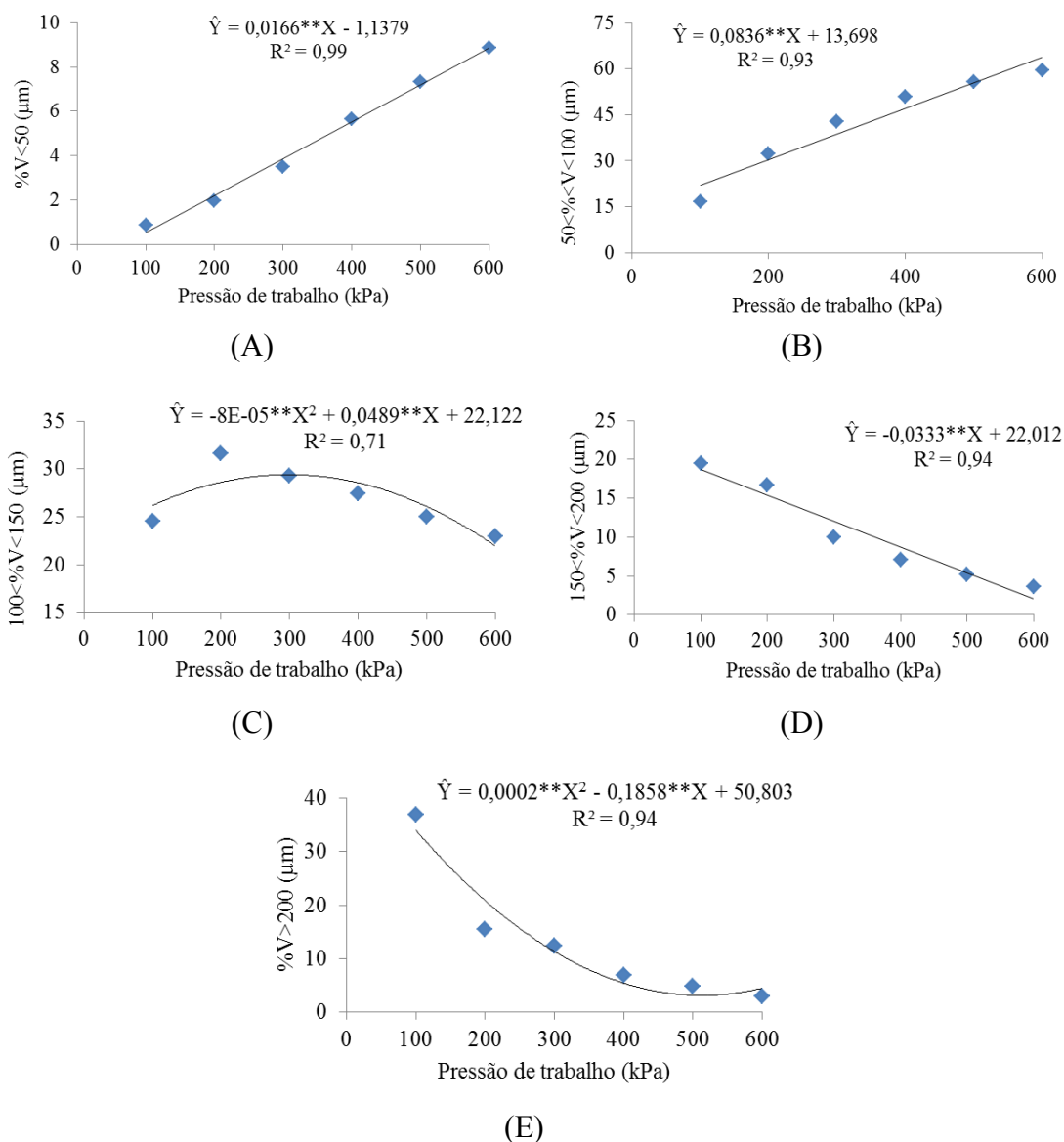


**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 20. Espectro de gotas proporcionado pelo nebulizador CoolNet ProTM em diferentes condições operacionais.

No resfriamento adiabático, o diâmetro da gota também é fator importante a ser observado, uma vez que, um maior número de gotas com diâmetro pequeno aumenta a evaporação (ABREU et. al., 1999). Isso ocorre porque, em um mesmo volume de água, gotas pequenas possuem maior área de contato e aumenta a troca de calor sensível com o ar a ser resfriado em comparação às gotas de maior diâmetro. Perissinotto et al. (2007) relataram que o sistema “*fogging*” é mais eficiente no resfriamento adiabático, em relação ao sistemas “*misting*”, devido o menor diâmetro das gotas.

Na avaliação da porcentagem do volume que compõe o espectro, os nebulizadores aumentaram a porcentagem do volume correspondente a gotas com diâmetro menor que 50 μm e reduziram a porcentagem do volume maior que 200 μm , com o aumento da pressão de trabalho (Figura 21).



**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 21. Porcentagem do volume que compõe classes do espectro de gotas proporcionados pelo nebulizador CoolNet ProTM em diferentes condições operacionais. (A) %V<50; (B) 50<%V<100; (C) 100<%V<150; (D) 150<%V<200; (E) %V>200 μm.

De acordo com o tamanho de gotas obtido pelos nebulizadores, operar com elevadas pressões de trabalho, há a tendência de se elevar a eficiência de resfriamento, pois reduz o diâmetro das gotas.

Yu et al. (2013) observaram que gotas de até 35 μm proporcionaram incremento de até 90% no desempenho de resfriamento, comparado com gotas com diâmetros entre 45 e 55 μm.

Na avaliação do potencial uso destes nebulizadores no resfriamento adiabático, as condições psicrométricas do ar ambiente, apresentaram temperatura entre 20,8 e 40,1 °C e umidade relativa entre 74 e 29 % (Quadro 5). No presente ensaio, definiu o ponto de umidade relativa de 80%, visto que nesta condição há otimização no uso da água para o resfriamento e, sob esta condição, o ar apresenta baixo potencial evaporativo. A quantidade de água necessária para realizar o resfriamento, até a umidade relativa de 80% variou entre 0,01336 e 0,2196 L min⁻¹, dependendo das condições psicrométricas do ar (Quadro 5).

Quadro 5. Quantidade média de líquido requerido para o umedecimento do ar (80%) em diferentes condições psicrométricas

T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)	Q _{H2O} (L min ⁻¹)
20,8	74	6,25	0,013
24,5	59	12,35	0,056
29,7	45	22,63	0,112
35,2	35	36,90	0,171
40,1	29	52,35	0,220

Sob condições psicrométricas do ar caracterizado por baixos valores de DPV a quantidade de água a ser aplicada para o resfriamento é mínima (0,013 L min⁻¹). Sempre que possível, a quantidade previamente calculada foi aplicada. Entretanto, como a quantidade de água foi ajustada de acordo com a pressão de trabalho, nas condições de DPV de 6,25 hPa, os nebulizadores operaram na pressão mínima de trabalho de 100 kPa, com vazão acima do limite para chegar a 80% de umidade relativa (Quadro 6).

Quadro 6. Condições operacionais e quantidade de água aplicada no sistema de resfriamento adiabático sob baixa pressão

DPV (hPa)	Pressão de trabalho (kPa)	Quantidade de água (L min ⁻¹)
6,25	100	0,082
12,35	100	0,082
22,6	400	0,146
36,90	600	0,176
52,35	700	0,190

Sob condições de alto DPV, a quantidade de água a ser aplicada foi superior à máxima pressão de trabalho. Neste caso, para aplicar a quantidade de líquido previamente calculado, poderia utilizar-se dois nebulizadores a pressão intermediária. Entretanto, em ensaios preliminares, ao utilizar-se dois nebulizadores, agravou-se o problema de escorrimento de líquido ao longo da tubulação. Com o uso de apenas um nebulizador esse problema foi amenizado. Por isso, optou-se por utilizar apenas um nebulizador.

Na avaliação do sistema de resfriamento evaporativo por meio de nebulizadores sob baixa pressão, constatou-se redução do DPV na ordem de até 21,94 hPa, e a eficiência do sistema foi dependente das condições iniciais do ambiente (Quadro 7).

Quadro 7. Valores médios das condições psicrométricas do ar antes e após o resfriamento com nebulizadores operando sob baixa pressão

Antes do resfriamento			Após o resfriamento				Quantidade de água não evaporada (L min ⁻¹)
T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)	T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)	ξ (%)	
20,8	74	6,26	19,8	83	3,86**	34,3	0,057
24,5	60	12,36	23,3	71	8,38**	44,2	0,048
29,7	46	22,60	25,9	68	10,64**	44,2	0,068
35,2	35	36,92	29,9	59	17,38**	53,4	0,082
40,1	29	52,28	35,3	47	30,34**	58,9	0,072

**Significativo pelo teste t a 1% de probabilidade. Vazão de ar de 35,15 m³ s⁻¹.

Nas condições em que o ar inicial apresentou baixo DPV, a porcentagem do líquido evaporado foi de 34,30%. Em contraste, para condições extremas foi de 58,86%. Wang et al. (2008) relatam que a eficiência dos sistemas de resfriamento evaporativo é dependente, tanto da temperatura, como da umidade do ar. Quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar, mais eficiente é o sistema de resfriamento adiabático, explicando o presente resultado. Isto se deve ao fato de que, no resfriamento adiabático, a evaporação da água presente em uma superfície acarreta em troca de calor e essa superfície é resfriada, pois, cada grama de água evaporada retira 590 calorias em forma de calor sensível. Esse processo ocorre até o ponto de saturação do ar. Ou seja, quanto mais próximo do ponto de saturação do ar, menos eficiente será a troca, logo a taxa de evaporação.

Observou-se que, em todas as situações, houve umedecimento excessivo ao longo do túnel de vento e acarretou em escorrimento de líquido. Em alguns casos, como por exemplo, na criação de animais, o sistema adiabático tem por finalidade o molhamento da superfície do animal, e por meio da ventilação forçada realiza-se a troca de calor, com redução da temperatura do animal (MATARAZZO et al., 2006). Na aplicação de agrotóxico, o escorrimento de líquido é um agravante para o sistema de resfriamento adiabático, visto que pode “lavar” o produto aplicado. Neste caso, o uso deste sistema reduziria as perdas por evaporação, mas aumentam-se as perdas por escorrimento. Stanislavski (2012) avaliou um sistema de resfriamento adiabático na aplicação de agrotóxicos. Utilizou-se nebulizadores de baixa pressão, e também constatou o escorrimento de líquido, corroborando com o presente resultado.

Para contornar estes problemas, uma solução seria adicionar sistemas de coleta de água ao longo do duto. O líquido escorrido retornaria para o depósito de água do sistema. Outra alternativa, é procurar outros métodos de resfriamento que não apresente esse problema.

4.5.2. Resfriamento adiabático com nebulizadores sob baixa pressão e alteração do volume de líquido através um sistema intermitente automatizado

O sistema de aplicação intermitente é pouco usual no resfriamento adiabático. Comumente controla-se a quantidade de água pelo número de nebulizadores. Desenvolveu-se este sistema, de modo a produzir gotas de menor diâmetro possível. Os nebulizadores operaram à máxima pressão de trabalho. Como a vazão de líquido é diretamente proporcional à pressão, a alternativa para realizar o controle da quantidade de líquido é por meio de pulverizações intermitentes.

Para a operação da válvula solenoide, esta deve trabalhar com chaves de programação com intervalo de tempo (ligado e desligado) de 1000/1000; 1000/2000; e 1000/5500 milissegundos, para as aberturas de 75, 50 e 25%, respectivamente. Nessas condições, a válvula trabalha a uma frequência de 0,53; 0,37 e 0,17 Hz. Este ajuste foi realizado com base nas recomendações de Perdignes et al. (2008), que relatam que em um sistema intermitente é mais eficiente aumentar a frequência de pulsos do que o tempo de pulverização por ciclo.

No presente trabalho, esse intervalo de tempo foi ajustado de modo que a frequência fosse a máxima possível, desde que, a cada oscilação, o intervalo de tempo fosse o suficiente para acarretar em corte do fluxo de líquido.

No ensaio da vazão de líquido, quanto maior a relação de tempo ligado e desligado, menor foi a quantidade de líquido aplicado (Quadro 8).

Quadro 8. Médias da vazão de líquido pulverizado com uso do sistema intermitente

Abertura da válvula (%)	Intervalo de tempo (ligado/desligado)	Vazão de líquido (L min ⁻¹)
100	-	0,176
75	1000/1000	0,126
50	1000/2000	0,087
25	1000/5500	0,040

Teoricamente, com base no dimensionamento realizado para alcançar a condição hipotética de umidade relativa de 80% na sua respectiva temperatura, a válvula solenoide deve permanecer aberta 25% do tempo para o DPV de aproximadamente 8 hPa. Para o DPV de 22; 35 e 53 hPa, o tempo passa a ser de 75, 100 e 100%, respectivamente. Entretanto, em ensaios realizados sob estas condições foi constatado o escorrimento de líquido ao longo do túnel de vento.

Por isso, realizaram-se os ensaios sob diferentes condições ambientais e em todas as frequências de pulsos (Quadro 9).

Quadro 9. Valores médios das condições psicrométricas do ar e da quantidade de líquido aplicado com o uso do sistema intermitente

Abertura (%)	DPV (hPa)	QH ₂ O (L min ⁻¹)*	Quantidade de água aplicado (L min ⁻¹)
25	8,3	0,026	0,040
50	8,9	0,030	0,087
75	7,9	0,021	0,126
100	7,98	0,023	0,176
25	22,9	0,110	0,040
50	23,5	0,113	0,087
75	22,9	0,110	0,126
100	22,6	0,109	0,176
25	36,4	0,167	0,040
50	36,73	0,170	0,087
75	34,95	0,179	0,126
100	36,05	0,167	0,176
25	54,78	0,235	0,040
50	53,35	0,228	0,087
75	52,13	0,224	0,126
100	52,85	0,228	0,176

*Quantidade de líquido para se obter umedecimento do ar de até 80%; Vazão de ar de 35,15 m³ s⁻¹.

Na avaliação do sistema de resfriamento adiabático, observou-se redução na temperatura do ar de até 6,1 °C e incremento na umidade relativa de até 26% (Quadro 10).

Quadro 10. Média das condições psicrométricas do ar antes e após o sistema de resfriamento adiabático intermitente

Abertura (%)	Antes do resfriamento			Após o resfriamento			Quantidade de água não evaporada (L min ⁻¹)	ξ (%)
	T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)	T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)		
25	22,8	70	8,30	21,3	81	4,92**	0,03	31,3
50	23,2	69	8,90	20,9	84	3,76**	0,05	46,3
75	22,8	72	7,90	20,5	88	2,9**	0,07	44,6
100	22,7	71	7,98	20,2	89	2,62**	0,08	52,6
25	30,2	47	22,90	28,5	54	17,95**	0,02	46,3
50	30,5	46	23,50	27,2	64	13,08**	0,04	54,0
75	30,1	46	22,90	26,1	67	11,35**	0,06	54,8
100	30,0	47	22,60	25,3	73	8,7**	0,08	55,9
25	35,2	36	36,40	33,7	40	31,25**	0,01	71,3
50	35,2	36	36,73	32,3	45	26,73**	0,03	65,8
75	34,7	37	34,95	30,4	53	20,45**	0,05	58,3
100	35,0	36	36,05	28,9	61	15,48**	0,07	59,2
25	40,5	27	54,78	39,3	30	50,03*	0,01	80,0
50	39,9	28	53,35	37,4	33	42,85**	0,03	63,8
75	39,7	28	52,13	35,7	38	36,08**	0,05	62,9
100	39,7	27	52,85	34,0	46	28,83**	0,06	64,8

**Significativo pelo teste t ao nível de 1% de probabilidade; *Significativo pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade; Vazão de ar de 35,15 m³ s⁻¹.

Para as condições do ar com baixo DPV, ou seja, menor que 10 hPa, a redução média na temperatura do ar foi de 1,5 °C quando a válvula operou na abertura de 25%. Já, operando a 100%, esta redução foi na ordem de 2,5 °C. Manhani (2011) e Alvarenga (2012) relatam que a condição ótima para aplicação de agrotóxicos é quando o DPV estiver abaixo de 10 hPa. Neste sentido, sob estas condições ambientais onde o potencial evaporativo do ar é baixo, recomenda-se operar a válvula na frequência mínima ou então não realizar o resfriamento do ar, pois, além do sistema de resfriamento promover pouca alteração do ar, existem os problemas de escoamento de água ao longo da tubulação.

Para as demais condições, quanto maior for a frequência dos pulsos da válvula solenoide, maior será a redução do DPV. Nas condições iniciais de 22; 36 e 52 hPa, e utilizando-se a abertura de 100%, os valores de DPV foram reduzidos para 8,7; 15,48 e 28,83 hPa, respectivamente. Alvarenga et al. (2013b) recomendam interromper a pulverização quando o DPV estiver acima de 30 hPa. Na ocorrência de

condições extremas como 36 e 52 hPa, o acionamento do sistema de resfriamento adiabático, reduziu estes valores, permitindo a aplicação.

Por outro lado, quanto maior for a frequência de trabalho, maior será o escoamento de líquido no túnel de vento. Considerando-se o efeito escoamento, em todas as condições ambientais, o escoamento foi amenizado quando a válvula operou com abertura de 25%. Porém, nesta frequência de trabalho, não é possível reduzir o DPV para proporcionar uma condição ambiental satisfatória de pulverização.

Com base nos limites impostos por Alvarenga et al. (2013b) quando as condições ambientais eram extremas e, associando-se ao nível de escoamento de líquido, recomenda-se operar o sistema intermitente com aberturas de 0; 25; 50 e 100% para os DPV de 8; 22; 36 e 52 hPa, respectivamente.

4.5.3 Resfriamento adiabático com o uso de placas de celulose

O resfriamento por meio de placas de celulose consiste na passagem do ar em um material umedecido, geralmente, feito de celulose.

Na caracterização dos nebulizadores Lurmark (modelo 1.0, Lurmark, New Brighton, EUA) a vazão média unitária de líquido foi de $0,92 \text{ L min}^{-1}$ à pressão de 300 kPa. O conjunto de três nebulizadores ligados sob a placa porosa aplicou em média $0,275 \text{ L min}^{-1}$. Quanto ao espectro de gotas, os parâmetros $DV_{0,1}$, $DV_{0,5}$ e $DV_{0,9}$ corresponderam à 66; 108 e 179 μm , respectivamente.

No uso do sistema de placas porosas, comumente, empregam-se canos de PVC perfurados (TILAHUN, 2010; SOARES et al., 2011; AHMED et al.; 2011). Utilizando-se este sistema, deve-se garantir o completo molhamento da superfície.

No desenvolvimento do sistema de resfriamento adiabático, empregando-se placas porosas, observou-se queda na velocidade do ar. Sem o uso do sistema de resfriamento a velocidade média obtida foi de $10,3 \text{ m s}^{-1}$, e com o uso da placa porosa, reduziu para $4,3 \text{ m s}^{-1}$, quando esta foi colocada a sota-vento do ventilador. Em contraste, esta velocidade diminuiu para $6,0 \text{ m s}^{-1}$, quando posicionado a barlavento do mesmo. Esta redução da velocidade do ar se deve a perda de carga do fluido, ou seja, perda de energia dinâmica localizada diante do atrito do fluido (ar) com a placa porosa.

Quanto ao potencial uso do sistema de resfriamento adiabático, com as placas porosas posicionadas a barlavento do sistema de ventilação, este possibilitou redução de até 2,1 °C na temperatura do ar e incremento de até 12% na umidade relativa do ar (Quadro 11).

Quadro 11. Valores médios das condições psicrométricas do ar, com o uso do sistema de resfriamento adiabático empregando-se placas porosas, posicionadas a barlavento do sistema de ventilação

Antes do Resfriamento			Após o resfriamento		
T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)	T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)
22,1	73	7,3	21,6	77	5,8**
24,3	63	11,3	23,3	73	7,9**
27,4	54	16,7	25,8	64	11,8**
28,7	51	19,4	26,6	62	13,1**

**Significativo pelo teste t ao nível de significância de 1% de probabilidade. Vazão de ar de 35,15 m³ s⁻¹.

Já, com o sistema de placas porosas posicionadas a sota-vento do sistema de ventilação, a redução na temperatura do ar foi na ordem de até 5,5 °C e aumento na umidade relativa de até 9% (Quadro 12).

Quadro 12. Valores médios das condições psicrométricas do ar com o uso do sistema de resfriamento adiabático com placas porosas posicionadas a sota-vento do sistema de ventilação

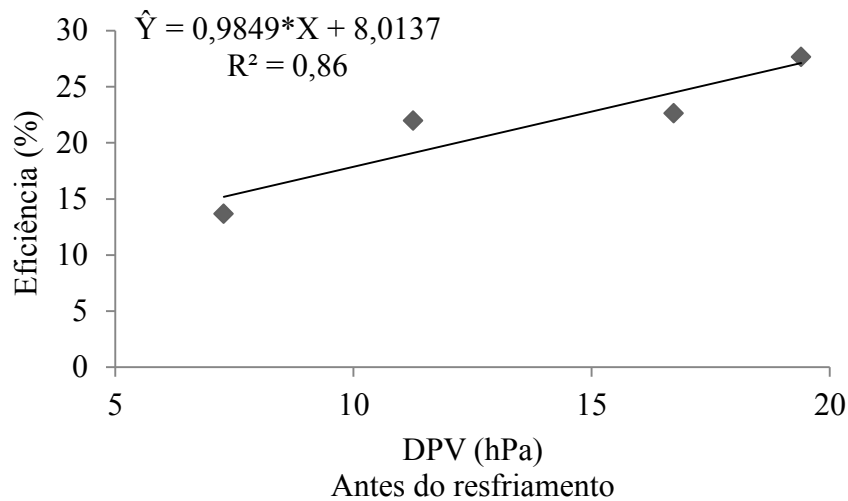
Antes do resfriamento			Após o resfriamento		
T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)	T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)
23,8	66	10,0	23,4	69	9,1**
31,3	44	25,5	29,6	49	21,0**
37,8	32	44,7	33,0	41	29,8**
41,9	26	60,4	36,4	36	39,1**

**Significativo pelo teste t ao nível de significância de 1% de probabilidade. Vazão de ar de 35,15 m³ s⁻¹.

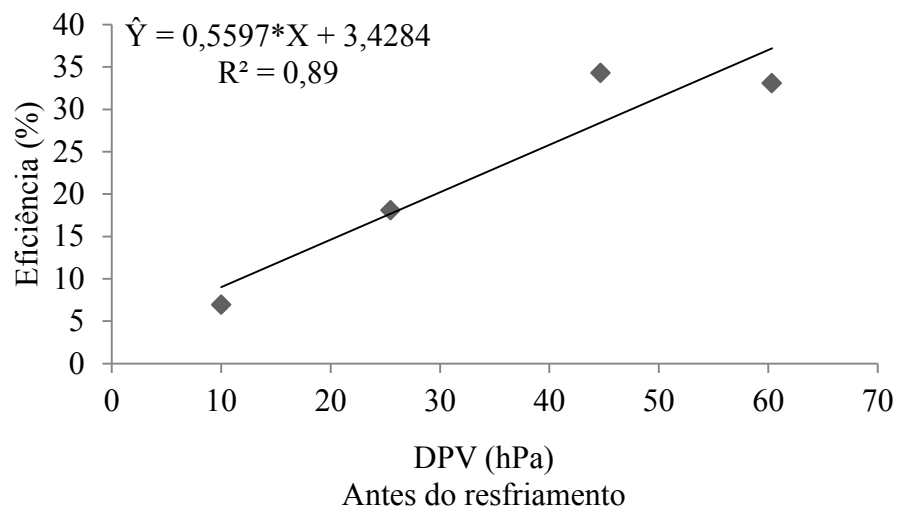
O emprego do sistema de resfriamento adiabático constituídos por placas porosas, instalados a sota-vento do ventilador, acarretou em menor temperatura e maior umidade relativa do ar comparada ao sistema com placas porosas posicionadas anteriormente ao sistema de ventilação. Este resultado pode ser atribuído à maior circulação do ar e às condições psicrométricas do ar mais severas, impostas nos tratamentos com as placas após o sistema de ventilação. Lertsatitthanakorn et al. (2006) afirmam que a eficiência de resfriamento do sistema por placas porosas é

afetada pelas dimensões do painel, taxa de fluxo do ar e condições externas de temperatura e umidade relativa do ar, corroborando com o presente resultado.

Quanto à eficiência de resfriamento do sistema, observou-se que foi dependente, principalmente, das condições ambientais externas ao túnel de ventilação (Figura 22).



(A)



(B)

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

Figura 22. Eficiência do resfriamento evaporativo com placas porosas, sendo posicionadas à barlavento (A) e sota-vento (B) do ventilador.

No presente trabalho, a máxima eficiência obtida foi de 34,3%, observada sob condições ambientais caracterizadas por temperaturas mais elevadas e valores de umidade relativa do ar mais baixos, como constatados por Dagtekin et al. (2009) e Chinenye (2011). Esta eficiência é considerada relativamente baixa, comparada a outras áreas de estudo. Chinenye (2011), avaliando diferentes sistemas de resfriamento adiabático para o acondicionamento pós-colheita, obteve eficiência entre 20 e 92%. Ahmed et al. (2011) avaliaram a eficiência de resfriamento proporcionado por diferentes painéis porosos e encontraram eficiência de até 90%. Steidle Neto e Zolnier (2010) em casa de vegetação relataram eficiência de até 81%.

A baixa eficiência do sistema de resfriamento se deve principalmente à velocidade do ar com que passa pelas placas de celulose. De acordo com as recomendações do fabricante, a velocidade recomendada é de 1 a 2 m s⁻¹, e que no presente ensaio foi de 4,3 e 6,0 m s⁻¹. Utilizando-se alta velocidade do ar, o tempo de contato entre o ar e a placa umedecido é reduzido, não resfriando o ar adequadamente (FRANCO et al., 2014). Visando melhorar o sistema de resfriamento, podem-se empregar placas de celulose com maior espessura, aumentando-se, assim, a resistência do ar e o tempo de contato entre este e a placa.

Nota-se que o sistema de resfriamento adiabático, constituídos por placas porosas para a aplicação de agrotóxicos, tem a vantagem de não acarretar o escorrimento de líquido ao longo da tubulação, amenizando os problemas encontrados com o uso de nebulizadores operando sob baixa pressão. Como desvantagem, tem-se a baixa eficiência de resfriamento e a redução na velocidade do ar.

Com base nos limites impostos por Alvarenga et al. (2013b), e associando-se a eficiência do sistema, nas condições ambientes impostas no presente trabalho, justifica-se o uso de placas porosas instaladas sota-vento do sistema de ventilação, e com DPV limite de aproximadamente 45 hPa, o qual é reduzido para menos de 30 hPa.

4.5.4. Resfriamento adiabático com o uso de nebulizadores de alta pressão e alteração do volume por meio do número de nebulizadores

O resfriamento a alta pressão comumente chamado de “*fogging*” é caracterizado por utilizar gotas entre 2 a 60 μm .

No ensaio dos nebulizadores, a vazão de líquido foi alterada conforme a variação do número de nebulizadores instalados (Quadro 13).

Quadro 13. Valores médios da vazão de líquido proporcionados pelos nebulizadores operados sob alta pressão

Número de Nebulizadores	Vazão de Líquido (L min^{-1})
1	0,040
2	0,070
3	0,108
4	0,140
5	0,175
6	0,210

A vazão de líquido proporcionada pela adição de nebulizadores operando sob alta pressão, é de suma importância para determinação da quantidade de líquido a ser aplicada no sistema de resfriamento.

Quanto ao espectro de gotas, proporcionado pelos nebulizadores sob alta pressão, verificou-se que os diâmetros das gotas foram reduzidos e ocorreu o aumento da porcentagem de gotas com diâmetros abaixo de 100 μm (Quadro 14).

Quadro 14. Espectro de gotas proporcionado pelo nebulizador sob alta pressão

Parâmetros	Diâmetros (μm)
DV _{0,1}	25,22
DMV	46,33
DV _{0,9}	84,16
%V<50	57,32
50<%V<100	36,67
%V>100	6,01

Constatou-se que os nebulizadores operando sob alta pressão apresentaram alto volume de gotas com diâmetro abaixo de 100 μm , que neste caso apresenta a vantagem de favorecer a evaporação das pequenas gotículas e conseqüentemente, o resfriamento adiabático.

Durante os ensaios, a média da temperatura do ar, e umidade relativa, para os diferentes tratamentos, bem como o número de nebulizadores empregados para o resfriamento encontra-se no Quadro 15.

Quadro 15. Valores médios das condições psicrométricas do ar antes do resfriamento e quantidade de água necessária e aplicada para o resfriamento à alta pressão

T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)	Q H ₂ O (L min ⁻¹) *	Número de neb.	Quantidade de água aplicada (L min ⁻¹)
22,9	67	9,20	0,034	1	0,038
29,4	43	23,35	0,121	3	0,108
34,8	33	37,38	0,180	5	0,175
39,3	26	52,78	0,235	6	0,210

*Quantidade de líquido para se obter umedecimento do ar de até 80%

Na avaliação do sistema de resfriamento, observou redução na temperatura do ar de até 6,7 °C e incremento na umidade relativa de até 27% (Quadro 16).

Quadro 16. Condições psicrométricas do ar após o resfriamento adiabático com nebulizadores de alta pressão

Antes do resfriamento			Após o resfriamento		
T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)	T (°C)	UR (%)	DPV (hPa)
22,9	67	9,20	21,6	78	5,80**
29,4	43	23,35	26,1	63	12,55**
34,8	33	37,38	28,5	60	15,63**
39,3	23	52,78	32,6	51	24,10**

** Significativo pelo teste t a 1% de probabilidade. Vazão de ar de 35,15 m³ s⁻¹.

O sistema de resfriamento adiabático implementado, com o uso de nebulizadores sob alta pressão, apresentou redução do DPV e não apresentou escorrimento de líquido ao longo da tubulação. Em condições psicrométricas do ar extremas, caracterizados por altos valores de DPV, houve redução de até 28,7 hPa no DPV. Em outras áreas de estudos, como em casa de vegetação, diversas pesquisas têm demonstrado resultados satisfatórios com o uso dos sistemas de alta pressão. Katsoulas et al. (2006) obtiveram redução do DPV de até 14 hPa, corroborando com o presente resultado. López et al. (2012) observaram redução de até 10,4 °C no interior da instalação empregando o sistema de resfriamento *fogging*.

A eficiência do sistema de resfriamento, foi de 69,5; 48,6; 61,2; e 50,0%, para os valores iniciais de DPV de 9,2; 23,4; 37,4 e 52,8 hPa, respectivamente. Os sistemas de resfriamento adiabático tendem a ser mais eficientes em condições caracterizadas por baixa umidade relativa do ar. No presente trabalho, a quantidade de líquido foi ajustada de acordo com o número de nebulizadores, havendo pequena diferença na quantidade de líquido pulverizado e o valor previamente calculado para as condições de umedecimento até o limite de umidade relativa de 80% ($\rho 80\%$). Na condição de baixo DPV com o uso de apenas um nebulizador, aplicou-se a quantidade de líquido $0,004 \text{ L min}^{-1}$ superior ao previamente determinado ($\rho 80\%$) e, na condição extrema, com o uso de 6 nebulizadores, ocorreu o inverso, ou seja, aplicou-se $0,025 \text{ L min}^{-1}$ da quantidade de líquido inferior ao estabelecido, explicando a eficiência de resfriamento obtida.

Analisando o potencial de redução de evaporação do ar, entre os sistemas de resfriamento adiabáticos avaliados, considerando-se ainda, o uso do sistema intermitente nas aberturas 0; 25; 50 e 100% para os DPV de 8; 22; 36 e 52 hPa, respectivamente, o que apresentou-se ser o mais promissor é o uso dos sistemas de alta pressão (Figura 23), pois, além de reduzir significativamente o DPV do ar não apresentou escorrimento de líquido ao longo da tubulação, mesmo em condições iniciais com baixo DPV e, diferentemente das placas de celulose, não alterou a velocidade do ar proporcionado pelo ventilador.

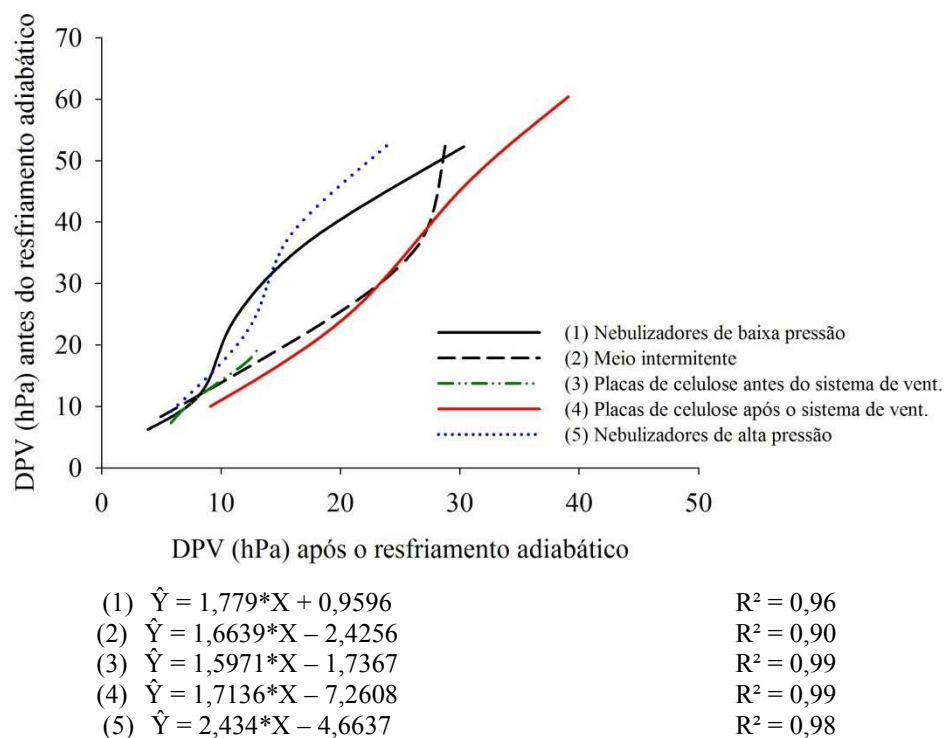


Figura 23. Análise conjunta do potencial de redução do DPV dos diferentes sistemas de resfriamentos adiabáticos testados.

Ainda, considerando os limites impostos por Alvarenga et al (2013b) de 30 hPa, até mesmo na pior condição psicrométrica do ar, com DPV de 58,8 hPa, utilizando-se o sistema de alta pressão possibilita realizar a aplicação de agrotóxico, uma vez que foi reduzido para 24,1 hPa. Observa-se como vantagem do uso do sistema de resfriamento, a redução de perdas de agrotóxicos por evaporação e ainda, aumenta o rendimento operacional, uma vez que, aumenta a “janela” estabelecidas pelas condições ambientais adequadas, para realizar a correta pulverização.

Para empregar este sistema em pulverizadores com assistência de ar na barra, necessita-se um circuito hidráulico, um reservatório de água, uma bomba de alta pressão, além de filtros e nebulizadores. De acordo com López et al. (2012), em casa de vegetação, este sistema acarreta em alto gasto de energia demandadas pelas bombas de alta pressão, requerendo potência entre 7,2 a 8,9 kW para acioná-las. Em um conjunto trator-pulverizador, esta potência é passível de ser adicionada, via tomada de potência, sem acarretar em danos no desempenho do conjunto mecanizado.

4.6. Efeito do sistema de resfriamento adiabático nos parâmetros técnicos da pulverização

Durante a condução do experimento, as condições psicrométricas do ar, referentes aos diferentes tratamentos, sem o uso do sistema de resfriamento adiabático, encontra-se no Quadro 17.

Quadro 17. Valores médios das condições psicrométricas do ar, sem o uso do sistema de resfriamento adiabático durante as avaliações do espectro de gotas

Tratamentos - DPV (hPa)	T (°C)	UR (%)
9	22,3	67
17	26,7	52
25	30,8	44
32	33,8	38

O efeito do sistema de resfriamento adiabático nas condições psicrométricas do ar podem ser observadas no Quadro 18.

Quadro 18. Valores médios das condições psicrométricas do ar com o uso do sistema de resfriamento adiabático durante as avaliações do espectro de gotas

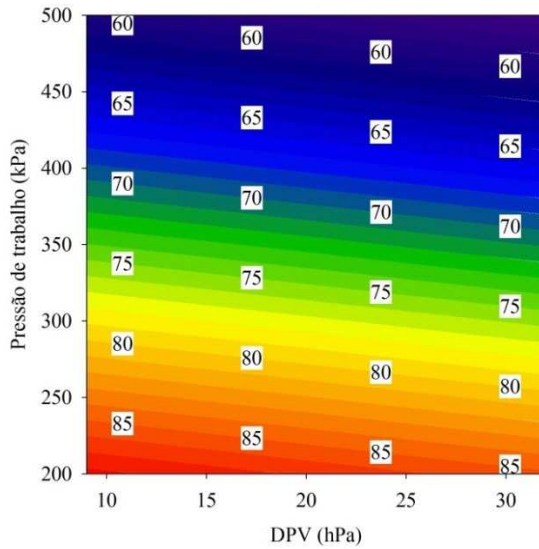
Tratamentos - DPV (hPa)	Sem resfriamento		Após o resfriamento		
	T(°C)	UR(%)	T(°C)	UR(%)	DPV (hPa)
9	22,2	68	21,4	79	5,43**
17	27,0	51	24,1	71	8,8**
25	30,6	44	25,6	70	9,7**
32	33,7	38	26,3	64	12,3**

**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t. Vazão de ar de 35,15 m³ s⁻¹.

Para avaliação do efeito do sistema de resfriamento adiabático nos parâmetros técnicos da pulverização, foi realizado o desdobramento das interações entre os fatores. No desdobramento do sistema de resfriamento adiabático (Ligado/Desligado), correspondentes às diferentes pressões de trabalho e condições de DPV, analisaram-se os dados por meio da regressão linear múltipla. Verificou-se que, na ausência do resfriamento adiabático, à medida que se aumentou a pressão de trabalho e o DPV houve a tendência de redução dos diâmetros das gotas pulverizadas (Figura 24).

$$DV_{0,1} = 108,7022 - 0,0955**P - 0,1376*DPV$$

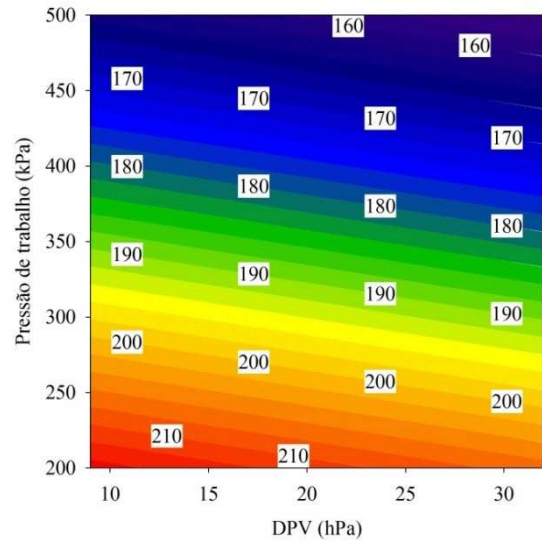
$$R^2 = 0,82$$



(A)

$$DMV = 252,51 - 0,172**P - 0,350**DPV$$

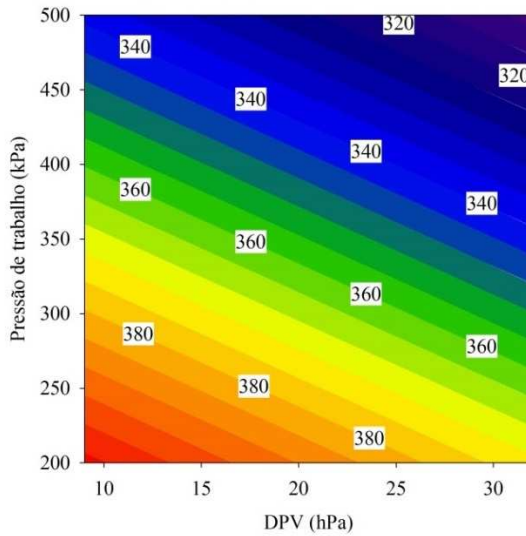
$$R^2 = 0,82$$



(B)

$$DV_{0,9} = 454,34 - 0,209**P - 1,233**DPV$$

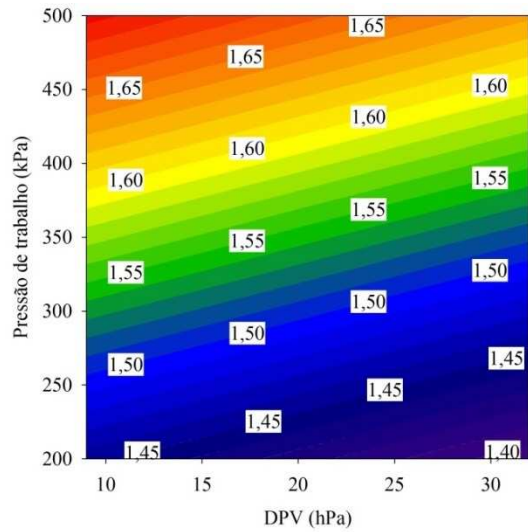
$$R^2 = 0,65$$



(C)

$$\text{Span} = 1,3189 + 0,0008**P - 0,0027**DPV$$

$$R^2 = 0,51$$



(D)

**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 24. Estimativa do tamanho de gotas proporcionado pela ponta JSF 11002 sem o uso do sistema de resfriamento adiabático. (A) $DV_{0,1}$; (B) DMV; (C) $DV_{0,9}$; (D) Índice Span.

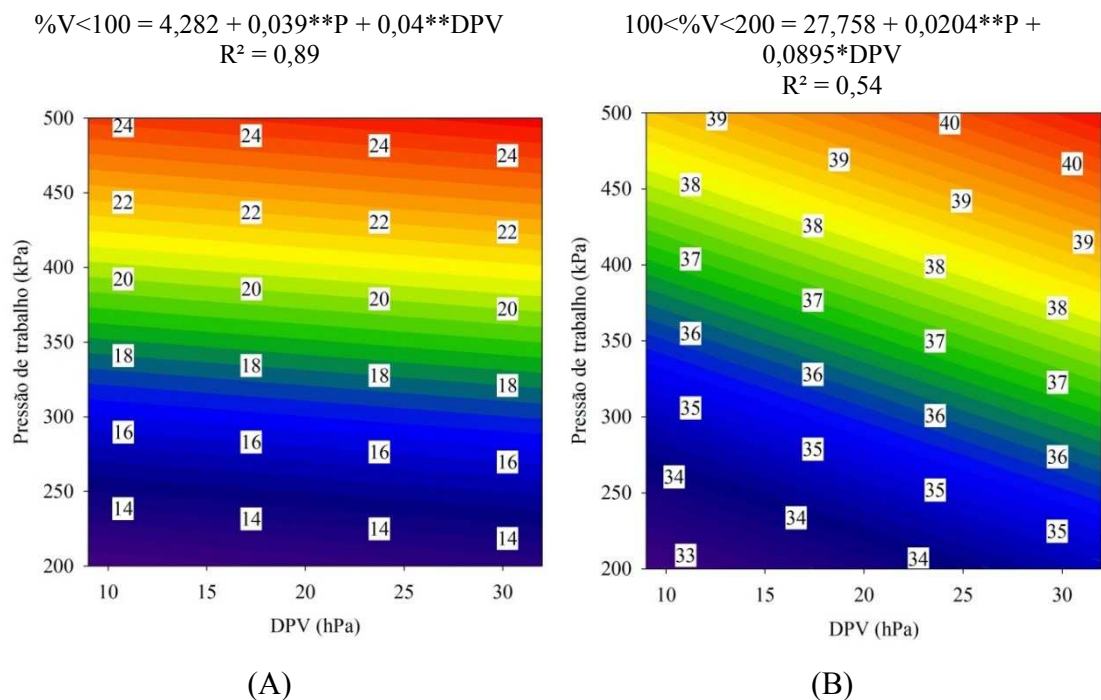
O resultado deste trabalho demonstra que houve evaporação das gotas pulverizadas e o efeito de absorção de umidade pelo ar atuou em todas as classes de

tamanho de gotas, reduzindo tanto o $DV_{0,1}$, como também o DMV e $DV_{0,9}$. Resultados semelhantes foram obtidos por Thomson e Lyn (2011).

Conforme ocorrem as perdas por evaporação, há tendência do estreitamento da amplitude do espectro de gotas, reduzindo, neste caso, o valor do índice Span. De acordo com Ozkan et al. (1997), sob condições não favoráveis, gotas menores que 50 μm são completamente evaporadas antes de atingir o alvo. Cunha (2008), simulando o potencial risco de deriva de agrotóxicos, observou que, dependendo das condições meteorológicas, 10% do volume total aplicado é perdido por evaporação.

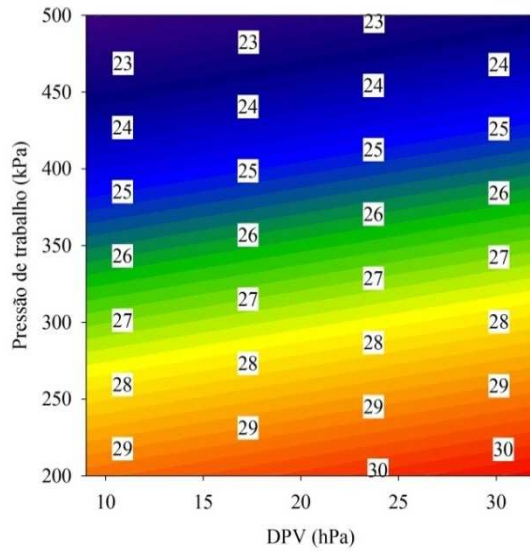
Hanna e Schaefer (2009) relatam o efeito das condições psicrométricas do ar no diâmetro das gotas pulverizadas e o comportamento das gotas ao longo do seu trajeto entre a ponta e o alvo, o que explica os resultados obtidos neste trabalho.

Quanto à porcentagem dos volumes que compõem o espectro, com o aumento da pressão do líquido, houve a tendência de se aumentar a porcentagem do volume de gotas com menores diâmetros. Com o aumento do DPV, elevam-se a porcentagem do volume de gotas que se perdem por evaporação, acarretando em deslocamento de classes das gotas formadas (Figura 25).



$$200 < \%V < 300 = 33,6453 - 0,0239^{**}P + 0,0509^{\circ}DPV$$

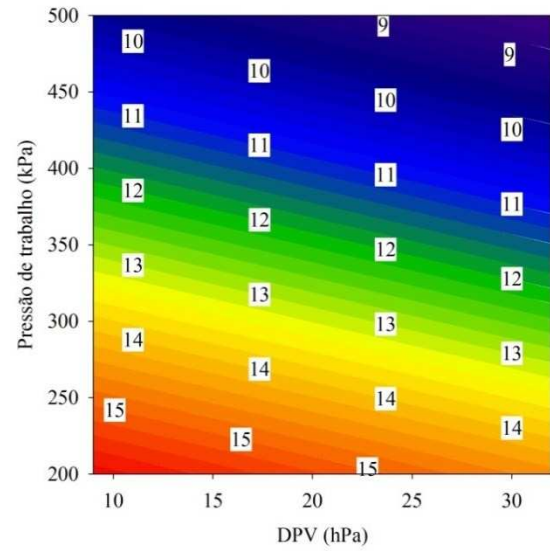
$$R^2 = 0,63$$



(C)

$$300 < \%V < 400 = 20,582 - 0,0205^{**}P - 0,0622^{**}DPV$$

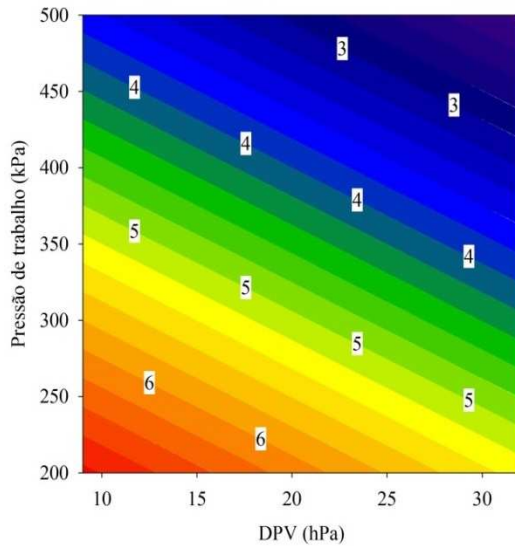
$$R^2 = 0,78$$



(D)

$$400 < \%V < 500 = 9,579 - 0,0106^{**}P - 0,0668^{**}DPV$$

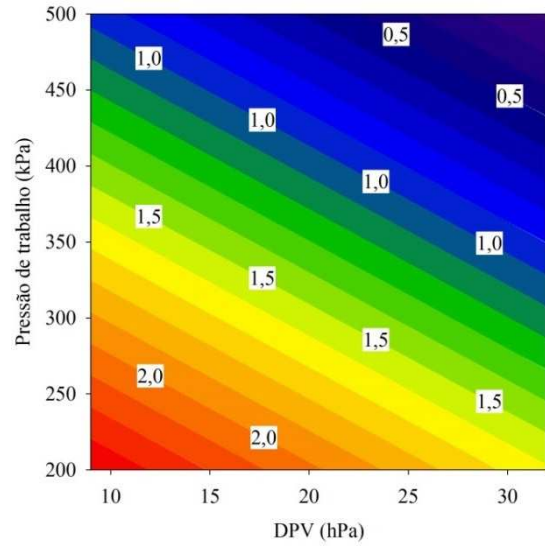
$$R^2 = 0,57$$



(E)

$$500 < \%V < 600 = 3,664 - 0,0048^{**}P - 0,0340^{**}DPV$$

$$R^2 = 0,58$$



(F)

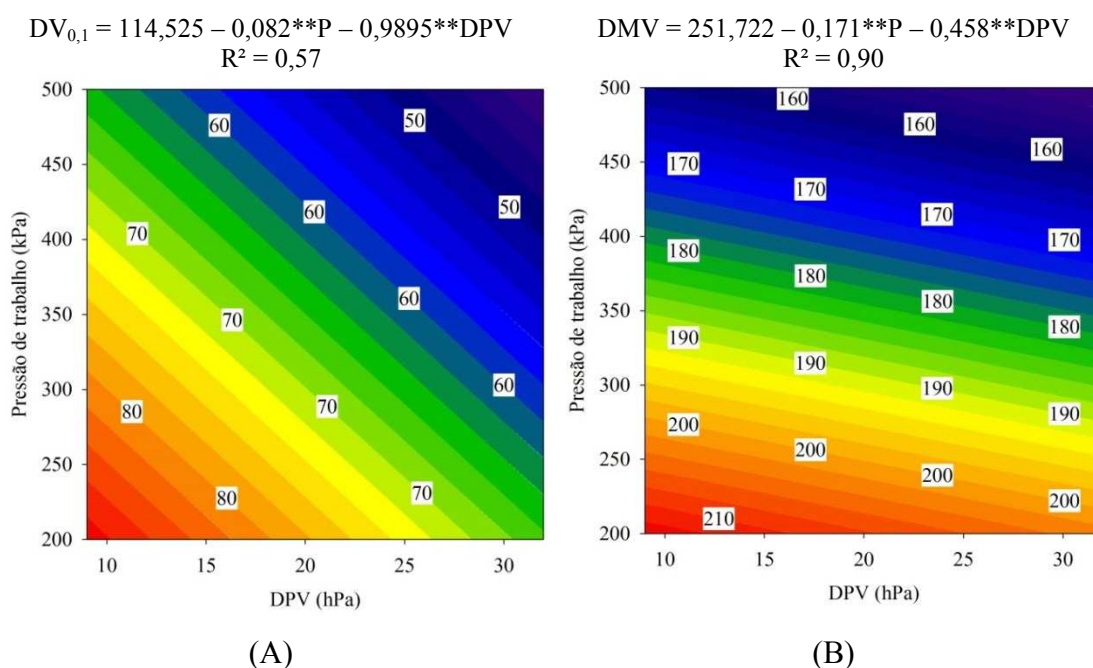
**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; °Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

Figura 25. Estimativa das porcentagens dos volumes das gotas que compõe o espectro proporcionado pela ponta JSF 11002, em diferentes condições de pressão e DPV. (A) $\%V < 100$; (B) $100 < \%V < 200$; (C) $200 < \%V < 300$; (D) $300 < \%V < 400$; (E) $400 < \%V < 500$; (F) $500 < \%V < 600$ μm .

A classe de gotas pertencente a porcentagem do volume de gotas com diâmetro maior que 600 μm não apresentou comportamento específico, de acordo com as diferentes condições impostas, não permitindo, assim, um ajuste de um modelo de regressão aos dados observados para explicar o fenômeno.

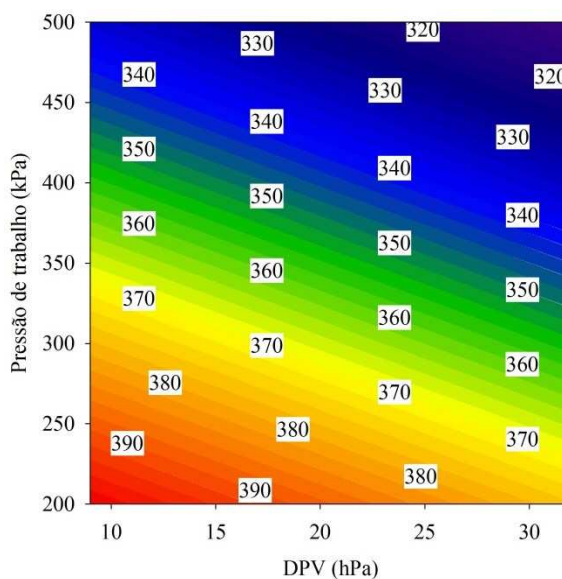
Embora gotas pequenas sejam importantes para a eficácia dos tratamentos fitossanitários, quando empregadas sob condições adversas favorecem as perdas tanto por evaporação quanto por deriva. Kjaer et al. (2014) relataram que a umidade absoluta do ar pode interferir no carregamento das gotas para áreas vizinhas. Schamphelire et al. (2009) também constataram que a deriva foi influenciada pelas condições meteorológicas do ambiente, pois sob altas temperaturas (26,2 $^{\circ}\text{C}$) e baixa umidade relativa do ar (58,5%), proporcionaram maior deriva das gotas, em comparação com outras condições consideradas ideais, corroborando o presente resultado.

Com o uso do sistema de resfriamento adiabático, observou-se a tendência de redução do diâmetro das gotas, considerando-se as diferentes condições de DPV avaliados (Figura 26). Com o uso do sistema de resfriamento adiabático, não foi possível ajustar uma equação de regressão para explicar os dados obtidos para o índice Span. O valor deste parâmetro variou entre 1,263 e 1,763, com valor médio de 1,51.



$$DV_{0,9} = 452,23 - 0,2153**P - 1,0276**DPV$$

$$R^2 = 0,63$$



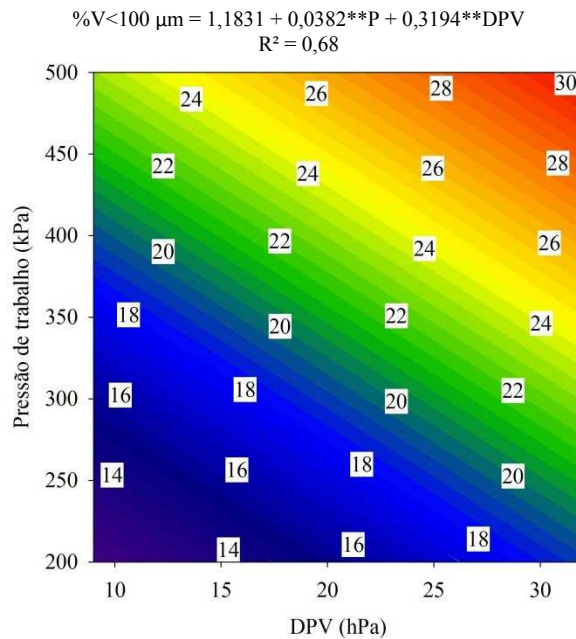
(C)

**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 26. Estimativa dos diâmetros das gotas proporcionada pela ponta JSF 11002 com o uso do sistema de resfriamento adiabático. (A) $DV_{0,1}$; (B) DMV; (C) $DV_{0,9}$.

Constata-se que com a utilização do sistema de resfriamento adiabático, existe a tendência de redução do diâmetro das gotas pulverizadas quando comparado ao sistema de pulverização convencional. Os coeficientes de regressão ajustados (β_2) para os parâmetros $DV_{0,1}$; DMV e $DV_{0,9}$ sem o uso do sistema de resfriamento foram de -0,138; -0,350 e -1,233, e com o uso do sistema de resfriamento adiabático foram de -0,989; -0,458 e -1,028, respectivamente. Este comportamento ocorre devido à redução do potencial evaporativo do ar com o uso do sistema de resfriamento e, nestas ocasiões, as menores gotículas são preservadas durante a pulverização, acarretando em redução dos valores dos parâmetros técnicos da pulverização.

Ao reduzir as perdas por evaporação, o sistema proporcionou aumento da porcentagem do volume menor que 100 μm (Figura 27).



**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 27. Estimativa da porcentagem do volume menor que 100 µm proporcionado pela ponta JSF 11002 com o uso do sistema de resfriamento adiabático.

Em considerações de campo, o benefício advindo do sistema proposto não somente reduziria as perdas por evaporação, mas, possivelmente, aumentaria a eficiência da aplicação. Esta técnica preserva as menores gotículas, em uma pulverização com a assistência de ar, as quais tendem a atingir a parte inferior da planta, local onde há maior dificuldade para o alcance da pulverização.

Com o uso do sistema de resfriamento adiabático, as pulverizações foram realizadas em condições psicrométricas do ar semelhantes. O maior DPV foi de 12 hPa (Figura 28). Ou seja, as pulverizações foram realizadas sob condições psicrométricas do ar consideradas ótimas para a pulverização, o que explica o resultado obtido.

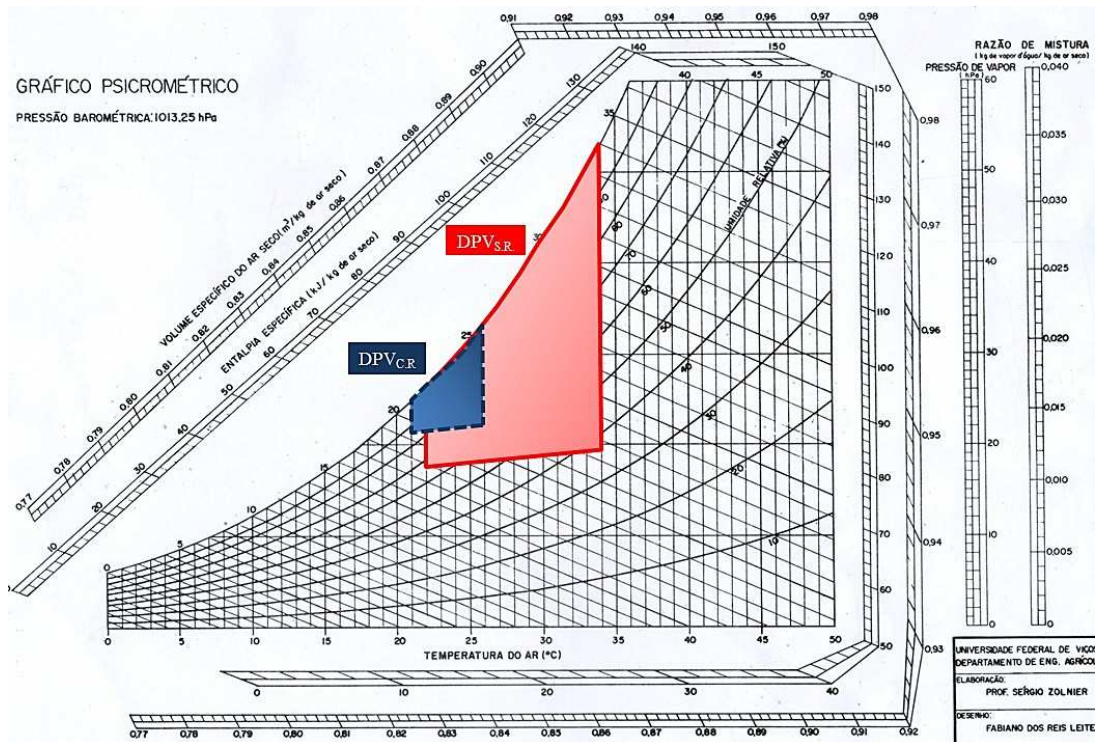


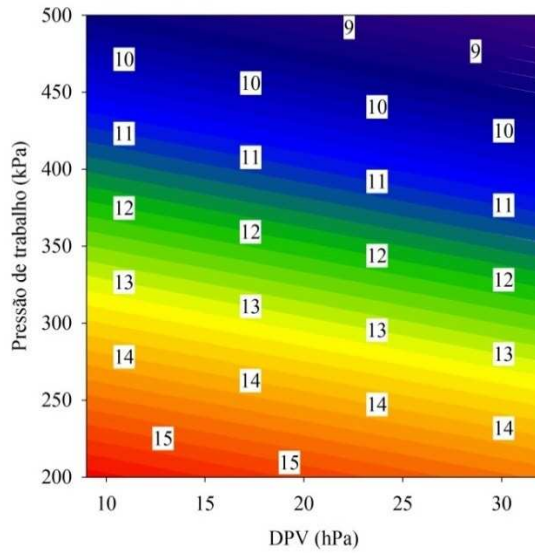
Figura 28. Condições psicrométricas do ar com e sem o uso do sistema de resfriamento adiabático.

Sem a utilização do sistema adiabático, o potencial evaporativo do ar foi na ordem de até 32,8% do volume aplicado, já resfriando-se o ar o potencial foi reduzido para 14,99%.

Com a redução das perdas por evaporação, amenizou-se o efeito de deslocamento de classes de diâmetros de gotas, não apresentando efeito significativo do DPV para as classes de volumes de gotas compreendidas com diâmetros entre $100 < V < 200$ e $200 < V < 300$ μm . Para as classes $300 < V < 400$, $400 < V < 500$ e $500 < V < 600$, houve redução da porcentagem do volume que compõe o espectro com o aumento do DPV (Figura 29).

$$300 < \%V < 400 = 20,3012 - 0,0207^{**}P - 0,0502^{**}DPV$$

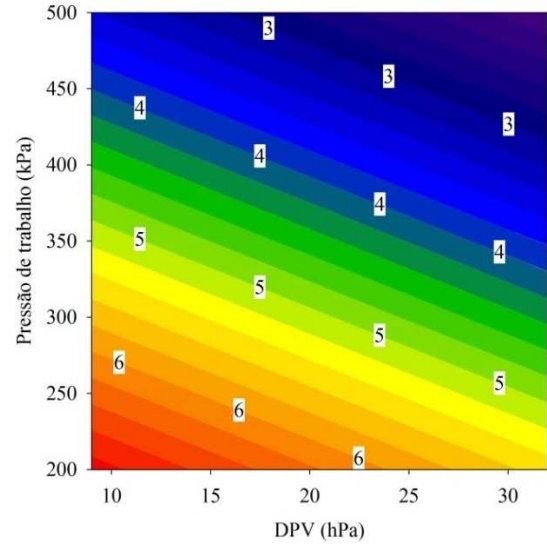
$$R^2 = 0,82$$



(A)

$$400 < \%V < 500 = 9,764 - 0,0116^{**}P - 0,0605^{**}DPV$$

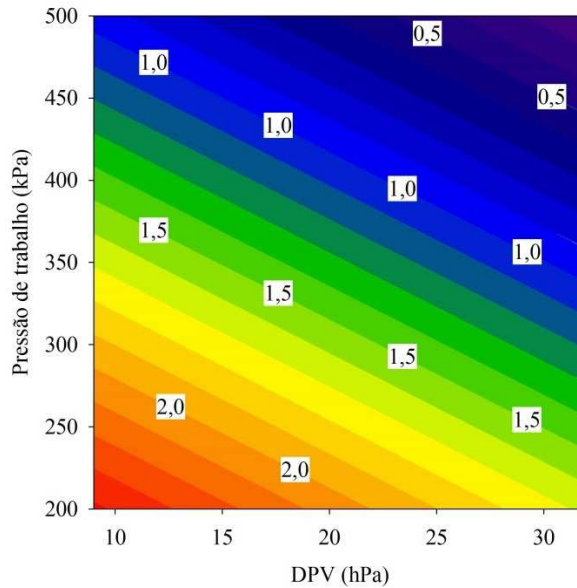
$$R^2 = 0,67$$



(B)

$$500 < \%V < 600 = 3,6923 - 0,0049^{**}P - 0,0324^{**}DPV$$

$$R^2 = 0,53$$



(C)

**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Figura 29. Estimativa da porcentagem do volume que compõe o espectro da ponta JSF 11002 com o uso do sistema de resfriamento adiabático. (A) $300 < \%V < 400$; (B) $400 < \%V < 500$; (C) $500 < \%V < 600 \mu\text{m}$.

Comparando-se as classes de gotas de $300 < \%V < 400$, $400 < \%V < 500$ e $500 < \%V < 600$, com e sem o uso do sistema de resfriamento adiabático, houve redução da porcentagem do volume que compõe estas classes com o aumento do DPV para ambos os sistemas. Entretanto, com o uso do sistema de resfriamento adiabático, a redução foi menos proeminente. Este resultado pode ser atribuído tanto pela redução do poder evaporativo do ar como também pela manutenção das menores gotículas durante a pulverização.

Diversas alternativas têm sido pesquisadas para minimizarem os efeitos psicrométricos do ar. Uma delas é o uso de adjuvantes à calda, o qual é adicionado à calda com a finalidade de reduzirem as perdas por deriva e melhorar a cobertura do alvo, entretanto ainda assim ocorrem as perdas por evaporação.

Outra alternativa, é a modificação dos equipamentos empregados para a aplicação de agrotóxicos, conforme os desenvolvidos por Alvarenga et al. (2013a) e Doruchowski et al. (2009). Neste sentido, um sistema que possibilite alterar as condições psicométricas do ar, anteriormente à pulverização, como o uso do sistema de resfriamento evaporativo adiabático do ar em pulverizadores hidráulicos com assistência de ar na barra, permitiria também minimizar as perdas por evaporação durante a pulverização, melhorando-se assim a eficiência de aplicação.

Na aplicação de agrotóxicos, a temperatura e a umidade do ar, afetam não somente o transporte da gota até o alvo, mas também acarretam redução da absorção e translocação do produto na planta, pois, em condições extremas, as gotas da pulverização secam mais rapidamente, e a absorção do produto diminui ou, até mesmo, cessa, afetando o desempenho biológico, opiniões semelhantes foram expressadas por Sugisawa et al. (2007).

5) CONCLUSÕES

Houve redução no diâmetro das gotas pulverizadas com o aumento do DPV e da pressão de trabalho.

Para uma dada pressão de trabalho a cada incremento de 1 hPa no DPV, proporcionou redução do diâmetro das gotas na ordem de 0,0759; 0,518 e 1,514 μm para os parâmetros de $DV_{0,1}$; DMV e $DV_{0,9}$, respectivamente.

As perdas de líquido por evaporação durante a pulverização pode chegar a até 39% do volume de líquido pulverizado.

O uso de sistema de resfriamento adiabático, durante as pulverizações, reduziu as perdas por evaporação durante a pulverização.

O melhor sistema de resfriamento adiabático foi implementado com nebulizadores operando sob alta pressão, com redução do DPV de até 19,7 hPa.

6) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, P.G.; ABREU, V.M.N.; MAZZUCO, H. Uso do resfriamento adiabático evaporativo . EMBRAPA-CNPSA. 1999. 51p.

ADE, G.; RONDELLI, V. Performance of an air-assisted boom sprayer in the control of Colorado beetle infestation in potato crops. **Biosystems Engineering**, v.97, p.181-187, 2007.

AHMED, E. M.; ABAAS, O.; AHMED, M.; ISMAIL, M. R. Performance evaluation of three different types of local evaporative cooling pads in greenhouses in Sudan. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v.18, p.45-51, 2011.

ALODAN, M.; AL-FARAJ, A. A. Design and evaluation of galvanized metal sheets as evaporative cooling pads. **Journal King Saud University**, v.18, n. 1, p. 9-18, 2005.

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

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

ALVARENGA, C. B.; TEIXEIRA, M. M.; ZOLNIER, S.; SASAKI, R. S.; RINALDI, P. C. N. Efficiency of the spray tip using hydraulic hollow cone from the spectral analysis of the droplets. **Braslian Journal of Applied Technology For Agricultural Science**, v.5, n.3, p. 41-50, 2012.

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. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n.2, p.81-87, 2013b.

ALVARENGA, C. B.; TEIXEIRA, M. M.; ZOLNIER, S.; SASAKI, R. S.; RINALDI, P. C. N. Controle automático do espectro de gotas de pulverizador hidropneumático em função do déficit de pressão de vapor d'água no ar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.43, n.1, p.26-33, 2013a.

ALVARENGA, C. B.; TEIXEIRA, M. M.; ZOLNIER, S.; CECON, P. R.; SIQUEIRA, D. L.; RODRIGUÊS, D. E.; SASAKI, R. S.; RINALDI, P. C. N. Efeito do deficit de pressão de vapor d'água no ar na pulverização hidropneumática em alvos artificiais. **Bioscience Journal**, v.30, n.1, p.182-193, 2014.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI/AMCA 210-85 Standard. Arlington Heights, IL 600004: Air Movement and Control Association, Inc. 1985.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Evaporative air cooling. In:____. **HVAC systems and equipment handbook**. Atlanta, GA, 1996, chapter 19, p. 1-8.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. ASAE S572.1. 1999. **Spray nozzle classification by droplet spectra**. St. Joseph, MI., 4p.

ARVIDSSON, T.; BERGSTROM, L.; KREUGER, J. Spray drift as influenced by meteorological and technical factors. **Pesticide Management Science**, v.67, p. 586 – 598, 2011.

BAESSO, M. M.; TEIXEIRA, M. M.; VIEIRA, R. F.; JÚNIOR, T. J. P.; CECON, P. R. Uniformity of liquid distribution in the canopy of the bean plant, using the spectrophotometric analysis. **Revista Ceres**, v.58, n.6, p. 710-716, 2011.

BAESSO, M. M.; TEIXEIRA, M. M.; VIEIRA, R. G.; PAULA JÚNIOR, T. J.; CECON, P. R. Uniformidade de distribuição de líquido e de ar ao longo da barra de pulverização. **Engenharia na Agricultura**, v.18, n.4, 2010.

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**, v.29, n.2, p.293-298, 2008.

BAUER, F. C.; ALMEIDA, E.; MARQUES, D. C.; ROSSI, T.; PEREIRA, F. A. R. Deposição de pontas de pulverização AXI 11002 e JA-2 em diferentes condições operacionais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.6, p. 1610-1614, 2008.

BUENO, M. R.; CUNHA, J. P. A. R.; ROMAN, R. A. A. Tamanho de gotas de pontas de pulverização em diferentes condições operacionais por meio da técnica de difração do raio laser. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n.5, p.976-985, 2013a.

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

CAMARGO, J. R. Resfriamento evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente. **Revista ciências exatas**, Taubaté, v.9/10, n.1-2, p.69-75, 2004.

CHAIM, A.; VALARINI, P. J.; OLIVEIRA, D. A.; MORSOLETO, R. V.; PIO, L. P. Avaliação de perdas de pulverização em cultura de feijão e de tomate. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999, 29p. Boletim de pesquisa 2 (Embrapa Meio Ambiente, Boletim de Pesquisa, 2).

CHINENYE, N. M. Development of clay evaporative cooler for fruits and vegetables preservation. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 13, n.1, p. 1-6, 2011.

CHRISTOVAM, R. S.; RAETANO, C. G.; PRADO, E.P.; DAL POGETTO, M., H., F.; AGUIAR JÚNIOR, H. O.; GIMENES, M. J.; SERRA, M. E. Air-assistance and low volume application to control of asian rust on soybean crop. **Journal of plant protection research**, v.50, n.3, 2010.

CUNHA, J. P. A. R. Simulação da deriva de agrotóxicos em diferentes métodos de aplicação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 4, p.487–193, 2008.

CUNHA, J. P. A. R. Análise da distribuição volumétrica de pontas de pulverização hidráulicas de jato plano. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, Pará, v.31, n.1, p. 233-239. 2007.

CUNHA, J. P. A. R.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C. Avaliação do espectro de gotas de pontas de pulverização hidráulicas utilizando a técnica da difração do raio laser. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. esp., p. 10-15, 2007.

CZACZYK, Z.; KRUGER, G.; HEWITT, A. Droplet size classification o fair induction flat fan nozzles. **Journal of plant protection research**, v. 52, n. 4, p. 415 – 420, 2012.

DAGTEKIN, M.; KARACA, C.; YILDIZ, Y. Performance characteristics of a pad evaporative cooling system in a broiler house in a Mediterranean climate. **Biosystems Engineering**, vI03, p. 100-104, 2009.

DONKERSLEY, P.; NUYTENS, D. A meta analysis of spray drift sampling. **Crop Protection**, v. 30, p. 931-936, 2011.

DORUCHOWSKI, G.; SWIECHOWSKI. W.; HOLOWNICKI, R.; GODYN, A. Environmmmentally-Dependent Application System (EDAS) for safer spray appication in fruit growing. **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, E. Esp., p. 107-112, 2009.

FRANCO, A.; VALERA, D. L.; PEÑA, A. Energy efficiency in greenhouse evaporative cooling techniques: cooling boxes versus cellulose pads. **Energies**, v.7, p.1427-1447, 2014.

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

GABRIEL, R. R.F.; BAILO, F. H. R. Interação entre pressão e tamanho de gota por instrumentação eletrônica em pulverizador pressurizado por CO₂. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, p. 164-169, 2013.

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

GIL, Y.; SINFORT, C.; GUILLAUME, S.; BRUNET, Y.; PALAGOS, B. Influence of micrometeorological factors on pesticide loss to the air during vine spraying: Data Analysis with statistical and fuzzy inference models. **Biosystems Engineering**, v.100, p.184-197, 2008.

GÓMEZ, E. V.; MARTÍNEZ, F. C. R.; GONZÁLEZ, A. T. The phenomenon of evaporative cooling from a humid surface as an alternative method for air-conditioning. **International Journal of Energy and Environment**, v.1, n.1, p. 66-96, 2010.

GULART, C. A.; DEBORTOLI, M.; MADALOSSO, M.; BALARDIM, R.; SANTOS, P. S.; CORTE, G. D.; LENZ, G.; MARQUES, L. N. Espectro de gotas de pulverização e controle de doenças em duas cultivares de trigo. **Ciência Rural**, v.43, n. 10,p. 1747-1753, 2013.

GUPTA, P.; SIROHI, N. P. S.; MISHRA, I. M.; Air flow characteristics of an air-assisted sprayer through horizontal crop canopy. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.5, n.1, p. 1-6, 2012.

GURGACZ, F. **Utilização de barra auxiliar de pulverização de água para reduzir a deriva de defensivos agrícolas**. 2013. 53 f. Tese de doutorado (Agronomia). Universidade Estadual Paulista – Unesp, Botucatu, 2013.

HANNA, M.; SCHAEFER, K. Spray Drift potential increases during warm weather applications. Integrated Crop Management News, Iowa, USA. 2009. Disponível em: <<http://www.extension.iastate.edu/CropNews/2009/0611schaefer.htm>>. Acesso em. 12 maio de 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **Equipment for crop protection - Sprayer nozzles - Colour coding for identification**. ISO 10625, Geneva, 2005. 4p.

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

KATSOULAS, N.; KITTAS, E.; KITTAS, C. Greenhouse cooling by a fog system: effect on microclimate and on production and quality of a soilless pepper crop. **Acta Horticulturae**, v.719, 455-461, 2006.

KJAER, C.; BRUUS, M.; BOSSI, R.; LOFSTROM, P.; ANDERSEN, H. V.; NUYTTENS, D.; LARSEN, S. E. Pesticide drift deposition in hedgerows from multiple spray. **Journal Pesticide Science**, v.39, n.1, p.14-21, 2014.

LASSERAN, J.C. Aeração de grãos. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, Universidade Federal de Viçosa, 1981. 131p. (Série CETREINAR, 2).

LENZ, G.; BALARDIN, R. S.; MINUZZI, S. G.; TORMEN, N. R.; MARQUES, L. N. Espectro de gotase idade de trifólios na taxa de absorção e efeito residual de fungicidas em soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.10, p. 1702-1708, 2011.

LERTSATITTHANAKORN, C.; RERNGWONGMITAYA, S.; SOPONRONNARIT, S. Field experiments and economic evaluation of an evaporative cooling systems in a silkworm rearing house. **Biosystems Engineering**, Oxford, v.93, n.2, p. 213-219, 2006.

LEŠNIK, M.; PINTAR, C.; LOBNIK, A.; KOLAR, M. Comparison of the effectiveness of standard and drift-reducing nozzles for control of some pests of apple. **Crop Protection**, v.24, n.2, p. 93-100, 2005.

LÓPEZ, A.; VALERA, D. L.; MOLINA-AIZ, F. D.; PEÑA, A. Sonic anemometry to evaluate airflow characteristics and temperature distribution in empty Mediterranean greenhouses equipped with pad-fan and fog systems. **Biosystem Engineering**, v. 113, p. 334-350, 2012.

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

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

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

MATARAZZO, S. V.; SILVA, I. J. O.; PERISSINOTTO, M.; FERNANDES, D. A. A. Intermittência do sistema de resfriamento adiabático evaporativo por aspersão em

instalação para vacas em lactação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.3, p.654-662, 2006.

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

MINGUELA, J. V.; CUNHA, J. P. A. R. Manual de aplicação de produtos fitossanitários. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2010. 588 p.

NASCIMENTO, A. B.; OIVEIRA, G. M.; BALAN, M. G.; HIGASHIARA, L. R.; ABI SAAB, O. J. G. Deposição de glifosato e utilização de adjuvantes para diferentes pontas de pulverização e horário de aplicação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v.5, n.2, p.105-116, 2012.

NETO, A. J. S.; ZONIER, S. Desempenho de um sistema de resfriamento evaporativo do ar em casa-de-vegetação. **Irriga**, Botucatu, v.15, n.2, p.140-150, 2010.

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

NUYTTENS, D.; DE SCHAMPHELEIRE, M.; BAETENS, K.; BRUSSELMAN, E.; DEKEYSER, D.; VERBOVEN, P. Drift from field crop sprayers using an integrated approach: results of a five year study. **Transaction of ASABE**, v. 54, n. 2, p. 403-408, 2011.

OLIVA, R. A.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Máquina para aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis – Adaptação de um modelo comercial convencional. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30, 2001, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: SBEA, 2001, 1 CD.

OZKAN, H. E.; MIRALLES, A.; SINFORT, C.; ZHU, H.; REICHARD, D. L.; FOX, R. D., (1997). Effect of shielding spray boom on spray deposition. In: Goss, G. R., Hopkinson, M. J., Collins, H. M. (Eds.), Pesticide formulations and application systems. 17 ASTM, Ann Arbor.

PERDIGONES, A.; GARCÍA, J. L.; ROMERO, A.; RODRÍGUES, A.; LUNA, L.; RAPOSO, C.; PLAZA, S. Cooling strategies for greenhouses in summer: Control of fogging by pulse width modulation. **Biosystems Engineering**, v. 99, p. 573-586, 2008.

PERISSINOTTO, M.; MOURA, D. J.; CRUZ, V. F. Avaliação da produção de leite em bovinos utilizando diferentes sistemas de climatização. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.30, n. 1, 2007.

PICHÉ, M.; PANNETON, B.; THÉRIAULT, R. Reduced drift from air-assisted spraying. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 42, n.3, p. 117-122, 2000.

QUIRINO, A.; TEIXEIRA, M. M. Droplets deposition provided by hydraulic nozzles in function of wind seed during pesticides application. **Applied Research & Agrotechnology**, v.6, n.3, p. 95-99, 2013.

RAETANO, C. G.; BAUER, F. C. Deposição e perdas da calda em feijoeiro em aplicação com assistência de ar na barra pulverizadora. **Bragantia**, Campinas, v.63, n.2, p. 309-315, 2004.

RANGEL, M.A.S. 1994. 80f. **Secagem estacionária de sementes de arroz com ar ambiente**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 1994.

RANZ, W. E.; MARSHALL, W. R. Evaporation from drops. **Chemical Engineering Progress**, v. 48, n.3, p. 141-146, 1952.

REICHARD, D. L.; RETZER, H. J.; LILJEDAHN, L. A.; HALL, F. R. Spray droplet size distributions delivered by air blast orchard sprayers. **Transactions of the ASAE**, v.20, n.2, p. 232-237, 1977.

RODRIGUES, G. J.; TEIXEIRA, M. M.; ALVARENGA, C. B. Desempenho operacional de pontas hidráulicas na determinação de parâmetros da pulverização hidropneumática, **Bioscience Journal**, v.28, n.1, p.8-15, 2012.

SCHAMPHELEIRE, M.; BAETENS, K.; NUYTENS, D.; SPANOGHE, P. Spray drift measurements to evaluate the Belgian drift mitigation measures in field crops. **Crop Protection**, v.27, p. 577-589, 2009.

SHAMSHIRI, R.; ISMAIL, W. I. W. Performance evaluation of ventilation and pad-and-fan systems for greenhouse production of tomato in lowland Malaysia. **World Research Journal of Agricultural & Biosystems Engineering**, v.1, n. 1, p.1-5, 2012.

SILVA, J. S.; LOPES, R. P.; LOPES, D. C.; REZENDE, R. C. Princípios básicos de psicrometria. In: Silva, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 22. Ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. P. 37-62.

SIQUEIRA, J. L.; ANTUNIASSI, U. R. Inspeção periódica de pulverizadores nas principais regiões de produção de soja no Brasil. **Revista Energia na Agricultura**, v.26, n.4, p.92-100, 2011.

SOARES, M.; SOUZA, S. N. M.; HALMEMAN, M. C. R.; FRACARO, G. P. M. Desenvolvimento de um sistema alternativo de trocador de calor para climatização de construções agroindustriais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.3, p. 411-417, 2011.

STANISLAVSKI, W. **Otimização da tecnologia de assistência de ar em pulverizador de barras através da umidificação do fluxo do ar**. 2012. 61f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2012.

STEIDLE NETO, A. J.; ZOLNIER, S. Desempenho de um sistema de resfriamento evaporativo do ar em casa-de-vegetação. **Irriga**, Botucatu, v.15, n.2, p.1450-150, 2010.

SUGUISAWA, J. M.; FRANCO, F. N.; SILVA, S. S. S.; PECHE FILHO, A. Qualidade de aplicação de herbicida em lavoura de trigo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.esp., p.41-47, jan. 2007.

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

TILAHUN, S. W. Feasibility and economic evaluation of low-cost evaporative cooling system in fruit and vegetables storages. **African Journal of Food Agriculture Nutrition and Development**, v. 10, n. 8, p.2984 - 2997, 2010.

TRIGO, M. F. O.; MOTTABICCA, F. M.; TRIGO, L. F. N.; ASSIS, F. N. Estimativa do número de horas diárias favoráveis à secagem de sementes com ar ambiente forçado. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 19, n.2, p.225-229, 1997.

THOMSON, S. J.; LYN, M. E. Environmental and spray mixture effects on droplet size represented by water-sensitive paper used in drift studies. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 54, n. 3, p. 803-807, 2011.

UMEZU. C. K.; CAPPELLI, N. L. Desenvolvimento e avaliação de um controlador eletrônico para equipamentos de aplicação de insumos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.10, n.1, p. 225-230, 2006.

VIANA, R. G.; FERREIRA, L. R.; FERREIRA, M. C.; TEIXEIRA, M. M.; ROSELL, J. R.; TUFFI SANTOS, L. D.; MACHADO, A. F. L. Distribuição volumétrica e espectro de gotas de pontas de pulverização de baixa deriva. **Planta Daninha**, v.28, n.2, p. 4369-446, 2010.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. Viçosa: Editora UFV, 2012, 460p.

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

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

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**, Columbus, v. 104, n. 3, p. 324-334, 2009b.

YU, Z.; XU, T.; LI, J.; XU, T.; YOSHINO, T. Computational analysis of droplet mass and size effect on mist/air impingement cooling performance. **Advances in Mechanical Engineering**, v.2013, p. 1-8, 2013.

WANG, C.; CAO, W.; LI, B.; SHI, Z.; GENG, A. A fuzzy mathematical method to evaluate the suitability of a evaporative pad cooling system for poultry houses in China. **Biosystems Engineering**, v. 101, p. 370-375, 2008.

WOLF, R. E.; FRIEDLI, C.; LAUER, B. Comparison of spray droplet size and coverage for nozzles used for agronomic weed control. **ASABE Meeting Presentation**. April 4. Paper No: MC09-207, 2009.