

# EFEITOS DA VELOCIDADE E DA DIREÇÃO DO VENTO NA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA DE SISTEMAS AUTOPROPOLIDOS

HENRIQUE F. E. DE OLIVEIRA<sup>1</sup>, ALBERTO COLOMBO<sup>2</sup>, LESSANDRO C. FARIA<sup>3</sup>,  
GIULIANI DO PRADO<sup>4</sup>

**RESUMO:** A velocidade e a direção de incidência do vento, em relação ao eixo de deslocamento do aspersor, são variáveis apresentadas em vários trabalhos como fatores importantes para a determinação da uniformidade de aplicação de água dos equipamentos autopropelidos de irrigação. No entanto, em razão das dificuldades de se conduzir estudos de campo com canhões hidráulicos sob condições controladas de direção e velocidade do vento, as recomendações de espaçamento entre carregadores, em sua maioria, consideram apenas o efeito da velocidade do vento, sem mencionar a direção de sua incidência. Neste trabalho, a aplicação de coeficientes semiempíricos do modelo Richards & Weatherhead, ajustados com base em ensaios de campo do canhão PLONA RL-250, possibilitou realizar, por meio de simulações digitais, uma análise quantitativa dos efeitos da velocidade e da direção do vento sobre a uniformidade de aplicação de água dos sistemas autopropelidos. As simulações indicaram que, na medida em que a incidência do vento passa de perpendicular para paralela ao eixo de deslocamento, os efeitos prejudiciais da velocidade do vento sobre a uniformidade são ampliados. Desta forma, fica evidenciado que tanto a direção como a velocidade do vento devem ser consideradas nas recomendações de espaçamento entre carregadores.

**PALAVRAS-CHAVE:** simulação, canhão hidráulico, modelo semiempírico.

## EFFECTS OF WIND SPEED AND DIRECTION ON WATER APPLICATION UNIFORMITY OF TRAVELER IRRIGATION SYSTEMS

**ABSTRACT:** Wind velocity and its direction, in relation to the sprinkler travel axis, are pointed out as key factors in determining water application uniformity of traveler irrigation machines. However, due to difficulties in running field tests with rain guns under controlled wind conditions, most towpath spacing recommendations consider only wind velocity without mentioning its direction. In this study, the application of semi-empirical parameters from RICHARDS & WEATERHEAD model's, adjusted based on field tests with the rain gun PLONA RL-250, provided with the help of computer simulation, the data necessary for a quantitative analysis about the effects of wind velocity and direction on water application uniformity of traveler irrigation systems. Simulations indicated that as wind direction moves from perpendicular to parallel to the sprinkler travel axis, the deleterious effects of wind velocity are enhanced. Therefore, these results demonstrated that both wind direction and wind speed must be considered on towpath spacing recommendations.

**KEYWORDS:** simulation, gun type sprinkler, semi empirical model.

<sup>1</sup> Doutor, Prof. Efetivo, Departamento de Ciências Agrárias, Instituto Federal Goiano - IFG, Caixa Postal 51, Ceres - GO. Fone: (0XX62) 3307-7100, henrique.fonseca@ifgoiano.edu.br.

<sup>2</sup> Doutor, Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia - DEG, Universidade Federal de Lavras - UFLA, Caixa postal 37, Lavras - MG, Fone: (0XX35) 38291388, acolombo@ufla.br.

<sup>3</sup> Doutor, Prof. Adjunto, Centro de Desenvolvimento Tecnológico - CDTEC/Eng. Hídrica/UFPel, Pelotas - RS, Fone: (0XX53) 3921-1240, lessandro.faria@ufpel.edu.br.

<sup>4</sup> Doutor, Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia Agrícola - DEA, Universidade Estadual de Maringá - UEM, Cidade Gaúcha - PR, Fone: (0XX44) 3675-1779, gprado@uem.br.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 25-3-2010

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 15-2-2012

## INTRODUÇÃO

Em um cenário no qual a proteção ambiental e a conservação dos recursos hídricos são enfatizadas, e os custos da água e de energia estão em ascensão, a uniformidade de aplicação de água é uma preocupação crescente para fabricantes de equipamentos, projetistas e usuários de sistemas de irrigação. A desuniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação tem efeitos sobre as características de produção das culturas irrigadas (FRIZZONE et al., 2007; MONTAZAR & SADEGHI, 2008) e causa desperdício de água, energia e fertilizantes, contribuindo para a redução do retorno econômico das áreas irrigadas e aumento do impacto ambiental da exploração agrícola.

Entre os vários fatores que afetam a uniformidade de distribuição de água dos sistemas autopropelidos de irrigação, KELLER & BLIESNER (1990) destacam: velocidade e direção do vento, trajetória do jato, tipo do bocal (cônico ou anel), regulagem do mecanismo setorial (ângulo de giro), características do perfil radial de aplicação de água do aspersor e variações da pressão de operação e da velocidade de deslocamento do aspersor ao longo do carreador.

O grande número de fatores que influenciam a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação por aspersão, torna o estudo da interação destes fatores, baseado inteiramente em ensaios de campo, uma tarefa demorada e, na maioria das vezes, impossível de se realizar, diante da dificuldade de se obter todas as condições operacionais e ambientais desejadas. Diante disto, diversos autores, a exemplo de ZAPATA et al. (2007), SMITH et al. (2008) e PRADO & COLOMBO (2010), recorrem ao uso de simulações digitais no estudo destas interações.

Para o caso particular dos canhões hidráulicos, as simulações baseadas na teoria balística, que são aplicadas com sucesso (PLAYAN et al., 2006; ZAPATA et al., 2009) nos estudos da distribuição espacial da água aplicada por pequenos aspersores, operando em diferentes condições de vento, têm aplicação limitada. Tal limitação fez com que diversos pesquisadores (OLIVEIRA, 2008; SMITH et al., 2008) optassem pelo uso do modelo semiempírico de RICHARDS & WEATHERHEAD (1993), que tem um procedimento de calibração relativamente simples, baseado em, pelo menos, três ensaios de campo de distribuição de água do canhão (um sem vento e dois com vento).

De acordo com SMITH et al. (2008), OLIVEIRA et al. (2009) e PRADO & COLOMBO (2010), simulações digitais permitem estudar de forma rápida, precisa e segura os efeitos de diferentes combinações de condições operacionais do aspersor (pressão, diâmetro e tipo de bocal, ângulos de giro e de lançamento do jato d'água) e ambientais (velocidade e direção do vento) sobre a uniformidade de aplicação de água dos equipamentos autopropelidos. Estas simulações fazem-se necessárias porque, apesar de vários autores destacarem o efeito conjunto da velocidade e de direção do vento sobre a uniformidade dos autopropelidos, nas avaliações de desempenho de campo (SILVA et al., 2007) e na maioria das recomendações de espaçamento encontradas na literatura (KELLER & BLIESNER, 1990; TARJUELO, 2005), somente o fator velocidade do vento é considerado.

Desta forma, neste trabalho, os valores dos parâmetros semiempíricos do modelo RICHARDS & WEATHERHEAD (1993), ajustados com base em ensaios de campo de distribuição de água do aspersor canhão marca PLONA, modelo RL-250, permitiram, por meio de simulações digitais, uma análise quantitativa dos efeitos de diferentes combinações de velocidade e direções de vento sobre a uniformidade de aplicação de água dos sistemas autopropelidos operando com canhões hidráulicos.

## MATERIAL E MÉTODOS

No presente estudo, foi utilizado um canhão hidráulico de reversão lenta da marca PLONA, modelo RL250, que apresenta ângulo de inclinação do lançamento do jato de água de 24°, flange de acoplamento de 2 ½" e giro proporcionado pelo impacto de um de seus dois braços oscilantes.

Características operacionais deste canhão, obtidas em ensaios de laboratório, são dadas por PRADO & COLOMBO (2007).

Dados de 53 ensaios de distribuição de água do canhão PLONA-RL250, realizados sob as diferentes condições de velocidade de vento e combinações de bocais, e pressões de serviço mostradas na Tabela 1, foram utilizados neste estudo. Nos ensaios de distribuição de água, foi utilizada uma malha de coletores plásticos, de 8 cm de diâmetro, regularmente espaçados de 6 m, dispostos em uma área de 84 x 84 m, em cujo centro foi instalado o canhão PLONA-RL250. A velocidade e a direção do vento durante estes ensaios foram registradas, em intervalos regulares de 5 minutos, com auxílio de um anemômetro, modelo Weather Monitor II, da Davis, instalado a uma altura de 2 m do solo.

TABELA 1. Velocidade média do vento e combinações de bocais, e pressão de serviço registradas nos 53 ensaios de distribuição de água do canhão PLONA-RL250. **Average wind speed and nozzle pressure combinations during the 53 PLONA-RL250 catch can tests.**

| Bocal Auxiliar (mm) | Pressão de serviço (kPa)                                           |      |       |      |       |      |       |      |       |  |     |      |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|--|-----|------|
|                     | 392                                                                |      | 490   |      | 392   |      | 490   |      | 392   |  | 490 |      |
|                     | Velocidade média do vento durante cada ensaio (m.s <sup>-1</sup> ) |      |       |      |       |      |       |      |       |  |     |      |
| 7                   | 4,96                                                               | 4,72 | 2,95  | 3,13 | 5,32  | 5,83 |       |      |       |  |     |      |
|                     | 2,96                                                               | 3,45 |       | 2,84 | 4,74  | 4,64 |       |      |       |  |     |      |
| 6                   | 1,76                                                               |      | 2,79  | 1,83 | 3,57  | 3,39 | 2,43  | 2,71 |       |  |     | 2,87 |
|                     | 0,97                                                               |      | 2,61  |      | 2,54  | 1,34 | 1,73  | 2,04 |       |  |     | 2,74 |
|                     | 0,96                                                               |      |       |      | 2,01  |      | 1,00  |      |       |  |     |      |
|                     |                                                                    |      |       |      |       |      |       |      |       |  |     |      |
| 5                   | 4,11                                                               | 3,92 | 1,82  | 1,72 | 2,27  | 4,13 |       |      |       |  |     |      |
|                     | 1,71                                                               | 1,61 | 1,39  | 1,56 |       | 2,48 |       |      |       |  |     |      |
|                     |                                                                    |      | 1,05  |      |       |      |       |      |       |  |     |      |
| 0                   | 4,13                                                               | 4,00 | 2,24  | 2,25 | 2,03  | 2,39 |       |      |       |  |     |      |
|                     | 1,77                                                               | 1,15 | 1,58  | 1,90 |       | 1,17 |       |      |       |  |     |      |
|                     |                                                                    |      |       | 0,99 |       |      |       |      |       |  |     |      |
| Bocal Principal     | 14 mm                                                              |      | 16 mm |      | 18 mm |      | 20 mm |      | 22 mm |  |     |      |

Para simular a distribuição espacial de água, correspondente às mesmas condições operacionais e de vento observadas durante os ensaios de campo realizados com o PLONA-RL250, seguiu-se metodologia descrita por OLIVEIRA (2008) e FARIA et al. (2009). Utilizando o modelo de RICHARDS & WEATHERHEAD (1993), os valores das constantes semiempíricas foram ajustados por meio de determinações experimentais das dimensões da área molhada distorcida pelo vento (OLIVEIRA et al., 2009) e também com o auxílio de uma rotina computacional para planilha eletrônica *Excel* desenvolvida em *Visual Basic para Aplicativos (VBA)*.

A metodologia utilizada para transformar os valores de intensidade de precipitação das matrizes de distribuição de água, simuladas ou observadas, do aspersor PLONA-RL250, operando de forma estacionária no centro da malha de coletores, em valores de lâminas de água aplicada ao longo de uma linha perpendicular à trajetória infinita de deslocamento linear de um aspersor, é esquematizada na Figura 1. Esta metodologia, que é semelhante à utilizada por SMITH et al. (2008) e OLIVEIRA (2008), tem como base a aplicação da eq.(1), cujos elementos geométricos são definidos no esquema mostrado na Figura 1.

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^{i-n} (I_{0(i,j)} \cdot \Delta x)}{v} \quad (1)$$

em que,

$L_i$  - lâmina de ordem  $i$  aplicada ao longo da linha perpendicular ao deslocamento linear do aspersor, mm;

- $I_{0(i,j)obs}$  - intensidade de aplicação de água no coletor de índice  $i, j$ , da malha de coletores do ensaio de distribuição de água,  $mm\ h^{-1}$ ;
- $\Delta x$  - espaçamento regular entre coletores, m, e
- $v$  - velocidade de deslocamento linear do aspersor;  $m\ h^{-1}$ .

Em todas as simulações efetuadas, foi considerado que o aspersor, com ângulo de giro  $\alpha=180^\circ$ , desloca-se com velocidade linear ( $v, m\ h^{-1}$ ) constante de  $50\ m\ h^{-1}$ , ao longo de uma trajetória infinita, paralela ao eixo  $x$  do sistema de coordenadas dos ensaios de campo.

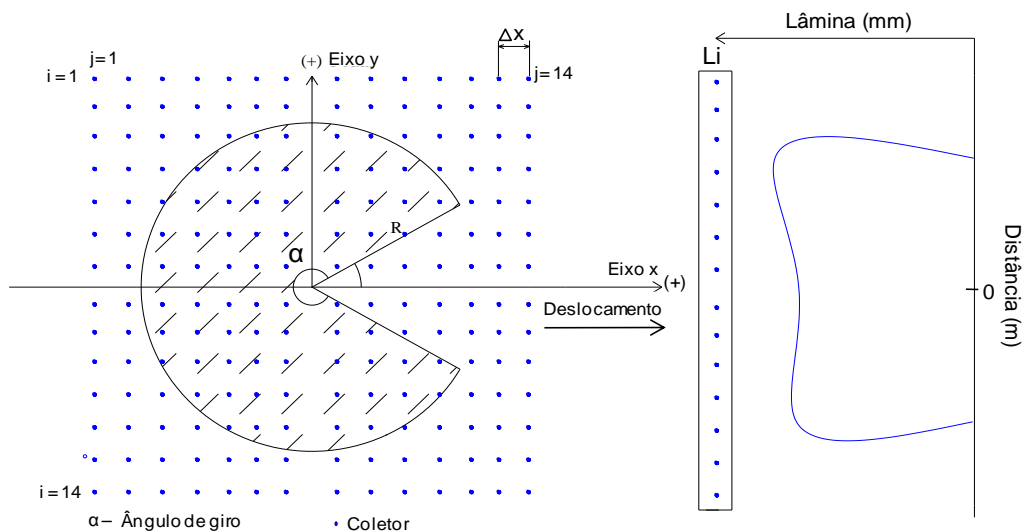


FIGURA 1. Simulação das lâminas aplicadas em um perfil transversal por meio da integração dos valores de intensidade de precipitação observados na operação estacionária do aspersor. **Catch can transect simulation through the integration of the simulated sprinkler distribution pattern with respect to the direction of travel.**

Nas simulações do perfil de aplicação de água de autopropelidos, o efeito do ângulo de giro selecionado para o aspersor, de  $360^\circ$ , sobre os valores de intensidade de precipitação da malha estacionária de distribuição de água, foi reproduzido de acordo com o seguinte esquema: (i) nos pontos de amostragem situados fora do setor molhado, os valores de intensidade de precipitação foram zerados; (ii) nos pontos de amostragem situados no interior do setor molhado, os valores de intensidade de precipitação foram corrigidos, conforme indicado pela eq.(2):

$$I_{0(i,j)} = \frac{360 \cdot I_{(i,j)}}{\alpha} \quad (2)$$

em que,

- $\alpha$  - ângulo do setor molhado pelo aspersor, graus;
- $I_{(i,j)}$  - taxa de aplicação de água, no ponto de amostragem  $(i,j)$  da malha estacionária do aspersor operando com ângulo de  $360^\circ$ ,  $mm\ h^{-1}$ , e
- $I_{0(i,j)}$  - taxa de aplicação de água, no ponto de amostragem  $(i,j)$  da malha estacionária do aspersor operando com ângulo menor que  $360^\circ$ ,  $mm\ h^{-1}$ .

Para simulação da uniformidade de distribuição de água de equipamentos autopropelidos, operando sob diferentes espaçamentos de carreadores, os valores de lâmina aplicada na linha perpendicular ao deslocamento do aspersor foram sobrepostos lateralmente, seguindo metodologia amplamente utilizada na avaliação de equipamentos autopropelidos (ISO 8224-1 (ISO, 2004)).

A habilidade com que o modelo ajustado é capaz de prever a uniformidade de aplicação de água em sistemas autopropelidos, equipados com o aspersor PLONA-RL250, operando sob condições de vento, foi avaliada, determinando-se: (i) o desvio absoluto médio, e (ii) o valor do

coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da reta ajustada aos pares (simulados e observados) de valores de CUC, além de se determinar, conforme CAMARGO & SENTELHAS (1997), o (iii) o índice de confiança de desempenho (c), que é obtido pela multiplicação do coeficiente de correlação (r) pelo índice de Willmott (d), conforme apresentado nas expressões abaixo:

$$c = r d \quad (3)$$

com:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (4)$$

em que,

$P_i$  - valor estimado;

$O_i$  - valor observado, e

$\bar{O}$  - média dos valores observados.

O índice de confiança de desempenho foi avaliado segundo escala proposta por CAMARGO & SENTELHAS (1997): Ótimo ( $c > 0,85$ ); Muito Bom ( $0,76 \leq c \leq 0,85$ ); Bom ( $0,66 \leq c \leq 0,75$ ); Mediano ( $0,61 \leq c \leq 0,65$ ); Sofrível ( $0,51 \leq c \leq 0,60$ ); Mau ( $0,41 \leq c \leq 0,50$ ); e Péssimo ( $c \leq 0,40$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A relação entre 354 valores de CUC gerados a partir de simulações baseadas no modelo RICHARDS & WEATHERHEAD (1993) ( $CUC_{Sim}$ ), ajustado ao aspersor PLONA-RL250, e 354 valores de CUC obtidos a partir de ensaios de campo ( $CUC_{Obs}$ ), é mostrada na Figura 2. Os pares de valores de CUC apresentados na Figura 2 estão concentrados ao redor da reta 1:1. A adequação desta concentração é confirmada pelo valor do índice de confiança dos valores simulados ( $c = 0,85 \times 0,91 = 0,77$ ), que, de acordo com a escala de CAMARGO & SENTELHAS (1997), corresponde a uma classificação do tipo: Muito Bom ( $0,76 \leq c \leq 0,85$ ).

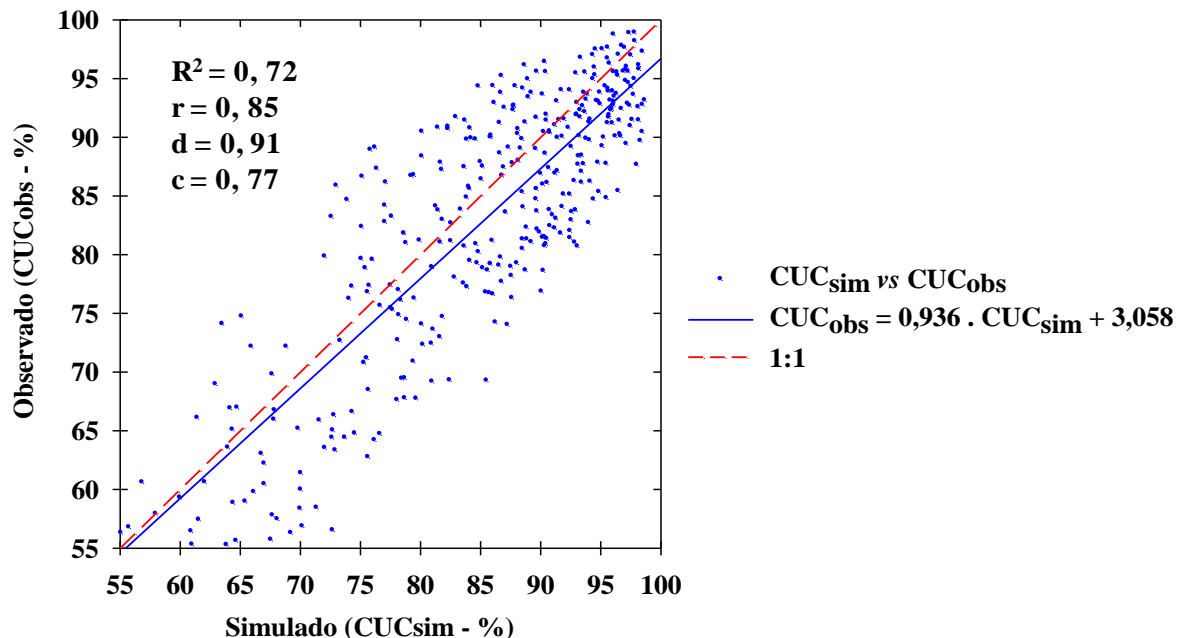


FIGURA 2. Valores de Coeficiente de Uniformidade de Christiansen obtidos a partir de simulações ( $CUC_{Sim}$ ) e obtidos a partir de ensaios de campo ( $CUC_{Obs}$ ). **Christiansen Uniformity Coefficient values based on simulations ( $CUC_{Sim}$ ) versus values based on field tests ( $CUC_{Obs}$ ).**

Observa-se boa correlação ( $R^2 = 0,72$ ) entre os valores de CUC, simulados pelos dois processos, sendo que a distribuição dos pontos em relação à reta 1:1, quando comparada com a linha de tendência ajustada aos pontos, demonstra que os valores de CUC simulados com malhas geradas pelo modelo ajustado tendem a ser pouco superiores aos valores simulados com malhas medidas em campo.

Na Figura 3, são apresentados 354 valores absolutos da diferença entre valores de CUC, expressos em porcentagem, oriundos de simulações e de ensaios de campo. Nessa figura, pode-se observar que o valor médio das diferenças absolutas (5,38%), representado pela linha vermelha, situa-se entre as médias de 2,34% encontrada por PRADO & COLOMBO (2009), em comparações obtidas com perfis radiais compostos em laboratório e 7% relatada por COLOMBO (1991), com simulações baseadas em distribuições de água de aspersores medidas em campo.

A análise do desempenho do modelo ajustado não pode deixar de considerar que as diferenças nas estimativas de CUC encontradas neste trabalho não refletem apenas as deficiências do modelo ajustado, mas também refletem a dificuldade de se obter, ao longo do período de duração dos ensaios de campo, a mesma estabilidade nos valores dos parâmetros climáticos considerados nas simulações.

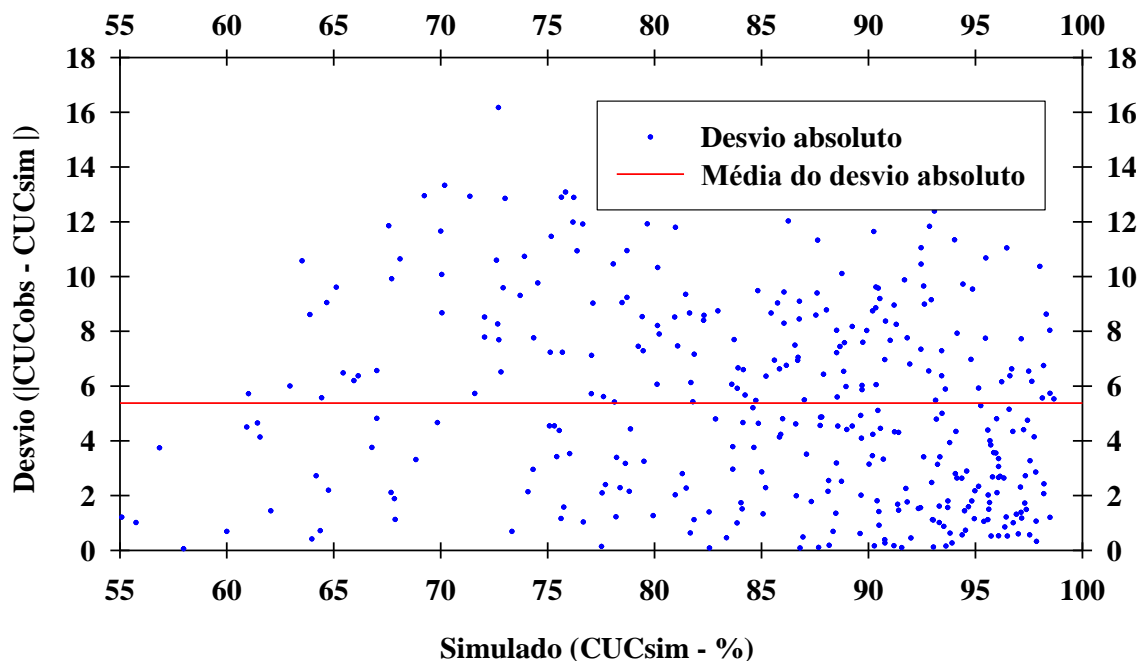


FIGURA 3. Diferenças absolutas entre estimativas de CUC obtidas com dados de ensaios de campo ( $CUC_{obs}$  - %) e com dados de ensaios simulados ( $CUC_{sim}$  - %). **Absolute differences among CUC estimates based on field tests data ( $CUC_{obs}$ ) and simulated data ( $CUC_{sim}$ -%).**

Com o auxílio do programa gráfico SURFER, versão 6.0 (KECKLER, 1997), geraram-se superfícies de valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC - %), simulado em função do espaçamento entre carregadores, expresso em porcentagem do diâmetro molhado (DM - %) do aspersor, e da velocidade do vento ( $v$ ,  $m\ s^{-1}$ ), conforme se observa na Figura 4. Nas simulações, foram consideradas três direções de incidência do vento (paralela, inclinada de  $45^\circ$  e perpendicular ao deslocamento do aspersor) e o aspersor PLONA-RL250, com ângulo de giro de  $180^\circ$ , operando em condições distintas de bocal e pressão de serviço ((A) 22 x 6 mm x 392 kPa; (B) 18 x 5 mm x 490 kPa; (C) 14 x 5 mm x 392 kPa; (D) 14 x 5 mm x 588 kPa).

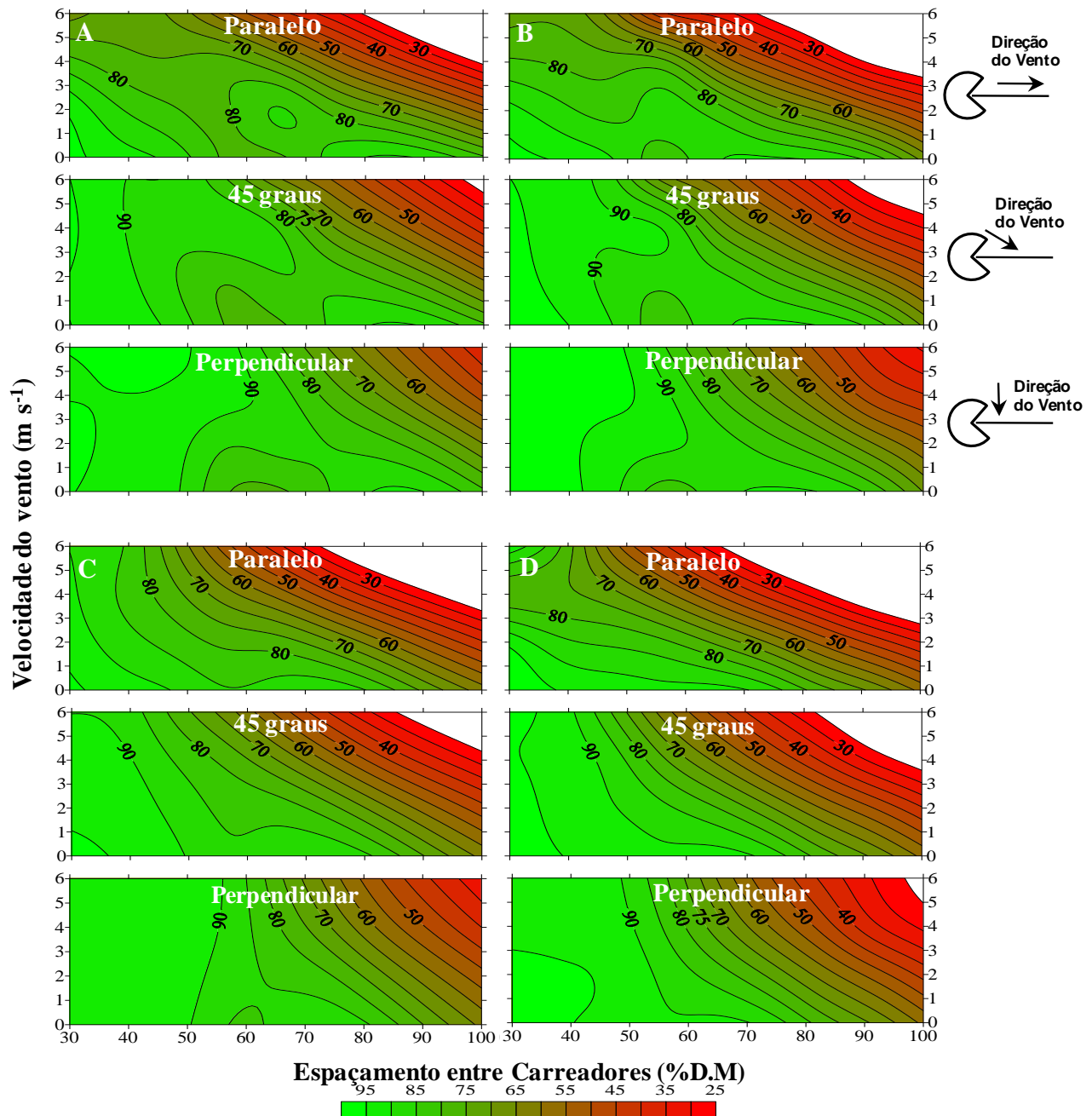


FIGURA 4. CUC em função da velocidade do vento e do espaçamento entre carreadores, em quatro diferentes combinações de bocal x pressão (A, B, C e D) e três direções de incidência do vento. **CU as function of wind speed and towpath spacing at four different sprinkler operational conditions (A, B, C, and D) and three wind directions.**

A análise da Figura 4 contrapõe as sugestões de SHULL & DYLLA (1976), os quais afirmam que os espaçamentos entre carreadores devem ser reduzidos à medida que os mesmos são orientados em relação à direção paralela ao deslocamento do aspersor.

Na Tabela 2, são apresentadas equações lineares que foram ajustadas, a partir das coordenadas das isolinhas que representam o valor de CUC de 80% de cada superfície, mostrada na Figura 4 (A, B, C e D), para estimar o Espaçamento Máximo entre Carreadores (EMC, expresso em porcentagem do Diâmetro Molhado - DM%), em função da velocidade do vento ( $v - m s^{-1}$ ).

TABELA 2 Espaçamento Máximo entre Carreadores (EMC), resultando em CUC de 80%.  
**Maximum towpath spacing (EMC) resulting on a 80% CUC level.**

| Figura |                | Vento Paralelo     | Vento 45 graus    | Vento Perpendicular |
|--------|----------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| 4A     | EMC            | - 12,920 v + 96,78 | - 6,678 v + 95,89 | - 5,571 v + 98,18   |
|        | r <sup>2</sup> | 0,941              | 0,954             | 0,951               |
| 4B     | EMC            | - 17,670 v + 95,32 | - 6,464 v + 89,10 | - 5,357 v + 90,21   |
|        | r <sup>2</sup> | 0,878              | 0,969             | 0,931               |
| 4C     | EMC            | - 7,214 v + 77,92  | - 6,607 v + 84,53 | - 3,785 v + 83,64   |
|        | r <sup>2</sup> | 0,803              | 0,954             | 0,913               |
| 4D     | EMC            | - 15,820 v + 83,64 | - 5,500 v + 76,92 | - 3,714 v + 77,14   |
|        | r <sup>2</sup> | 0,915              | 0,933             | 0,915               |

Os valores mostrados na Tabela 2 e Figura 4 ilustram o fato de que a seleção do espaçamento entre carreadores deve considerar não só o valor da velocidade do vento, mas também sua direção, e ainda, conforme observado também por PRADO et al. (2007), a condição operacional do aspersor, que, neste caso, foi representada pelas diferentes combinações de diâmetro de bocal e pressão de serviço. Os valores apresentados ilustram também a dificuldade de se estabelecer um critério de espaçamento entre carreadores que seja válido para todas as condições.

Nas condições estudadas, percebe-se nitidamente maior influência da velocidade do vento sobre a uniformidade de distribuição de água quando a direção predominante do vento é paralela ao carreador. Esta constatação está de acordo com as recomendações de TARJUELO (2005), no sentido de orientar o deslocamento do aspersor perpendicularmente à direção predominante do vento, para diminuir a distorção por ele causada. Os resultados apresentados confirmam também as observações de KELLER & BLIESNER (1990), quanto à obtenção de valores adequados de uniformidade sob espaçamentos de carreadores menores que 55% do diâmetro de alcance do aspersor, mesmo sob condições de elevadas velocidades de vento.

SMITH et al. (2008) relatam que, antecedendo à implantação do projeto, ou mesmo depois de instalado o sistema de irrigação, utilizando séries históricas contendo dados de velocidade e direção do vento ou, ainda, dados obtidos de uma estação meteorológica, é possível estabelecer a velocidade média e a direção predominante do vento para uma determinada região. Tal informação demonstra ter grande relevância na orientação do posicionamento do sistema de irrigação em campo, aumentando a eficiência do mesmo, podendo ainda ser aplicada a modelos de simulação da distribuição de água de aspersores (OLIVEIRA et al., 2009).

## CONCLUSÕES

O efeito da direção do vento não pode ser desconsiderado quando se pretende determinar o espaçamento entre carreadores em função da velocidade do vento. À medida que a incidência do vento passa de perpendicular para paralela ao eixo de deslocamento do aspersor, os efeitos prejudiciais da velocidade do vento sobre a uniformidade de aplicação de água dos sistemas autopropelidos são ampliados.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, pela bolsa de estudos do primeiro autor e pelos recursos provenientes do projeto de pesquisa CAG-1607/06.

## REFERÊNCIAS

CAMARGO, A.P. de; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.



- COLOMBO, A. *Simulação do desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido*. 1991. 120 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.
- FARIA, L.C.; COLOMBO, A.; OLIVEIRA, H.F.E.; PRADO, G. Simulação da uniformidade da irrigação de sistemas convencionais de aspersão operando sob diferentes condições de vento. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.29, n.1, p.19-27, 2009.
- FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R.; GONÇALVES, A.C.A.; HEBEL JUNIOR, A. Produtividade do feijoeiro sob diferentes uniformidades de distribuição de água na superfície e na subsuperfície do solo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.2, p.414-425, 2007.
- ISO. International Organization for Standardization. *ISO 8224-1: traveller irrigation machines: part 1: operational characteristics and laboratory and field test methods*. Switzerland, 2004. 36 p.
- KECKLER, D. *Surfer for windows: version 6 User's Guide - Contouring and 3D Surface Mapping*. Golden: Golden Software, 1997. 540 p.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. *Sprinkle and trickle irrigation*. New York: AnaviBook, 1990. 652 p.
- MONTAZAR, A.; SADEGHI, M. Effects of applied water and sprinkler irrigation uniformity on alfalfa growth and hay yield. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.95, n.11, p.1279-1287, 2008.
- OLIVEIRA, H.F.E. *Modelagem semiempírica da distribuição de água de aspersores autopropelidos sob diferentes condições de vento*. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- OLIVEIRA, H.F.E.; COLOMBO, A.; FARIA, L.C. Modelagem dos efeitos do vento sobre as dimensões do alcance do jato de um canhão hidráulico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.818-824, 2009. Suplemento.
- PLAYAN, E.; ZAPATA, N.; FACI, J.M.; TOLOSA, D.; LACUERVA, J.L.; PELEGRI, J.; SALVADOR, R.; SANCHES, I.; LAFITA, A. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.84, n.1, p.89-100, 2006.
- PRADO, G.; COLOMBO, A. Análise da uniformidade de aplicação de água pelo aspersor Plona-RL250 em sistemas autopropelidos de irrigação. *Irriga*, Botucatu, v.12, n.2, p.249-262, 2007.
- PRADO, G.; COLOMBO, A. Composição de perfis radiais de distribuição de água de aspersores. *Irriga*, Botucatu, v.14, n.1, p.41-53, 2009.
- PRADO, G.; COLOMBO, A. Distribuição espacial de água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação - Parte I: Modelagem com o Simulasoft. *Irriga*, Botucatu, v.15, n.1, p.51-62, 2010.
- PRADO, G.; COLOMBO, A.; BIAGIONI, P. F. Ângulo de giro e espaçamento entre carregadores em sistemas autopropelidos de irrigação com o aspersor PLONA-RL400. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.2, p.346-353, 2007.
- RICHARDS, P. J.; WEATHERHEAD, E. K. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Amsterdam, v.54, n.4, p.281-291, 1993.
- SHULL, H.; DYLLA, A. S. Wind effects on water application patterns from a large, single nozzle sprinkler. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v.19, n.3, p.501-504, 1976.
- SILVA, L.L.; SERRALHEIRO, R.; SANTOS, N. Improving irrigation performance in hose-drawn traveller sprinkler systems. *Biosystems Engineering*, Amsterdam, v.96, n.1, p.121-127, 2007.

SMITH, R. J.; GILLIES, M. H.; NEWELL, G.; FOLEY, J. P. A decision support model for travelling gun irrigation machines. *Biosystems Engineering*, Amsterdam, v.100, n.1, p.126-136, 2008.

TARJUELO, J.M. *El riego por aspersión y su tecnología*. 3<sup>rd</sup> ed. Madrid: Mundi, 2005. 581 p.

ZAPATA, N.; PLAYÁN, E.; MARTÍNEZ, A.; SÁNCHEZ, I.; FACI, J. M.; LECINA, S. From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.87, n.2, p.187-199, 2007.

ZAPATA, N.; PLAYÁN, E.; SKHIRI, A.; BURGUETE, J. Simulation of a collective solid-set sprinkler irrigation controller for optimum water productivity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.135, n.1, p.13-24, 2009.