

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ÁGUA APLICADA POR EQUIPAMENTOS AUTOPROPELIDOS DE IRRIGAÇÃO - PARTE II: VALIDAÇÃO DO SIMULASOFT

Giuliani do Prado; Alberto Colombo

Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, giulianip@bol.com.br

1 RESUMO

São apresentados resultados da validação analítica e experimental do aplicativo computacional SIMULASOFT, que simula a distribuição espacial da lâmina de água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação. Para validação analítica, foram calculados valores de lâmina e uniformidade de aplicação de água, considerando-se um aspersor com perfil radial de formato triangular, em deslocamento linear com velocidade constante, operando com ângulos de giro de 270° e 360°. A comparação entre valores gerados analiticamente e pelo aplicativo demonstrou a equivalência dos dois processos. Valores de lâmina de água aplicados, observados em quatro ensaios de campo, realizados com um carretel enrolador dotado de um aspersor, da marca SIME®, modelo Big-River, quando comparados com valores produzidos pelo aplicativo, para as mesmas condições observadas nos ensaios de campo, apresentaram um coeficiente de determinação médio de 91,3%. Nas comparações entre os valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen, simulados e observados em campo, verificou-se um erro relativo médio de 3,6%.

UNITERMOS: ensaios de uniformidade, simulação matemática, aspersores

PRADO, G. do; COLOMBO, A. SPATIAL DISTRIBUTION OF WATER APPLIED BY TRAVELER IRRIGATION MACHINES – PART II: SIMULASOFT VALIDATION

2 ABSTRACT

Results from both analytical and experimental validation of Simulasoft, a software that simulates spatial distribution of water applied by traveler irrigation machines, are presented. For the analytical validation, values of applied water depth and irrigation uniformity were input considering a sprinkler which presented radial water application profile and had triangular shape, moving along a straight line at constant speed and operating with wetted sectors of 270° and 360°. Comparisons among analytically input values and simulated ones have demonstrated that the two procedures are equivalent. When water depth values determined at four field tests of a traveler irrigation machine, set with a SIME® sprinkler, Big-River model, were compared to simulated values considering the operational conditions observed at field tests, a 91.3% determination coefficient was found. Comparisons among field observed and simulated Christiansen uniformity coefficient values showed that the relative error has a 3.6% average value.

KEYWORDS: uniformity tests, irrigation uniformity, sprinklers

3 INTRODUÇÃO

O aplicativo computacional SIMULASOFT (Prado, 2004) foi desenvolvido para contribuir com a melhora do desempenho de equipamentos autopropelidos de irrigação, permitindo, através da simulação da distribuição espacial da água aplicada por estes equipamentos, identificar as condições operacionais que resultam em um grau adequado de uniformidade de aplicação de água.

Obviamente, a confiabilidade dos resultados fornecidos pelo SIMULASOFT, a exemplo dos demais aplicativos disponíveis para este fim, fica condicionada ao confronto entre previsões produzidas pelo aplicativo e valores reais medidos em campo (Vories et al., 1987; Colombo, 1991; Osterno, 1994; Montero et al., 2001; Omary & Sumner, 2001; Smith et al., 2008).

Apesar dos ensaios de campo serem considerados fundamentais (Tarjuelo et al., 1999), para calibração de modelos de simulação, deve-se levar em conta, conforme salienta Victoria (1992), que, no caso dos sistemas de irrigação por aspersão, diferenças climáticas dificultam consideravelmente a comparação entre valores de lâmina e uniformidade. Além das variações induzidas pelas condições climáticas, deve-se também considerar que, enquanto as condições operacionais simuladas são fixas e invariáveis, os testes de campo estão sujeitos a erros no método experimental, tais como mensuração da vazão, pressão e volume coletado (Montero et al., 2001).

Em função das dificuldades e limitações dos ensaios de campo, torna-se necessário confrontar valores produzidos pelo aplicativo SIMULASOFT com valores oriundos de expressões analíticas. Este confronto tem o mérito de detectar pequenas incorreções numéricas, que poderiam estar presentes nas rotinas numéricas do aplicativo em questão, que, de outra forma, poderiam ser encobertas pelas pequenas variações nas condições climáticas e operacionais que são inerentes aos ensaios de campo.

No caso particular dos aplicativos que simulam a distribuição espacial da água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação, as expressões analíticas desenvolvidas por Bittinger & Longenbaugh (1962) podem ser utilizadas para verificação da existência de incorreções no procedimento numérico de simulação (Zaggo et al., 1988; Colombo, 1991). No entanto, a verificação baseada nas expressões analíticas de Bittinger & Longenbaugh (1962) para equipamentos autopropelidos restringe-se a uma pequena parcela dos valores simulados, porque estas expressões têm sua aplicação limitada aos casos nos quais o aspersor trabalha com o mecanismo setorial desativado (giro de 360°) e à região central da faixa molhada, onde não existem os efeitos de borda causados pelo início e término da movimentação do aspersor.

Tendo em vista a necessidade de confrontar resultados fornecidos pelo aplicativo SIMULASOFT com resultados de campo e as limitações das expressões analíticas disponíveis para permitir um confronto adequado com valores simulados, este trabalho tem os seguintes objetivos: (i) apresentar expressões analíticas para o cálculo da distribuição espacial da lâmina de água aplicada em toda a faixa molhada formada pelo deslocamento linear de um aspersor operando com ângulos de giro variando entre 180° e 360°; (ii) demonstrar a confiabilidade dos dados simulados pelo aplicativo SIMULASOFT através do confronto entre: (a) valores simulados e valores obtidos analiticamente e (b) entre valores simulados e valores reais, obtidos em ensaios de campo de equipamentos autopropelidos de irrigação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A exatidão da rotina numérica do SIMULASOFT foi avaliada através da comparação entre valores fornecidos pelo aplicativo e valores obtidos por expressões analíticas especialmente desenvolvidas para este fim. Nesta fase da validação, foi considerado que o aspersor que se desloca linearmente ao longo do carreador apresenta, na região coberta pelo seu ângulo de giro, um perfil radial de distribuição de água de formato geométrico triangular (perfil B de Christiansen), que pode ser caracterizado através da seguinte expressão:

$$i(r) = \begin{cases} \text{Para : } 0 \leq r \leq R \rightarrow i(r) = I_0 \cdot \frac{360}{\theta} \cdot \frac{R-r}{R}; & \text{com : } I_0 = \frac{3000 \cdot Q}{\pi \cdot R^2} \\ \text{Para : } r > R \rightarrow i(r) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

em que, $i(r)$ é a intensidade de precipitação em função da distância radial ao aspersor (mm h^{-1}); r a distância radial ao aspersor (m); R o raio de alcance do aspersor (m); Q a vazão do aspersor ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$); θ o ângulo de giro do aspersor (graus).

Conforme indicado na Figura 1, na faixa molhada formada pelo deslocamento do aspersor, o sistema de coordenadas utilizado no cálculo das lâminas tem a sua origem ($x = 0$, $y = 0$) no ponto de início de deslocamento do aspersor no carreador.

No sistema de coordenadas da Figura 1, o eixo x é coincidente com o carreador e tem a mesma direção do deslocamento do aspersor. No eixo x , o ponto de término do deslocamento do aspersor é representado pelas coordenadas ($x = x_p$, $y = 0$), sendo x_p o comprimento do carreador. O eixo y determina as distâncias perpendiculares ao carreador.

De uma maneira geral, a lâmina de água ($L(x, y)$, em mm) aplicada em cada ponto de amostragem (coletor de água fictício) pode ser determinada pela soma de três parcelas distintas: (i) a lâmina aplicada no intervalo de tempo (T_{pi} em horas) que o aspersor opera estacionado no ponto de início do deslocamento no carreador; (ii) a lâmina aplicada durante o deslocamento linear do aspersor, no intervalo de tempo correspondente ao tempo de molhamento (T_M em horas) do ponto considerado; e (iii) a lâmina aplicada durante o tempo (T_{pf} em horas) de operação do aspersor estacionado no ponto de término do deslocamento linear do aspersor no final do carreador. Estas três parcelas são representadas na equação 2:

$$L(x, y) = T_{pi} \cdot i\left(r = \sqrt{x^2 + y^2}\right) + \int_0^{T_M} i\left(r = \sqrt{y^2 + (W_a - V \cdot t)^2}\right) \cdot dt + \dots \quad (2)$$

$$\dots + T_{pf} \cdot i\left(r = \sqrt{(x - CC)^2 + y^2}\right)$$

em que, V é a velocidade de deslocamento linear do aspersor no carreador (m h^{-1}); W_a a diferença entre o valor da coordenada x do coletor considerado e o valor assumido pela coordenada x do aspersor em deslocamento, no instante ($t = 0$) em que se inicia a fase de aplicação de água no coletor com o aspersor em movimento linear (m); t o tempo transcorrido desde o início da fase de aplicação de água no coletor com o aspersor em deslocamento (h).

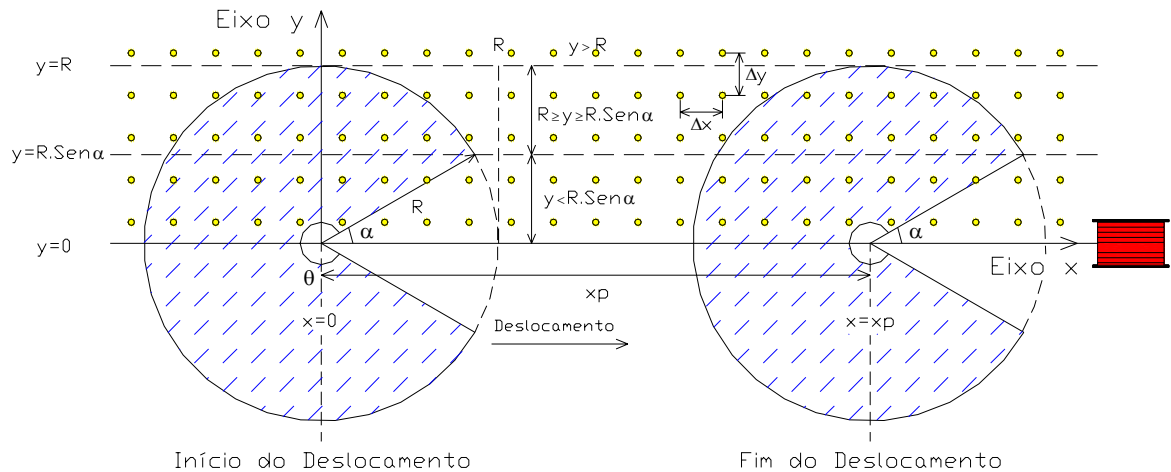


Figura 1. Esquema do sistema de coordenadas cartesianas (x, y) utilizado para representar a distribuição espacial das lâminas de água aplicadas na faixa molhada.

O tempo de molhamento de cada coletor (TM, em h) é calculado com base em:

$$TM = \frac{W_a - W_b}{V} \quad (3)$$

em que, W_b é a diferença entre o valor da coordenada x do coletor considerado e o valor assumido pela coordenada x do aspersor em deslocamento, no instante ($t = TM$) em que termina a fase de aplicação de água no coletor com o aspersor em movimento linear (m).

Nas diferentes regiões da faixa molhada, o cálculo das variáveis W_a e W_b é feito conforme indicado na Tabela 1, que considera o ângulo α (em graus) que, de acordo com a equação 4, representa metade do ângulo seco do aspersor mostrado na Figura 1:

$$\alpha = \frac{360 - \theta}{2} \quad (4)$$

Tabela 1. Procedimento para o cálculo de W_a e W_b , nas diversas regiões da faixa molhada esquematizadas na Figura 1.

Se $0 \leq y < R \cdot \sin(\alpha)$		Se $R \cdot \sin(\alpha) \leq y < R$	
Se $x \leq -\sqrt{R^2 - y^2}$	$W_a = 0$	Se $x \leq -\sqrt{R^2 - y^2}$	$W_a = 0$
	$W_b = 0$		$W_b = 0$
Se $x > -\sqrt{R^2 - y^2}$ e $x \leq y \cdot R \cdot \sin(\alpha)$	$W_a = x$	Se $x > -\sqrt{R^2 - y^2}$ e $x < \sqrt{R^2 - y^2}$	$W_a = x$
	$W_b = -\sqrt{R^2 - y^2}$		$W_b = -\sqrt{R^2 - y^2}$
Se $x > y \cdot R \cdot \sin(\alpha)$ e $x \leq CC - \sqrt{R^2 - y^2}$	$W_a = y \cdot R \cdot \sin(\alpha)$	Se $x \geq \sqrt{R^2 - y^2}$ e $x < CC - \sqrt{R^2 - y^2}$	$W_a = -\sqrt{R^2 - y^2}$
	$W_b = -\sqrt{R^2 - y^2}$		$W_b = -\sqrt{R^2 - y^2}$
Se $x > CC - \sqrt{R^2 - y^2}$ e $x \leq CC + y \cdot R \cdot \sin(\alpha)$	$W_a = y \cdot R \cdot \sin(\alpha)$	Se $x \geq CC - \sqrt{R^2 - y^2}$ e $x < CC + \sqrt{R^2 - y^2}$	$W_a = -\sqrt{R^2 - y^2}$
	$W_b = x - CC$		$W_b = x - CC$
Se $x > CC + y \cdot R \cdot \sin(\alpha)$	$W_a = 0$	Se $x < CC + \sqrt{R^2 - y^2}$	$W_a = 0$
	$W_b = 0$		$W_b = 0$

Para solução da integral da equação 2, é vantajoso trocar a variável de integração “t” pela variável “w”, definida conforme indicado pela equação 5:

$$\text{Se: } w = Wa - V \cdot t, \quad \text{então: } dt = \frac{-dw}{V} \quad (5)$$

A troca de variáveis na função $i(r)$, que descreve a intensidade de precipitação do aspersor (equação 1), e a solução da integral resultante da troca são mostradas abaixo:

$$\begin{aligned} \int_0^{TM} i\left(r = \sqrt{y^2 + (Wa - V \cdot t)^2}\right) dt &= \frac{I_0}{R} \frac{360}{\theta} \int_0^{TM} \left(R - \sqrt{y^2 + (Wa - V \cdot t)^2}\right) dt = \\ &= \frac{I_0}{V \cdot R} \frac{360}{\theta} \int_{wb}^{wa} \left(R - \sqrt{y^2 + w^2}\right) dw = \\ &= \frac{I_0}{V} \frac{360}{\theta} \left[Wa - Wb - \frac{Wa \cdot si - Wb \cdot st - y^2 \cdot \ln\left(\frac{Wa + si}{Wb + st}\right)}{2 \cdot R} \right] \quad (6) \\ \text{com: } si &= \sqrt{y^2 + Wa^2} \quad \text{e} \quad st = \sqrt{y^2 + Wb^2} \end{aligned}$$

Para o caso de um campo irrigado composto de diversos carregadores, de mesmo comprimento e igualmente espaçados, cada ponto de amostragem é caracterizado pelas coordenadas (XG,YG) do sistema de coordenadas mostrado na Figura 2.

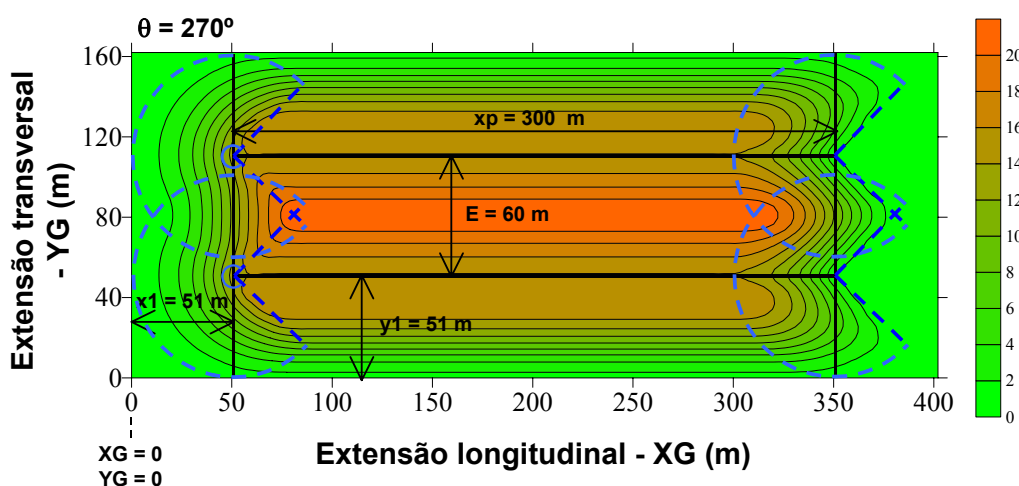


Figura 2. Esquema do sistema de coordenadas cartesianas (XG, YG) utilizado para representar as lâminas sobrepostas LS(XG,YG), em um campo com diversos carregadores.

Para cálculo das lâminas sobrepostas, conforme indicado na equação 7, as coordenadas (XG,YG), que representam a posição dos coletores em relação à origem do sistema de coordenadas do campo, são, sucessivamente, transformadas para o sistema de coordenadas (x,

y), que representa a posição dos coletores em relação à origem de cada carregador, e aplicadas na função $L(x, y)$ da equação 2:

$$LS(XG, YG) = \sum_{j=1}^{Nc} L[XG - X1, YG - (Y1 + (j-1) \cdot E)] \quad (7)$$

em que, $LS(XG, YG)$ é a lâmina aplicada em (XG, YG) , considerando a sobreposição das lâminas aplicadas em carregadores adjacentes (mm); NC o número de carregadores no campo irrigado; $X1$ a distância longitudinal entre o canto inferior esquerdo da área irrigada e o ponto de início da movimentação do aspersor no primeiro carregador (m); $Y1$ a distância transversal entre o canto inferior esquerdo da área irrigada e o início do carregador (m); E o espaçamento entre carregadores (m).

Na validação experimental do SIMULASOFT, valores, de lâmina de água e de uniformidade da irrigação, simulados pelo aplicativo foram comparados com valores obtidos em ensaios de campo de um equipamento do tipo carretel enrolador. Nesta comparação, foram utilizados valores obtidos por Rocha (2000), em uma área com declividade inferior a 1%, em condições de velocidade do vento menores que $1,5 \text{ m s}^{-1}$, com um equipamento dotado de um aspersor do tipo canhão hidráulico, de reversão lenta, da marca SIME®, modelo Big River. Os valores de vazão, de raio de alcance e do perfil radial de distribuição de água, que são requeridos pelo SIMULASOFT para efetuar as simulações de distribuição espacial da água, foram determinados, no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Lavras, em ensaios de um aspersor Big River operando com as mesmas combinações de bocais e pressões de serviço (22 mm x 392 kPa, 22 mm x 392 kPa e 24 mm x 490 kPa) descrito nos ensaios realizados por Rocha (2000).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

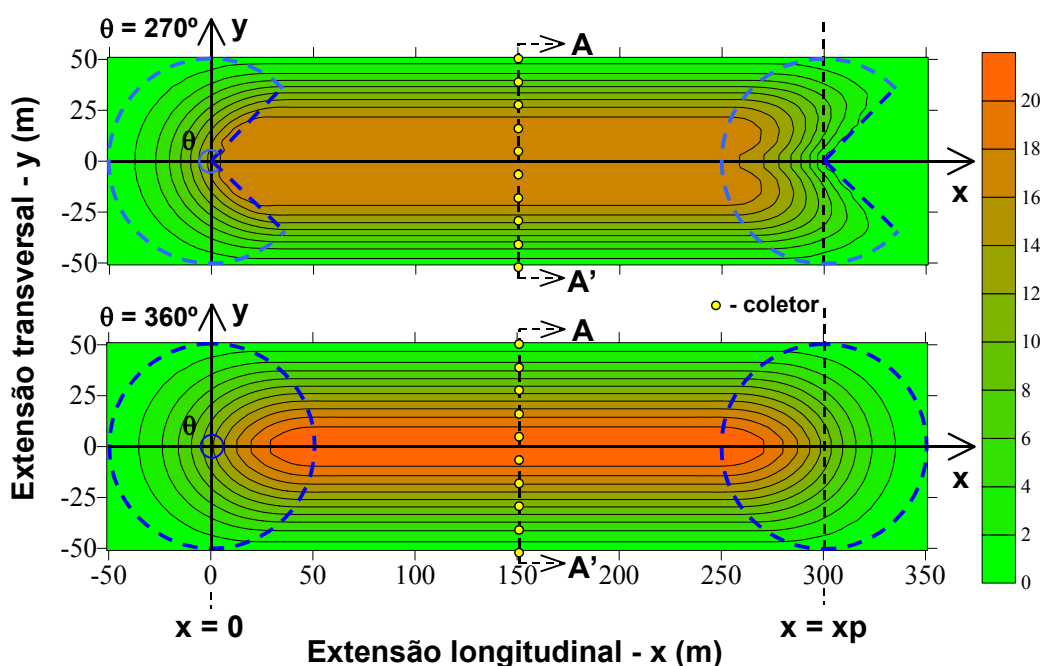


Figura 3. Lâminas (em mm) resultantes do deslocamento linear, com velocidade de 50 m h^{-1} , de um aspersor, com perfil radial de distribuição de formato triangular, com raio de 50,6 m e vazão de $56,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, operando com ângulo de giro de 270° e 360° .

Os valores de lâmina de água representados na Figura 3 foram computados através das equações 2 e 6, considerando um carreador com comprimento total (x_p) de 300 m, no qual se desloca, com velocidade (V) constante de 50 m h^{-1} , um aspersor, com perfil radial de distribuição de formato triangular, com raio (R) de 50,6 m e vazão (Q) de $56,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, operando, sem tempo de parada nas extremidades ($T_{pi} = T_{pf} = 0\text{h}$), com dois diferentes ângulos de giro ($\alpha = 270^\circ$ e $\alpha = 360^\circ$).

A Figura 4 permite comparar valores de lâmina de água, tomados em perfis transversais localizados no centro ($x = 150 \text{ m}$) das faixas molhadas esquematizadas na Figura 3 (cortes AA'), que foram simulados pelo processo analítico (azul) com valores de lâmina fornecidos pela rotina numérica do SIMULASOFT (vermelho). Os valores unitários dos coeficientes de determinação, mostrados nesta figura, indicam que as lâminas geradas pela simulação numérica são, essencialmente, iguais àquelas computadas analiticamente.

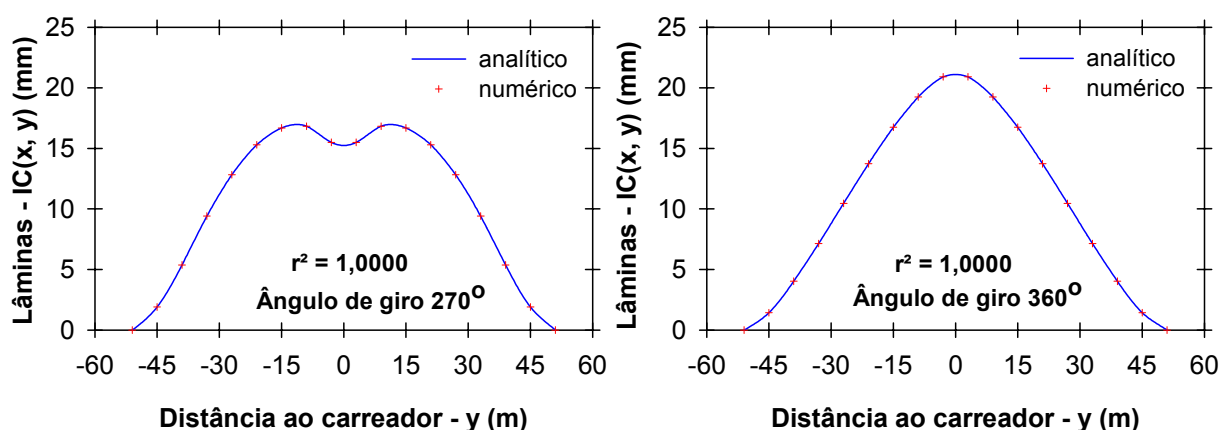


Figura 4. Lâminas aplicadas, calculadas pelo processo analítico (azul) e pela rotina numérica do SIMULASOFT (vermelho), ao longo dos perfis transversais AA' tomados no centro das faixas molhadas ($\alpha = 270^\circ$ e $\alpha = 360^\circ$) esquematizadas na Figura 3.

A Figura 5 permite comparar valores médios de lâmina, tomados em perfis transversais das faixas molhadas esquematizadas na Figura 3, abrangendo desde $y = 3 \text{ m}$ até $y = 51 \text{ m}$, com incremento constante de 6 m, dispostos longitudinalmente, desde $x = -51 \text{ m}$ até $x = 351 \text{ m}$, com incremento de 6 m, que foram simulados pelo processo analítico (azul) com valores de lâmina fornecidos pela rotina numérica do SIMULASOFT (vermelho). A equivalência dos valores obtidos pelos dois processos analisados, mostrada na Figuras 4, é também demonstrada na Figura 5.

A grande variação dos valores de lâmina, nas extremidades das faixas molhadas, mostrada na Figura 5, ilustra a necessidade da seleção adequada dos tempos de parada (T_{pi} e T_{pf}) nas extremidades das faixas, conforme ressaltam Keller & Bliesner (1990) e Tarjuelo (1999).

Na Figura 6, são apresentados valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) obtidos através da sobreposição (equação 4) das lâminas dos perfis transversais mostrados na Figura 4. A proximidade entre valores de uniformidade mostrados, é consequência da proximidade entre os valores de lâmina mostrada nas Figuras 3 e 4. Alterações nos valores de uniformidade, correspondentes a um mesmo espaçamento de carreadores, em função dos diferentes ângulos de giro do aspersor (270° e 360°) considerados

na Figura 6, ilustram a importância de se selecionar adequadamente o ângulo de giro do canhão, conforme ressaltam Keller & Bliesner (1990) e Tarjuelo (1999).

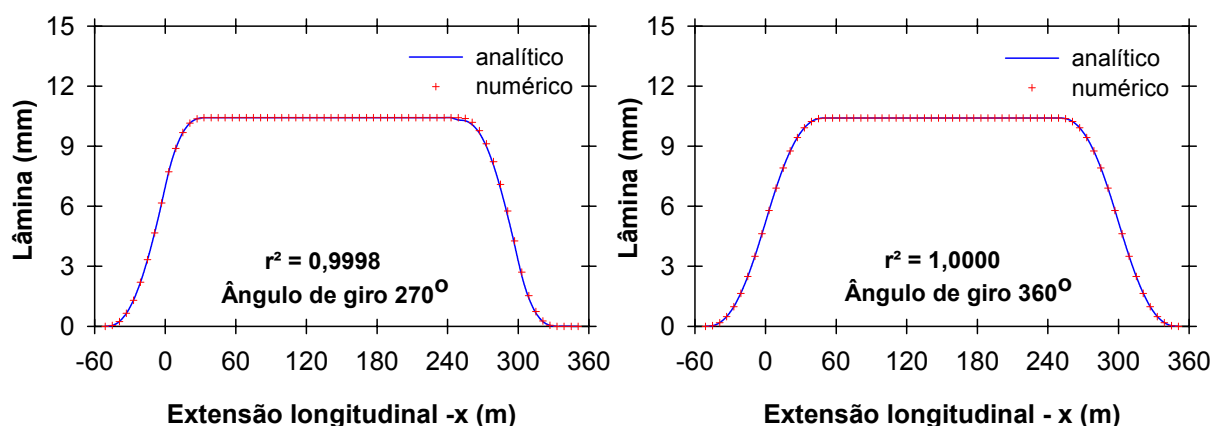


Figura 5. Valores médios de lâminas aplicadas, calculadas pelo SIMULASOFT (vermelho) e pelo processo analítico (azul), ao longo de cortes transversais tomados ao longo da extensão longitudinal das faixas molhadas esquematizadas na Figura 3.

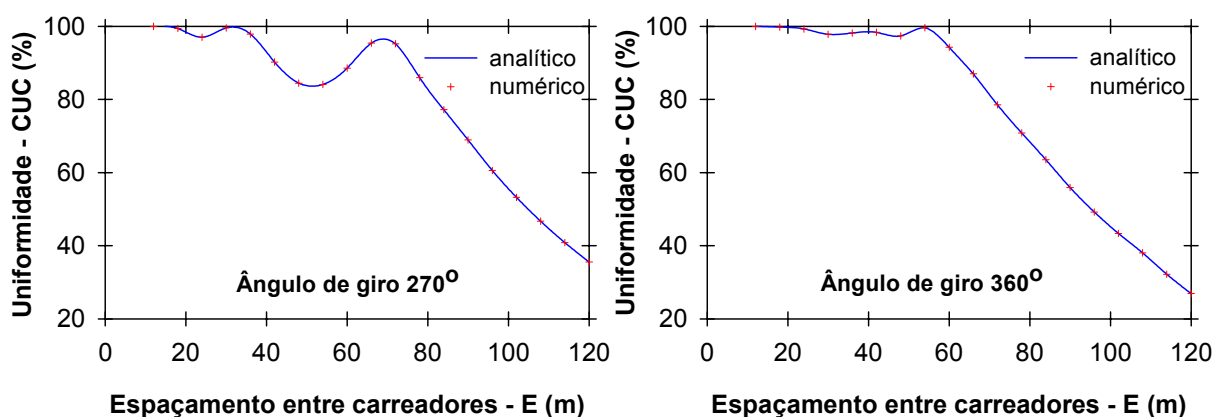


Figura 6. Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC %), referentes à sobreposição lateral dos perfis mostrados na Figura 4 em diferentes espaçamentos de carreadores, calculados pelo SIMULASOFT (vermelho) e pelo processo analítico (azul).

A comparação entre valores de lâmina aplicada e de uniformidade obtidos com o SIMULASOFT e valores observados em ensaios de campo realizados por Rocha (2000), nas mesmas condições operacionais, é mostrada na Figura 7.

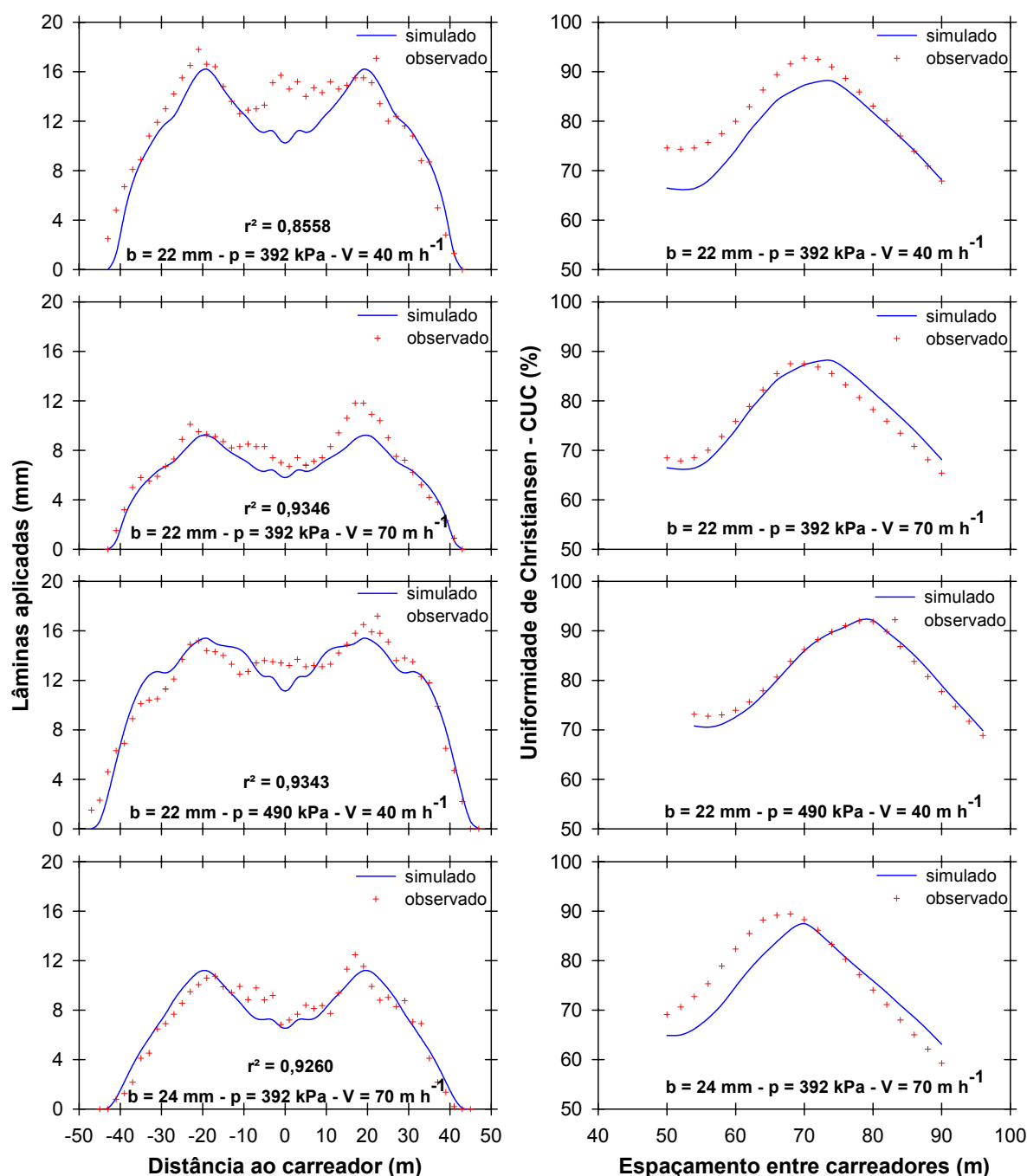


Figura 7. Valores de lâmina e uniformidade de aplicação, simulados (azul) e observados (vermelho) por Rocha (2000), em ensaios de um autopropelido equipado com um aspersor Big River operando em diferentes combinações de pressão (p) e bocal (b).

No que se refere aos valores mostrados de lâmina (coluna da esquerda), nota-se que os valores simulados guardam simetria, em relação ao eixo de deslocamento do aspersor, enquanto os valores obtidos em campo não apresentam a mesma simetria. Observa-se, também, que distorção entre valores simulados e observados é maior do que a obtida na comparação com valores analíticos (Figuras 4 e 5). Estes resultados confirmam as

observações de Montero et al. (2001) quanto à dificuldade de se comparar valores de campo com valores simulados.

Apesar das diferenças nos valores de lâmina aplicada, coluna da esquerda da Figura 7, observa-se que o SIMULASOFT é capaz de reproduzir a tendência geral da variação da uniformidade (coluna da direita da Figura 7) em função do espaçamento entre carregadores.

Na Figura 8a é demonstrada a relação linear entre os valores de CUC simulados e observados; estes valores apresentaram um coeficiente de determinação igual a 83,24% e um coeficiente angular da reta igual a $42^{\circ} 43'$, denotando boa correlação entre os valores simulados e observados. Montero et al. (2001), na validação de seu modelo de simulação para aspersão convencional, encontraram um coeficiente de determinação de 89% e um coeficiente angular da reta igual a $48^{\circ} 29'$ entre os valores de CUC simulados e observados, com respectivos erros absoluto e relativo iguais a 2,7% e 3,4%.

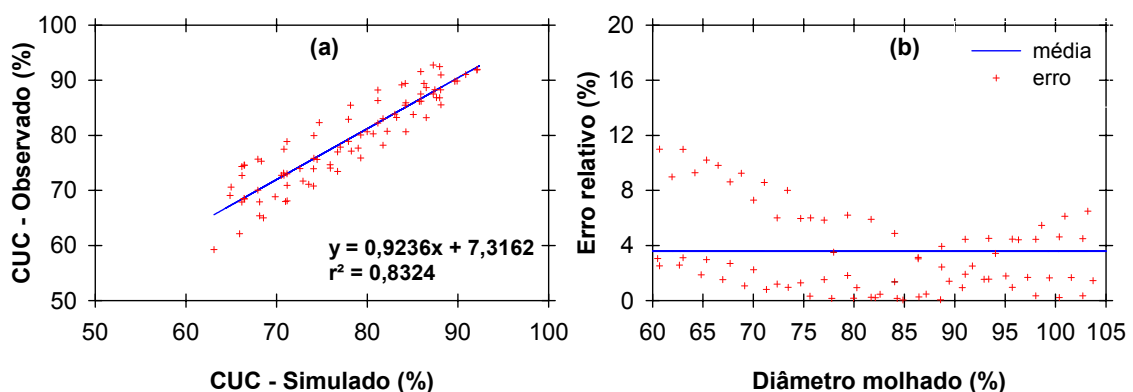


Figura 8. Relação entre valores observados e simulados, de CUC (a) e erro relativo (b), em função do espaçamento entre carregadores.

Na Figura 8b é apresentado o erro relativo percentual entre os valores de CUC simulados e observados nas 85 simulações de espaçamento entre carregadores, sendo o erro relativo médio igual a 3,57%. O maior valor de erro relativo foi de 11%, gerado por um erro absoluto de $(CUC_{obs} - CUC_{sim})$ 8,17%, e o menor erro relativo foi de 0,04%, gerado por um erro absoluto de 0,03%. Os valores de erro apresentados aproximam-se dos 7% descritos por Colombo (1991), na validação de seu modelo de simulação para autopropelidos, e se encaixam na faixa entre 13 e 1%, descrita por Vories et al. (1987) para um sistema de irrigação por aspersão convencional.

6 CONCLUSÕES

- O SIMULASOFT não apresenta falhas no processo numérico de cálculo das lâminas de irrigação aplicadas, visto ao valor unitário do coeficiente de determinação obtido entre as lâminas de irrigação geradas pelo modelo matemático proposto e pela expressão analítica do perfil triangular de distribuição de água;
- Os desvios experimentais observados com o SIMULASOFT são próximos dos valores encontrados na literatura referente à validação de modelos de simulação da distribuição de água de aspersores, podendo, desta forma, ser utilizado para identificação das combinações mais adequadas do ângulo setorial do aspersor, do espaçamento entre

carreadores, da extensão da faixa irrigada e dos tempos de operações nas extremidades dos carreadores de equipamentos autopropelidos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BITTINGER, M. W.; LONGENBAUGH, R. A. Theoretical distribution of water from a moving irrigation sprinkler. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 5, n. 1, p. 26-30, Jan./Feb. 1962.

COLOMBO, A. **Simulação do desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido de irrigação**. 1991. 120 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; CARRIÓN, P. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation: II calibration and validation of the model. **Irrigation Science**, New York, v. 20, n. 2, p. 85-98, May 2001.

OMARY, M.; SUMNER, H. Water distribution for irrigation machine with small spray nozzles. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 127, n. 3, p. 156-160, May/June 2001.

OSTERNO, F. M. T. **Avaliação da performance do pivô central usando modelo computacional**. 1994. 112 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1994.

PRADO, G. **Aplicativo computacional para simulação da distribuição de água pelo aspersor PLONA-RL300 em sistemas autopropelidos de irrigação**. 2004. 86 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2004.

ROCHA, A. F. **Desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido em condições de campo**. 2000. 80 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2000.

SMITH, R. et al. A decision support model for travelling gun irrigation machines. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 100, n. 1, p. 126-136, May 2008.

TARJUELO, J. M. **El riego por aspersión y su tecnología**. 2. ed. Madrid. Mundi Prensa Libros, 1999. 529 p.

TARJUELO, J. M. et al. Analysis of uniformity of sprinkler irrigation in a semi-arid area. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 40, n. 1, p. 315-331, Nov. 1999.

VICTORIA, F. R. B. **Avaliação de aspersores para operação em baixa pressão.** 1992. 130 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

VORIES, E. D.; ASCE, S. M.; VON BERNUTH, R. D. Simulating sprinkler performance in wind. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 113, n. 1, p. 119-130, Feb. 1987.

ZAGGO, S. P. et al. Simulação de desempenho de sistema de irrigação com aspersor autopropelido. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis. **Anais...** Brasília, DF: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1988. p. 283-308.