



SIA: Modelo para simulação da irrigação por aspersão - Calibração e validação¹

Henrique F. E. de Oliveira², Alberto Colombo³, Lessandro C. Faria⁴,
Samuel Beskow⁴ & Giuliani do Prado⁵

RESUMO

A maioria dos modelos matemáticos de simulação da aplicação de água por aspersores requer trabalhos laboriosos de calibração e validação, além de exigir, dos computadores, elevada capacidade de processamento. Este estudo foi realizado com o objetivo de calibrar e validar o modelo Simulação da Irrigação por Aspersão (SIA) no que se refere à operação de canhões hidráulicos em condições reais de campo. O método de otimização global Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) foi implementado no SIA com o intuito de ajustar os parâmetros de calibração baseados no modelo semiempírico de Richards & Weatherhead utilizando-se ensaios de campo do canhão Plona - RL250. Os parâmetros obtidos na calibração para determinada configuração do aspersor, foram mantidos constantes e posteriormente usados na validação para diferentes condições operacionais e de vento. O Método Shuffled Complex Evolution apresentou elevados índices de qualidade do ajuste além de rápida convergência. O modelo SIA foi capaz de prever a taxa de aplicação de água do canhão hidráulico Plona-RL250 e a uniformidade de distribuição de água do sistema, de forma adequada tanto no estágio de calibração quanto no de validação.

Palavras-chave: canhão hidráulico, uniformidade, modelo computacional, vento

SIA: Model for simulation of sprinkler irrigation - Calibration and validation

ABSTRACT

Great majority of mathematical simulation models of water application by sprinkler requires laborious tasks of calibration and validation and high processing power of computers as well. This study was conducted in order to calibrate and validate the SIA - Simulation Model for Sprinkler Irrigation, referring to the operation of rain guns in real field conditions. The Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) global optimization method was implemented in the SIA, aiming for adjusting the calibration parameters, based on the semi empirical model of Richards & Weatherhead, using field tests from PLONA - RL250 rain gun. The parameters obtained through calibration, for a given configuration of the sprinkler, were kept constant and, subsequently, used in validation for different wind and operating conditions. The Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) method showed high level of adjustment quality and fast convergence. The SIA model was able to predict the rate of a PLONA – RL250 rain gun application and uniformity of water distribution system adequately both in calibration stage as well as in validation stage.

Key words: gun sprinkler, uniformity, computational model, wind

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada à Universidade Federal de Lavras, com bolsa da FAPEMIG

² DCA/IF Goiano, Rod. 154, Km 03, C.P. 51, CEP 76300-000, Ceres, GO. Fone: (62) 3307-7100. E-mail: henrique.fonseca@ifgoiano.edu.br

³ DEG/UFLA, C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35) 3829-1388. E-mail: acolombo@ufla.com

⁴ CDTec/Eng. Hídrica/UFPel, CEP 96010-610, Pelotas, RS. Fone: (53) 3921-1400. E-mail: lessandro.faria@ufpel.edu.br; samuel.beskow@ufpel.edu.br

⁵ DEA/UEM, CEP 87820-000, Cidade Gaúcha, PR. Fone: (44) 3675-1779. E-mail: gprado@uem.br

INTRODUÇÃO

No cenário atual a agricultura irrigada tem alcançado expressividade no setor produtivo mundial tornando fundamental a utilização de equipamentos de irrigação e técnicas de manejo que propiciem o uso racional de água e energia.

Neste contexto, em que a proteção ambiental e a conservação dos recursos hídricos são enfatizadas e os custos da água e 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 reduz o retorno econômico que pode ser obtido em áreas irrigadas e aumenta o impacto ambiental desta atividade (Ortega et al., 2004) em função da redução na produtividade das culturas irrigadas e do desperdício de água, energia e fertilizantes (Oliveira et al., 2009).

No Brasil, a irrigação por aspersão figura como um dos métodos mais empregados, principalmente pela facilidade operacional que o método oferece (Prado, 2008). Atualmente, devido aos incentivos na produção de biocombustíveis, o setor sucroalcooleiro tem apresentado grande expansão com a produção de etanol alcançando 18 milhões de metros cúbicos no período 2006/2007 (Goldenberg et al., 2008) o que alavancou a utilização dos sistemas autopropelidos de irrigação utilizados sobretudo para a aplicação da vinhaça. A sustentabilidade do descarte da vinhaça na cana-de-açúcar pelos sistemas autopropelidos de irrigação depende da uniformidade de aplicação desses equipamentos (Colombo et al., 2009).

Modelos de simulação permitem a análise da distribuição de água de sistemas de irrigação por aspersão operando sob condições reais, sendo desenvolvidos com o objetivo de evitar a realização de laboriosos testes de campo e de auxiliar nos projetos dos sistemas de irrigação (Carrión et al., 2001). Tradicionalmente, duas aproximações muito importantes têm sido utilizadas nos modelos de simulação da distribuição de água de aspersores: a teoria balística tradicional e os métodos empíricos.

De acordo com Smith et al. (2008) métodos empíricos requerem uma quantidade substancial de dados de distribuição de água para cada configuração operacional do aspersor enquanto a teoria balística pode ser empregada para simular uma gama maior de configurações sem a necessidade de coleta repetitiva de dados. Entretanto e segundo os mesmos autores, métodos baseados na teoria balística requerem equipamentos com alto custo agregado para coleta da distribuição do tamanho das gotas enquanto os modelos empíricos podem produzir resultados adequados sem a necessidade de realização deste tipo de teste.

No caso particular dos canhões hidráulicos, além das incertezas quanto aos valores dos coeficientes de arraste, existem dificuldades de se estabelecer as condições iniciais das gotas (posição em relação ao aspersor, velocidade e ângulo da trajetória), motivo pelo qual a modelagem baseada na teoria balística é frequentemente empregada na simulação do desempenho de pequenos (Conceição & Coelho, 2003) e médios aspersores (Montero et al., 2001; Playán et al., 2006).

No caso dos canhões hidráulicos o modelo de Richards & Weatherhead (1993) vem recebendo, nos últimos anos, a atenção de diversos pesquisadores interessados na simulação da distribuição de água desses aspersores operando em condições de vento (Granier et al., 2003; Newell, 2003; Smith et al., 2008; Faria et al., 2009). De acordo com Oliveira et al. (2009) por ser classificado pelos autores como “semiempírico”, em função da utilização de equações que têm forte embasamento teórico, o modelo de Richards & Weatherhead (1993) requer um número limitado de ensaios de campo para ajuste de seus parâmetros.

De acordo com Beskow et al. (2011b) no ajuste dos parâmetros de um modelo a calibração manual pode ser usada; no entanto, a qualidade dos resultados depende da habilidade do modelador em lidar com o modelo matemático e suas abordagens fundamentais. Eckhardt et al. (2005) enfatizam ainda que este tipo de calibração é subjetiva, demorada e potencialmente tendenciosa, sendo que procedimentos de calibração automática podem superar esses problemas.

Dentre os métodos de otimização automática encontrados na literatura destaca-se o Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) desenvolvido na Universidade do Arizona por Duan et al. (1992). Tradicionalmente, o SCE-UA tem sido mais comumente aplicado a modelos hidrológicos (Beskow et al., 2011b) por ser robusto e computacionalmente eficiente. Recentemente, no entanto, ele também foi aplicado com resultados promissores a um modelo de simulação da irrigação por aspersão (Faria et al., 2012).

Tendo em vista as vantagens decorrentes da utilização de modelos de simulação na análise dos efeitos do vento sobre o padrão de distribuição espacial da água aplicada por canhões hidráulicos (Smith et al., 2008; Faria et al., 2009; Oliveira et al., 2009; Prado & Colombo, 2010a,b) propôs-se, neste trabalho: (i) calibrar os parâmetros adimensionais correspondentes à deriva (A/R, B/R e C/R) e à interrupção do fluxo de ar induzido (D/R, E/R e F/R) do modelo de Richards & Weatherhead (1993); (ii) validar o modelo computacional confrontando dados de distribuição de água obtidos em ensaios de campo com os respectivos dados simulados pelo aplicativo computacional, para o aspersor canhão Plona RL-250; (iii) averiguar se o método de otimização SCE-UA pode ser empregado para o caso específico do modelo SIA.

MATERIAL E MÉTODOS

O programa computacional denominado Simulação da Irrigação por Aspersão (SIA) foi desenvolvido em Delphi (ambiente Windows) e conta com o método de otimização global Shuffled Complex Evolution (SCE-UA), no intuito de buscar um conjunto de parâmetros do modelo de Richards & Weatherhead (1993) de modo a minimizar a função objetivo que calcula os desvios entre dados observados e simulados de distribuição de água de aspersores operando sob diferentes combinações de velocidade e direção do vento.

Para calibrar e validar o aplicativo SIA, ensaios de laboratório e de campo foram utilizados a fim de caracterizar a distribuição espacial de água do aspersor marca Plona, modelo RL250, operando sob diferentes condições operacionais e de velocidade e direção de vento.

O aspersor Plona - RL250 é um canhão hidráulico de reversão lenta, com 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. As características operacionais deste aspersor foram obtidas em ensaios de laboratório e disponibilizadas por Prado & Colombo (2007).

Na Tabela 1 verificam-se dados registrados em 53 ensaios de campo do aspersor Plona - RL250, realizados sob diferentes condições de velocidade e direção do vento e combinações de bocais e pressão de serviço, os quais foram utilizados na calibração e validação do SIA.

Tabela 1. Velocidades médias do vento registradas nos 53 ensaios de distribuição de água do aspersor Plona-RL250 para as diferentes combinações de bocais e pressão de serviço

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

Os ensaios foram realizados seguindo-se os procedimentos recomendados pela norma ISO 7749-2 (ISO, 1990), sendo utilizada uma malha composta por coletores plásticos, de 8 cm de diâmetro, espaçados 6 m perfazendo uma área de 84 x 84 m, na qual o canhão hidráulico foi instalado exatamente no centro. A velocidade e a direção do vento durante os ensaios foram registradas em intervalos regulares de 5 min utilizando-se um anemômetro, modelo Weather Monitor II, da Davis, instalado a 2 m do solo.

A rotina de ajuste dos parâmetros adimensionais correspondentes à deriva (A/R, B/R e C/R) e à interrupção do fluxo de ar induzido (D/R, E/R e F/R), obtidos a partir da calibração baseada no método Shuffled Complex Evolution (Duan et al., 1992), utilizada no SIA, visa minimizar simultaneamente, para três pares de matrizes (simuladas vs. observadas), a raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado (RMSE) entre valores de intensidade de aplicação de água simulados pelo aplicativo e obtidos em ensaios de campo. Para tal, dos 53 ensaios de campo (Tabela 1) três foram selecionados ao acaso para calibrar o modelo; entre os 50 ensaios restantes outros três foram selecionados, também ao acaso, para validação.

Os ensaios selecionados para calibração foram:

- (1) 16 x 0 mm x 490 kPa, vento de 0,99 m s⁻¹ e direção 321,5°
- (2) 16 x 6 mm x 392 kPa, vento de 2,79 m s⁻¹ e direção 2,4°
- (3) 18 x 5 mm x 490 kPa, vento de 4,13 m s⁻¹ e direção 107,3°

Para validação os ensaios seguintes foram selecionados:

- (4) 14 x 0 mm x 392 kPa, vento de 1,77 m s⁻¹ e direção 354,4°
- (5) 16 x 7 mm x 490 kPa, vento de 2,84 m s⁻¹ e direção 4,3°
- (6) 18 x 6 mm x 392 kPa, vento de 3,57 m s⁻¹ e direção 55,5°

Devido às incertezas em relação ao valor dos coeficientes empíricos do modelo (A/R, B/R, C/R, D/R, E/R e F/R) foram estabelecidos limites abrangentes (-1 a 1) para os parâmetros, conforme recomendações de Beskow et al. (2011b). Esta observação do possível limite inferior e superior é pertinente, visto que o processo de calibração poderia avaliar muitos conjuntos de parâmetros que produziriam resultados irreais.

A utilização adequada do Shuffled Complex Evolution (SCE - UA) depende da seleção correta dos parâmetros de calibração do método, dos quais se pode destacar:

- p, o número de complexos
- m, o número de pontos em um complexo ($m = 2n + 1$)
- q, o número de pontos em um subcomplexo ($q = n + 1$)
- p_{\min} , o número mínimo de complexos ($1 \leq p_{\min} \leq p$)
- α , número consecutivo de valores gerados por cada subcomplexo ($\alpha \geq 1$)

vi) β , o número de evoluções de cada complexo ($\beta = m$) onde "n" é o número de parâmetros a serem ajustados, sendo necessário estabelecer previamente o limite inferior e superior do espaço amostral para cada parâmetro.

Todas as simulações realizadas foram avaliadas quantificando-se as diferenças entre os valores de intensidade de precipitação de água simulados pelo SIA e aqueles obtidos em ensaios de campo. Os valores dos coeficientes empíricos adimensionais (A/R, B/R, C/R, D/R, E/R e F/R) do modelo de Richards & Weatherhead (1993) utilizados como parâmetros de calibração do SIA, que melhor se ajustaram aos ensaios de campo do aspersor Plona - RL250, foram determinados testando-se aleatoriamente diferentes combinações entre condições operacionais deste aspersor (bocais vs. pressão de serviço) e condições climáticas (velocidade e direção do vento). Para cada um dos 3 pares de ensaios (malhas simuladas vs. malhas observadas), contendo os valores de intensidade de aplicação de água do Plona - RL250, observou-se, para as etapas de calibração e validação, os valores da raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado (RMSE, mm h⁻¹) tomados em relação aos valores não nulos, o erro relativo entre valores de vazão simulados e observados (e, %) e o índice de confiança ou desempenho (c).

- soma do quadrado dos desvios (SQD, mm² h⁻²)

$$SQD = \sum (I_{(i,j)sim} - I_{(i,j)obs})^2 \quad (1)$$

- raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado (RMSE, mm h⁻¹) tomados em relação aos valores não nulos

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} [(I_{(i,j)sim} - I_{(i,j)obs})^2]}{n_0}} \quad (2)$$

- erro relativo entre valores de vazão simulados e observados (e, %)

$$e = \frac{(Q_{sim} - Q_{obs})}{Q_{obs}} \quad (3)$$

iv) índice de confiança ou desempenho (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997)

$$c = r \times d \quad (4)$$

com

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} (I_{(i,j)sim} - I_{(i,j)obs})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} (|I_{(i,j)sim} - \bar{I}| + |I_{(i,j)obs} - \bar{I}|)^2} \right] \quad (5)$$

em que:

$I_{(i,j)sim}$ - intensidade de aplicação de água no ponto de coordenadas (i,j) da malha simulada pelo modelo ajustado, mm h⁻¹

$I_{(i,j)obs}$ - intensidade de aplicação de água no ponto de coordenadas (i,j) da malha observada em campo, mm h⁻¹

n_0 - número de pontos com desvio diferente de zero

n - número de linhas da malha que é igual ao número de colunas

$(I_{(i,j)obs} - I_{(i,j)sim})^*$ - desvios com valor diferente de zero

Q_{sim} - vazão total da malha simulada, m³ h⁻¹

Q_{obs} - vazão total da malha observada, m³ h⁻¹

r - coeficiente de correlação

d - índice de Willmott

I - média dos valores de intensidade de aplicação de água observados, mm h⁻¹

O índice de confiança ou desempenho foi avaliado segundo a escala proposta por Camargo & Sentelhas (1997) como: 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 qualidade do ajuste entre os valores de intensidade de aplicação de água simulados pelo modelo e os observados em ensaios de campo pode ser comprovada através da análise dos coeficientes estatísticos, mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Qualidade do ajuste entre dados de intensidade de aplicação de água simulados pelo SIA e observados em ensaios de campo

	RMSE	e	c	RMSE	e	c	RMSE	e	c
	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
Calibração	1,12	0,60	0,87	1,40	0,99	0,90	2,10	-1,31	0,87
	Ensaio 4			Ensaio 5			Ensaio 6		
Validação	0,71	1,36	0,94	1,76	-0,14	0,89	1,60	-2,45	0,90

RMSE - raiz quadrada da média dos desvios ao quadrado; e - erro relativo entre valores de vazão; c - índice de confiança ou desempenho

Conforme a Tabela 2, para a etapa de calibração os valores médios encontrados de RMSE, erro relativo entre valores de vazão (e) e índice de confiança ou desempenho (c) entre dados

de intensidade de aplicação de água simulados pelo modelo e observados em ensaios de campo foram, respectivamente, 1,54 mm h⁻¹, 0,97% e 0,88. Para a validação os valores foram 1,36 mm h⁻¹, 1,32% e 0,91, respectivamente. Verifica-se, para ambas as etapas, calibração e validação, que em todos os ensaios foram obtidos ajustes classificados ótimos, segundo a escala de Camargo e Sentelhas (1997).

Na otimização dos parâmetros do modelo de Richards & Weatherhead (1993), Smith et al. (2008) encontraram um valor médio de RMSE igual a 2,62 mm h⁻¹. Utilizando o mesmo modelo e para o aspersor Plona-RL250 operando nas pressões de 392 e 490 kPa, com bocais de 18 x 5 e 18 x 7 mm, Prado (2008) encontrou um desvio médio dos valores de intensidade de aplicação de água variando entre 2,17 e 3,61 mm h⁻¹.

Granier et al. (2003) encontraram, utilizando o canhão Komet Twin 101/Plus com bocal de 22 mm e pressão de 450 kPa, um desvio médio de 3,38 mm h⁻¹ no ajuste dos parâmetros do modelo de Richards & Weatherhead. No trabalho pioneiro Richards & Weatherhead (1993) verificaram, utilizando o canhão Nelson P150, com o bocal de 25,4 mm, sob diferentes pressões, desvios médios que variaram entre 1,4 e 3,4 mm h⁻¹.

Verifica-se assim que para a fase de calibração quanto para a fase de validação os valores dos desvios entre dados observados e simulados de intensidade de aplicação de água se mostraram menores que os encontrados na literatura para avaliações em condições semelhantes.

Na Figura 1 observa-se a boa similaridade entre os valores das lâminas simuladas pelo SIA e observadas em ensaios de campo, sendo possível verificar a qualidade com que o modelo ajustado foi capaz de prever as lâminas aplicadas ao longo de linhas perpendiculares à trajetória de deslocamento de um autopropeido isolado, operando sob condições de vento.

Os ensaios selecionados para essas simulações são os mesmos utilizados para calibração e validação do modelo, citados anteriormente, considerando o aspersor se deslocando com velocidade linear constante de 50 m h⁻¹ ao longo do carreador.

Os valores dos desvios absolutos médios encontrados na comparação entre lâminas de água simuladas com base em dados de ensaios de campo e dados simulados pelo SIA foram de 0,76 e 0,66 mm para calibração e validação, respectivamente. Na aplicação de uma rotina computacional para ajuste dos parâmetros de Richards & Weatherhead (1993) Prado (2008) encontrou, utilizando o canhão Plona-RL250, valores de desvio médio entre 1,52 e 2,31 mm.

Os valores de "r" mostrados na Figura 1 indicam haver uma forte correlação entre os valores de lâmina simulados com base em dados de ensaios de campo com os de dados obtidos pelo SIA.

A relação entre 326 valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) gerados a partir de simulações oriundas do aplicativo SIA e 326 valores de CUC simulados a partir de dados obtidos em ensaios de campo, para o sistema operando com o aspersor Plona-RL250 sob condições de vento, é mostrada na Figura 2. Nas simulações foram utilizados espaçamentos entre carreadores variando de 24 a 90 m, abrangendo uma faixa que representa de 20 a 100% do diâmetro molhado (% DM) do aspersor, de acordo com a configuração (bocal vs. pressão) selecionada.

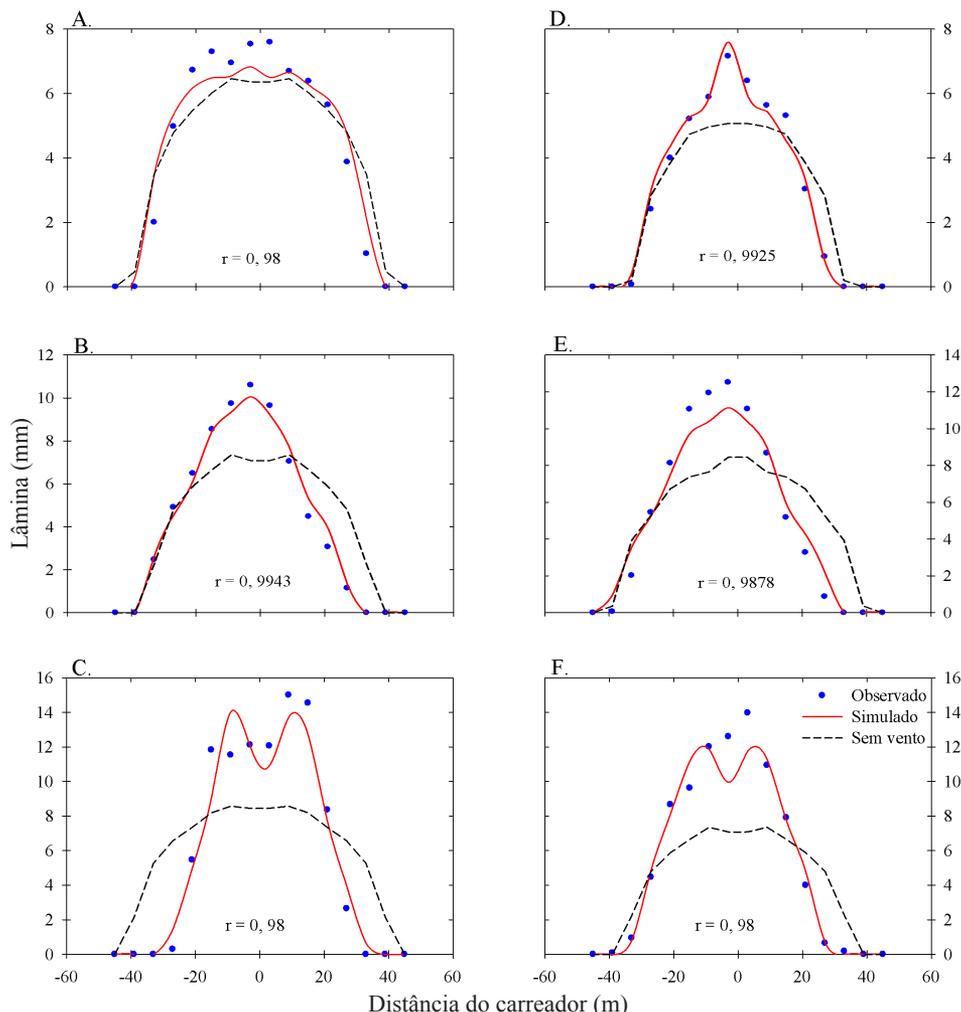


Figura 1. Lâminas de água (simuladas vs. observadas) aplicadas pelo aspersor Plona – RL250 deslocando-se ao longo de uma trajetória infinita, paralela ao eixo x do sistema de coordenadas dos ensaios de campo ((A) 16 x 0 mm x 490 kPa, $vv = 0,99 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 321,5^\circ$; (B) 16 x 6 mm x 392 kPa, $vv = 2,79 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 2,4^\circ$; (C) 18 x 5 mm x 490 kPa, $vv = 4,13 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 107,3^\circ$; (D) 14 x 0 mm x 392 kPa, $vv = 1,77 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 354,4^\circ$; (E) 16 x 7 mm x 490 kPa, $vv = 2,84 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 4,3^\circ$; (F) 18 x 6 mm x 392 kPa, $vv = 3,57 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 55,5^\circ$)

O elevado valor encontrado para o índice de confiança dos valores simulados ($c = 0,86$) que, de acordo com a escala de Camargo & Sentelhas (1997) corresponde à classificação do tipo ótimo ($c > 0,85$), demonstra a adequação das simulações. Observa-se forte correlação ($r = 0,91$) entre os valores de CUC simulados pelos dois processos e boa distribuição de pontos em relação à reta 1:1 que, quando comparada com a linha de tendência ajustada aos pontos, demonstra que os valores de CUC simulados com malhas geradas pelo SIA tendem a ser ligeiramente superiores aos valores simulados com malhas medidas em campo.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,88$) do ajuste linear entre valores de CUC simulados com dados de distribuição de água observados em ensaios de campo e dados simulados pelo SIA foi superior aos valores encontrados por Oliveira (2008) e Prado & Colombo (2010b) os quais encontraram, ao ajustar seus modelos de simulação da irrigação por aspersão, valores de R^2 iguais a 0,72 e 0,83, respectivamente. Montero et al. (2001) e Faria et al. (2009) obtiveram, em avaliações com aspersores de tamanho médio valor médio de R^2 igual a 0,73.

Na Figura 3 são apresentados os valores absolutos da diferença entre valores de CUC expressos em porcentagem, oriundos de simulações e de ensaios de campo. Constatou-se que o valor médio das diferenças absolutas representado pela linha vermelha (tracejada), foi 5,39%, valor este muito próximo de 5,38% encontrado por Oliveira (2008) em simulações semelhantes.

Conforme observações de Faria et al. (2009) na análise do desempenho do modelo ajustado não se pode deixar de considerar que as diferenças nas estimativas de CUC não refletem apenas as deficiências do modelo ajustado mas também a dificuldade de se obter, ao longo do período de duração dos ensaios de campo, o mesmo grau de estabilidade nos valores dos parâmetros climáticos considerados nas simulações. De acordo com Carrión et al. (2001), existem vários tipos de erro intrínseco em testes e processos de simulação, os quais podem afetar o ajuste entre valores observados e simulados. Para esses autores erros nas medidas de vazão, pressão e volume coletado, dentre outros, são típicos deste tipo de análise experimental. Os autores incluem, ainda, a variabilidade das condições climáticas

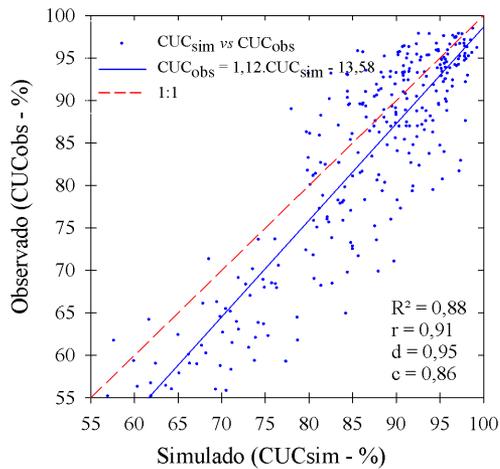


Figura 2. Relação entre valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) simulado com dados de precipitação de água gerados pelo modelo (SIA) e CUC simulado com dados de precipitação observados em ensaios de campo

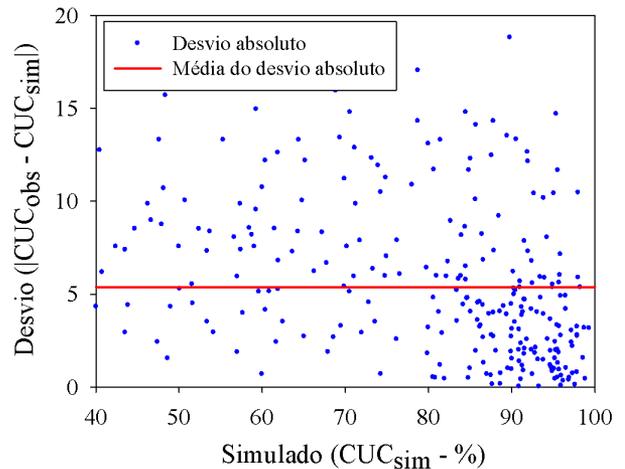


Figura 3. Diferenças absolutas entre estimativas de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) obtidas com dados de ensaios de campo (CUC_{obs} - %) e com dados de ensaios simulados (CUC_{sim} - %) do aspersor Plona - RL250

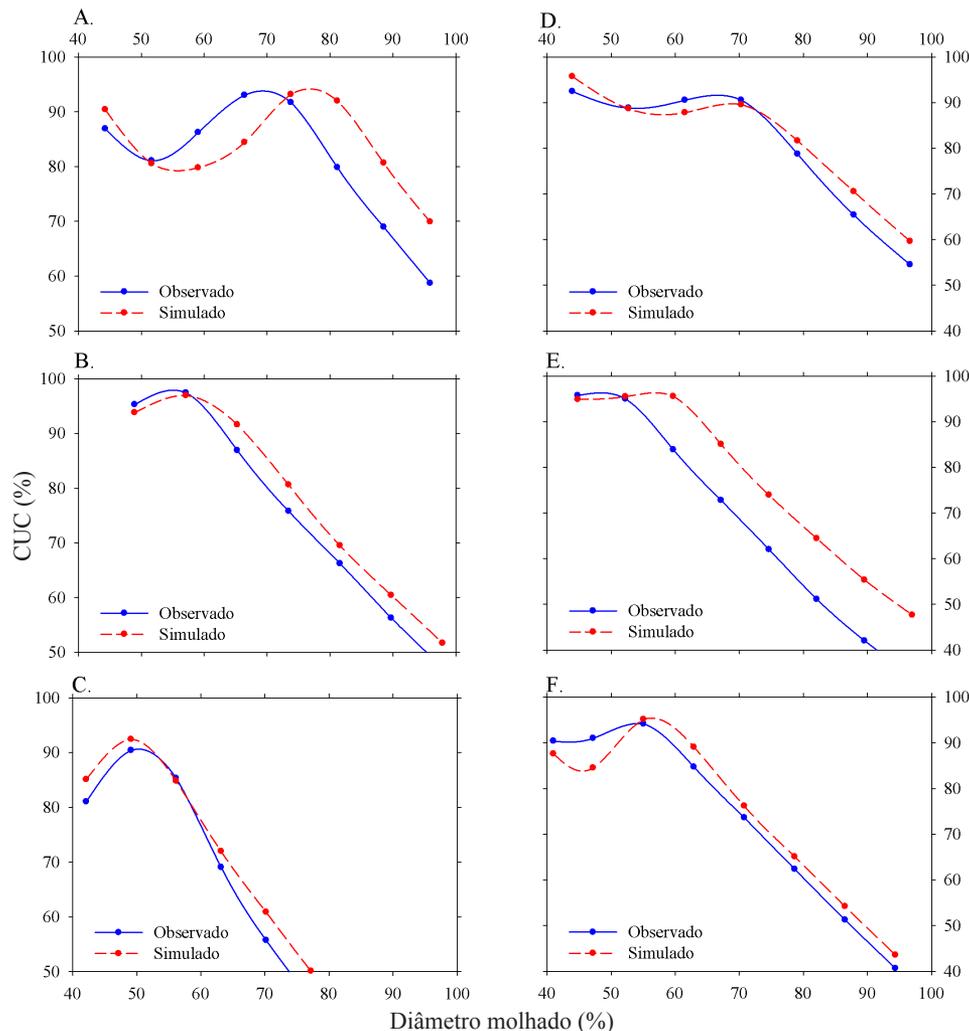


Figura 4. Variação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen – CUC (simulado vs. observado) em função do espaçamento entre carregadores para os ensaios utilizados na calibração e validação do modelo ((A) 16 x 0 mm x 490 kPa, $vv = 0,99 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 321,5^\circ$; (B) 16 x 6 mm x 392 kPa, $vv = 2,79 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 2,4^\circ$; (C) 18 x 5 mm x 490 kPa, $vv = 4,13 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 107,3^\circ$; (D) 14 x 0 mm x 392 kPa, $vv = 1,77 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 354,4^\circ$; (E) 16 x 7 mm x 490 kPa, $vv = 2,84 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 4,3^\circ$; (F) 18 x 6 mm x 392 kPa, $vv = 3,57 \text{ m s}^{-1}$ e $dv = 55,5^\circ$)

(velocidade e direção do vento) durante os testes enfatizando que nas simulações as condições são fixas e invariáveis.

Na Figura 4 estão apresentados os valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC - %) simulados em função do espaçamento entre carregadores, expressos em porcentagem do diâmetro molhado (DM - %) do aspersor, os quais foram obtidos a partir de valores de distribuição de água simulados pelo SIA e valores de distribuição de água oriundos de observações de ensaios de campo utilizados na calibração e na validação do modelo.

Nas simulações considerou-se o aspersor Plona - RL250, com ângulo de giro de 360°, operando em condições distintas de bocal e pressão de serviço. Apesar das diferenças nos valores absolutos das estimativas de CUC mostrados na Figura 4, observa-se que o comportamento da uniformidade de aplicação de água em função do aumento do espaçamento entre carregadores, determinado com base nos dados de ensaios de campo, foi adequadamente representado nas seis condições de velocidade e direção de vento simuladas tanto para os ensaios utilizados na calibração quanto para os ensaios utilizados na validação.

CONCLUSÕES

1. O modelo SIA foi capaz de prever a taxa de aplicação de água do canhão hidráulico Plona-RL250 e a uniformidade de distribuição de água do sistema de forma adequada, tanto no estágio de calibração quanto no de validação.

2. O Método Shuffled Complex Evolution (SCE – UA) demonstrou uma boa convergência quando implementado no SIA apresentando elevados índices de qualidade do ajuste, além de rápida convergência.

3. O modelo é capaz de prever o comportamento do sistema de irrigação antes e depois da instalação em campo com vista à seleção de canhões hidráulicos, dimensionamento do sistema e horário de funcionamento.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pela bolsa de estudos do primeiro autor.

LITERATURA CITADA

- Beskow, S.; Mello, C. R.; Norton, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. *Scientia Agricola*, v.68, p.265-274, 2011a.
- Beskow, S.; Mello, C. R.; Norton, L. D.; Silva, A. M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. *Catena*, v.86, 169-171, 2011b.
- 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*, v.5, p.89-97, 1997.
- Carrión, P.; Tarjuelo, J. M.; Motero J. SIRIAS: A simulation model for sprinkler irrigation. Part I: Description of model. *Irrigation Science*, v.20, p.73-84, 2001.
- Conceição, M. A. F.; Coelho, R. D. Simulating wind effect on microsprinkler water distribution. *Scientia Agricola*, v.60, p.205-209, 2003.
- Colombo, A.; Prado, G.; Oliveira, H. F. E. Modeling wind effects on travelling gun sprinkler water application uniformity. In: *Asabe Annual International Meeting*, paper number 096727, 2009, Reno. *Anais.... Reno: ASABE*, 2009. p.1-11.
- Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, v.28, p.1015-1031, 1992.
- Eckhardt, K.; Fohrer, N.; Frede, H. Automatic model calibration. *Hydrological Processes*, v.19, p.651-658, 2005.
- Faria, L. C.; Beskow, S.; Colombo, A.; Oliveira, H. F. E. de. Modelagem dos efeitos do vento na uniformidade da irrigação por aspersão: Aspersores de tamanho médio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.133-141, 2012.
- Faria, L. C.; Colombo, A.; Oliveira, H. F. E. de; Prado, G. Simulação da uniformidade da irrigação de sistemas convencionais de aspersão operando sob diferentes condições de vento. *Engenharia Agrícola*, v.29, p.19-27, 2009.
- Goldenberg, J. Coelho, S.T., Guardabassi, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Police*, v.36, p.2086-2097, 2008.
- Granier, J.; Molle, B.; Deumier, J. M. IRRIPARC-Part 1: Modeling spatial water distribution under a sprinkler in windy conditions. In: *European Regional Conference of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 20, 2003, Montpellier. *Anais.... Montpellier: AFEID*, 2003. CD-Rom
- ISO – International Organization for Standardization. ISO 7749- 2. Irrigation equipment – Rotating sprinklers – Part 2: Uniformity of distribution and test methods. Switzerland: ISO, 1990. 6p.
- Montero, J.; Tarjuelo, J. M.; Carrión, P. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. Part II: Calibration and validation of the model. *Irrigation Science*, v.20, p.85-98, 2001.
- Newell, G. Traveling gun simulation model TRAVGUN: User's manual and technical documentation: National Centre for Engineering in Agriculture-NCEA. Toowoomba: University of Southern Queensland, 2003. 89p.
- Oliveira, H. F. E. Modelagem semiempírica da distribuição de água de aspersores autopropelidos sob diferentes condições de vento. Lavras: UFLA, 2008. 74p. Dissertação Mestrado
- 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.
- Ortega, J. F. A.; Tarjuelo, J. M. M.; De Juan, J. A. V.; Carrión, P. P. Uniformity distribution and its economic effect on irrigation management in semiarid zones. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.130, p.257-347, 2004.
- Playán, 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*, v.84, p.89-100. 2006.

- Prado, G. Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento. Lavras: UFLA, 2008. 121p. Tese Doutorado
- Prado, G.; Colombo, A. Análise da uniformidade de aplicação de água pelo aspersor Plona-RL250 em sistemas autopropelidos de irrigação. Irriga, v.12, p.249-262, 2007.
- Prado, G.; Colombo, A. Distribuição espacial de água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação - Parte I: Modelagem com o Simulasoft. Irriga, v.15, p.51-62, 2010a.
- Prado, G.; Colombo, A. Distribuição espacial de água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação - Parte II: Validação do Simulasoft. Irriga, v.15, p.63-74, 2010b.
- Richards, P. J.; Weatherhead, E. K. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. Journal of Agricultural Engineering Research, v.54, p.281-291. 1993.
- Smith, R. J.; Gillies, M. H.; Newell, G.; Foley, J. P. A decision support model for travelling gun irrigation machines. Biosystems Engineering, v.100, p.126-136, 2008.