

## **DISTORÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA APLICADA POR SISTEMAS AUTOPROPOLIDOS DE IRRIGAÇÃO EM CONDIÇÕES DE VENTO**

**GIULIANI DO PRADO<sup>1</sup>; ALBERTO COLOMBO<sup>2</sup> E ANTÔNIO CARLOS BARRETO<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Eng. Agrônomo, Doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Maringá, Cidade Gaúcha - PR, CEP 87.820-000, e-mail: gprado@uem.br

<sup>2</sup> Eng. Agrônomo, Doutor, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, CEP 37200-000, e-mail: acolombo@ufla.br

<sup>3</sup> Eng. Agrícola, Doutor, Instituto Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba - MG, CEP 38064-300, e-mail: barreto@iftm.edu.br

### **1 RESUMO**

A distorção na distribuição espacial de água por aspersores, devido ao vento, pode ser modelada através de seis parâmetros empíricos, que definem a deriva e a redução do raio de alcance, segundo o modelo teórico de Richards e Weatherhead. A determinação desses parâmetros pode ser estabelecida através de ensaios de distribuição de água de um equipamento autopropelido de irrigação em operação. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma rotina computacional, em *Visual Basic 6*, para o ajuste dos seis parâmetros a partir de ensaios de distribuição de água de equipamentos autopropelidos. Para o ajuste dos parâmetros de distorção devido ao vento foi empregado um procedimento numérico de primeira (método das estimativas descendentes) e de segunda (método de Newton) ordem. Os dados de distribuição de água, obtidos em duas diferentes condições de vento, para o aspersor PLONA-RL250 operando em um equipamento autopropelido de irrigação com ângulo de giro de 240°, velocidade linear de 30 m h<sup>-1</sup>, pressão de 392 kPa e bocais de 14 x 5 e 14 x 7 mm, foram utilizados para aplicação da rotina computacional desenvolvida. No ajuste dos parâmetros com a rotina computacional, foram encontrados valores de desvios médios de 1,521 e 2,307 mm, entre os valores de lâminas de precipitação estimadas e observadas. Com os parâmetros estimados é possível simular a distribuição espacial de água do aspersor para qualquer direção de vento e para velocidades do vento, que não excedam os valores nos quais os parâmetros foram determinados.

**Palavras-chave:** rotina computacional, procedimento numérico, deriva pelo vento

**PRADO, G. do; COLOMBO, A; BARRETO, A. C.**  
**DISTORTION OF WATER DISTRIBUTION APPLIED BY TRAVELING GUN IRRIGATION SYSTEM UNDER WINDY CONDITIONS**

### **2 ABSTRACT**

Distortion in spatial water distribution by sprinklers due to windy conditions can be modeled by six empirical parameters. These parameters define the drift and range shortening according to Richards & Weatherhead theoretical model (1993). Determination of these parameters is performed through water distribution trials using rainguns mounted on traveling machines.

The objective of this study was to develop a computational routine, written in Visual Basic 6, to adjust wind distortion parameters from data obtained by the water distribution trials of traveling machines. A first (Steepest Descent Method) and second (Newton Method) order numerical procedure was used to adjust wind distortion parameters. As input to the computational routine, data were used from water distribution trials held under two different wind conditions, with a PLONA-RL250 sprinkler operating at 392 kPa working pressure, 14 x 5 and 14 x 7 mm nozzle sizes on a traveling machine with a wetted sector angle of 240° and traveling speed of 30 m h<sup>-1</sup>. In the adjustments of the parameters to the computational routine, 1.521 and 2.307 mean deviation values were found between estimated and observed values of water depths. Based on the estimated parameters, it is possible to simulate spatial distribution of water of the sprinklers for any wind orientation and speed values that do not exceed the ones in which the parameters were determined.

**Keywords:** computational routine, numerical procedure, wind drift.

### 3 INTRODUÇÃO

A irrigação por aspersão com o uso de equipamentos autopropelidos de irrigação é uma prática intensivamente utilizada na cultura da cana-de-açúcar (NUNES et al., 2004). O uso desses equipamentos não é adotado exclusivamente na irrigação da cana-de-açúcar. Na Europa, em função da facilidade com que os autopropelidos cobrem áreas irregulares, estes equipamentos são amplamente empregados. Segundo Lancey (2006), os canhões hidráulicos são empregados em aproximadamente 75% da área irrigada por aspersão na Inglaterra.

Nos sistemas autopropelidos de irrigação, a uniformidade de aplicação de água normalmente não é adequada, principalmente, em condições de vento (SMITH et al., 2008). Conforme Rocha et al. (2005) e Prado e Colombo (2007), a baixa uniformidade de aplicação de água, dos equipamentos autopropelidos de irrigação, está ligada a uma falta de critérios específicos de dimensionamento capazes de proporcionar um desempenho satisfatório e competitivo desses sistemas de irrigação em diferentes condições operacionais.

O desconhecimento de uma combinação ótima dos fatores que podem, ou não, ser controlados pelo operador do sistema de irrigação é uma das causas que leva a um inadequado valor de uniformidade de aplicação de água. Dentre os fatores controlados pelo operador, destacam-se: ângulo de lançamento do jato de água, tipo de bocal, ângulo de giro do aspersor, características do perfil estacionário de aplicação de água do aspersor, sobreposição dos perfis radiais e variações na pressão de serviço e na velocidade de deslocamento do aspersor ao longo do carreador (COLLIER e ROCHESTER, 1980; COLOMBO, 1991; PRADO et al., 2007). Dentre os fatores que fogem ao controle do operador, destacam-se: velocidade e direção do vento em relação ao carreador (SHULL e DYLLA, 1976; NEWELL et al., 2003). Desta forma, em função das várias possíveis combinações de fatores que influenciam na uniformidade de aplicação de água, o uso de modelos de simulação da distribuição espacial de água de aspersores é fundamental quando o objetivo é maximizar a uniformidade de aplicação de água (PRADO e COLOMBO, 2007).

Segundo Vories e Von Bernuth (1986), Han et al. (1994) e Oliveira et al. (2009), o vento (velocidade e direção) é um dos fatores de maior relevância na distribuição de água de aspersores. Conforme estes autores, em condições de vento, há uma distorção na aplicação de água do aspersor, ocorrendo um alongamento da área molhada no sentido do vetor vento e um achatamento da área molhada perpendicularmente ao sentido do vetor vento.

Richards e Weatherhead (1993) descreveram um procedimento empírico para modelar matematicamente a distorção ocasionada pelo vento na distribuição espacial de água de canhões hidráulicos sem a necessidade de se conhecer o diâmetro de gotas do jato de água. O emprego deste modelo está condicionado ao ajuste de seis parâmetros, que definem a deriva pelo vento e a redução do raio de alcance devido ao vento. No ajuste desses parâmetros é necessária a realização de ensaios de distribuição de água no campo com o aspersor operando isoladamente (método da malha).

A realização de ensaios de distribuição de água com o aspersor operando isoladamente nem sempre é viável, pois normalmente há a necessidade de montar uma área experimental para este fim. Desta maneira, Newell et al. (2003) adaptaram o modelo de Richards e Weatherhead (1993) para equipamentos autopropelidos de irrigação. A esta metodologia, os referidos autores denominaram de método inverso, e para o ajuste dos parâmetros é necessária à realização de pelo menos três ensaios de distribuição de água do aspersor operando em um equipamento autopropelido de irrigação (um com vento e dois sem vento).

Na metodologia apresentada por Newell et al. (2003) não há uma descrição do procedimento de cálculo para a estimativa dos parâmetros de ajuste de distorção devido ao vento. Os autores só comentam que é utilizado um procedimento numérico de primeira ordem, no ajuste dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento. Desta forma, este trabalho tem por objetivos: i) desenvolver uma rotina computacional para ajustar os parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção de Richards e Weatherhead (1993) ocasionados pelo vento, a partir de ensaios de equipamentos autopropelidos de irrigação, que envolva um procedimento numérico de primeira ordem (método das estimativas descendentes) e de segunda ordem (método de Newton); ii) aplicar a rotina computacional no ajuste dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento para ensaios de campo do aspersor PLONA-RL250 operando em um equipamento autopropelido de irrigação.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Descrição do modelo

Como é mostrado na Figura 1, a distribuição de água de um aspersor operando com um ângulo de giro ( $\theta$  em graus) e em movimento linear com velocidade constante ( $V$  em  $m\ h^{-1}$ ) ao longo do carreador é avaliada, de acordo com a norma ISO 8224-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2003), com auxílio de um dado número de coletores de água ( $N_C$ ) dispostos ao longo do eixo " $y_M$ ", situado perpendicularmente ao sentido de deslocamento do aspersor.

O número de pontos de amostragem (coletores de água), representados pelo índice  $k_C$  e espaçados em  $\Delta e$  (Figura 1), necessários para representar a distribuição de água do aspersor e a posição de cada coletor em relação ao carreador ( $y_M$  em m) são estabelecidos, respectivamente, através das expressões 1 e 2.

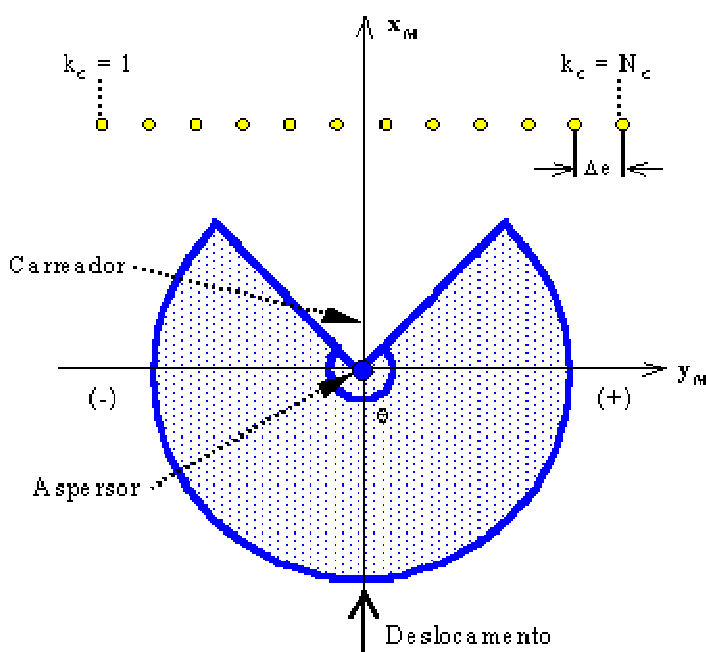
$$N_C = 2 \cdot \text{Int}(\tau) + 4$$

$$\text{sendo: } \tau = \frac{R}{\Delta e} \quad (1)$$

$$y_M = \left[ \left( -\frac{N_C}{2} + 0,5 \right) + (k_C - 1) \right] \cdot \Delta e \quad (2)$$

em que  $N_C$  é o número de coletores necessários para representar a distribuição de água do aspersor em movimento linear;  $R$  o raio de alcance do aspersor (m);  $\Delta e$  o espaçamento entre pontos de amostragem (m);  $\text{Int}(\tau)$  a função matemática que retorna a parte inteira de  $\tau$ ; e  $y_M$  coordenada dos pontos de amostragem na linha de coletores (m).

**Figura 1.** Disposição dos pontos de amostragem para determinação da distribuição de água de um aspersor operando em um equipamento autopropelido de irrigação.



Na realização dos ensaios de distribuição de água, além dos valores de lâminas aplicadas pelo aspersor, coletadas no final do ensaio, durante o ensaio, os valores médios de velocidade e direção do vento devem ser monitorados em intervalos de tempo pré-estabelecidos.

A partir das lâminas coletadas nos ensaios de distribuição de água, observa-se que sempre há perdas de água por evaporação e arraste. Richards e Weatherhead (1993) e Granier et al. (2003) comentam que para canhões hidráulicos esta perda é pequena e pode ser negligenciada. Entretanto, para que não haja problemas volumétricos, os valores de lâminas de precipitação observadas, em cada ensaio de distribuição de água, são corrigidos por:

$$I'_{k_E k_C} = I_{k_E k_C} \cdot \frac{Q_a}{Q_E}$$

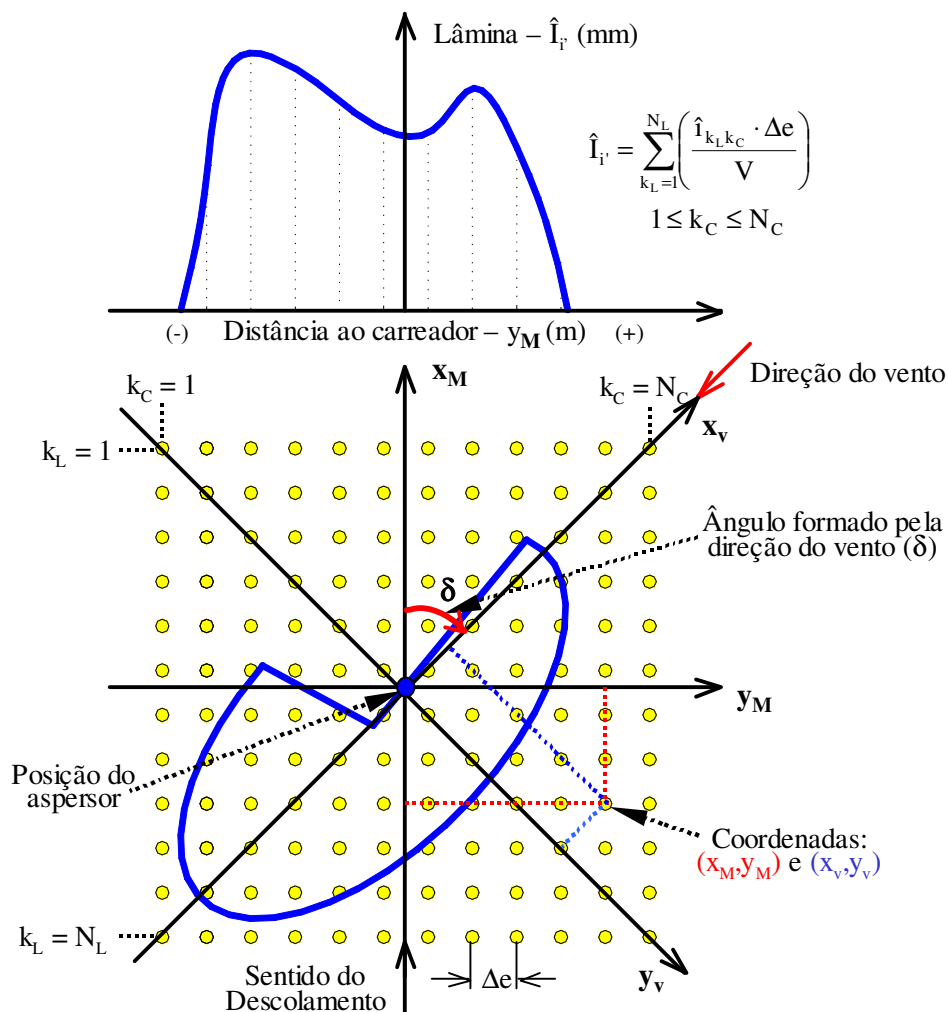
$$\text{sendo: } Q_E = \sum_{k_C=1}^{N_C} \left( \frac{I_{k_E k_C} \cdot \Delta e \cdot V}{1000} \right) \quad (3)$$

$$\text{com: } 1 \leq k_E \leq N_E ; 1 \leq k_C \leq N_C$$

em que,  $I'_{k_E k_C}$  é a lâmina de precipitação corrigida observada no ensaio de distribuição de água no campo (mm);  $I_{k_E k_C}$  a lâmina de precipitação observada no ensaio de distribuição de água no campo (mm);  $Q_a$  a vazão do aspersor ( $m^3 h^{-1}$ );  $Q_E$  a vazão determinada no ensaio de distribuição de água no campo ( $m^3 h^{-1}$ );  $V$  a velocidade de deslocamento linear do aspersor ( $m h^{-1}$ );  $k_E$  o índice que identifica o número do ensaio e;  $N_E$  a quantidade de ensaios de distribuição de água.

Como mostra a Figura 2, a estimativa das lâminas aplicadas por um aspersor operando em um equipamento autopropelido de irrigação, com um ângulo de giro ( $\theta$ ) e com velocidade constante ao longo do carreador, pode ser realizada a partir das lâminas aplicadas em torno do aspersor operando de forma estacionária (método da malha). Desta forma, considerando que o número de coletores na coluna ( $N_C$ ) é igual o número de coletores na linha ( $N_L$ ), com auxílio da expressão 1, é estabelecido o número total de coletores de água necessários para representar a distribuição de água do aspersor operando isoladamente (Figura 2).

**Figura 2.** Disposição dos pontos de amostragem para estimativa das lâminas aplicadas por um aspersor operando em um equipamento autopropelido de irrigação.



Na malha de coletores apresentada na Figura 2, as coordenadas “ $x_M$ ” dos pontos de amostragem em relação ao aspersor são estabelecidas com auxílio da expressão 4 e os valores das coordenadas “ $y_M$ ” são cálculos através da equação 2.

$$x_M = \left[ \left( \frac{N_L}{2} - 0,5 \right) - (k_L - 1) \right] \cdot \Delta e \quad (4)$$

em que  $x_M$  é a coordenada dos pontos de amostragem na malha de coletores (m) e;  $k_L$  o índice que identifica o coletor na linha.

A partir do ângulo ( $\delta$  em graus), formado entre a direção predominante do vetor vento e o eixo  $x_M$  da malha de coletores, é estabelecido um sistema de coordenadas cartesianas ( $x_v$ ,  $y_v$ ). Como mostra a Figura 2, nesse sistema de coordenadas cartesianas, o eixo “ $x_v$ ” é alocado de forma a coincidir com a direção predominante do vetor vento e o eixo “ $y_v$ ” é alocado perpendicularmente em relação à direção predominante do vetor vento. A posição dos coletores de água em relação aos eixos “ $x_v$ ” e “ $y_v$ ” é calculada, respectivamente, pelas expressões 5 e 6.

$$x_v = x_M \cdot \cos(\delta) + y_M \cdot \sin(\delta) \quad (5)$$

$$y_v = y_M \cdot \cos(\delta) - x_M \cdot \sin(\delta) \quad (6)$$

em que  $x_v$  e  $y_v$  são as coordenadas dos pontos de amostragem de água originadas em função da direção do vento (m).

Com os valores das coordenadas “ $x_v$ ” e “ $y_v$ ” de cada coletor em relação ao aspersor, na condição de vento, e a partir de uma estimativa inicial dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) é possível determinar, pelo modelo de Richards e Weatherhead (1993), às coordenadas ( $x_{v0}$ ,  $y_{v0}$ ) de cada coletor, na condição da ausência de vento a partir das equações 7 e 8. Essa determinação, como apresentado por Prado e Colombo (2011) é efetuada de maneira interativa pelo método de Newton (BURDEN e FAIRES, 2003).

- sendo:  $\cos(\phi) = \frac{x_{v0}}{r}$ , tem-se:

$$x_v = x_{v0} - \left[ A + B \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + C \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot v - K - \left[ D \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + E \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 + F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^3 \right] \cdot \frac{x_{v0}}{r} \cdot S \cdot v \quad (7)$$

- sendo:  $\sin(\phi) = \frac{y_{v0}}{r}$ , tem-se:

$$y_v = y_{v0} - \left[ D \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + E \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 + F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^3 \right] \cdot \frac{y_{v0}}{r} \cdot S \cdot v \quad (8)$$

$$\text{onde: } S = \frac{\sqrt{\sin^2(\alpha) \cdot x_{v0}^2 + y_{v0}^2}}{r} \quad \text{e} \quad r = \sqrt{x_{v0}^2 + y_{v0}^2}$$

em que,  $v$  é a velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ );  $r$  a distância radial do coletor ao aspersor (m);  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$  coordenadas para vento igual a zero (m);  $S$  o seno do ângulo formado entre a direção do jato do aspersor e a direção do vento;  $\alpha$  o ângulo de lançamento do jato d'água do aspersor ( $^\circ$ );  $A$ ,  $B$  e  $C$  constantes de ajuste da expressão que representa a deriva causada pelo vento ( $\text{m m}^{-1} \text{ s}$ ) e;  $D$ ,  $E$  e  $F$  constantes de ajuste da expressão que representa a redução do raio de alcance causada pelo vento ( $\text{m m}^{-1} \text{ s}$ ).

Conhecendo a posição de cada coletor, em relação ao aspersor, na ausência de vento ( $x_{v0}$ ,  $y_{v0}$ ) determina-se, no perfil radial de distribuição de água do aspersor, a intensidade de precipitação de água. Desta forma, corrigindo o valor da intensidade de precipitação obtida para a ausência de vento, pela equação 9, conforme o modelo de Richards e Weatherhead (1993), é possível estabelecer a intensidade de precipitação ocorrida em cada ponto de amostragem na condição de vento.

$$\hat{i}_{k_E k_C k_L} = \frac{i_0}{\frac{\partial x_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} \cdot \frac{\partial y_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}}} \quad (9)$$

em que,  $\hat{i}_{k_E k_C k_L}$  a intensidade de precipitação estimada pelo modelo ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $i_0$  a intensidade de precipitação na ausência de vento ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $\frac{\partial x_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}}$  e  $\frac{\partial y_v(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}}$  são as derivadas parciais, respectivamente, das equações 7 e 8.

Uma solução analítica das derivadas parciais das equações 7 e 8, utilizadas para a estimativa da intensidade de aplicação de água do aspersor na condição de vento (equação 9), é apresentada por Prado e Colombo (2011).

Com os valores de intensidades de precipitação aplicados por um aspersor operando de forma estacionária, na malha de coletores apresentada na Figura 2, são estimadas as lâminas aplicadas pelo aspersor em movimento. Esta estimativa é feita integrando os valores de intensidades de precipitação estimados em cada coluna da malha de coletores por:

$$\hat{I}_{k_E k_C} = \sum_{k_C=1}^{N_C} \left( \frac{\hat{i}_{k_E k_C k_L} \cdot \Delta e}{V} \right) \quad (10)$$

com :  $1 \leq k_E \leq N_E$  ;  $1 \leq k_L \leq N_L$

em que,  $\hat{I}_{k_E k_C}$  é a lâmina de precipitação estimada aplicada pelo aspersor em movimento no carreador (mm).

No ajuste dos parâmetros ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  e  $F$ ), que definem a deriva ocasionada pelo vento e a redução do raio de alcance ocasionado pelo vento, é utilizado o método dos mínimos quadrados. Desta forma, é preciso estabelecer uma função (função objetivo) da diferença ao quadrado dos valores de lâmina de precipitação corrigidos determinados nos ensaios

distribuição de água no campo ( $I'_{k_E k_C}$ ), menos os valores de lâmina de precipitação estimados ( $\hat{I}_{k_E k_C}$ ), dada por:

$$g_A(\mathbf{x}) = \sum_{k_E=1}^{N_E} \sum_{k_C=1}^{N_C} (I'_{k_E k_C} - \hat{I}_{k_E k_C})^2 \quad (11)$$

com:  $1 \leq k_E \leq N_E$  ;  $1 \leq k_C \leq N_C$

em que,  $g_A(\mathbf{x})$  é a função objetivo ( $\text{mm}^2$ ) e;  $\mathbf{x} = (x_1 = A, x_2 = B, x_3 = C, x_4 = D, x_5 = E, x_6 = F)^t$  o vetor que contém os parâmetros de ajuste.

Para começar o processo de cálculo da estimativa dos parâmetros, inicialmente são efetuadas duas estimativas da função objetivo: uma com os parâmetros (A, B, C, D, E e F) obtidos no trabalho de Richards e Weatherhead (1993) e outra com os parâmetros (A, B, C, D, E e F) obtidos no trabalho de Granier et al. (2003). Desta forma, os parâmetros escolhidos para iniciar o processo de cálculos são aqueles que proporcionam o menor valor da função objetivo.

No ajuste dos seis parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção ocasionada pelo vento, a rotina computacional desenvolvida utiliza dois métodos numéricos: i) método das estimativas descendentes, para uma estimativa inicial dos valores de A, B, C, D, E e F e; ii) método de Newton para sistemas de equações não lineares, na estimativa final dos parâmetros de ajuste. A descrição e os critérios de parada do método das estimativas descendentes e do método de Newton são apresentados por Prado e Colombo (2011).

Nas estimativas dos valores dos parâmetros (A, B, C, D, E e F), o desvio médio entre os valores de precipitação estimadas ( $\hat{I}_{k_E k_C}$ ) e observadas ( $I'_{k_E k_C}$ ) são calculados pela expressão:

$$D_M = \sqrt{\frac{g_A(A, B, C, D, E, F)}{N_V}} \quad (12)$$

em que  $D_M$  é o desvio médio dos valores de lâminas de precipitação estimadas e observadas (mm) e;  $N_V$  é o número de valores na qual a diferença ao quadrado dos valores de intensidades de precipitação estimadas e observadas é maior que zero.

## 4.2 Aplicação do modelo matemático

O modelo matemático descrito foi aplicado aos ensaios de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250 operando com os bocais 14 x 5 mm e 14 x 7 mm sob a pressão de serviço de 392 kPa. Esses ensaios foram realizados nas condições sem e com vento.

Os ensaios de distribuição de água (perfil radial de distribuição de água), em condições de ausência de vento (ventos menores que  $0,9 \text{ m s}^{-1}$ ), foram determinados na bancada de ensaios de aspersores da Universidade Federal de Lavras, em Lavras - MG, de acordo com o procedimento descrito por Prado e Colombo (2005).

Para determinação da distribuição de água, em condições de vento, foram feitos ensaios com o aspersor PLONA-RL250, operando em um carretel enrolador da marca Metal Lavras, modelo Hidro Roll 63/150. Estes ensaios foram realizados para duas condições de



vento (velocidade e direção) distintas, no Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) da cidade de Uberaba/MG, em um terreno com declividade descendente, de 2%, no sentido do deslocamento do aspersor, observando-se as seguintes condições operacionais: i) bocais de 14 x 5 mm, ângulo de giro de 240° e velocidade de 30 m h<sup>-1</sup>; ii) bocais de 14 x 7 mm, ângulo de giro de 240° e velocidade de 30 m h<sup>-1</sup>.

Nos ensaios de campo, transversalmente ao sentido de deslocamento do aspersor, a uma distância maior que 45 m dos pontos de início e parada do deslocamento linear do aspersor no carreador, foram alocadas três linhas de coletores, espaçadas de 6 m. Em cada lado destas linhas foram instalados 20 coletores de plástico, com 8 cm de diâmetro e espaçados em 2 m.

Durante os ensaios a pressão de operação medida na base do aspersor era monitorada a cada 10 minutos e as condições de velocidade média e direção do vento eram monitoradas a cada 5 minutos, com um anemômetro de canecas, instalado a 2 m de altura do solo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Rotina computacional

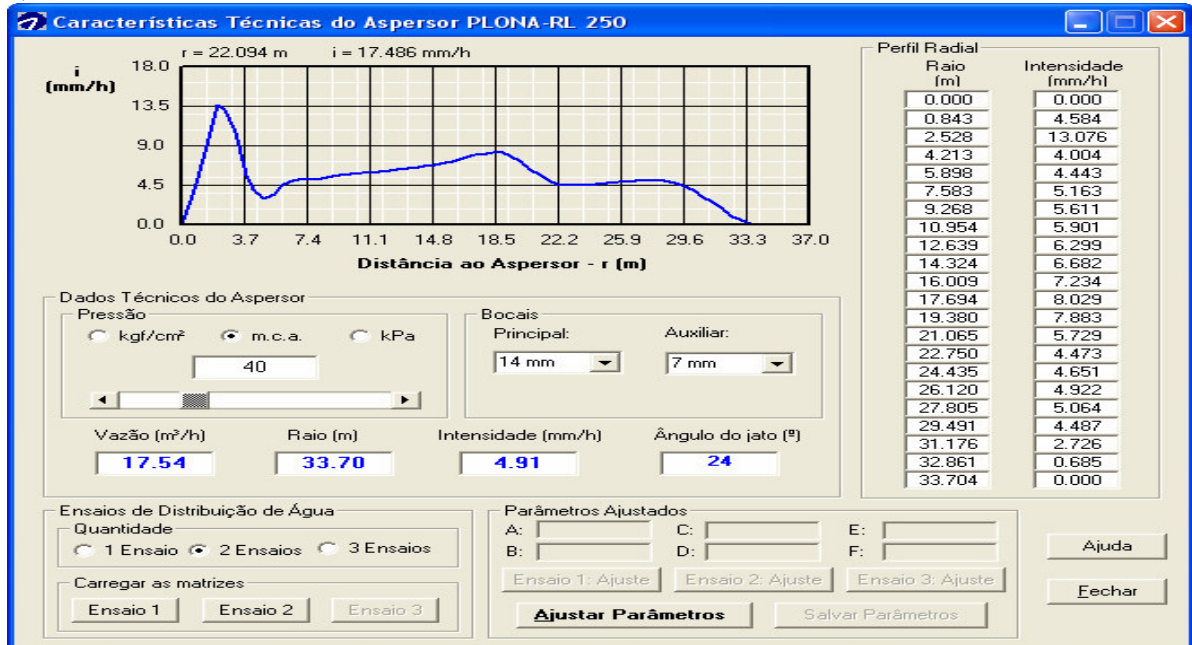
A partir do modelo matemático descrito foi desenvolvida, em linguagem de programação *Visual Basic 6*, e incorporada ao programa SIMULASOFT (PRADO, 2004) uma rotina computacional para ajuste dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção devido ao vento (Figura 3). Estes parâmetros são determinados através de até três ensaios de distribuição de água de equipamentos autopropelidos de irrigação, obtidos na condição de vento.

Como mostra a Figura 3a, na janela inicial da rotina computacional é necessário definir as condições operacionais do aspersor. Para os aspersores PLONA RL250, RL300 e RL400 ao selecionar a combinação de pressão de serviço e bocais o programa apresenta os dados técnicos de vazão, raio de alcance, intensidade de precipitação média e perfil radial de distribuição de água do aspersor operando na ausência de vento. Nessa janela, também é preciso assinalar o número de ensaios (um, dois ou três) de distribuição de água realizados com o aspersor operando em condições de vento.

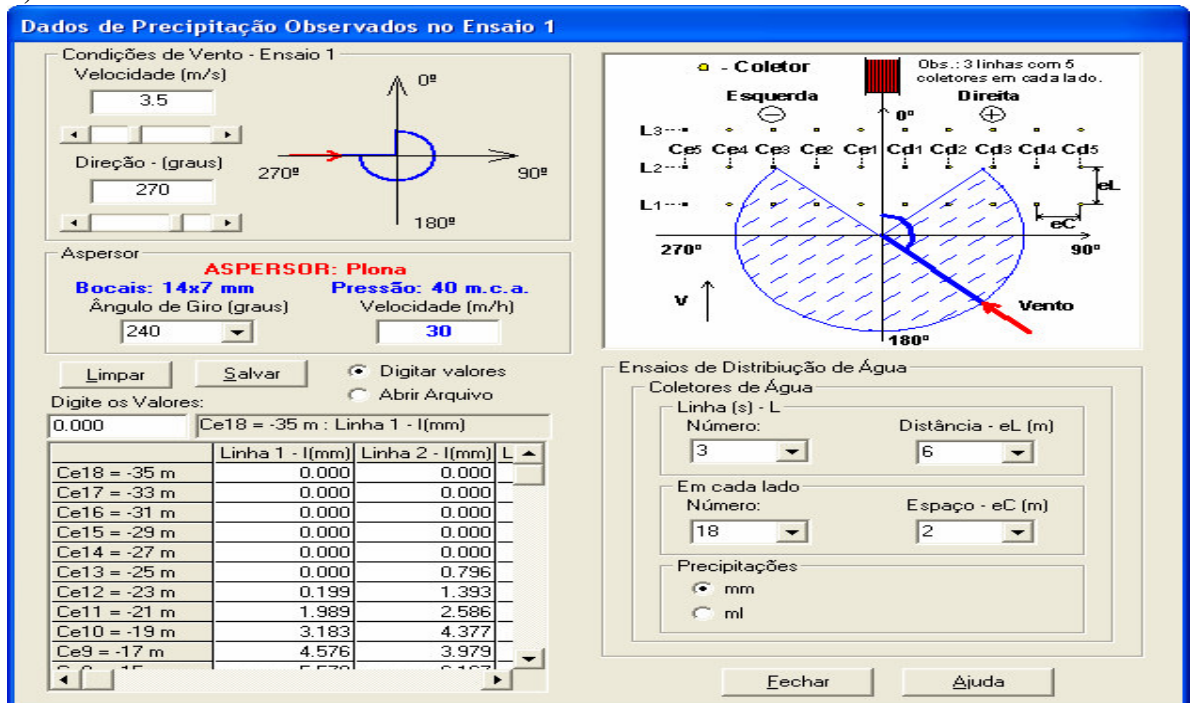
Ao definir o número de ensaios de distribuição de água realizados em condições de vento (Figura 3a), na janela seguinte (Figura 3b) é preciso entrar com os seguintes valores de ensaio de campo: i) velocidade média do vento; ii) direção média do vento; iii) ângulo de giro do aspersor; iv) velocidade de deslocamento do aspersor no carreador e; v) lâminas de precipitação observadas. A entrada desses valores pode ser por meio de digitação ou abertura de arquivo, que deve estar na extensão \*.TXT separado por tabulações.

**Figura 3.** Janelas da rotina computacional para entrada de dados: (a) dados técnicos do aspersor e ajustes dos parâmetros de vento; (b) dados dos ensaios de distribuição de água em condições de vento.

a)



b)

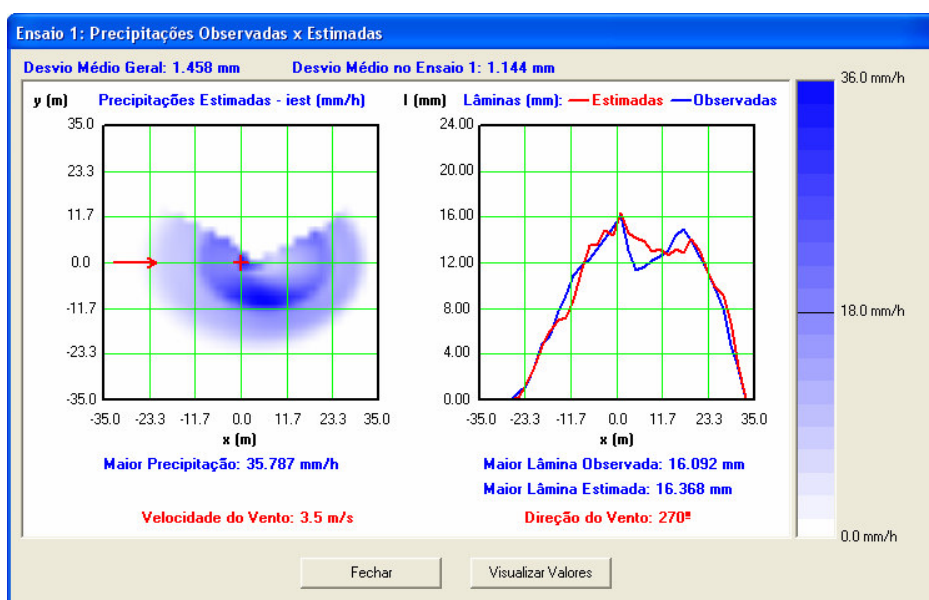


Com os dados de ensaio de distribuição de água determinados em condições de vento, o programa determina os valores dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) minimizando a diferença

dos valores de lâminas de precipitação estimadas e observadas. Os valores de intensidades de precipitação estimados na malha de coletores, e utilizados para gerar os valores de lâminas de precipitação estimadas são representados em um gráfico de superfície. Já as lâminas de precipitação estimadas e observadas são representadas em um gráfico de linhas, conjuntamente com o valor do desvio médio das estimativas (Figura 4).

Os parâmetros ajustados, para combinação de bocal e pressão de serviço do aspersor, podem ser salvos e utilizados no SIMULASOFT (PRADO, 2004) para simulação da distribuição espacial de água do aspersor operando em sistemas autopropelidos de irrigação. Estas simulações podem ser efetuadas para outras condições de velocidade de deslocamento e ângulo de giro do aspersor. Desta forma, é possível estabelecer, de modo a maximizar a uniformidade de aplicação de água, as melhores condições operacionais de ângulo de giro e espalhamento entre carreadores para as condições de vento predominantes na região.

**Figura 4.** Apresentação gráfica do ajuste dos parâmetros de distorção ocasionados pelo vento a partir de ensaios de distribuição de água de equipamentos autopropelidos de irrigação.



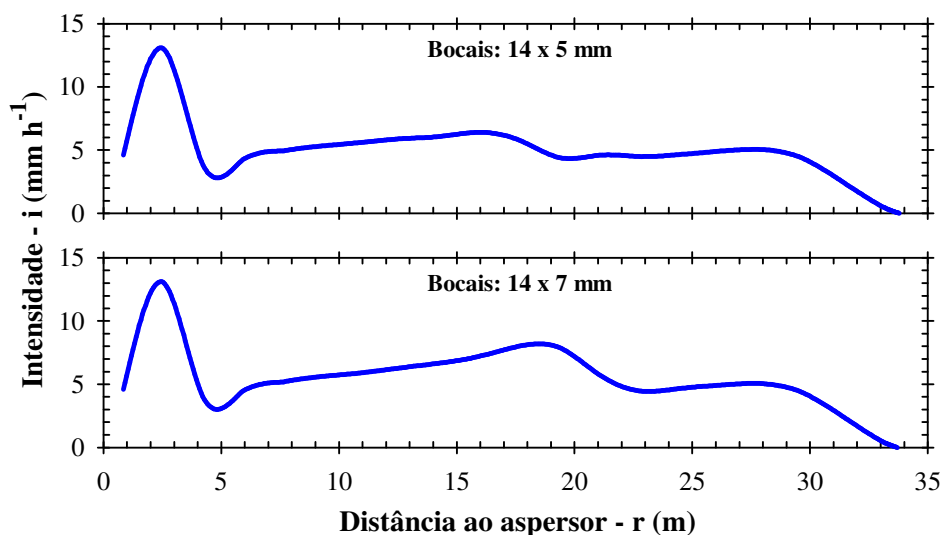
## 5.2 Ajuste dos parâmetros

As duas formas geométricas dos perfis radiais de distribuição de água obtidas em laboratório na condição de ausência de vento são apresentadas na Figura 5. Esses dois perfis radiais foram determinados para as mesmas combinações de bocais e pressão de serviço utilizadas nos ensaios de distribuição de água no campo, em condições de vento.

De acordo com os perfis radiais de distribuição de água típicos, descritos por Christiansen (1942), os perfis radiais apresentados na Figura 5 assemelham-se aos perfis radiais E e F de Christiansen. Conforme Keller e Bliesner (1990) canhões hidráulicos apresentam, normalmente, perfis radiais de distribuição de água com as formas geométricas típicas D e E de Christiansen. De acordo com Vories e Von Bernuth (1986) e Kincaid (1991), aspersores que apresentam perfil radial de distribuição de água com formato geométrico semelhantes aos perfis apresentados na Figura 5 sofrem menor influência do vento, em

relação a aspersores que apresentam perfil radial de distribuição de água com a forma geométrica tendendo para o triangular.

**Figura 5.** Perfis radiais de distribuição de água do aspersor PLONA-RL250, obtidos na ausência de vento, em função dos bocais e da pressão de serviço de 392 kPa.



Na Tabela 1 são apresentados os valores médios de velocidade e direção do vento observados nos ensaios de distribuição de água no campo. Conforme a classificação de Tarjuelo (1999), em três ensaios os valores de velocidade média de vento são medianos ( $2$  a  $4 \text{ m s}^{-1}$ ) e em um ensaio o valor de velocidade média do vento é forte (acima de  $4 \text{ m s}^{-1}$ ). Segundo este autor, para valores de velocidades médias do vento superiores a  $4 \text{ m s}^{-1}$  a irrigação deve ser suspensa, devido ao comprometimento da uniformidade de aplicação de água. Desta forma, ensaios de distribuição de água com valores de velocidade média do vento muito além ao valor de  $4 \text{ m s}^{-1}$  são desnecessários, pois na prática não seria adequada à utilização de sistemas de irrigação por aspersão nessas condições.

**Tabela 1.** Condições médias de vento (velocidade e direção) observadas durante a realização dos ensaios de distribuição de água.

Bocais (mm)	Pressão (kPa)	Ensaio	Condições de vento			
			Velocidade ( $\text{m s}^{-1}$ )	Velocidade CV* (%)	Direção (graus)	Direção CV (%)
14 x 5	392	1	3,5	0,22	270	0,31
		2	4,4	0,20	193	0,03
14 x 7	392	1	1,8	0,55	332	0,37
		2	3,5	0,24	270	0,23

\* Coeficiente de variação (CV).

Os valores de coeficientes de variação dos valores médios de velocidade e direção do vento, apresentados na Tabela 1, variaram de 0,03 a 0,55. O maior valor de coeficiente de variação, tanto para velocidade como para direção do vento, foi observado no ensaio onde a velocidade média do vento foi igual a  $1,8 \text{ m s}^{-1}$ . Para valores de velocidades médias de vento mais baixas (menor que  $3,0 \text{ m s}^{-1}$ ), a constância do vetor vento é mais difícil. Desta forma, os

ensaios de distribuição de água devem ser realizados quando a velocidade média do vento supera o valor de  $3,0 \text{ m s}^{-1}$ . Newell et al. (2003) recomendam que os ensaios de distribuição de água no campo para o ajuste dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção do vento sejam realizados quando as velocidades do vento estejam entre  $4,0$  a  $5,0 \text{ m s}^{-1}$ .

Conforme as observações de Shull e Dylla (1976), nos ensaios de distribuição de água de aspersores operando em equipamentos autopropelidos de irrigação, a dificuldade na obtenção da constância do vetor vento é muito mais acentuada, em relação a ensaios de distribuição de água com o aspersor operando isoladamente (método da malha). Nos ensaios de distribuição de água do aspersor operando isoladamente o tempo de ensaio é em torno de uma hora, já para equipamentos autopropelidos de irrigação dependendo do diâmetro molhado do aspersor e da velocidade de deslocamento do aspersor, o tempo de ensaio pode durar várias horas.

Na Tabela 2 são mostrados os ajustes dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção ocasionados pelo vento, o desvio médio entre os valores de lâminas de precipitação observadas nos ensaios de campo e estimadas pelo modelo e o valor da função objetivo. Estes valores foram obtidos para o aspersor deslocando-se com velocidade linear de  $30 \text{ m h}^{-1}$  no carreador, com ângulo de giro  $240^\circ$ , na pressão de  $392 \text{ kPa}$  e com os bocais de  $14 \times 5 \text{ mm}$  e  $14 \times 7 \text{ mm}$ , para duas diferentes condições de vento (velocidade e direção). Concordando com as observações de Richards e Weatherhead (1993), observa-se na Tabela 2 que, o maior valor de desvio médio ( $D_M = 2,307 \text{ mm h}^{-1}$ ), no ajuste dos parâmetros, foi observado nos ensaios de campo que apresentaram as maiores velocidades médias de vento (Tabela 1).

O ajuste dos parâmetros de distorção devido ao vento, mostrados na Tabela 2, não garantem que o valor da função objetivo seja um valor com um mínimo global, este valor pode ser um mínimo local. Segundo Saramago (2003) raramente pode-se garantir a existência e unicidade de um ponto ótimo global, isto ocorre devido à existência de várias soluções, mau condicionamento numérico ou lenta convergência.

Conforme Šimunek e Hopmans (2002) uma estratégia para alcançar um valor com um mínimo global da função objetivo seria iniciar o processo de otimização a partir de diferentes configurações dos parâmetros, caso se encontre o mesmo valor final dos parâmetros, tem-se alguma garantia de mínimo global. A utilização deste procedimento no ajuste dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção pelo vento, através de ensaios de distribuição de água de equipamentos autopropelidos de irrigação, seria inviável, pois exigiria um grande esforço computacional e o tempo despendido para encontrar a solução ótima seria muito grande.

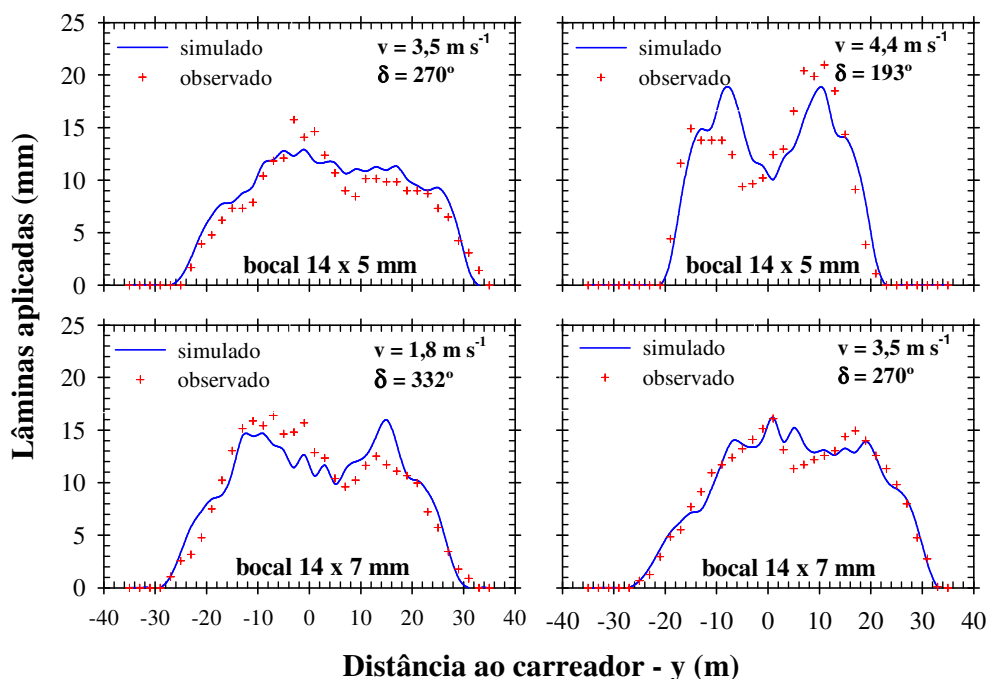
**Tabela 2.** Parâmetros (A, B, C, D, E e F) de distorção do vento ajustados para o aspersor PLONA-RL250 operando em um equipamento autopropelido de irrigação com os bocais  $14 \times 5$  e  $14 \times 7 \text{ mm}$  sob a pressão de  $392 \text{ kPa}$ , ângulo de giro  $240^\circ$  e velocidade linear de  $30 \text{ m h}^{-1}$  no carreador.

Ajuste dos Parâmetros	Bocal $14 \times 5 \text{ mm}$	Bocal $14 \times 7 \text{ mm}$
	Pressão $392 \text{ kPa}$	Pressão $392 \text{ kPa}$
A ( $\text{m m}^{-1} \text{ s}$ )	0,250	0,694
B ( $\text{m m}^{-1} \text{ s}$ )	3,473	3,773
C ( $\text{m m}^{-1} \text{ s}$ )	-2,926	-3,610
D ( $\text{m m}^{-1} \text{ s}$ )	1,673	1,182
E ( $\text{m m}^{-1} \text{ s}$ )	4,946	10,199
F ( $\text{m m}^{-1} \text{ s}$ )	-3,793	-9,034
$D_M^*$ ( $\text{mm h}^{-1}$ )	<b>2,307</b>	<b>1,521</b>
$g_A(A,B,C,D,E,F)$ ( $\text{mm}^2 \text{ h}^{-2}$ )	<b>276,65</b>	<b>143,34</b>

\* Desvio médio ( $D_M$ ).

Na Figura 6 são mostrados os valores de lâminas de precipitação observados nos ensaios de distribuição de água obtidos no campo e os valores de lâminas de precipitação estimados com os parâmetros (A, B, C, D, E e F) ajustados pelo modelo. Observa-se que para as duas condições operacionais de bocais e pressão de serviço do aspersor PLONA-RL250, os perfis de distribuição de água do aspersor em movimento linear com velocidade constante de  $30 \text{ m h}^{-1}$  e com ângulo de giro  $240^\circ$ , observados nos ensaios de campo, apresentaram boa semelhança aos perfis de distribuição de água estimados pelo modelo.

**Figura 6.** Valores de lâminas de precipitação observadas nos ensaios de distribuição de água e estimadas pelo modelo, para o aspersor PLONA-RL250 operando com os bocais  $14 \times 5 \text{ mm}$  e  $14 \times 7 \text{ mm}$  sob a pressão de serviço de  $392 \text{ kPa}$ , ângulo de giro  $240^\circ$  e velocidade linear de  $30 \text{ m h}^{-1}$  no carreador.



Ao comparar a metodologia de ajuste dos parâmetros de distorção que utiliza ensaios de distribuição de água de equipamentos autopropelidos de irrigação com a metodologia que utiliza o método da malha (PRADO e COLOMBO, 2011), a metodologia proposta exige mais critérios para coleta de dados de campo e o esforço computacional para determinação dos parâmetros é muito maior, pois se utiliza de uma malha de coletores muito mais adensada. Entretanto, a obtenção dos valores de lâminas aplicadas no campo é muito mais fácil, visto que podem ser obtidos diretamente no local onde o sistema de irrigação foi implantado e não há necessidade de montar um campo experimental para ensaiar o aspersor isoladamente.

## 6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que: i) a rotina computacional foi elaborada e permite ajustar os parâmetros de distorção ocasionados pelo vento a partir de até

três ensaios de distribuição de água de aspersores operando em equipamentos autopropelidos de irrigação; ii) a rotina computacional foi aplicada no ajuste dos parâmetros (A, B, C, D, E e F) e os mesmos podem ser utilizados para simular a distribuição de água de aspersores para qualquer direção e velocidades do vento que não excedam aos valores observados nos ensaios de campo.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Análise numérica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 740 p.
- CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station, 1942. 124 p. (Bulletin, 670).
- COLLIER, R. L.; ROCHESTER, E. W. Water application uniformity of hose towed traveler irrigators. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 23, n. 5, p. 1135-1138, 1980.
- COLOMBO, A. **Simulação do desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido de irrigação**. 1991. 120p. (Dissertação de Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.
- GRANIER, J.; MOLLE, B.; DEUMIER, J. M. IRRIPARC - Part 1: modeling 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.
- HAN, S.; EVANS, R. G.; KROEGER, M. W. Sprinkler distribution patterns in windy conditions. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 37, n. 5, p. 1481-1489, 1994.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8224-1 **Traveller irrigation machines**. Part1: Operational characteristics and laboratory and field test methods. Switzerland. 2003. 36p.
- KELLER, J., BLIESNER, R. D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990. 652 p.
- KINCAID, D.C. Impact sprinkler pattern modification. **Transactions of the American of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.34, n.6, p.2397-2402, 1991.
- LANCEY, T. **Improving Irrigation Efficiency: Optimising raingun performance in field-scale vegetable production**. Bedfordshire: Cranfield University, February 2006. Disponível em: <<http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/iwe/students/timlacey.htm>>. Acesso em: 20 maio de 2006.

NEWELL, G. F.; FOLEY, J.; SMITH, R. **TRAVGUN-Travelling Gun Simulation model user's manual**. Version 1.1. Toowooba, QLD. Australia. 2003. 91.p.

NUNES, D.; PINTO, R. S.; TRENTO FILHO, E.; ELIAS, A. I. **Indicadores do setor sucroalcooleiro - safras 2003/2004**. Ribeirão Preto, Grupo IDEA, 2004, 111 p.

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**, Campina Grande, v.13, p.818-824, 2009.

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.

PRADO, G.; COLOMBO, A. Ajuste de parâmetros para distorção da distribuição de água aplicada por canhões hidráulicos em condições de vento. **Irriga**, v.16, n. 1, p.52-69, 2011.

PRADO, G.; COLOMBO, A. Caracterização técnica do aspersor PLONA-RL300. **Irriga**, Botucatu, v.10, n. 1, p.53-63, 2005.

PRADO, G.; COLOMBO, A.; BIAGIONI, P. F. Análise da uniformidade de aplicação de água pelo aspersor PLONA-RL400 em sistemas autopropelidos de irrigação. **Revista de Engenharia**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 346-353, 2007.

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.

RICHARDS, P. J.; WEATHERHEAD, E. K. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 54, n. 4, p. 281-291. 1993.

ROCHA, F. A. et al. Análise da uniformidade de distribuição de água de um equipamento autopropelido. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 1, p. 96-106, 2005.

SARAMAGO, S. F. P. Método de otimização de otimização randômica: algoritmos genéticos e "simulated annealing". São Carlos, SP: SBMAC, 2003, 37 p. (Notas em Matemática Aplicada; 6).

SHULL, H.; DYLLA, A. S. Traveling gun application uniformity in high winds. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 19, n. 2, p. 254-258, 1975.

ŠIMÛNEK, J.; HOPMANS J. W. Parameter Optimization and Nonlinear Fitting, In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods**. Third edition, SSSA, Madison, WI, p. 139-157, 2002.



---

SMITH, R. J. et al. A decision support model for traveling gun irrigation machines. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 100, n. 01, p. 123-136, 2008.

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

VORIES, E. D.; VON BERNUTH, R. D. Single nozzle sprinkler performance in wind. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 29, n. 5, p. 1325-1330, 1986.