



**LESSANDRO COLL FARIA**

**MODELAGEM DA APLICAÇÃO DE ÁGUA DE  
ASPERSORES DE TAMANHO MÉDIO EM  
CONDIÇÕES DE VENTO**

**LAVRAS – MG  
2011**

**LESSANDRO COLL FARIA**

**MODELAGEM DA APLICAÇÃO DE ÁGUA DE ASPERSORES DE  
TAMANHO MÉDIO EM CONDIÇÕES DE VENTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de “Doutor”.

Orientador  
Prof. PhD. Alberto Colombo

**LAVRAS – MG  
2011**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Faria, Lessandro Coll.

Modelagem da aplicação de água de aspersores de tamanho médio em condições de vento / Lessandro Coll Faria. – Lavras : UFLA, 2011.

90 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Alberto Colombo.

Bibliografia.

1. Simulação. 2. Modelo semiempírico. 3. Ensaios de campo. 4. Irrigação por aspersão. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.587

**LESSANDRO COLL FARIA**

**MODELAGEM DA APLICAÇÃO DE ÁGUA DE ASPERSORES DE  
TAMANHO MÉDIO EM CONDIÇÕES DE VENTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 11 de março de 2011.

Dr. Jacinto de Assunção Carvalho	UFLA
PhD. Luiz Antônio Lima	UFLA
Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira	UFLA
Dr. Samuel Beskow	UFPeI

Prof. PhD. Alberto Colombo  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2011**

A minha mãe, Lucimeri, pelo incentivo, educação e ensinamentos recebidos.  
Aos meus irmãos, Leandro, Leonardo e Mateus, pelo carinho e amizade.

**OFEREÇO**

Ao meu saudoso pai, Alípio Pereira Faria, pela amizade, incentivo, educação e  
ensinamentos recebidos.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Alberto Colombo, pelos ensinamentos e orientação na realização deste trabalho.

Aos professores Jacinto de A. Carvalho, Luiz Lima, Luiz F. Coutinho e Samuel Beskow, membros da banca examinadora, pelas sugestões.

Aos professores do DEG/UFLA, pelos ensinamentos.

À professora Rita de Cássia Fraga Damé, pelo incentivo.

Ao amigo Samuel Beskow, pela contribuição na realização deste trabalho, e a sua família, pela amizade e convivência.

Aos funcionários Osvaldo “Nenê” e José Luís, do Laboratório de Hidráulica da UFLA, pela convivência e pelos serviços prestados.

A todos colegas de curso, em especial Anselmo Custódio, Bruno Leite, Carolina Bilibió, Eduardo (Meta), Gervásio Rios, Giuliani do Prado, Henrique Oliveira, Joaquim A. de L. Júnior, Léo Ávila, Luciano Geisenhoff, Marcelo Viola, Marcus Vinícius e Moisés Ribeiro, pela amizade e convivência.

Aos amigos Charles Moreira, Christopher Dávalos, Eder Isquierdo, Juliano dos Santos, Luiz Fernando Costa, Luciano Vieira, Marcos Palma, Romário Melo, Roger Toscan e Vinicius Saito, pela convivência durante minha passagem por Lavras, MG.

A Raíssa Sousa Martins, pela amizade, carinho e compreensão.

A todos meus familiares e amigos que, mesmo a distância, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste projeto.

A Deus, por sempre me acompanhar.

## RESUMO

A uniformidade de aplicação de água é um fator importante a ser considerado na avaliação dos sistemas de irrigação por aspersão, sendo afetada pelo tipo de aspersor e condições operacionais, disposição e espaçamento entre aspersores no campo, e pela velocidade e direção do vento durante o período de aplicação de água. Dentre estes fatores, o vento é considerado um dos principais responsáveis pela desuniformidade de aplicação de água de aspersores, podendo tornar um determinado sistema de irrigação ineficiente. Nestas condições, a modelagem computacional pode facilitar as avaliações de sistemas convencionais de aspersão, antes mesmo de sua implantação no campo, como proposto neste estudo, no qual foi avaliada a aplicabilidade do modelo semiempírico de Richards e Weatherhead (1993), operando em diferentes condições de vento, para aspersores de tamanho médio dos modelos Agropolo/NY e Naan/5024. Os parâmetros empíricos do modelo ajustado indicaram que, na direção contrária ao vento, ocorreu um decréscimo de 3,7% em relação ao valor do alcance sem vento do aspersor; na direção de alcance perpendicular ao vento ocorreu um decréscimo de 3,0% em relação ao alcance sem vento e, na mesma direção do vento, ocorreu um acréscimo de 2,2% em relação ao alcance sem vento do aspersor, para cada incremento de  $1 \text{ m s}^{-1}$  na velocidade do vento. Os valores dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (1942) (CUC), obtidos com dados de ensaios de campo e em simulações computacionais, foram comparados por meio de diversos índices ( $R^2=0,88$ , desvio absoluto médio de 4,75%, e índice de desempenho de 0,91), para os aspersores operando isoladamente e em linhas laterais de aspersores ( $R^2=0,78$ , desvio absoluto médio de 4,1%, e índice de desempenho de 0,76). Demonstrou-se, dessa forma, a aplicabilidade do modelo de Richards e Weatherhead (1993) frente à predição da uniformidade de aplicação de água de sistemas convencionais de irrigação operando com aspersores de tamanho médio, o que reduz o esforço e o tempo requeridos em trabalhos de campo envolvendo a avaliação da distribuição de água destes aspersores.

Palavras-chave: Simulação. Modelo semiempírico. Ensaio de campo. Irrigação por aspersão.

## ABSTRACT

The water application uniformity is an important factor to be considered in irrigation system evaluations, being affected by sprinkler type and its operational conditions, sprinkler disposition and spacing on the field, and wind velocity and direction during water application periods. Wind has influence on sprinkler water distribution and this can make a given irrigation system inefficient. Under this circumstance, the mathematical modeling can make it easier evaluations of conventional sprinkler irrigation systems even before they are installed at in field. This study evaluated the applicability of the semi-empirical model by Richards and Weatherhead (1993) when medium-sized sprinklers (Agropolo/NY and Naan/5024) are used under local wind conditions. Model's empirical parameters were adjusted showing that, there was: a 3.7% decrease on the distance to the upwind edge, a 3.0% decrease on the distance to the crosswind edge, and a 2.2% increase on downwind edge distance in relation to the no-wind radius of throw, for each  $1 \text{ m s}^{-1}$  increase in wind velocity. Values of Christiansen (1942) coefficient of uniformity (CUC) based on in-field sprinkler tests were compared to simulated values resulting in the following evaluation indices: (i)  $R^2=0.88$ , a 4.75% average absolute deviation, and a 0.91 performance index for the solid set sprinkler system; and (ii)  $R^2=0.78$ , a 4.1% average absolute deviation, and a 0.76 performance index for the block sprinkler system. These results emphasize the capability of the Richards and Weatherhead (1993) model with respect to the prediction of water application uniformity of conventional sprinkler systems operating with medium-sized sprinklers, thus allowing the reduction of efforts and time required in field trials for water distribution evaluation of these sprinklers.

Keywords: Simulation. Semi empirical model. In-field test. Sprinkler irrigation.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Irrigação por aspersão convencional.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Distribuição de água de aspersores .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Modelagem da uniformidade de distribuição de água de aspersores .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Modelagem da uniformidade distribuição de água sem vento.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Modelagem da uniformidade de distribuição de água com vento .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.2.1</b>	<b>Modelo semiempírico de Richards &amp; Weatherhead .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Técnicas de otimização de parâmetros.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>Uniformidade de distribuição de água de aspersores .....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Influência do vento na uniformidade de distribuição de água.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Quantificação da uniformidade de distribuição de água .....</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Distribuição de água dos aspersores .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Composição dos perfis radiais adimensionais .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Determinações experimentais das dimensões da área molhada distorcida pelo vento .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4</b>	<b>Ajuste dos parâmetros empíricos .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Ajuste por meio das dimensões da área molhada distorcida pelo vento .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Ajuste por meio da distribuição de água em condições de vento.....</b>	<b>39</b>
<b>3.5</b>	<b>Avaliação da modelagem da uniformidade de aplicação de água .....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Perfis radiais adimensionais de distribuição de água .....</b>	<b>45</b>

<b>4.2</b>	<b>Estimativas dos parâmetros do modelo de Richards &amp; Weatherhead .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Estimativas pelas dimensões da área molhada distorcida pelo vento .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Estimativa pelo método dos mínimos quadrados: rotina computacional .....</b>	<b>53</b>
<b>4.3</b>	<b>Avaliação do modelo .....</b>	<b>59</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Avaliação dos parâmetros de distorção do vento ajustados com o modelo de Richards e Weatherhead.....</b>	<b>59</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Avaliação da uniformidade de aplicação de água de sistemas convencionais de irrigação .....</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>78</b>
	<b>ANEXO B .....</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em um cenário mundial caracterizado pela crescente demanda por água e energia, bem como as preocupações com os impactos ambientais associados aos diversos processos produtivos, a viabilidade econômica e a própria sustentabilidade dos sistemas de irrigação por aspersão ficam na dependência do uso mais eficiente dos recursos hídricos e energéticos disponíveis.

Os sistemas convencionais de irrigação por aspersão são muito difundidos no Brasil. Mesmo assim, o conhecimento técnico a respeito das condições de uniformidade de aplicação de água destes sistemas operando sob diferentes condições de vento ainda é bastante limitado. As limitações no conhecimento das interações entre o vento e a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação por aspersão colocam em risco não só a viabilidade econômica, como também a própria sustentabilidade destes sistemas.

No momento, podem-se destacar alguns fatores responsáveis por estas limitações, como, por exemplo, o número excessivo de parâmetros (distribuição individual dos diâmetros e velocidade das gotas, coeficientes de arraste e perfis radiais de aplicação de água) para ajuste de modelos de cálculo em estudos desta magnitude. Além disso, as condições naturais de vento não permitem a análise de diferentes combinações de incidências e velocidades de vento ou, mesmo, a análise de diferentes disposições dos equipamentos sob condições idênticas de vento.

Diante da importância do conhecimento da distribuição de água dos aspersores, é surpreendente a falta de informações técnicas, em catálogos de fabricantes, a respeito dos diversos modelos de aspersores disponíveis no mercado. Devido às dificuldades e à inviabilidade de as empresas fabricantes disponibilizarem dados de distribuição de água dos aspersores em condições de vento, os catálogos limitam-se a apresentar os valores de vazão e raio de alcance,

para diferentes combinações de bocal e pressão de serviço recomendadas, deixando a critério dos projetistas e usuários a responsabilidade de selecionar as disposições entre aspersores que resultam em valores adequados de uniformidade de aplicação de água.

Apesar da necessidade de laboriosos trabalhos de calibração e validação e de exigirem elevada capacidade de processamento de cálculo, modelos matemáticos tornam-se ferramentas indispensáveis em estudos dos efeitos do vento na uniformidade de aplicação de água de aspersores, eliminando limitações impostas pelas condições naturais de campo e possibilitando as comparações de diferentes condições operacionais sob mesmas condições de vento, antes mesmo da implantação do sistema no campo.

A necessidade de reduzir o capital investido em sistemas convencionais tem levado os usuários a optarem por longas jornadas de irrigação, de 21 horas por dia. Como consequência, alguns setores do sistema de irrigação operam em horários nos quais as intensidades de vento são mais elevadas (tipicamente entre 9 e 16 horas). Assim, o uso da aspersão sem considerar os efeitos do vento negligencia possíveis reduções na uniformidade que, com certeza, comprometem a viabilidade técnica e econômica das culturas irrigadas. Além disso, sistemas portáteis requerem manuseio durante as horas claras do dia, convencionalmente mais expostas ao vento.

Tendo em vista que o efeito da ocorrência de vento em sistemas convencionais de irrigação propicia uma aplicação desuniforme da água, e que os avanços tecnológicos da informática permitem desenvolver procedimentos de cálculos mais eficientes para a simulação dos efeitos do vento na uniformidade de distribuição de água de aspersores, este trabalho foi realizado com os seguintes objetivos:

- i) aplicar o modelo semiempírico de Richards e Weatherhead (1993), que envolve um número reduzido de parâmetros de ajuste, para simular a distorção causada pelo vento no padrão espacial de aplicação de água dos aspersores de tamanho médio Agropolo/NY e Naan/5024;
- ii) avaliar a capacidade do modelo de Richards e Weatherhead (1993) em prever a uniformidade de aplicação de água dos aspersores de tamanho médio Agropolo/NY e Naan/5024, operando em diferentes condições de vento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Irrigação por aspersão convencional

O método de irrigação por aspersão é uma técnica que consiste na aplicação de água à cultura na forma de chuva uniforme, de maneira que ela infiltre totalmente no solo. Nesse método de irrigação o jato de água em alta velocidade se dissipa no ar em forma de gotas, distribuindo-se sobre toda a parcela irrigada (HOLZAPFEL et al., 2007).

Existem diferentes tipos de sistemas de irrigação por aspersão que, de acordo com Pereira (2003), podem ser classificados em convencionais e mecanizados, sendo os sistemas convencionais classificados em portátil (ou móvel), semiportátil e fixo.

Diferentes tipos de aspersores podem ser utilizados em sistemas convencionais de irrigação. De acordo com Andrade e Borges Júnior (2008), eles vão desde simples furos em tubulações laterais até aspersores tipo *spray* (estacionários) e de impacto (rotativos). Os aspersores de impacto são os que giram em torno da posição onde estão montados, aplicando água em área de formato circular, com giro completo (360°) ou parcialmente completo (setorial).

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional se adaptam bem a quase todos tipos de cultura e solo, sendo mais comum a utilização de aspersores que operam com pressão intermediárias (200 a 400 kPa) com um ou dois bocais e irrigando um raio de 10 a 35 m (PEREIRA, 2003). Nestes sistemas, o jato de água pode sofrer influência do vento (HOLZAPFEL et al., 2007; KELLER; BLIESNER, 1990). Em geral, quanto maior a pressão de operação do aspersor, menor o tamanho das gotas e maior o efeito prejudicial do vento no padrão de aplicação de água de aspersores (ANDRADE; BORGES JÚNIOR, 2008).

## 2.2 Distribuição de água de aspersores

A caracterização da distribuição de água do aspersor operando isoladamente deve ser realizada de acordo com procedimentos previstos em normas técnicas, como indicado na norma NBR 04:015.08-013-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1999) equivalente à norma ISO 7749 – 2 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 1990).

Estas normas preconizam que a caracterização de curva de distribuição de água do aspersor pode ser realizada por meio de dois métodos:

- i) método completo de campo (ou método da malha), em que o aspersor é instalado na posição central de uma malha de coletores regularmente espaçados;
- ii) método radial (aplicado somente em condições nulas de vento), pelo qual os coletores são instalados ao longo de uma linha reta, definida a partir do centro do aspersor a ser ensaiado.

Além disso, conforme preconizado nas normas técnicas, no método completo de campo, deve-se usar uma estação meteorológica para medir a velocidade e a direção do vento, a temperatura e a umidade relativa do ar, a uma altura mínima de 2 m da superfície do solo e distância inferior a 50 m da área de ensaio. A pressão de serviço deve ser monitorada sempre na altura do bocal principal do aspersor. O tempo de duração de cada ensaio deve ser de uma hora.

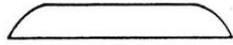
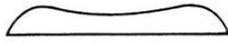
O conhecimento das características técnicas de distribuição de água dos aspersores é essencial para se estabelecer, com o auxílio de aplicativos computacionais, os critérios de dimensionamento e as adequadas condições operacionais em que os sistemas de irrigação devem operar (PRADO; COLOMBO, 2010a). De acordo com Carrión, Tarjuelo e Montero (2001), a modelagem de distribuição de água é fundamental no auxílio na tomada de decisões em projetos de irrigação, na avaliação de sistemas de irrigação e no

desenvolvimento de novos aspersores, constituindo-se em uma ferramenta cada vez mais utilizada devido à agilidade e precisão nos resultados obtidos.

De acordo com Keller e Bliesner (1990), cada tipo de aspersor gera uma curva de distribuição de água característica que varia com o tamanho do bocal, a pressão de operação e o ângulo de saída do jato de água, resultando em uma taxa ótima de pressão para cada diâmetro de bocal, sendo esta utilizada em diversos estudos de simulação de uniformidade de distribuição de água de aspersores (TARJUELO; GOMÉZ; PRADO, 1992).

Na Tabela 1 são mostrados os cinco perfis clássicos de aplicação de água identificados por Christiansen (1942). De acordo com Keller e Bliesner (1990), os perfis do tipo A e B são característicos de aspersores que tenham dois ou mais bocais, perfis C e D são característicos de aspersores que trabalham com um único bocal e o perfil tipo E é obtido quando se trabalha com pressões inferiores àquelas recomendadas para o tamanho do bocal.

Tabela 1 Formas geométricas dos perfis de distribuição de água de Christiansen

Perfil	Forma	Recomendações de espaçamento (% do diâmetro molhado)		
		Quadrado	Triângulo Equilátero	Retângulo
A		50	50	40 x 60 a 65
B		55	66	40 x 60
C		60	65	40 x 60 a 65
D		40	70 a 75	40 x 70 a 75
E		40	80	40 x 80

Fonte: Adaptada de Keller e Bliesner (1990)

Pereira (2003) e Tarjuelo, Gómez e Prado (1992) descrevem três tipos de perfis: (i) o triangular, obtido com aspersores médios de dois bocais; (ii) o elíptico, que é normalmente obtido com aspersores de um único bocal e (iii) o “donut”, obtido com os aspersores operando com pressões reduzidas.

Solomon e Bezdek (1980) desenvolveram um procedimento de cálculo para a estimativa da curva de distribuição de água de aspersores operando na ausência de vento e em condições de pressão intermediárias àquelas observadas nos ensaios de campo. Neste procedimento, as curvas de distribuição de água determinadas nos ensaios de campo são adimensionalizadas, ou seja, expressam-se as distâncias radiais a partir do aspersor em termos da fração do raio de alcance do aspersor e os valores de intensidade de precipitação em termos da fração da intensidade média de aplicação de água.

Por esta metodologia é possível sintetizar as informações obtidas no perfil radial de distribuição de água, registrando-se apenas os vinte valores de intensidade de precipitação adimensional correspondentes às vinte frações do raio de alcance. De acordo com Solomon e Bezdek (1980), para os casos em que os valores de fração do raio de alcance não coincidam com os valores medidos, deve-se fazer uma interpolação linear entre os valores correspondentes à fração da intensidade de aplicação para cada valor de intensidade medido.

## **2.3 Modelagem da uniformidade de distribuição de água de aspersores**

### **2.3.1 Modelagem da uniformidade distribuição de água sem vento**

Para sistemas convencionais de irrigação por aspersão, a uniformidade alcançada por uma dada disposição de aspersores é computada com base na

sobreposição da distribuição de água, a qual pode ser obtida com auxílio de diversos aplicativos computacionais:

- i) CATCH 3D, desenvolvido na Utah State University (ALLEN, 1992; MERKLEY; ALLEN, 2004);
- ii) SPACE Pro<sup>TM</sup>, desenvolvido no Center for Irrigation Technology (CIT) – California State University (OLIPHANT, 2003);
- iii) SORA (*Solapamiento em riego por aspersion*), da Universidad de Castilla – La Mancha (CARRIÓN; TARJUELO; MOTERO, 2001);
- iv) WinSIPP2, disponibilizado pela empresa Senninger Irrigation's (2010) e
- v) NaanCat 11.0, disponibilizado pela empresa Naandanjain (2010).

É importante salientar que todos esses aplicativos de modelagem da uniformidade de sistemas convencionais de irrigação requerem a caracterização da distribuição espacial de água dos aspersores operando isoladamente, sendo possível simular a uniformidade de distribuição de água para diferentes espaçamentos e disposições desses aspersores.

### **2.3.2 Modelagem da uniformidade de distribuição de água com vento**

O vento é considerado um dos fatores que mais afetam a uniformidade de distribuição de água de aspersores (JUSTI; VILAS-BOAS; SAMPAIO, 2010). Sendo assim, o uso de modelos matemáticos para simular os efeitos danosos do vento pode contribuir para a melhoria da uniformidade de distribuição de água de aspersores, sendo ferramenta de grande utilização (OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009), auxiliando projetistas nas tomadas de decisão, melhorando a performance destes sistemas em condições reais de trabalho (CARRIÓN; TARJUELO; MOTERO, 2001).

A teoria balística tem sido utilizada em diversos trabalhos para simular a distribuição espacial de água de aspersores em condições de vento. O modelo

*Simulacion de riego por aspersión* (SIRIAS), desenvolvido por Carrión, Tarjuelo e Motero (2001), que necessita de ensaios de distribuição de água de aspersores operando com e sem vento na calibração de seus parâmetros, foi avaliado com êxito para aspersores de tamanho médio (MONTERO; TARJUELO; CARRIÓN, 2001; PLAYÁN et al., 2006) e microaspersores (CONCEIÇÃO; COELHO, 2003).

Além de modelos baseados em teorias balísticas para a simulação da distribuição de água de aspersores, diversos autores optam por modelos empíricos de simulação, devido, principalmente, ao menor número de parâmetros de ajustes. Em condições de vento, o modelo de Richards e Weatherhead (1993) tem sido bastante empregado em simulações com canhão hidráulico, tanto operando em sistemas autopropelidos (GRANIER; MOLLE; DEUMIER, 2003; NEWELL, 2003; PRADO; COLOMBO, 2010a, 2010b; SMITH et al., 2008) como em sistemas convencionais (FARIA et al., 2009).

Este modelo tem grande empregabilidade em aspersores tipo canhão hidráulicos, nos quais a maioria das gotas de água lançada pelo aspersor não se forma nas proximidades da saída do bocal, o que dificulta a determinação de valores iniciais de posição e velocidade de gotas e de coeficientes de arraste (OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009; SMITH et al., 2008).

Ainda que os modelos balísticos adaptem-se bem a aspersores que operam com pressões intermediárias, como demonstrando por Montero, Tarjuelo e Carrión (2001) e Playán et al. (2006), o modelo de Richards e Weatherhead (1993) pode ser ferramenta útil em simulações da distribuição de água de aspersores de tamanho médio, usados em sistemas convencionais de irrigação, e ainda em emissores utilizados em sistemas de irrigação do tipo pivô central e linear móvel, como sugerido por Granier, Molle e Deumier (2003).

### 2.3.2.1 Modelo semiempírico de Richards & Weatherhead

No modelo semiempírico desenvolvido por Richards e Weatherhead (1993) a distorção do padrão de distribuição de água de um aspersor ocorre por causa da ação de dois processos distintos: a deriva das gotas e redução do raio de alcance devido à interrupção do fluxo de ar junto ao jato de água. De acordo com os autores, as expressões que definem a deriva ( $Dv$  em m) e a redução do alcance do aspersor ( $Ra$  em m), causados pelo vento, são:

$$Dv = \left[ A + B \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + C \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot V \quad (1)$$

$$Ra = \left[ D \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + E \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 + F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^3 \right] \cdot V \cdot S \quad (2)$$

em que:

A, B, C, D, E e F são constantes empíricas ( $m$  por  $m s^{-1}$ );

$r$  é a distância radial ao aspersor em condição de ausência de vento ( $m$ ), dada pela Equação 3;

$R$  é o raio molhado do aspersor na ausência de vento ( $m$ );

$V$  é a velocidade do vento ( $m s^{-1}$ );

$S$  é o seno do ângulo entre o vetor velocidade do vento e a direção do jato que depende, no plano vertical, do ângulo ( $e$ ) de saída do jato de água do aspersor e, no plano horizontal, do ângulo ( $\theta$ ) formado entre a direção de lançamento do jato e a linha da direção do vento, dado pela Equação 4.

$$r = \sqrt{(x_{v0})^2 + (y_{v0})^2} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\sin^2 e \cdot \cos^2 \theta + \sin^2 \theta} \quad (4)$$

em que  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$  são as coordenadas do ponto de impacto da água no solo nas condições nulas de vento.

A primeira medida para a aplicação do modelo é a determinação da curva de distribuição radial de água do aspersor, em condições nulas de vento. O cálculo da distorção do padrão molhado causada pelo vento é realizado no sistema de eixos esquematizado na Figura 1, que tem o vento sempre no sentido contrário ao eixo  $x_v$ , e o eixo  $y_v$  sempre direcionado perpendicularmente à direção do vento, sendo que o ponto de instalação do aspersor determina a origem dos eixos ( $x_v = 0, y_v = 0$ ).

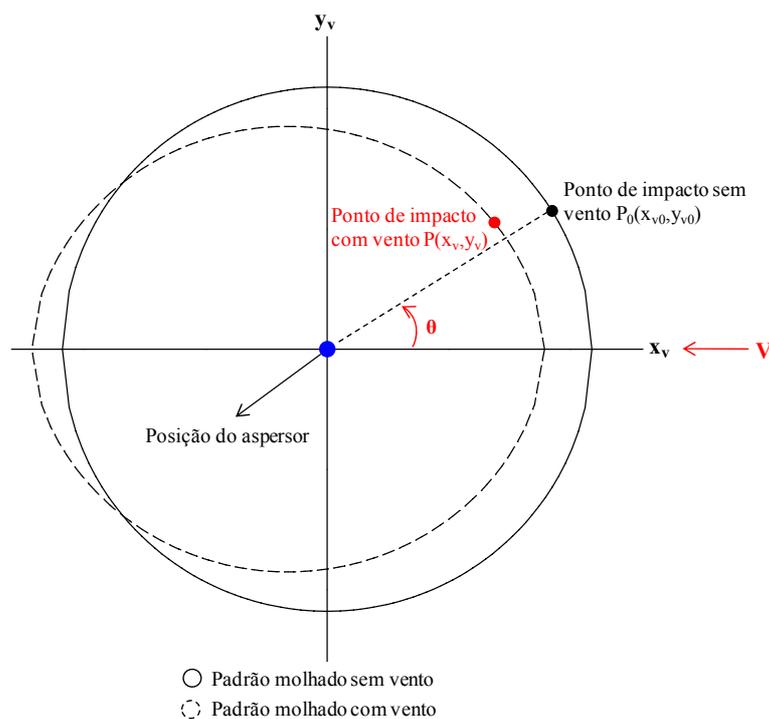


Figura 1 Esquema do deslocamento do ponto de impacto da água aplicada pelo aspersor devido à influência do vento

De acordo com o esquema mostrado na Figura 1, a água que, na ausência de vento, teria um ponto de impacto no solo  $P_0$ , com coordenadas  $(x_{v0}, y_{v0})$ , passa a ter, em função da ação do vento, um ponto de impacto no solo  $P$ , com coordenadas  $(x_v, y_v)$ . Levando em consideração que, no modelo de Richards e Weatherhead (1993), na coordenada  $x_v$  o vento afeta ambos os processos ( $Dv$  e  $Ra$ ) e que, na coordenada  $y_v$ , somente a redução do alcance ( $Ra$ ) é afetado pelo vento, as alterações nos valores das coordenadas do ponto de impacto da água devido à ação do vento ( $x_v$  e  $y_v$ ) podem ser obtidas pelas Equações 5 e 6:

$$x_v = x_{v0} - Dv - Ra \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

$$y_v = y_{v0} - Ra \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

Finalmente, a relação entre o valor da taxa de aplicação de água  $I_0$  (em  $\text{mm h}^{-1}$ ) no ponto de impacto sem vento  $(x_{v0}, y_{v0})$  e o valor da taxa de aplicação de água  $I_v$  (em  $\text{mm h}^{-1}$ ), no ponto de impacto com vento  $(x_v, y_v)$ , é dada pela Equação 7:

$$I_v = \frac{I_0}{\left( \frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}} \cdot \frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}} \right)} \quad (7)$$

em que  $\frac{\partial x_v}{\partial x_{v0}}$  e  $\frac{\partial y_v}{\partial y_{v0}}$  são obtidos diferenciando-se as Equações 5 e 6.

## 2.4 Técnicas de otimização de parâmetros

Beskow (2009) relata que vários métodos de calibração têm sido desenvolvidos em todo o mundo. Estes métodos são normalmente desenvolvidos para a otimização de parâmetros, de maneira que as previsões sejam aceitáveis por alguma medida estatística.

Para o ajuste dos seis parâmetros empíricos do modelo de Prado (2008) e Richards e Weatherhead (1993) utilizaram a combinação de dois métodos: o método das estimativas descendentes, para obter a estimativa inicial dos seis parâmetros ajustados e o método de Newton para sistemas de equações não lineares, para obter o valor final dos seis parâmetros ajustados.

De acordo com Prado (2008), o método das estimativas descendentes é classificado como de primeira ordem, em que é avaliada apenas a derivada da primeira função. Dessa forma, o método apresenta uma convergência linear para uma solução, sendo que, em geral, sempre haverá uma convergência de valores, mesmo quando as aproximações iniciais forem pobres. A partir da aproximação inicial dos parâmetros de ajuste, é possível aplicar o método de Newton (método de segunda ordem, que apresenta convergência quadrática para soluções de problemas) com maior garantia de que haverá convergência para um valor mínimo da função objetivo, obtendo-se uma melhor aproximação dos parâmetros a serem ajustados.

A eficácia da combinação desses dois métodos para a calibração dos seis parâmetros de distorção de vento necessários ao modelo de Richards e Weatherhead (1993) foi comprovada no aplicativo SimulaSoft 4.0, desenvolvido por Prado (2008).

Em estudos de simulações hidrológicas, Beskow (2009) utilizou um método denominado *Shuffled complex evolution* (SCE-UA), desenvolvido na Universidade do Arizona (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992). De acordo

com os autores, este método é uma técnica de otimização global que combina os esforços de quatro conceitos necessários para um método de otimização: i) os conceitos de combinações de abordagens aleatórias e determinísticas; ii) o conceito de agrupamento; iii) o conceito de uma evolução sistemática de um conjunto de dados no espaço amostral em conformidade com melhoria global e iv) o conceito de evolução competitiva para otimização.

De acordo com Duan, Sorooshian e Gupta (1992), na implementação do método de otimização SCE-UA, primeiramente, uma amostra inicial é gerada aleatoriamente dentro do espaço amostral de cada um dos parâmetros a serem ajustados, tendo cada parâmetro um valor de limite superior e um valor de limite inferior, sendo então todos os pontos classificados de acordo com a função objetivo utilizada. Posteriormente, os pontos são agrupados em diferentes complexos, que são avaliados separadamente, segundo o algoritmo *Complex evolution competitiva* (CCE), de Nelder e Mead (1965). Os complexos são então misturados e outros subcomplexos são criados com base nas informações fornecidas pelos complexos anteriores. O último passo é verificar os critérios de convergência, de modo que os processos de evolução e substituição sejam repetidos, até que os critérios de convergência sejam satisfeitos.

As etapas executadas no método SCE-UA são ilustradas nos fluxogramas apresentados nas figuras a seguir. Dados detalhados das etapas e equações do método SCE-UA foram obtidos no trabalho original de Duan, Sorooshian e Gupta (1992).

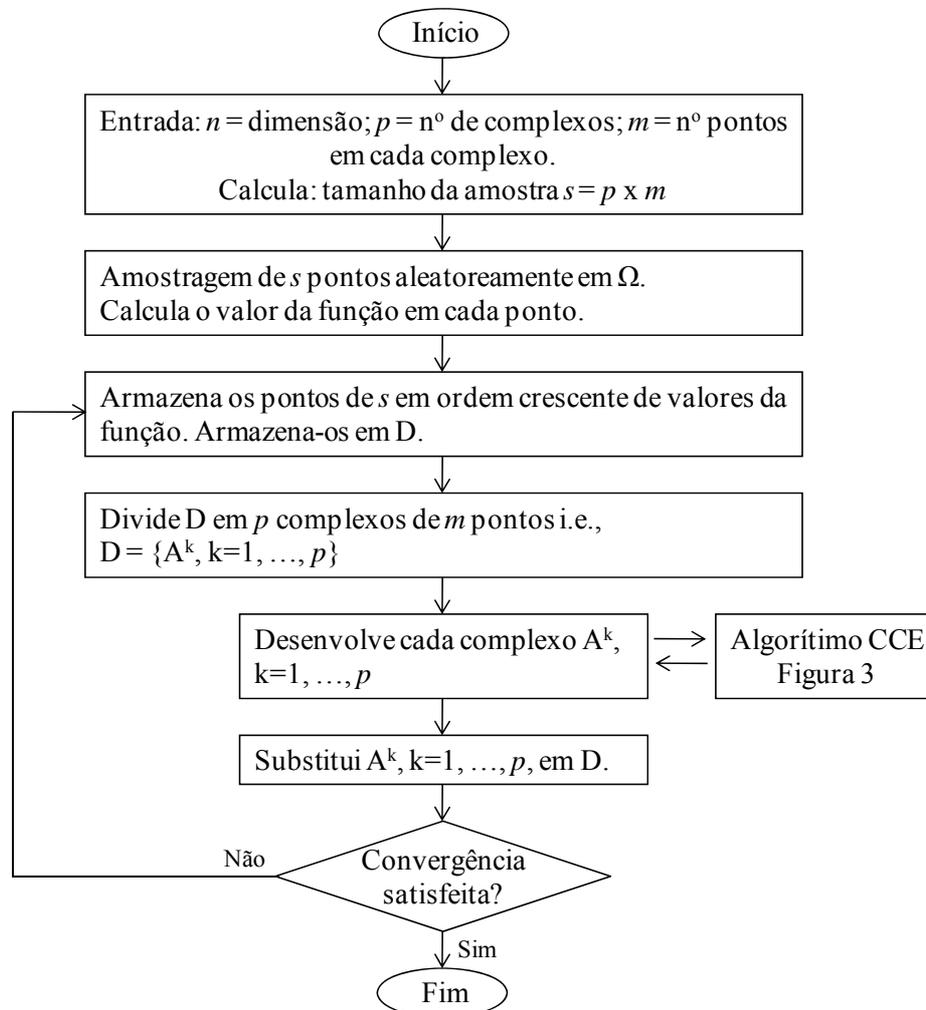


Figura 2 Fluxograma representativo do método SCE-UA  
 Fonte: Adaptado de Beskow (2009) e Duan, Sorooshian e Gupta (1992)

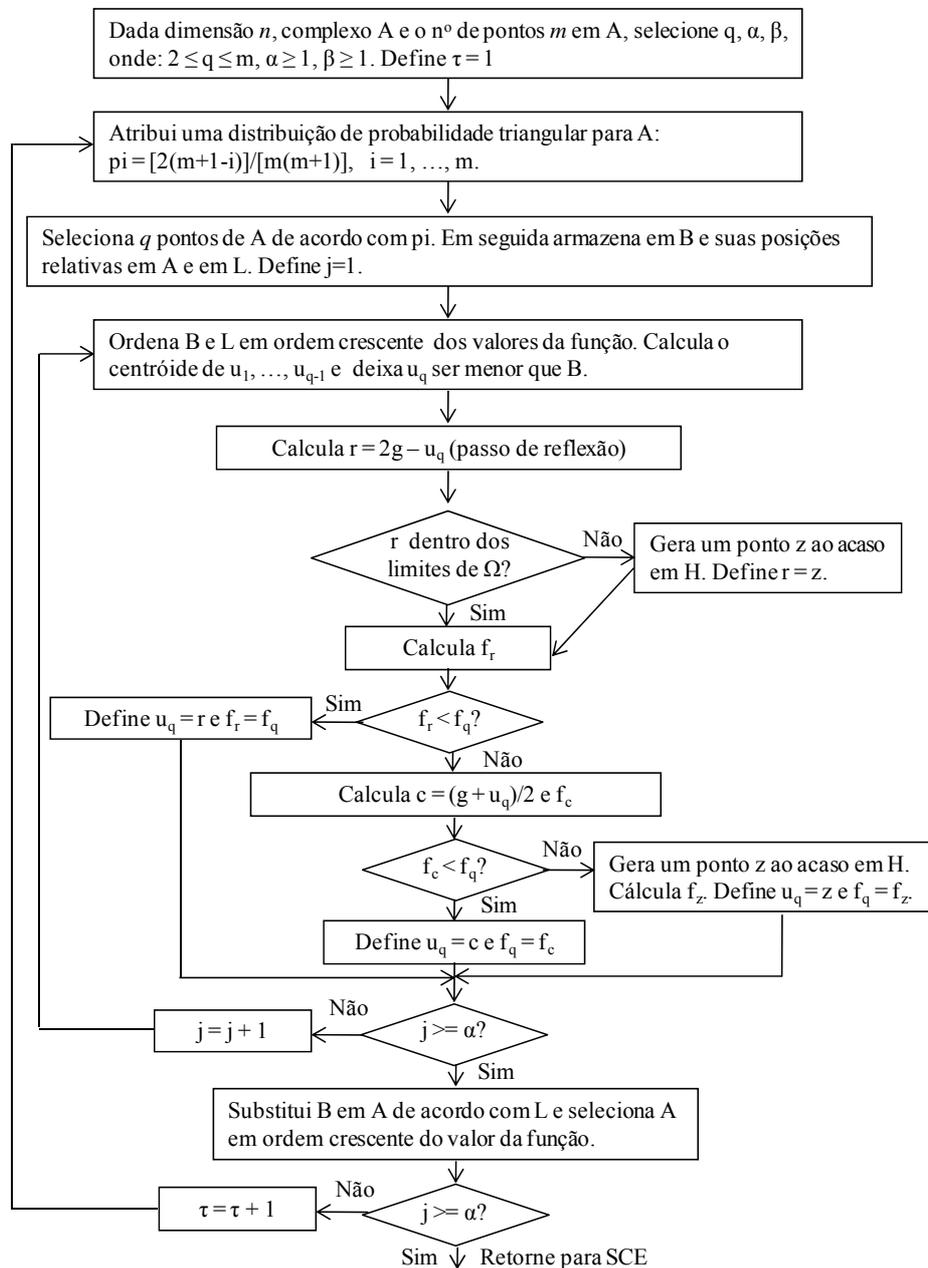


Figura 3 Fluxograma representativo do algoritmo CCE  
 Fonte: Adaptado de Beskow (2009) e Nelder e Mead (1965)

## **2.5 Uniformidade de distribuição de água de aspersores**

### **2.5.1 Influência do vento na uniformidade de distribuição de água**

Mateos (1998) classifica os diversos fatores que afetam a uniformidade da aplicação de água em:

- (i) características do aspersor: modelo, número e tamanho de bocais, pressão de serviço e ângulo de saída do jato de água do aspersor;
- (ii) distribuição do sistema: altura de instalação dos aspersores, espaçamento, tipo de arranjo, declividade do terreno e variações de pressão;
- (iii) fatores climáticos: direção e velocidade do vento e evaporação das gotas;
- (iv) fatores do manejo: inclinação das hastas dos aspersores, tempo de operação por posição e tipo de movimentação.

Dentre estes fatores, o efeito do vento tem recebido atenção especial de diversos pesquisadores (BERNUTH; SEGNER, 1990; FARIA et al., 2009; OLIVEIRA; COLOMBO; FARIA, 2009; PRADO; COLOMBO, 2010a, 2010b; SHULL; DYLLA, 1976; SMITH et al., 2008; TARJUELO et al., 1999; VORIES; ASCE; BERNUTH, 1987). De acordo com Tarjuelo et al. (1999), ventos de até  $2 \text{ m s}^{-1}$  não causam maiores prejuízos de uniformidade, porém, acima deste valor, devem-se obter melhor combinação de diâmetros de bocais, pressão de serviço, ângulo de saída do jato de água e disposição de aspersores no campo, de modo a minimizar os efeitos danosos do vento sobre a uniformidade de distribuição de água dos aspersores.

Bernuth e Segner (1990) afirmam que, devido à ação do vento, ocorre uma distorção no padrão de distribuição de água (diminuindo muito na direção contrária ao vento e aumentando pouco na mesma direção do vento), ocorrendo um deslocamento do centro de gravidade da distribuição de água do aspersor, na

mesma direção do vento, de 1 m para cada incremento de  $1 \text{ m s}^{-1}$  na velocidade do vento.

Em ensaios de distribuição de água sob condições de vento, com aspersores de tamanho médio, Tarjuelo et al. (1999) constataram que, na direção do vento, ocorreu um aumento médio no alcance do aspersor de 0,77 m (variando de 0,36 a 1,14 m) em relação ao alcance do aspersor para condição sem vento. Já nas direções de alcance contra o vento e perpendicular ao vento, estes autores observaram que para cada aumento de  $1 \text{ m s}^{-1}$  na velocidade do vento ocorreu uma redução média de 1,99 m (variando de 1,69 e 2,74 m) na direção contra o vento e uma redução média de 1,37 m (variando de 0,94 a 1,90 m) na direção perpendicular ao vento, em relação ao alcance do aspersor para condição sem vento.

A importância do efeito da direção do vento, em relação à posição das linhas laterais de aspersores, sobre a uniformidade de aplicação de água, é bastante controversa na literatura. De acordo com Faria (2008), a direção do vento exerce pouca influência no coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942). Shull e Dylla (1976) consideram que o melhor posicionamento da linha lateral ocorre na direção perpendicular ao vento. Vories e Bernuth (1986) obtiveram melhores uniformidades com as linhas laterais de aspersores dispostas paralelamente ao deslocamento do vento. Tarjuelo et al. (1999) relatam que o melhor posicionamento da linha lateral em relação à direção do vento depende do padrão de distribuição de água do aspersor.

Em muitos casos, devido aos problemas de desuniformidade causados pelo vento, projetistas de sistemas de irrigação optam por diminuir muito o espaçamento entre aspersores, porém, uma elevada redução de espaçamentos entre aspersores pode acarretar em um aumento no custo de implantação do sistema (HOLZAPFEL et al., 2007), sendo necessário, de acordo com Zapata et al. (2007), obter a combinação ótima entre as condições operacionais e

climáticas que vão proporcionar maiores valores de uniformidade de distribuição de água de aspersores.

### **2.5.2 Quantificação da uniformidade de distribuição de água**

A melhor maneira para determinar se o sistema de irrigação é aceitável ou não é a determinação da sua uniformidade de distribuição de água (BRENNAN, 2008). De acordo com Rocha et al. (1999), a avaliação de sistemas de irrigação após a sua implantação no campo é de grande importância para verificar se o desempenho do sistema está em conformidade com o que foi pré-estabelecido em projeto e, quando necessário, realizar ajustes para melhorar a performance do sistema no campo.

De acordo com Mateos (1998), a distribuição de água aplicada por sistemas de aspersão é um processo que passa por duas etapas: a aplicação de água na superfície do solo ou da cultura e a redistribuição da água aplicada no interior do solo. Apesar dos efeitos positivos da redistribuição da água no solo que, em alguns casos, pode anular os efeitos da desuniformidade de aplicação (LI; RAO, 2003), deve-se considerar, conforme enfatizado por Frizzone et al. (2007), que a produtividade das culturas irrigadas depende da uniformidade de distribuição de água.

Na literatura encontram-se diferentes coeficientes, Christiansen (1942), Criddle et al. (1956), Hart (1961) e Wilcox e Swailes (1947), utilizados para expressar a variabilidade de distribuição de água aplicada por sistemas de irrigação. Dentre todos os índices que quantificam a uniformidade de sistemas de irrigação, o proposto por Christiansen (1942) (Equação 8) é o mais utilizado, sendo referido em normas técnicas, como ISO 7749-2 (ISO, 1990) e NBR 04:015.08-013-2 (ABNT, 1999).

$$CUC = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |X_i - \bar{X}|}{n \cdot \bar{X}} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

em que:

CUC é o coeficiente de uniformidade de Christiansen (%);

$X_i$  é a precipitação obtida do pluviômetro de ordem  $i$  (mm);

$\bar{X}$  é a média geral das precipitações (mm);

$n$  é o número de observações.

A uniformidade de distribuição (*distribution uniformity*, DU), proposta por Criddle et al. (1956), é um pouco mais restritivo que o CUC e também é um índice bastante utilizado para quantificar a uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação, sendo computada por:

$$DU = \frac{\text{média do menor quartil das lâminas de água coletada}}{\text{média geral das lâminas de água coletada}} \cdot 100 \quad (9)$$

Os valores mínimos aceitáveis de uniformidade de distribuição de água podem variar, sendo recomendando por Keller e Bliesner (1990), como valores mínimos de CUC na faixa de 75% a 83% e de DU entre 60% e 74%, para culturas de campo que apresentam sistema radicular profundo; e de, no mínimo, 85% (CUC) e 75% (DU), para culturas de sistema radicular menos profundo, como batata e hortaliças em geral. No entanto, cabe ressaltar que, de acordo com o demonstrado por Holzapfel et al. (2007), valores ótimos de uniformidade dependem da análise criteriosa dos custos referentes ao sistema de irrigação, da água e da energia, podendo, ainda, serem considerados, de acordo com Ortega, Juan e Tarjuelo (2004), os custos relativos ao impacto ambiental da irrigação.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Distribuição de água dos aspersores

Foram utilizados dados obtidos em 57 ensaios (25 ensaios com  $V \leq 0,9$  m s<sup>-1</sup> e 32 ensaios com  $V > 0,9$  m s<sup>-1</sup>) de distribuição de água dos aspersores modelos Agropolo/NY (bocal 3,5 mm) e Naan/5024 (bocal 3,0 mm), com ângulo de inclinação do jato de água de 12°, pressões de serviço variando entre 196 e 343 kPa, em diferentes velocidades e direções de vento, conforme Tabela 1A do ANEXO A (BESKOW, 2006).

Os ensaios de distribuição de água dos aspersores, em condições de vento e na ausência de vento, foram realizados em área gramada próximo ao Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, MG, de acordo o método da malha descrito na norma NBR 04:015.08-013-2 (ABNT, 1999).

Nestes ensaios, o aspersor foi posicionado no centro de uma malha de coletores representada por uma matriz de 12 x 12, totalizando 144 coletores, contendo os valores de intensidade de precipitação (mm h<sup>-1</sup>) obtidos em coletores do tipo lata de óleo (de cozinha), com diâmetro interno de 83,5 mm e altura de 190 mm, situados a 500 mm da superfície do solo, regularmente espaçados de 2 m.

No registro das variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento), dispôs-se de uma estação meteorológica modelo Vantage Pro2, localizada a 2 m de altura da superfície do solo, na qual registravam-se os referidos dados, em intervalos regulares de 5 minutos.

O sistema de eixos orientados adotado nos ensaios de campo (X,Y), para identificação das coordenadas dos coletores da matriz A, utilizada no armazenamento dos dados de intensidade de precipitação observados em cada

ensaio, e a notação do registro do ângulo  $\Phi$ , da linha de ação do vento em relação ao eixo X, estão esquematizados na Figura 4. Neste sistema de eixos orientados, a posição do aspersor corresponde ao centro da matriz, nas coordenadas  $X = 0$  e  $Y = 0$ , e a posição do coletor cuja intensidade de precipitação foi armazenada no elemento (1,1) da matriz A, corresponde às coordenadas  $x = 11$  m e  $y = -11$  m.

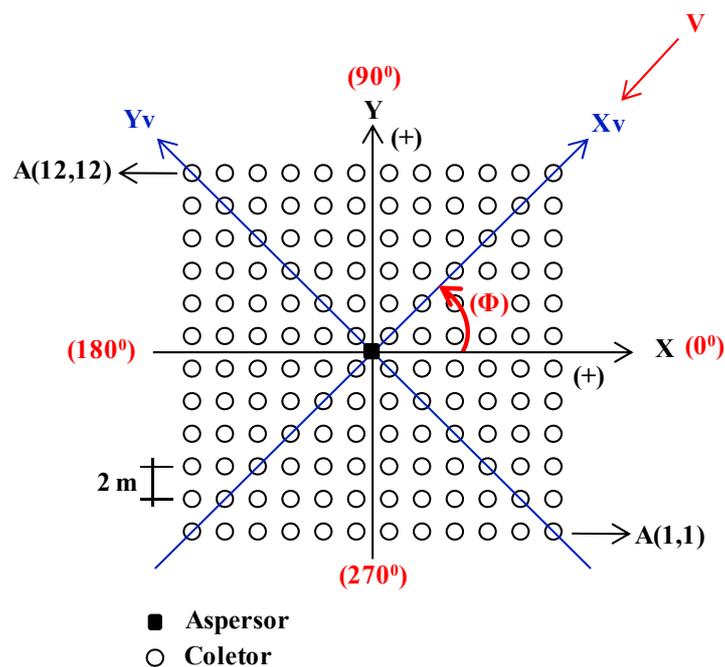


Figura 4 Esquema da malha de coletores ao redor do aspersor e inversão do eixo orientado no teste de campo (X,Y) para o eixo orientado segundo a direção do vento ( $X_v, Y_v$ )

Além dos 57 ensaios de distribuição de água com o aspersor operando isoladamente, foram utilizados também 24 ensaios com linhas laterais de aspersores Agropolo/NY e Naan/5024, apresentados na Tabela 2A do ANEXO A (BESKOW, 2006). Nestes ensaios, os aspersores foram dispostos em duas linhas laterais no espaçamento de 12 x 12 m, contendo dois aspersores em cada

linha lateral. Os 36 coletores foram dispostos de maneira a formarem quadrados de 2 m de lado.

Os ensaios tiveram duração de 50 minutos, com duração média de 10 minutos para a realização das leituras dos volumes de água nos coletores. Para controlar a pressão de serviço no sistema durante a realização dos testes de irrigação foram utilizadas duas tomadas de pressão, sendo uma localizada entre o registro de gaveta e o primeiro aspersor e a outra localizada no tubo de subida do último aspersor. A obtenção dos dados meteorológicos foi realizada da mesma maneira dos ensaios com um único aspersor.

### **3.2 Composição dos perfis radiais adimensionais**

A composição dos perfis radiais foi realizada a partir dos 25 ensaios (14 ensaios do aspersor Agropolo/NY e 11 ensaios do aspersor Naan/5024) de distribuição de água com os aspersores operando isoladamente (método da malha), em condições de vento até  $0,9 \text{ m s}^{-1}$ , conforme recomendado na norma NBR 04:015.08-013-2 (ABNT, 1999).

Com o auxílio de uma rotina criada em Visual Basic para Aplicativos (VBA) da planilha Excel, determinou-se a distância radial de cada coletor de água até o aspersor, sendo a intensidade de água coletada em coletores com distâncias similares somadas e divididas pelo número de distâncias similares, levando-se em conta a área do coletor e o tempo de ensaio, obtendo-se o perfil radial para cada um dos 25 ensaios de distribuição de água de aspersores.

Seguindo recomendações de Solomon e Bezdek (1980), os 25 perfis radiais, obtidos a partir dos 25 ensaios pelo método da malha, foram adimensionalizados (Equações 10 e 11), expressando-se as distâncias radiais ( $r_j$  em m) ao aspersor em termos da fração ( $ra_j$ ) do raio de alcance do aspersor ( $R$  em m) e os valores de intensidade de precipitação ( $i_j$  em  $\text{m h}^{-1}$ ) em termos da

fração ( $ia_j$ ) da intensidade média de aplicação de água ( $im$  em  $m\ h^{-1}$ ), na condição de trabalho em que se deseja estimar a curva de aplicação de água.

$$ra_j = \frac{r_j}{R} \quad (10)$$

$$ia_j = \frac{i_j \cdot \pi \cdot R^2}{Q} = \frac{i_j}{im} \quad (11)$$

em que:

Q é a vazão do aspersor ( $m^3\ h^{-1}$ );

j é o índice de identificação de cada ponto de amostragem (coletor) em relação ao aspersor.

Os 25 perfis adimensionais foram sintetizados, ou seja, estimou-se um único perfil radial para cada uma das 6 condições operacionais (bocal vs. pressão de serviço) dos aspersores Agropolo/NY e Naan/5024, sendo este processo obtido a partir da média dos perfis radiais adimensionais de mesmas condições operacionais.

Para que os seis perfis radiais adimensionais tivessem valores de precipitação adimensional correspondentes às mesmas 20 distâncias em relação ao aspersor (desde 2,5% até 97,5% do raio de alcance, em intervalos regulares de 5%), interpolaram-se linearmente, a partir dos valores originalmente observados em cada perfil radial adimensional, os 20 valores de intensidade de precipitação correspondentes às 20 distâncias em relação ao aspersor, conforme recomendado por Solomon e Bezdek (1980).

Ao final do processo de interpolação, os valores de precipitação foram corrigidos proporcionalmente, satisfazendo à condição imposta na Equação 12 (PRADO; COLOMBO, 2005), de maneira que a vazão (Q em  $m^3\ h^{-1}$ ) estimada com base no perfil radial de aplicação de água seja igual à vazão do aspersor.

$$\frac{0,05}{20} \cdot \sum_{j=1}^{j=20} [(2j-1) \cdot ia_j] = 1 \quad (12)$$

### 3.3 Determinações experimentais das dimensões da área molhada distorcida pelo vento

Na determinação das dimensões da área molhada distorcida pelo vento, as 32 matrizes contendo os valores de distribuição espacial de água observada nos ensaios sob condições de vento maiores que  $0,9 \text{ m s}^{-1}$  foram utilizadas para confeccionar 32 mapas de superfícies de dimensões iguais a  $16,5 \text{ cm} \times 16,5 \text{ cm}$ , que representavam, em escala apropriada ( $1 \text{ cm} = 1,33 \text{ m}$ ), a distribuição espacial das linhas de mesma intensidade de precipitação (desde  $0,25 \text{ mm h}^{-1}$  até  $9,25 \text{ mm h}^{-1}$  em intervalos de  $1 \text{ mm h}^{-1}$ ) ao redor do aspersor.

Na determinação das dimensões da área molhada distorcida pelo vento foi utilizado um sistema de eixos ( $X_v, Y_v$ ) orientados pelo sentido predominante do vento durante os ensaios. A direção predominante do vento foi definida no sentido da reta que liga a posição do aspersor ( $X = 0, Y = 0$ ) ao centro de gravidade ( $X = X_G, Y = Y_G$ ) da distribuição espacial de água (Figura 5).

Na determinação das coordenadas ( $X_G, Y_G$ ) do centro de gravidade (CG) da distribuição espacial de água, observada em cada ensaio, utilizaram-se as coordenadas dos 144 coletores, juntamente com os valores das intensidades de precipitação ( $I_{i,j}$ ) em cada coletor, conforme as Equações 13 e 14.

$$X_G = \frac{\sum_{i=1}^{i=12} \sum_{j=1}^{j=12} X_{i,j} \cdot I_{i,j}}{\sum_{i=1}^{i=12} \sum_{j=1}^{j=12} I_{i,j}} \quad (13)$$

$$YG = \frac{\sum_{i=1}^{i=12} \sum_{j=1}^{j=12} Y_{i,j} \cdot I_{i,j}}{\sum_{i=1}^{i=12} \sum_{j=1}^{j=12} I_{i,j}} \quad (14)$$

em que:

$X_{i,j}$  - coordenada X do coletor  $A(i,j)$ ;

$Y_{i,j}$  - coordenada Y do coletor  $A(i,j)$ .

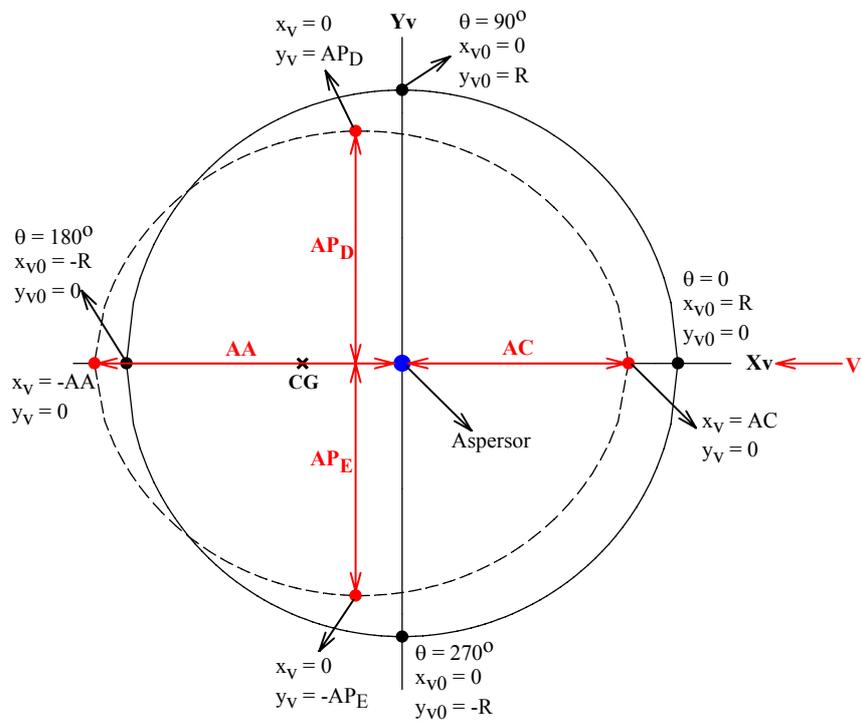


Figura 5 Esquema das distâncias do aspersor até a extremidade da área molhada, tomadas em quatro direções de alcance (AC, AA, AP<sub>D</sub>, AP<sub>E</sub>) em relação à direção predominante do vento

Conforme ilustrado na Figura 5, a linha da direção predominante do vento foi utilizada como referência para a determinação das medidas entre as distâncias do aspersor até a extremidade da área molhada pelo mesmo (definida pela posição da isoieta correspondente a uma intensidade de precipitação de  $0,25 \text{ mm h}^{-1}$ ).

Nestas medições foram consideradas quatro situações distintas: alcance na direção contra o vento (AC), a favor ao vento (AA), perpendicular à direita ( $AP_D$ ) e perpendicular à esquerda ( $AP_E$ ) ao vento. Posteriormente, os valores medidos em cada ensaio da média dos alcances perpendiculares ( $AP=(AP_D+AP_E)/2$ ) e as distâncias de alcance contra (AC) e a favor (AA) à direção predominante do vento foram expressos em termos de porcentagem do alcance sem vento ( $100AC/R$ ,  $100AA/R$  e  $100AP/R$ ).

### 3.4 Ajuste dos parâmetros empíricos

Os seis parâmetros empíricos do modelo de Richards e Weatherhead (1993) foram ajustados por meio de um processo que envolveu duas etapas:

- i) estabeleceram-se estimativas dos valores da soma dos parâmetros relacionados aos efeitos da redução alcance causados pelo vento ( $D+E+F$ ) e da soma dos valores dos parâmetros relacionados aos efeitos da deriva ( $A+B+C$ ), conforme descrito no item 3.4.1;
- ii) os valores conhecidos das somas ( $A+B+C$  e  $D+E+F$ ) foram utilizados para restringir os valores dos seis parâmetros ajustados pelo método denominado *Shuffled complex evolution* (SCE-UA), por meio de uma rotina computacional desenvolvida em Delphi 7 (ambiente Windows), cujo função objetivo foi minimizar a soma dos quadrados dos desvios, conforme descrito no item 3.4.2.

### 3.4.1 Ajuste por meio das dimensões da área molhada distorcida pelo vento

Conforme descrito no item 3.3, foram realizadas medições até a extremidade da área molhada tomadas nas direções de alcance: i) a favor do vento (AA); ii) contra o vento (AC); iii) perpendicular à direita (AP<sub>D</sub>) e iv) perpendicular à esquerda (AP<sub>E</sub>), ao vento. De acordo com o observado na Figura 5 e por meio das Equações de 1 a 6, que descrevem o modelo de Richards e Weatherhead (1993), tem-se que:

i) na direção a favor do vento ( $\theta = 180^0$ ), a relação entre o alcance até a extremidade da área molhada (AA) e a velocidade do vento (V) é estabelecida considerando-se os seguintes valores:  $x_v = -AA$ ;  $x_{v0} = -R$ ;  $y_{v0} = 0$ . Consequentemente, com  $r = R$ ,  $(r/R) = 1$ ;  $\cos\theta = x_{v0}/r$  e  $S = 0,208$  (calculado pela Equação 4). A Equação 5, combinada com as Equações 1 e 2, fornece:

$$\begin{aligned} -AA = -R - [A + B \cdot (1) + C \cdot (1)^2] \cdot V \dots \\ - [D \cdot (1) + E \cdot (1)^2 + F \cdot (1)^3] \cdot V \cdot 0,208 \cdot (-1) \end{aligned} \quad (15a)$$

$$AA = R + [(A + B + C) - (D + E + F) \cdot 0,208] \cdot V \quad (15b)$$

ii) na direção contrária ao vento ( $\theta = 0^0$ ), a relação entre o alcance até a extremidade da área molhada (AC) e a velocidade do vento (V) é estabelecida considerando-se os seguintes valores:  $x_v = AC$ ;  $x_{v0} = R$ ;  $y_{v0} = 0$ . Consequentemente, com  $r = R$ ,  $(r/R) = 1$ ;  $\cos\theta = x_{v0}/r$  e  $S = 0,208$  (calculado pela Equação 4). A Equação 5, combinada com as Equações 1 e 2, fornece:

$$AC = R - [A + B \cdot (1) + C \cdot (1)^2] \cdot V \dots \\ - [D \cdot (1) + E \cdot (1)^2 + F \cdot (1)^3] \cdot V \cdot 0,208 \cdot (1) \quad (16a)$$

$$AC = R - [(A + B + C) + (D + E + F) \cdot 0,208] \cdot V \quad (16b)$$

iii) na direção perpendicular à direita ( $\theta = 90^\circ$ ), a relação entre o alcance até a extremidade da área molhada ( $AP_D$ ), em função da velocidade do vento ( $V$ ), é calculada sem se levar em conta o efeito da deriva pelo vento. Dessa forma, são considerados os seguintes valores:  $y_v = AP_D$ ;  $y_{v0} = R$ ;  $x_{v0} = 0$ . Conseqüentemente, com  $r = R$ ,  $(r/R)=1$ ;  $\text{sen}\theta=y_{v0}/r$  e  $S = 1$  (calculado pela Equação 4). A Equação 6, combinada com a Equação 2, fornece:

$$AP_D = R - [D \cdot (1) + E \cdot (1)^2 + F \cdot (1)^3] \cdot V \cdot (1) \cdot (1) \quad (17a)$$

$$AP_D = R - (D + E + F) \cdot V \quad (17b)$$

iv) na direção perpendicular à esquerda ( $\theta = 270^\circ$ ), a relação entre o alcance até a extremidade da área molhada ( $AP_E$ ), em função da velocidade do vento ( $V$ ), é calculada sem se levar em conta o efeito da deriva pelo vento. Dessa forma, são considerados os seguintes valores:  $y_v = -AP_E$ ;  $y_{v0} = -R$ ;  $x_{v0} = 0$ . Conseqüentemente, com  $r = R$ ;  $(r/R) = 1$ ;  $\text{sen}\theta = y_{v0}/r$  e  $S = 1$  (calculado pela Equação 4). A Equação 6, combinada com a Equação 2, fornece:

$$AP_E = -R - [D \cdot (1) + E \cdot (1)^2 + F \cdot (1)^3] \cdot V \cdot (1) \cdot (-1) \quad (18a)$$

$$AP_E = -[-R + (D + E + F) \cdot V] \quad (18b)$$

$$AP_E = R - (D + E + F) \cdot V \quad (18c)$$

Quando os alcances AA, AC e  $AP = (AP_D + AP_E)/2$  são expressos em termos de porcentagem do raio de alcance sem vento (R), as Equações 15b, 16b, 17b e 18c assumem as seguintes formas:

$$100 \cdot \frac{AA}{R} = 100 + 100 \cdot \left[ \frac{(A+B+C)}{R} - 0,208 \cdot \frac{(D+E+F)}{R} \right] \cdot V \quad (19)$$

$$100 \cdot \frac{AC}{R} = 100 - 100 \cdot \left[ \frac{(A+B+C)}{R} + 0,208 \cdot \frac{(D+E+F)}{R} \right] \cdot V \quad (20)$$

$$100 \cdot \frac{AP}{R} = 100 - 100 \cdot \frac{(D+E+F)}{R} \cdot V \quad (21)$$

De acordo com as Equações 19, 20 e 21, os coeficientes angulares da reta ajustada aos pares de valores experimentais permitem estabelecer estimativas dos valores das somas dos coeficientes empíricos ( $100(D/R+E/R+F/R)$  e  $100(A/R+B/R+C/R)$ ).

### 3.4.2 Ajuste por meio da distribuição de água em condições de vento

Um programa computacional foi desenvolvido na linguagem de programação Delphi 7 (ambiente Windows), baseada no modelo de Richards e Weatherhead (1993), para simular a distribuição espacial de água de um aspersor operando em condições de vento. A rotina desenvolvida gera os valores de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ) ao longo de uma malha de pontos (coletores fictícios) uniformemente distribuídos ao redor do aspersor, observando o mesmo arranjo de coletores utilizados nos ensaios de campo (Figura 4).

Para o ajuste dos seis parâmetros empíricos (A, B, C, D, E e F) do modelo, implementou-se uma rotina baseada no método SCE-UA, proposto por Duan, Sorooshian e Gupta (1992). O objetivo foi minimizar, de acordo recomendado por Richards e Weatherhead (1993), simultaneamente a soma do

quadrado dos desvios (SQD) entre valores de intensidade de precipitação estimados em três malhas de ensaio geradas pelo programa desenvolvido e valores de intensidade de precipitação observados em três malhas de ensaios de campo.

As seguintes informações são requeridas como dados de entrada do programa computacional:

i) Dados do aspersor:

- a) marca/modelo;
- b) diâmetro do bocal;
- c) ângulo de saída do jato de água;
- d) pressão de serviço;
- e) raio de alcance na ausência de vento.

ii) Dados de vento:

- a) velocidade média do vento ( $m s^{-1}$ ); e
- b) direção média do vento (graus) em relação às coordenadas x e y (m) da posição dos coletores ao redor do aspersor no sistema de eixos orientados utilizados nos ensaios de campo (Figura 4).

iii) Dados requeridos pelo método SCE-UA:

Sendo “n” o número de parâmetros a serem ajustados ( $n = 6$ ), cujo limite inferior e superior do espaço amostral de cada parâmetro foi -1 e 1, respectivamente. Os valores de “m, q,  $p_{\min}$ ,  $\alpha$  e  $\beta$ ” utilizados foram os recomendados por Duan, Sorooshian e Gupta (1992), obtidos por:

- a)  $p$  = número de complexos ( $p = 2$ );
- b)  $m$  = o número de pontos em um complexo ( $m = 2n + 1$ , então  $m = 13$ );
- c)  $q$  = o número de pontos em um subcomplexo ( $q = n + 1$ , então  $q = 7$ );
- d)  $p_{\min}$  = o número mínimo de complexos ( $1 \leq p_{\min} \leq p$ );
- e)  $\alpha$  = o número consecutivo de valores gerados por cada subcomplexo ( $\alpha = 1$ );

f)  $\beta$  = o número de evoluções de cada complexo ( $\beta = m = 13$ ).

O programa ainda possibilita a opção de restringir os valores das somas das constantes empíricas do modelo que definem os efeitos da deriva do vento ( $A+B+C$ ) e a redução do alcance do jato ( $D+E+F$ ), sendo estes valores obtidos pela análise das dimensões do alcance do jato do aspersor (item 3.4.1). Assim, quando se restringem estes valores, tem-se uma maior facilidade de convergência, para o valor mínimo da função objetivo, dos valores das seis constantes empíricas do modelo.

Além disso, é necessária, para as simulações, a curva de aplicação de água do aspersor operando na ausência de vento, contendo vinte pares de valores de intensidade de precipitação e distância ao aspersor (adimensional), estando estes valores disponibilizados no banco de dados do programa.

Os dados de entrada foram processados de acordo com os seguintes passos:

- i) cálculo, com base no raio de alcance para condição sem vento ( $R$ ), do valor não ponderado ( $A=(A/R)\cdot R...$ ,  $F=(F/R)\cdot R$ ) das constantes empíricas do modelo de Richards e Weatherhead (1993);
- ii) conversão das coordenadas ( $x,y$ ) da posição de cada coletor, tomadas no sistema de eixos dos ensaios de campo, para as coordenadas ( $x_v,y_v$ ) do sistema de eixos orientado contra o sentido do vento definido no modelo de Richards e Weatherhead (1993). Esta conversão é realizada por meio das Equações 22 e 23, que se baseia no ângulo do vento  $\Phi$ , esquematizado na Figura 4.

$$x_v = x \cdot \cos(\Phi) + y \cdot \sin(\Phi) \quad (22)$$

$$y_v = y \cdot \cos(\Phi) - x \cdot \sin(\Phi) \quad (23)$$

iii) cálculo, por meio de um método iterativo, das coordenadas  $(x_{v0}, y_{v0})$  do ponto de impacto sem vento que resultam em um ponto de impacto com vento coincidente com a posição do coletor em questão, que tem coordenadas  $(x_v, y_v)$ . O processo iterativo para determinação das coordenadas  $(x_{v0}, y_{v0})$  tem início com  $x_{v0} = x_v$ , e  $y_{v0} = y_v$ , terminando quando o valor absoluto das correções das estimativas de  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$  for menor que 0,001 m. Para acelerar a convergência do processo iterativo, o método de Newton, descrito por Burden e Faires (2003) (ANEXO B) foi incorporado ao programa computacional e aplicado ao seguinte sistema de equações simultâneas, dadas no modelo Richards e Weatherhead (1993), para descrever as coordenadas do ponto de impacto na ausência de vento  $(x_{v0}, y_{v0})$  e as coordenadas do ponto de impacto na presença de vento  $(x_v, y_v)$ .

$$f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) = \left\{ \begin{array}{l} x_{v0} - [A + B \cdot (r/R) + C \cdot (r/R)^2] \cdot V - \dots \\ [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + F \cdot (r/R)^3] \cdot \dots \\ V \cdot \sqrt{\text{sen}^2 e \cdot \left(\frac{x_{v0}}{r}\right)^2 + \left(\frac{y_{v0}}{r}\right)^2} \cdot \frac{x_{v0}}{r} \end{array} \right\} - x_v \quad (24)$$

$$f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) = \left\{ \begin{array}{l} y_{v0} - [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + \dots \\ F \cdot (r/R)^3] \cdot V \cdot \sqrt{\text{sen}^2 e \cdot \left(\frac{x_{v0}}{r}\right)^2 + \left(\frac{y_{v0}}{r}\right)^2} \cdot \frac{y_{v0}}{r} \end{array} \right\} - y_v \quad (25)$$

- iv) cálculo da taxa da aplicação,  $I_0$ , na ausência de vento, no ponto de coordenada  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$ , que corresponde à distância radial  $r = (x_{v0}^2 + y_{v0}^2)^{1/2}$ , utilizando as informações do perfil radial de aplicação de água;
- v) cálculo da taxa da aplicação  $I_v$ , em  $x_v, y_v$ , por meio da Equação 7;
- vi) repete os passos (ii) até (v) para todos os coletores do sistema de eixos orientados utilizados nos testes de campo.

### 3.5 Avaliação da modelagem da uniformidade de aplicação de água

As uniformidades de aplicação de água em sistemas convencionais de aspersão, operando com aspersores de tamanho médio Agropolo/NY e Naan/5024, nas mesmas condições observadas nos ensaios de campo, foram obtidas pela sobreposição das matrizes contendo os valores de intensidade de precipitação ao redor do aspersor, obtidas por meio do mesmo programa computacional em questão. No processo de sobreposição, foram considerados apenas arranjos quadrados entre aspersores espaçados de 6, 12 e 18 m.

A adequação com que as simulações realizadas com modelo de Richards e Weatherhead (1993) permite prever os valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942) (CUC), em sistemas convencionais de aspersão com aspersores de tamanho médio operando sob condições de vento, foi avaliada das seguintes maneiras:

i) determinação do desvio absoluto (Equação 26) e do valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da reta ajustada aos pares (simulados e observados) de valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942) (CUC), de acordo sugerido por Montero, Tarjuelo e Carrión (2001).

$$DA = |CUC_{obs} - CUC_{sim}| \cdot 100 \quad (26)$$

ii) análise do índice de confiança de desempenho (c) de Camargo e Sentelhas (1997) que, conforme descrito por Conceição e Coelho (2003), é obtido pela multiplicação do coeficiente de correlação (r) pelo índice de Willmott (d), conforme apresentado nas expressões abaixo:

$$c = r \cdot d \quad (27)$$

sendo

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (28)$$

em que

$P_i$  - valor estimado;

$O_i$  - valor observado e

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

O índice de confiança de desempenho ( $c$ ) foi avaliado de acordo com a escala proposta por Camargo e Sentelhas (1997): ótimo ( $c > 0,85$ ), muito bom ( $0,76 \leq c \leq 0,85$ ), bom ( $0,66 \leq c \leq 0,75$ ), mediano ( $0,61 \leq c \leq 0,65$ ), sofrível ( $0,51 \leq c \leq 0,60$ ), mau ( $0,41 \leq c \leq 0,50$ ) e péssimo ( $c \leq 0,40$ ).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Perfis radiais adimensionais de distribuição de água

Na Figura 6 estão apresentadas as formas geométricas dos perfis radiais adimensionais de distribuição de água dos aspersores Naan/5024 e Agropolo/NY, estando os 20 valores correspondentes aos pares de distâncias adimensionais ao aspersor e suas respectivas intensidades de precipitação adimensionais apresentados na Tabela 3A do ANEXO A.

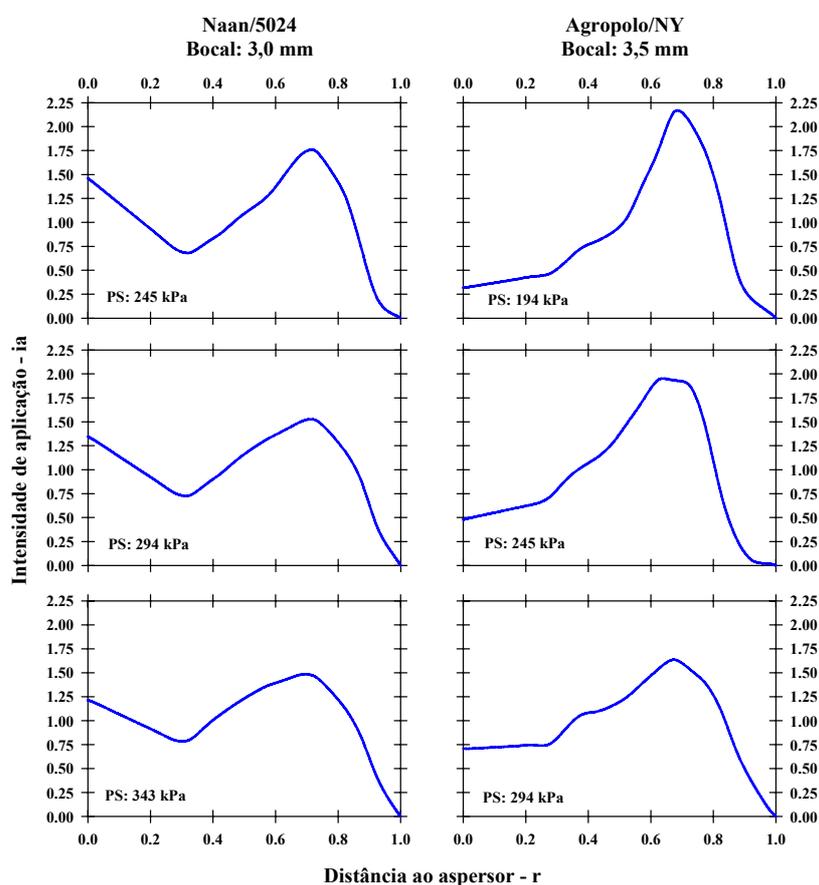


Figura 6 Perfis adimensionais dos aspersores Naan/5024 e Agropolo/NY

Os perfis de distribuição de água apresentados na Figuras 6 têm formato que se distanciam dos perfis uniformes descritos por Christiansen (1942) e, por isso, sofrem maior influência do vento (KINCAID, 1991).

Observa-se também que os perfis adimensionais de distribuição de água de aspersores modelos Naan/5024 e Agropolo/NY têm formato com tendência a um perfil tipo donut (PEREIRA, 2003) que, de acordo com estudos de uniformidade do mesmo autor, apresentam valores de uniformidade menores quando comparados a perfis triangulares.

Além disso, nota-se, na Figura 6, que existe um acúmulo de aplicação de água na extremidade final do perfil adimensional que se dissipa à medida que ocorre um aumento da pressão de serviço nos dois aspersores avaliados, estando este comportamento de acordo com o previsto por Christiansen (1942) e Keller e Bliesner (1990).

## **4.2 Estimativas dos parâmetros do modelo de Richards & Weatherhead**

### **4.2.1 Estimativas pelas dimensões da área molhada distorcida pelo vento**

Os valores normalizados dos coeficientes empíricos (A/R, B/R, C/R, D/R, E/R, F/R) do modelo semiempírico de Richards e Weatherhead (1993) estão demonstrados na Figura 7, na qual se observa que a distribuição dos pontos experimentais demonstra a adequação da hipótese de uma relação linear entre alcance do aspersor e velocidade do vento, também observado por Oliveira, Colombo e Faria (2009) para o canhão hidráulico Plona/RL250.

Nas três curvas (AP, AC e AA) apresentadas na Figura 7 foram considerados 32 valores de distâncias, determinadas com velocidades de vento maiores que  $0,9 \text{ m s}^{-1}$ , dos aspersores Agropolo/NY e Naan/5024 (observados Tabela 4A do ANEXO A) e, também, 6 valores de distâncias determinadas na

ausência de vento. Estes conjuntos de dados cobrem uma variação no valor do alcance sem vento do aspersor Agropolo/NY, que abrange desde 10,60 m (pressão de 194 kPa) até 11,70 m (pressão de 294 kPa), e de 9,63 m (pressão de 245 kPa) até 10,25 m (pressão de 343 kPa) para o aspersor Naan/5024.

De acordo com o observado nas três curvas apresentadas na Figura 7, nas direções perpendiculares (AP) ao vento (Figura 7A) não ocorrem perdas por deriva ( $Dv=A+B(r/R)+C(r/R)^2$ ), ocorrendo apenas a redução no alcance devido à interrupção do fluxo de ar junto ao jato de água ( $Ra=D(r/R)+B(r/R)^2+C(r/R)^3$ ), o que é constatado pela Equação 21 e comprovado na Figura 7A. Porém, nos alcances contrário (AC) e a favor (AA) à direção do vento (Figuras 7B e 7C, respectivamente), ambos os fenômenos ( $Dv$  e  $Ra$ ) ocorrem simultaneamente, como descrito nas Equações 19 e 20, e observado por Richards e Weatherhead (1993).

A variação em função da velocidade do vento, do valor médio ( $AP=(RP_D+RP_E)/2$ ) do alcance entre o aspersor e a extremidade da área molhada, tomados nas direções perpendiculares (AP) ao vento é mostrado na Figura 7A. Apesar do baixo valor obtido na regressão do modelo linear ( $R^2 = 0,42$ ), há uma proximidade entre o valor assumido pelo intercepto da reta (100,7) ajustado e o valor teórico esperado (100), sendo este um indicador da adequação do uso de parâmetros empíricos normalizados. O confronto entre as duas equações, apresentadas no interior da Figura 7A, fornece uma primeira estimativa do valor da soma dos coeficientes empíricos normalizados, utilizados no cálculo da redução do alcance do aspersor ( $D/R+E/R+F/R = 0,030 \text{ s m}^{-1}$ ).

A variação, em função do valor da velocidade do vento e do valor do alcance entre o aspersor e a extremidade da área molhada, tomados na direção contrária ao vento (AC/R), é mostrada na Figura 7B.

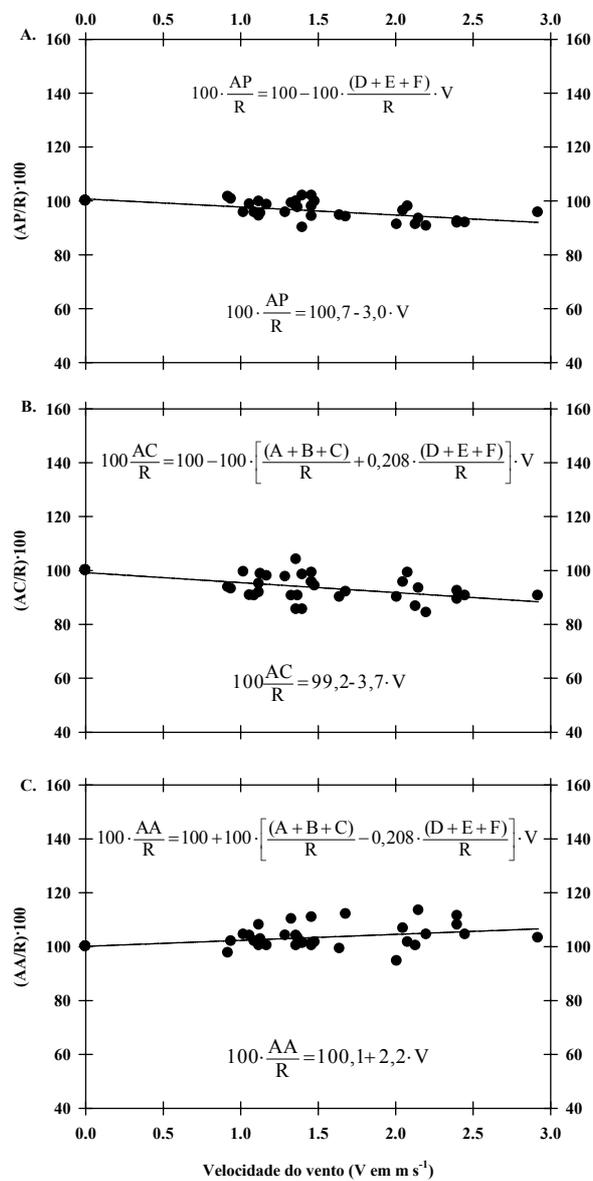


Figura 7 Alcances relativos até a extremidade da área molhada pelo aspersor tomados nas direções em relação ao vento: (A) perpendicular - AP; (B) contrária - AC e (C) a favor - AA, sob diferentes velocidades de vento

A proximidade entre o valor assumido pelo intercepto da reta (99,2) ajustado ao valor teórico esperado (100) (Figura 7B) é um indicador da adequação do uso de parâmetros empíricos normalizados, porém, também não se obteve um bom ajuste dos dados observados no modelo linear ( $R^2 = 0,32$ ). Oliveira, Colombo e Faria (2009) também obtiveram valores muito próximos de intercepto da reta ao valor teórico ajustado, porém, com maiores valores de ajuste obtidos com o modelo linear ( $R^2 = 0,85$  e  $R^2 = 0,74$  para os alcances perpendicular e contra a direção do vento, respectivamente).

Com base no confronto entre as duas equações, mostradas na Figura 7B, e o valor previamente estimado de  $D/R+E/R+F/R$  ( $0,030 \text{ s m}^{-1}$ ), pode-se estabelecer uma primeira estimativa do valor da soma dos coeficientes empíricos normalizados, utilizados no cálculo da deriva ( $A/R+B/R+C/R = 0,031 \text{ s m}^{-1}$ ).

A variação, em função do valor da velocidade do vento, do valor da distância relativa entre o aspersor e a extremidade da área molhada, tomada no mesmo sentido da direção predominante do vento ( $AA/R$ ), é mostrada na Figura 7C. Neste caso, assim como obtido por Oliveira, Colombo e Faria (2009), o coeficiente de determinação da reta de ajuste foi baixo ( $R^2 = 0,16$ ), porém, a proximidade entre o valor assumido pelo intercepto da reta ajustado e o valor teórico esperado (100,1 e 100) foi mantida.

A forma ascendente da reta de ajuste (Figura 7C) indica que, na mesma direção do vento, o efeito de redução do alcance ( $R_a$ ), provocado pela interrupção do fluxo de ar, é pouco menor que o efeito da deriva do vento ( $D_v$ ). Com base no confronto entre as duas equações mostradas no interior da Figura 7C e no valor previamente estimado de  $D/R+E/R+F/R$  ( $0,030 \text{ s m}^{-1}$ ), foi possível estabelecer uma segunda estimativa para o valor da soma dos fatores empíricos utilizados no cálculo da deriva: ( $A/R+B/R+C/R = 0,028 \text{ s m}^{-1}$ ). Dessa forma, pode-se assumir o valor médio entre a primeira e a segunda estimativa para o cálculo da deriva pelo vento ( $A/R+B/R+C/R = 0,0295 \text{ s m}^{-1}$ ).

Além disso, com base na Figura 7, pode-se dizer que: (i) na direção perpendicular ao vento (AP) o alcance do aspersor sofre uma redução de 3,0% em relação ao alcance (R) sem vento do aspersor, para cada incremento de  $1,0 \text{ m s}^{-1}$  na velocidade do vento; (ii) na direção contrária ao vento (AC), o alcance é reduzido em 3,7% para cada  $1,0 \text{ m s}^{-1}$  de incremento na velocidade do vento e (iii) a favor ao vento (AA) o alcance do aspersor aumenta 2,2% em relação ao alcance (R) sem vento do aspersor, para cada  $1,0 \text{ m s}^{-1}$  de incremento na velocidade do vento.

Os valores de distorção do padrão espacial de distribuição de água obtidos para cada incremento de  $1 \text{ m s}^{-1}$  na velocidade de vento são um pouco inferiores aos obtidos por Tarjuelo et al. (1999) para aspersores de tamanho médio (Agros35® e Rain Bird 46H). Porém, cabe ressaltar que as condições de velocidade de vento avaliadas por estes autores (ventos de até  $8,0 \text{ m s}^{-1}$ ) foram superiores às avaliadas neste estudo (ventos de até  $3,0 \text{ m s}^{-1}$ ), fator este que, provavelmente, ocasionou maior distorção do padrão espacial de distribuição de água dos aspersores Agros35® e Rain Bird 46H.

A porcentagem da variação no alcance, devido à velocidade e direção do vento, para os aspersores de tamanho médio Agropolo/NY e Naan/5024, diferenciaram-se dos valores obtidos para canhões hidráulicos, por Oliveira, Colombo e Faria (2009) e Richards e Weatherhead (1993), nos alcances a favor (AA), contra (AC) e perpendicular (AP) à direção do vento, conforme observado na Tabela 2. Ainda assim, o alcance a favor (AA) aumenta em menor proporção, quando comparado com as reduções contra (AC) e perpendicular (AP) à direção do vento, estando este comportamento de acordo com o previsto por Richards e Weatherhead (1993) e comprovado por Oliveira, Colombo e Faria (2009) para canhões hidráulicos e por Tarjuelo et al. (1999), para aspersores de tamanho médio.

Tabela 2 Porcentagem da variação do alcance, devido à velocidade do vento e nas direções AA, AC e AP, para os aspersores de tamanho médio avaliados e para os resultados obtidos na literatura

<b>Autor/ aspersor</b>	<b>AA (% por m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>AC (% por m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>AP (% por m s<sup>-1</sup>)</b>
<b>Agropolo/NY e Naan/5024</b>	2,2	-3,7	-3,0
<b>Oliveira et al. (2009) / Plona – RL250</b>	1,3	-6,3	-7,3
<b>Richards e Weatherhead (1993) / Nelson P150</b>	1,2	-6,4	-6,4

A maior distorção, pela ação do vento, da área molhada por canhões hidráulicos, quando comparados com aspersores de tamanho médio, é contraditório com a literatura. De acordo com Playán et al. (2005), gotas maiores são mais resistentes à deriva pelo vento porque gotas maiores apresentam menor área por unidade de massa e, conseqüentemente, são menos afetadas pelo vento.

Porém, deve-se considerar que o canhão Plona-RL250 operou com maiores velocidades de vento (valores próximos de 5,0 m s<sup>-1</sup>) que os aspersores de tamanho médio (cujas velocidades de vento não excederam 3,0 m s<sup>-1</sup>), conforme observado na coluna esquerda Figura 8, que compara os 38 valores de alcance do jato dos aspersores de tamanho médio Agropolo/NY e Naan/5024 (ângulo de saída do jato de 12<sup>0</sup>) com os 79 valores de alcance do jato do aspersor Plona-RL250 (ângulo de saída do jato de 24<sup>0</sup>) analisados por Oliveira, Colombo e Faria (2009). Comparando-se apenas os valores dos ensaios do canhão Plona-RL250 em condições de vento de até 3,0 m s<sup>-1</sup> (coluna direita da Figura 8), observa-se que os valores de variação do alcance analisados (AA, AC e AP) foram próximos aos obtidos com os aspersores de tamanho médio avaliados neste estudo.

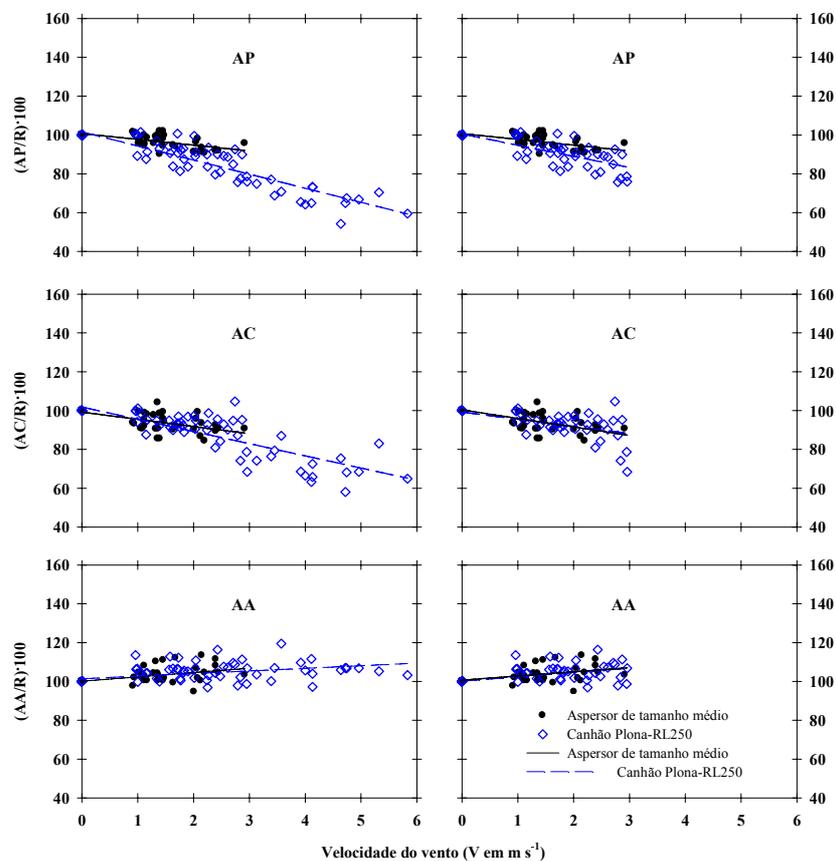


Figura 8 Comparação das variações do alcance a favor (AA), contra (AC) e perpendicular (AP) a direção do vento, entre o canhão hidráulico Plona-RL250 e os aspersores de tamanho médio avaliados

Além disso, deve-se considerar que em canhões hidráulicos existe uma interação significativa entre as gotas e o ar circunvizinho. De acordo com Richards e Weatherhead (1993), na simples teoria de trajetórias de gotas considera-se que o movimento de ar não é afetado pela transferência de momento da água para o ar. Entretanto, para canhões hidráulicos essa trajetória é significativa e o jato de água induzirá o ar circunvizinho a mover-se com ele. Este movimento de ar retarda o jato e reduz o arraste de gotas individuais, obtendo-se maiores reduções no alcance.

Observa-se também (Figura 8) que, na direção perpendicular ao vento (AP), ocorreu maior variação no alcance entre aspersores de tamanho médio e o canhão Plona-RL250 do que nas direções contra (AC) e a favor (AA). De acordo com Richards e Weatherhead (1993), isso ocorre porque a redução na direção perpendicular ao vento (AP) é consequência apenas do rompimento do fluxo de ar induzido ( $Ra = D(r/R) + B(r/R)^2 + C(r/R)^3$ ), que é mais relevante em canhões hidráulicos do que em aspersores de tamanho médio.

Deve-se considerar ainda que a velocidade do vento nos ensaios com o canhão Plona-RL250 foi mensurada a uma altura de 2 m da superfície do solo, porém, a altura do jato de água em canhões hidráulicos geralmente atinge valores superiores a 2 m. A velocidade do vento aumenta em escala logarítmica à medida que a altura também aumenta. Sendo assim, é necessário fazer uma correção nos valores mensurados de velocidade de vento, quando medido a 2 m da superfície do solo, para se obter a velocidade real de vento a uma altura superior a 2 m, como sugerido por Allen et al. (1998), o que provavelmente levaria a valores ainda mais próximos das variações de alcance a favor (AA), contra (AC) e perpendiculares (AP) à direção do vento, entre aspersores de tamanho médio e canhões hidráulicos.

#### **4.2.2 Estimativa pelo método dos mínimos quadrados: rotina computacional**

Nas Figuras 9, 10 e 11 são apresentadas as janelas do programa desenvolvido para ajustar parâmetros A, B, C, D, E e F do modelo de Richards e Weatherhead (1993). Como observado na janela inicial da programa (Figura 9), é necessário, primeiramente, selecionar o aspersor (Agropolo/NY ou Naan/5024) e as condições operacionais a serem utilizadas no ajuste.

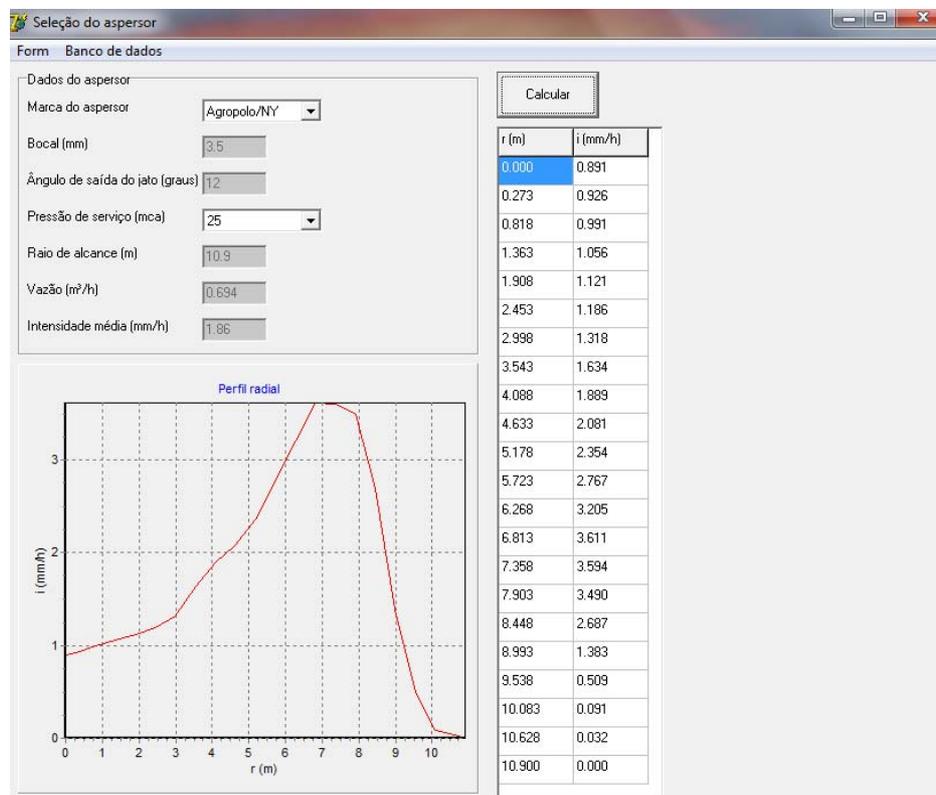


Figura 9 Informações requeridas como dados de entrada da rotina computacional

Ao fazer a seleção do aspersor, o programa apresenta os dados técnicos de vazão, raio de alcance, intensidade de precipitação média e perfil radial de distribuição de água do aspersor selecionado. Em seguida, entra-se com os valores de  $p$ ,  $m$ ,  $q$ ,  $p_{\min}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  (Figura 10), requeridos pelo método SCE-UA, tendo a opção de selecionar estes valores, de acordo com o sugerido por Duan, Sorooshian e Gupta (1992). Além disso, devem-se selecionar os limites inferior e superior do espaço amostral de cada parâmetro.

Na janela mostrada na Figura 10 observa-se também a opção de restringir os valores das somas das constantes empíricas do modelo que definem os efeitos da deriva ( $A+B+C$ ) e a redução do alcance do jato ( $D+E+F$ ), sendo

estes valores obtidos pela análise das dimensões do alcance do jato do aspersor (item 4.2.1). Assim, quando se restringem estes valores, tem-se maior facilidade de convergência, para o valor mínimo da função objetivo, dos valores das seis constantes empíricas do modelo.

Posteriormente (Figura 11), de acordo com a recomendação de Richards e Weatherhead (1993), no sentido de minimizar simultaneamente a soma de quadrados de desvios correspondentes a três pares de matrizes (três estimadas vs. três observadas), escolhem-se os ensaios de distribuição de água do aspersor operando em condições de vento que serão usados no ajuste dos seis parâmetros (sendo a entrada deste valores realizada por meio de importação de dados da planilha Excel).

Restrições dos parâmetros A, B, C, D, E e F

Não restringir     Restringir

A+B+C=

D+E+F=

---

Shuffled Complex Evolution

Parâmetros do modelo de calibração

p -> n<sup>o</sup> de complexos

m   D

q   D

pmin   D

Alpha   D

Beta   D

Loops

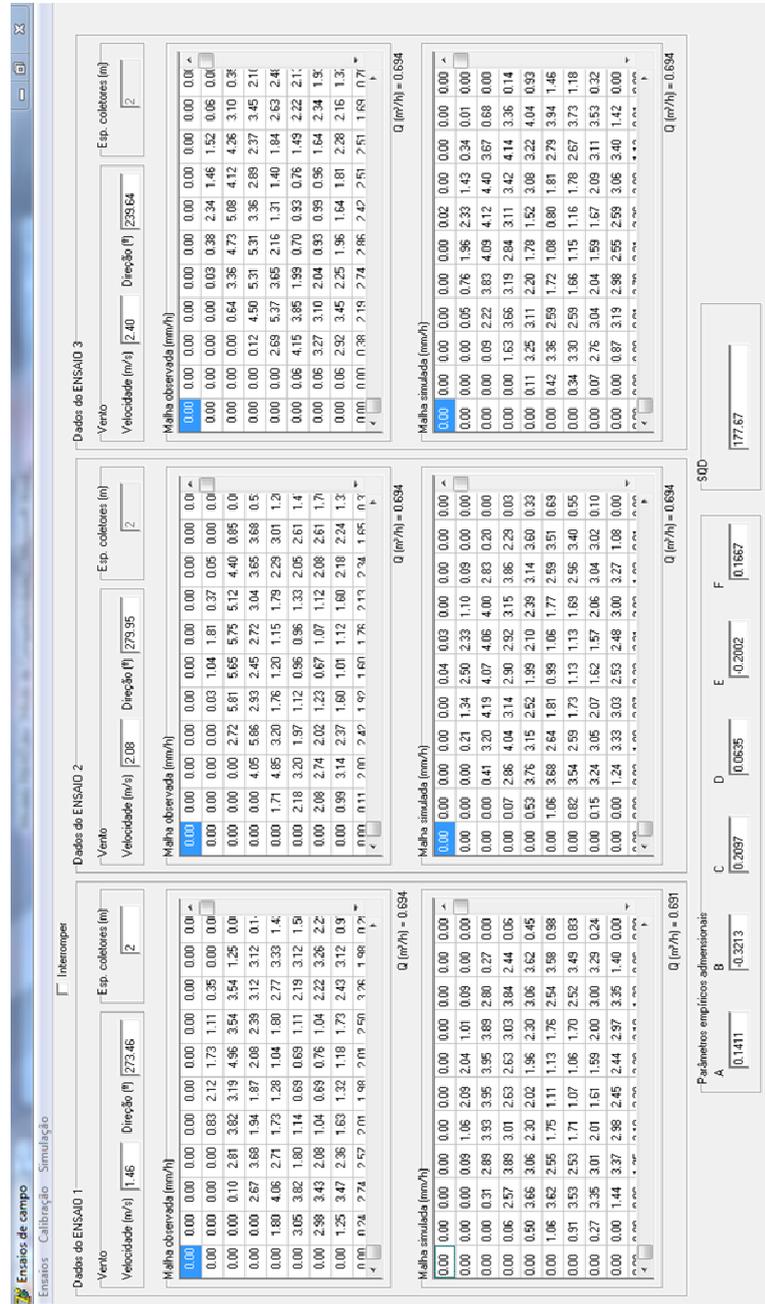
Restrição (SQD < X)

Limites dos parâmetros

Parâmetro	Limite inferior	Limite superior
Parâmetro A	-1	1
Parâmetro B	-1	1
Parâmetro C	-1	1
Parâmetro D	-1	1
Parâmetro E	-1	1
Parâmetro F	-1	1

Figura 10 Dados requeridos pelo método SCE-UA para o ajuste das seis constantes do modelo de Richards e Weatherhead (1993)

Figura 11 Dados de vento requeridos para o ajuste das constantes empíricas do modelo e malhas com valores de intensidade de precipitação observada em campo e simulada com o modelo



Os 32 ensaios de distribuição de água em condições de vento maior que  $0,9 \text{ m s}^{-1}$  permitiram a formação de 4.960 diferentes conjuntos de três ensaios de campo. No entanto, em função da análise das dimensões da área molhada distorcida pelo vento, foi estabelecido que valores representativos dos coeficientes empíricos selecionados devessem atender às seguintes restrições:  $A/R+B/R+C/R = 0,0295 \text{ s m}^{-1}$ ; e  $D/R+E/R+F/R = 0,0300 \text{ s m}^{-1}$ , como observado na Figura 10.

Dessa forma, diversos conjuntos distintos de três ensaios de campo foram submetidos ao processo de ajuste dos parâmetros, até que um conjunto, contendo os ensaios de campo de números E21, E23 e E24 (Tabela 1A do ANEXO A), forneceram valores de parâmetros empíricos ajustados que atendiam ao critério de representatividade estabelecido. Os valores individuais dos coeficientes empíricos de distorção de vento ajustados pelo método SCE-UA podem ser observados na Figura 11 e estão apresentados na Tabela 3.

A adequação dos parâmetros de ajuste obtido pode ser avaliada na Figura 12, na qual se comparam mapas de contorno das taxas de aplicação de água ( $\text{mm h}^{-1}$ ) do aspersor obtidas nos ensaios de campo E21, E23 e E24 com mapas gerados pelos valores obtidos, para as mesmas condições operacionais dos ensaios de campo, com o programa desenvolvido.

Tabela 3 Valores individuais dos seis parâmetros de distorção do vento ajustados pelo modelo de Richards e Weatherhead (1993)

Aspersor Agropolo/NY (Bocal = 3,5 mm e Pressão = 245 kPa)						
E21 ( $1,46 \text{ m s}^{-1}$ e $273,46^\circ$ ), E23 ( $2,08 \text{ m s}^{-1}$ e $279,95^\circ$ ) e E24 ( $2,40 \text{ m s}^{-1}$ e $239,64^\circ$ )						
Coeficientes empíricos de distorção de vento ( $\text{s m}^{-1}$ )						
A/R	B/R	C/R	D/R	E/R	F/R	SQD <sub>min.</sub>
0,1411	-0,3213	0,2097	0,0635	-0,2002	0,1667	177,67

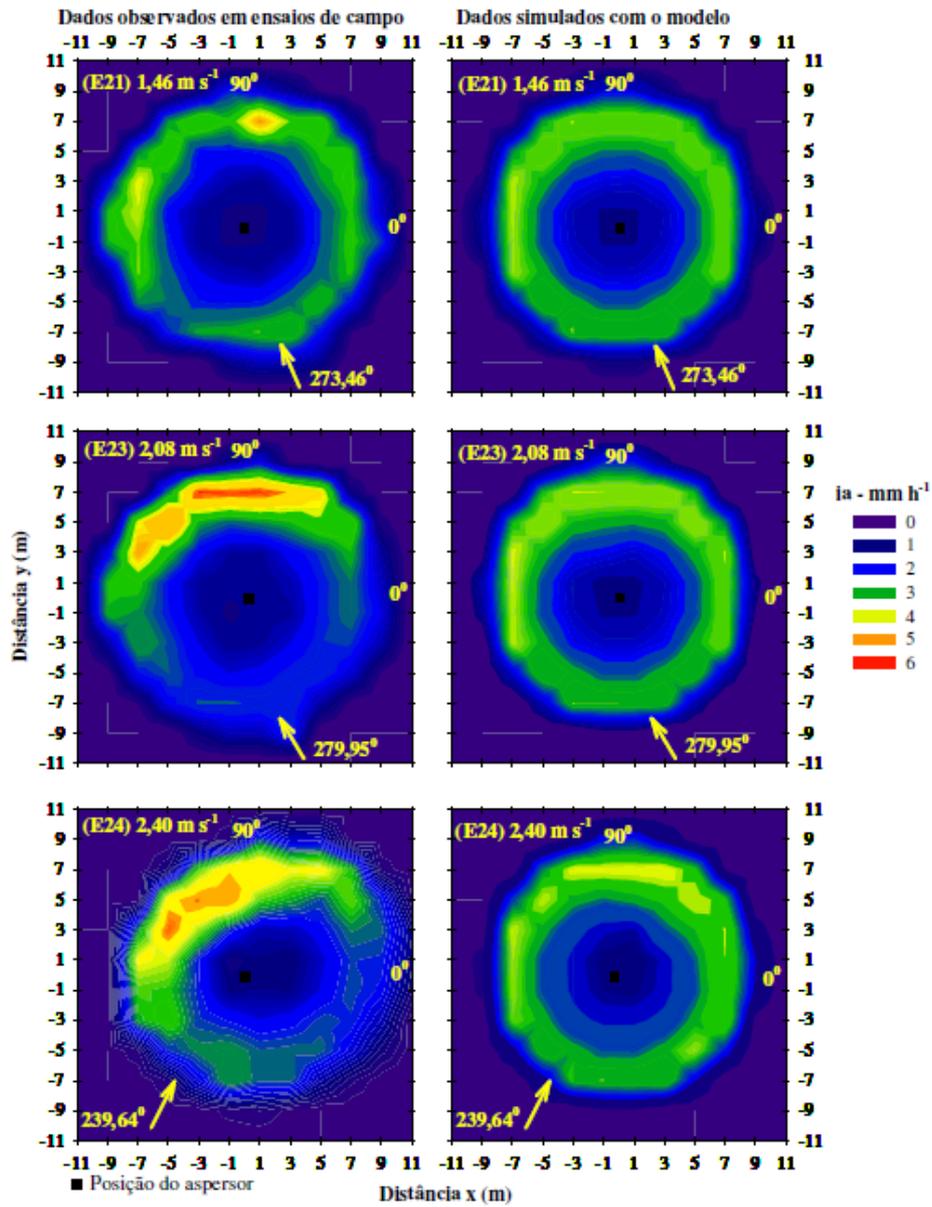


Figura 12 Superfícies de contorno das intensidades de aplicação de água ( $ia - \text{mm h}^{-1}$ ) do aspersor Agropolo/NY nos três ensaios utilizados no ajuste dos parâmetros de distorção do vento

A relação entre as intensidades de aplicação de água (em  $\text{mm h}^{-1}$ ) observadas nos ensaios de campo e estimadas pelo modelo (Figura 12) apresentou, de acordo com o índice de confiança de Camargo e Sentelhas (1997), desempenho ótimo ( $c > 0,85$ ) ou muito bom ( $0,76 \leq c \leq 0,85$ ), com valores de “c” iguais a 0,92; 0,85 e 0,77, para os ensaios E21, E23 e E24, respectivamente. Cabe ressaltar, ainda, que, de acordo com Voires, Arce e Bernuth (1987), mesmo que modelos matemáticos não representem exatamente a distribuição de água de aspersores operando sob condições de vento, os mesmos são ferramentas úteis no auxílio a tomadas de decisões em projetos de irrigação e na avaliação de sistemas de irrigação (PRADO; COLOMBO, 2010b).

### **4.3 Avaliação do modelo**

#### **4.3.1 Avaliação dos parâmetros de distorção do vento ajustados com o modelo de Richards e Weatherhead**

A convergência para um valor mínimo da função objetivo dos parâmetros ajustados de distorção do vento pode ser avaliada graficamente pela sua relação com a combinação entre diferentes pares de valores de parâmetros otimizados.

Os seis parâmetros (A, B, C, D, E e F) de ajuste do modelo combinados em pares resultam em 15 diferentes situações de análise. Então, optou-se por avaliar um parâmetro de distorção relacionado com a deriva das gotas (A, B e C) combinado com um parâmetro relacionado com a redução do raio de alcance, devido à interrupção do fluxo de ar junto ao jato de água (D, E e F).

Na Figura 13 está representada a relação entre o valor correspondente ao logaritmo de base dez da soma do quadrado dos desvios (SQD) com a combinação entre os parâmetros C e E de ajuste de distorção do vento do

modelo de Richards e Weatherhead (1993). Na elaboração desta figura, estipularam-se, para as constantes C (0,2097) e E (-0,2002), valores 50% maiores e 50% menores que os obtidos para as mesmas, que foram, respectivamente,  $C_{\text{maior}} = 0,3146$  e  $C_{\text{menor}} = 0,1049$  e  $E_{\text{maior}} = -0,1001$  e  $E_{\text{menor}} = -0,3003$ , mantendo-se fixos os valores das constantes A, B, D e F (Tabela 3), obtendo-se 120 novos valores de C, E e  $\text{Log}_{10}(\text{SQD})$ .

Na Figura 13 pode-se observar a ocorrência de um valor mínimo global ( $\log_{10} = 2,2$  da soma do quadrado dos desvios  $\text{SQD} = 177,67$ ) que corresponde ao parâmetros  $C = 0,2097$  e  $E = -0,2002$  ajustados, permitindo verificar que existe um valor mínimo da função objetivo, obtido com o método proposto no ajuste das constantes de distorção do vento do modelo de Richards e Weatherhead (1993).

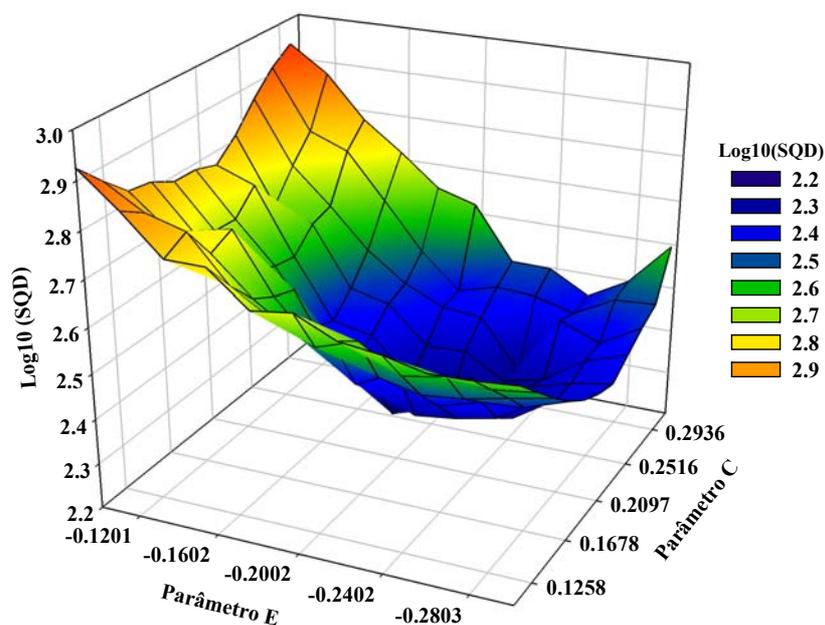


Figura 13 Valores da função objetivo (SQD) em Log10 em relação aos parâmetros C e E ajustados com o aspersor Agropolo/NY

### 4.3.2 Avaliação da uniformidade de aplicação de água de sistemas convencionais de irrigação

Na Figura 14 está apresentada a relação entre os 225 valores dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (1942) (CUC) obtidos por simulação para os aspersores de tamanho médio Agropolo/NY e Naan/5024, com o modelo de Richards e Weatherhead (1993), e os 225 valores de CUC obtidos em ensaios de campo. Visualmente é possível perceber que os pares de valores de CUC apresentados na Figura 14 estão bem concentrados ao redor da reta 1:1. A adequação desta concentração ao redor da linha 1:1 é confirmada pelo alto valor do índice de confiança dos valores simulados ( $c = 0,94 \times 0,97 = 0,91$ ) que, de acordo com a escala de Camargo e Sentelhas (1997), corresponde a uma classificação do tipo ótimo ( $c > 0,85$ ).

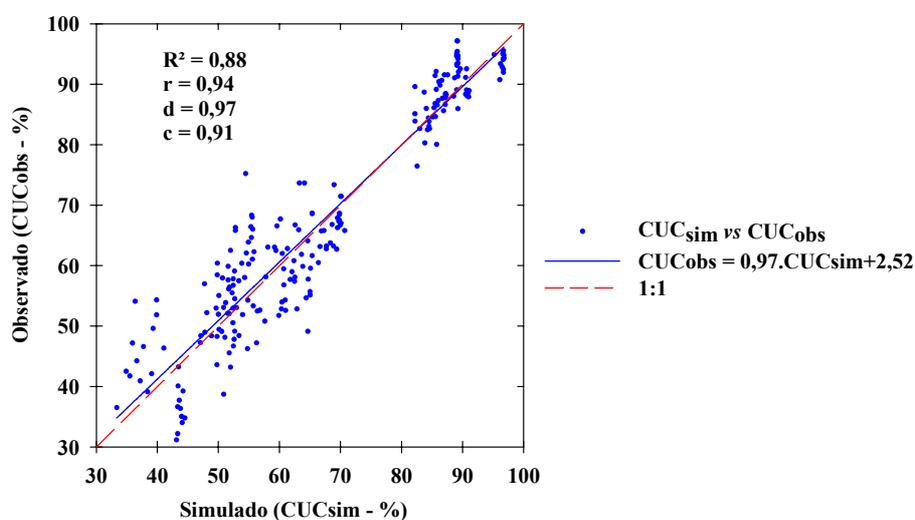


Figura 14 Coeficientes de uniformidade de Christiansen obtidos a partir de simulações (CUCsim) e de ensaios de campo (CUCobs)

O valor de  $c = 0,91$ , obtido na comparação de dados simulados com dados de ensaios de campo dos aspersores de tamanho médio Agropolo/NY e Naan/5024, foi superior aos obtidos por Faria et al. (2009) que, com o canhão hidráulico Plona/RL-250, encontraram valor de “c” igual a 0,78 (classificação do tipo muito bom) na comparação entre 319 valores de CUC observados em ensaios de campo e 319 valores de CUC estimados com o modelo de Richards e Weatherhead (1993).

A diferença entre os valores do índice “c” obtidos entre canhões hidráulicos e aspersores de tamanho médio pode ser atribuída ao número de comparações entre valores simulados e observados de uniformidade (319 valores comparados com canhões hidráulicos e 225 valores comparados com aspersores de tamanho médio). Além disso, na avaliação do canhão Plona/RL250, as velocidades de vento durante os ensaios de campo atingiram valores até  $5 \text{ m s}^{-1}$ , valores esses superiores aos  $3 \text{ m s}^{-1}$  atingidos nos ensaios de campo utilizados neste estudo, ou seja, apesar das diferenças no tamanho das gotas proporcionadas por canhões hidráulicos e aspersores de tamanho médio, maiores velocidades de vento proporcionaram maior distorção do padrão de distribuição de água do canhão hidráulico.

Na comparação da reta 1:1 com a linha do ajuste linear, observa-se que, na região de interesse prático ( $\text{CUC} > 60\%$ ), o modelo tende a produzir valores de CUC muito próximos aos observados nos ensaios de campo. O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,88$ ) do ajuste linear, entre valores observados e simulados de CUC, resultou em um valor superior aos obtidos por Faria et al. (2009) que, com o modelo de Richards e Weatherhead (1993), obtiveram  $R^2 = 0,73$  entre valores observados e simulados com o canhão Plona/RL-250, e de Montero, Tarjuelo e Carrión (2001) que, na avaliação do modelo SIRIAS, com aspersores de tamanho médio, obtiveram valores de  $R^2$  igual a 0,51; 0,75; 0,85 e 0,81, para os espaçamentos de 12x12; 12x18; 18x18; e 18x16, respectivamente.

Como os parâmetros A, B, C, D, E e F ajustados do modelo de Richards e Weatherhead (1993) foram para o aspersor Agropolo/NY operando com bocal 3,5 mm e pressão de serviço de 294 kPa, fez-se a análise separadamente da relação entre valores observados e simulados pelo modelo para cada aspersor (Agropolo/NY, Figura 15A, e Naan/5024, Figura 15B).

Observa-se, na análise de cada aspersor, que os valores de  $R^2$  e índice “c” foram mantidos para os aspersores Agropolo/NY (Figura 15A) e Naan/5024 (Figura 15B). O aspersor Naan/5024 (Figura 15 B) apresentou menor relação entre valores observados em campo e simulados pelo modelo na região de valores de CUC baixos (menores que 60%), região na qual não se tem interesse prático. Além disso, o bom ajuste do aspersor Naan/5024 serve como indício de que não há necessidade de ajustar individualmente valores das constantes do modelo de Richards e Weatherhead (1993) para cada condição operacional dos aspersores Agropolo/NY e Naan/5024.

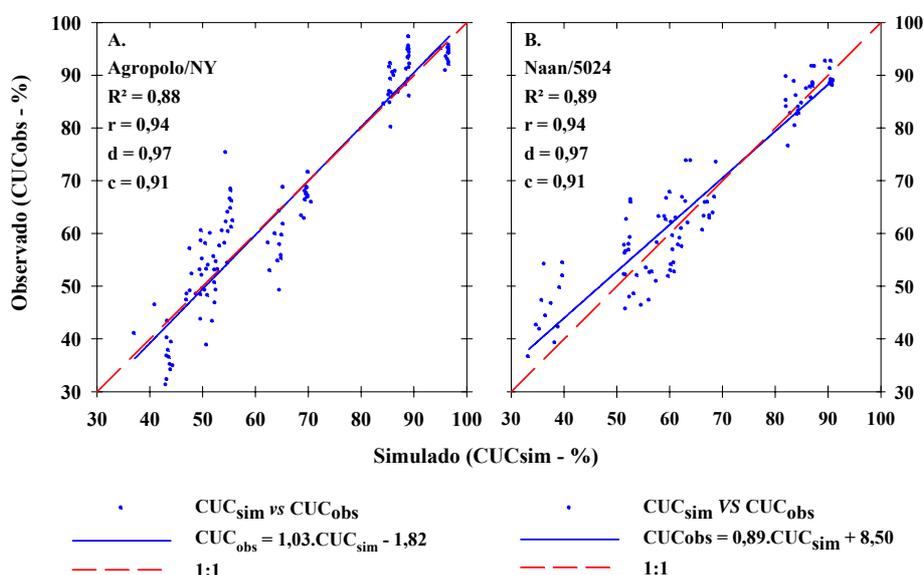


Figura 15 Valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen obtidos a partir de simulações ( $CUC_{sim}$ ) e de ensaios de campo ( $CUC_{obs}$ ), para os aspersores Agroplo (A) e Naan (B)

Na Figura 16A, estão apresentados 225 valores absolutos da diferença entre valores de CUC simulados e observados, expressos em porcentagem, oriundos de simulações e oriundos de ensaios de campo, para os aspersores avaliados. Observa-se que o valor médio das diferenças absolutas (4,75%), mesmo um pouco superior aos 4,1% obtidos por Faria et al. (2009), com o canhão Plona/RL-250 e aos 2,7% obtidos por Montero, Tarjuelo e Carrión (2001) na avaliação do modelo SIRIAS, situa-se abaixo do limite de 5%. Este resultado caracteriza um desempenho classificado como “muito bom”, na previsão de valores de CUC de sistemas convencionais de aspersão (MONTERO; TARJUELO; CARRIÓN, 2001), habilitando a utilização do modelo de Richards e Weatherhead (1993) em prever valores de uniformidade de distribuição de água de sistemas convencionais de irrigação operando sob condições de vento, com aspersores de tamanho médio. Pode, ainda, servir de auxílio a projetistas e irrigantes na escolha de condições operacionais e espaçamento entre aspersores que elevem o grau de uniformidade destes sistemas em condições reais de trabalho.

Analisando-se separadamente o desvio absoluto (DA) dos aspersores Agropolo/NY (Figura 16B, DA = 5%) e Naan/5024 (Figura 16C, DA = 4,5%) em relação ao DA dos ensaios utilizados no ajuste dos parâmetros de vento do modelo de Richards e Weatherhead (1993) (2,64%), observam-se também valores de DA de no máximo 5%, os quais estão dentro do limite caracterizado com muito bom, por Montero, Tarjuelo e Carrión (2001).

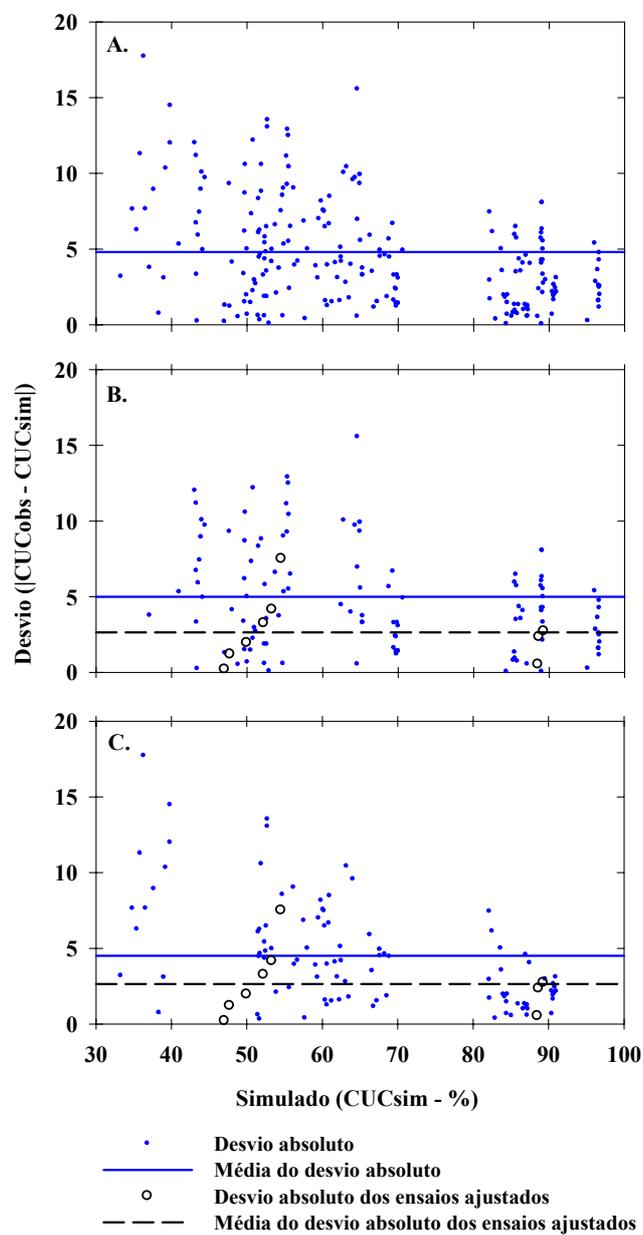


Figura 16 Diferenças absolutas (%) entre estimativas de CUC obtidas com dados de ensaios de campo (CUCobs) e com dados de ensaios simulados (CUCsim): (A) Agropolo/NY e Naan/5024; (B) Agropolo/NY; (C) Naan/5024

Ainda que ocorram diferenças entre valores de CUC simulados com o modelo e observados em campo, é importante ressaltar que estas diferenças nas estimativas dos valores de CUC não devem ser atribuídas apenas ao modelo, visto que as dificuldades 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, também refletem em diferenças nos valores de CUC simulados e observados.

O aumento da amplitude dos desvios correspondente aos menores valores de CUC, que é mostrado na Figura 16, indica que as estimativas que resultam em menores valores de CUC são mais susceptíveis às instabilidades dos fatores climáticos. Este aspecto foi também enfatizado por Solomon (1979), ao demonstrar que, mesmo em condições de ventos fracos, os espaçamentos entre aspersores que resultam em reduzido grau de sobreposição da água aplicada por aspersores adjacentes e, conseqüentemente, menores valores de CUC, apresentam, em função das pequenas variações nas condições climáticas observadas durante os ensaios de campo, uma maior incerteza nos valores de CUC (desvio padrão de 2% para CUC perto de 90%, desvio padrão de 4% para CUC próximo de 80% e desvio padrão de 6% para CUC perto de 70%).

Na Figura 17, é possível comparar, para diferentes espaçamentos entre aspersores dispostos em arranjos quadrados, estimativas de CUC obtidas por meio de ensaios de campo e simulações de aspersores isolados. As condições operacionais dos ensaios mostrados nesta Figura são as mesmas observadas nos ensaios E21, E23 e E24, utilizados para ajustar os valores dos parâmetros empíricos do modelo de Richards e Weatherhead (1993), ou seja, aspersor Agropolo/NY com bocal de 3,5 mm, pressão de serviço 245 kPa, raio de alcance 10,9 m e vazão  $0,694 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Observa-se, na Figura 17, que, apesar das diferenças nos valores absolutos das estimativas de CUC, o comportamento da uniformidade de

aplicação de água, em função do aumento do espaçamento entre aspersores, determinado com base nos dados de ensaios de campo, foi adequadamente representado nas três condições simuladas (Figuras 17A, 17B e 17C).

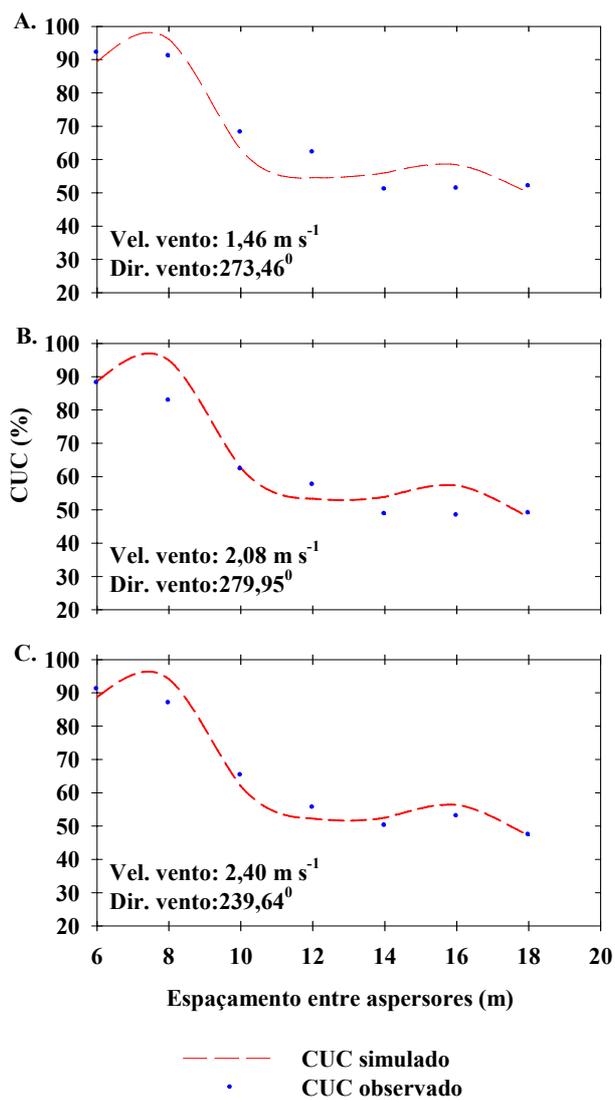


Figura 17 Estimativas do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), em função do espaçamento dos aspersores, geradas com dados simulados e com dados de ensaios de campo

Além da análise das estimativas da uniformidade de distribuição de água a partir de ensaios de campo de aspersores isolados, buscou-se também avaliar a capacidade do modelo de Richards e Weatherhead (1993) em prever a uniformidade de distribuição de água de aspersores operando em linhas laterais.

Na Figura 18A, pode-se observar a relação entre 24 valores de CUC gerados a partir de simulações baseadas no modelo de Richards e Weatherhead (1993), ajustado para aspersores de tamanho médio (Agropolo/NY e Naan/5024) e 24 valores de CUC obtidos a partir de ensaios de campo com linhas laterais de aspersores Agropolo/NY e Naan/5024 (Tabela 2A do ANEXO A) dispostos no espaçamento 12 x 12 m. Na Figura 18B, os 24 valores absolutos (DA) da diferença entre valores de CUC, expressos em porcentagem, oriundos de simulações e oriundos de ensaios de campo, para os aspersores avaliados.

Pode-se observar, na Figura 18A, que, para os pares de valores de CUC (observados e simulados) inferiores a 60% ocorre maior dispersão dos pontos em relação a reta 1:1, conforme previsto por Solomon (1979). Porém, na condição de interesse prático ( $CUC > 60\%$ ), os pares de valores de CUC encontram-se ao redor da reta 1:1, o que é comprovado pelo valor do índice de confiança ( $c = 0,76$ ), considerado, por Camargo e Sentelhas (1997), como muito bom. Além disso, o valor do ajuste linear ( $R^2 = 0,78$ ) foi superior ao obtido por Montero, Tarjuelo e Carrión (2001), para aspersores de tamanho médio operando com espaçamento 12 x 12 m, que foi de 0,51.

Constata-se também, na Figura 18<sup>a</sup>, que o modelo ajustado tende a subestimar os valores de CUC para aspersores operando em linhas laterais. Isso pode ser atribuído ao fato de que quando vários aspersores operam simultaneamente ocorre um choque entre as gotas aspergidas, uniformizando a distribuição de água entre aspersores. Além disso, de acordo com Ortega et al. (2000), quando vários aspersores operam simultaneamente, cria-se um microclima favorável entre eles, que diminui as perdas de água por evaporação e

arraste, quando comparado com aspersores operando isoladamente, o que resulta, de acordo com Beskow (2006), em maiores valores de uniformidade.

Na Figura 18B, o valor médio das diferenças absolutas (4,1%) é bastante similar ao obtido por Faria et al. (2009) para o ajuste do modelo de Richards e Weatherhead (1993) em sistemas convencionais de irrigação operando com canhão hidráulico Plona/R1250 e encontra-se abaixo do limite de 5% considerado, por Montero, Tarjuelo e Carrión (2001), como muito bom.

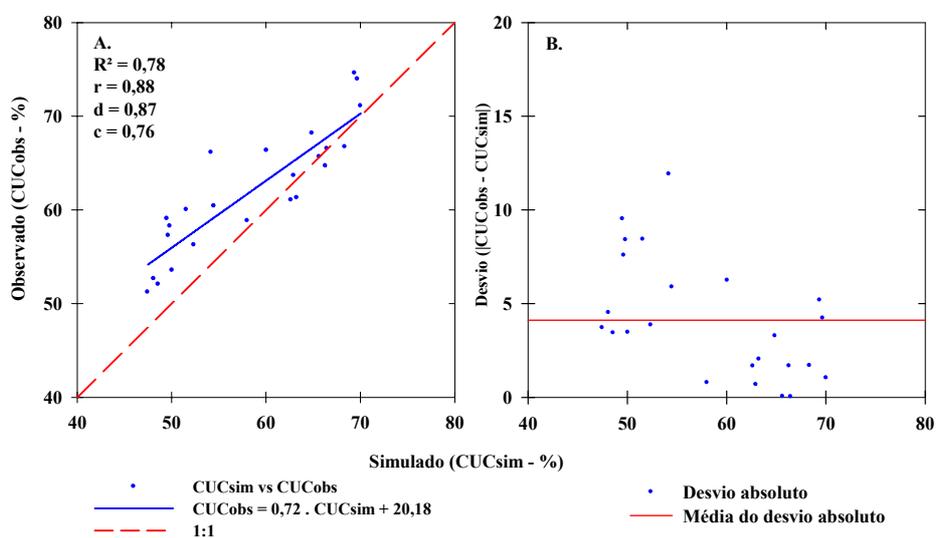


Figura 18 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (A) obtidos a partir de simulações e ensaios de campo e (B) desvios absolutos entre estimativas de CUC em campo e simulados

## 5 CONCLUSÕES

i) Nas situações de interesse prático, nas quais o grau de sobreposição das áreas molhadas por aspersores adjacentes é elevado, o modelo semiempírico de Richards e Weatherhead (1993) foi capaz de fornecer estimativas adequadas do coeficiente de uniformidade de Christiansen, para aspersores de tamanho médio, operando isoladamente e em linhas laterais de sistemas convencionais de irrigação, sob diferentes condições de vento.

ii) O bom desempenho do modelo ajustado permite inferir que o trabalho de campo requerido para produzir dados de uniformidade de aplicação de água de aspersores de tamanho médio, em diferentes condições de vento, pode ser bastante simplificado pela utilização do modelo semiempírico de Richards e Weatherhead (1993), tanto para aspersores operando isoladamente como operando em linhas laterais.

iii) O modelo semiempírico de Richards e Weatherhead (1993) pode ser utilizado com sucesso na previsão do comportamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional sob condições operacionais e climáticas pré-estabelecidas.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. **Catch-3D sprinkler pattern analysis software: user's manual**. Logan: Utah State University, 1992. 14 p.

ALLEN, R. G. et al. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and Drainage, 56).

ANDRADE, C. L. T. de; BORGES JÚNIOR, J. C. F. Seleção do método de irrigação. In: ALBUQUERQUE, P. E. P. de; DURÃES, F. O. M. (Ed.). **Uso e manejo de irrigação**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2008. p. 317-399.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 04:015.08-013-2: uniformidade de distribuição e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 1999. 10 p.

BERNUTH, R. D. von; SEGNER, I. Wind considerations in sprinkler system design. In: VISIONS OF THE FUTURE, NATIONAL IRRIGATION SYMPOSIUM, 3., 1990, Saint Joseph. **Proceedings...** Saint Joseph: ASAE, 1990. 1 CD-ROM.

BESKOW, S. **Avaliação de modelos empíricos para estimativa das perdas de água por evaporação e arraste em sistemas de aspersão convencional**. 2006. 94 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

\_\_\_\_\_. **Lash model: a hydrological simulation tool in gis framework**. 2009. 118 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

BRENNAN, D. Factors affecting the economic benefits of sprinkler uniformity and their implications for irrigation water use. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 26, n. 2, p. 109-119, Feb. 2008.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Análise numérica**. São Paulo: Thomson Learning, 2003. 736 p.

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

CARRIÓN, P.; TARJUELO, J. M.; MOTERO, J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation, part I: description of model. **Irrigation Science**, New York, v. 20, n. 2, p. 73-84, May 2001.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, 1942. 124 p.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; COELHO, R. D. Simulating wind effect on microsprinkler water distribution. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 205-209, 2003.

CRIDDLE, W. D. et al. **Methods for evaluating irrigation systems**. Washington: SCS-USDA, 1956. 24 p.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, Washington, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, July/Aug. 1992.

FARIA, L. C. **Simulação da uniformidade de aplicação de água em sistemas convencionais de irrigação operando sob diferentes condições de vento**. 2008. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

FARIA, L. C. et al. Simulação da uniformidade da irrigação de sistemas convencionais de aspersão operando sob diferentes condições de vento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 19-27, mar. 2009.

FRIZZONE, J. A. et al. Produtividade do feijoeiro sob diferentes uniformidades de distribuição de água na superfície e na subsuperfície do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 414-425, jun. 2007.

GRANIER, J.; MOLLE, B.; DEUMIER, J. M. Irriparc, part 1: modeling spatial water distribution under a sprinkler in windy conditions. In: INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE WORKSHOP, 1., 2003, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: ICID, 2003. p. 14-19.

HART, W. E. Overhead irrigation pattern parameters. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 42, n. 7, p. 354-355, July 1961.

HOLZAPFEL, E. A. et al. Análises técnico-econômico para selección de aspersores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 557-563, nov./dez. 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7749-2**: irrigation equipment: rotating sprinklers, part 2: uniformity of distribution and test methods. Copenhagen, 1990. 6 p.

JUSTI, A. L.; VILAS-BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C. Índice de capacidade do processo na avaliação da irrigação por aspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 264-270, mar./abr. 2010.

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

KINCAID, D. C. Impact sprinkler pattern modification. **Transactions of the American society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 34, n. 6, p. 2397-2402, Dec. 1991.

LI, J.; RAO, M. Field evaluation of crop yield as affected by nonuniformity of sprinkler-applied water and fertilizer. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 76, n. 3, p. 1-13, June 2003.

MATEOS, L. Assessing whole-field uniformity of stationary sprinkler irrigation systems. **Irrigation Science**, New York, v. 18, n. 2, p. 73-81, 1998.

MERKLEY, G. P.; ALLEN, R. G. **Sprinkle and trickle irrigation: lecture notes**. Logan: Utah State University, 2004. 286 p.

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

NAANDANJAIN. **NaanDan/NaanCAT irrigation irrigation software version 9.5**. Disponível em:

<[http://www.naan.co.il/e/Knowledge\\_Desk/Field\\_Crop\\_Knowledge/Sprinkler\\_Irrigation\\_\\_\\_Can\\_its\\_efficiency\\_be\\_improved.htm](http://www.naan.co.il/e/Knowledge_Desk/Field_Crop_Knowledge/Sprinkler_Irrigation___Can_its_efficiency_be_improved.htm)>. Acesso em: 13 ago. 2010.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for functional minimization. **Computer Journal**, London, v. 7, n. 4, p. 308-313, Jan. 1965.

NEWELL, G. **Traveling gun simulation model TRAVGUN: user's manual and technical documentation**. Toowoomba: National Centre for Engineering in Agriculture, 2003. 89 p.

OLIPHANT, J. C. **SpacePro installation and operation manual**. Fresno: Center for Irrigation Technology, 2003. Disponível em: <<http://cati.csufresno.edu/CIT/software/>>. Acesso em: 16 ago. 2010.

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. Suplemento.

ORTEGA, J. F. et al. Discharge efficiency in sprinkling irrigation: analysis of the evaporation and drift losses in semi-arid areas. **Agricultural Engineering International, the CIGR Ejournal**, Raleigh, v. 2, p. 1-21, Mar. 2000.

ORTEGA, J. F.; JUAN, J. A.; TARJUELO, J. M. Evaluation of the water cost effect on water resource management: application to typical crops in a semiarid region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 125-144, Apr. 2004.

PEREIRA, G. M. Aspersão convencional. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. (Ed.). **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. v. 2, p. 107-178.

PLAYÁN, E. et al. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 89-100, Mar. 2006.

\_\_\_\_\_. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 76, n. 3, p. 139-159, Sept. 2005.

PRADO, G. **Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento**. 2008. 121 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

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

\_\_\_\_\_. Distribuição espacial de água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação, parte I: modelagem com o Simulasoft. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 51-62, 2010a.

\_\_\_\_\_. Distribuição espacial de água aplicada por equipamentos autopropelidos de irrigação, parte II: validação do Simulasoft. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 63-74, 2010b.

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

ROCHA, E. M. de M. et al. Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na superfície e no perfil do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 154-160, maio/ago. 1999.

SENNINGER IRRIGATION'S. **WinSIPP2 software**. Disponível em: <<http://www.senninger.com/winsipp2.php>>. Acesso em: 16 ago. 2010.

SHULL, H.; DYLLA, A. S. Wind effects on water application patterns from a large, single nozzle sprinkler. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 19, n. 3, p. 501-504, May/June 1976.

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

SOLOMON, K. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test result. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 22, n. 5, p. 1078-1086, Sept./Oct. 1979.

SOLOMON, K.; BEZDEK, J. C. Characterizing sprinkler distribution patterns with a clustering algorithm. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 23, n. 4, p. 899-906, July/Aug. 1980.

TARJUELO, J. M. et al. Irrigation uniformity with medium size sprinklers part II: influence of wind and other factors on water distribution. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 42, n. 3, p. 677-689, May/June 1999.

TARJUELO, J. M.; GOMÉZ, M. V.; PRADO, J. L. Working conditions of sprinkler to optimize application of water. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 118, n. 6, p. 895-913, Nov./Dec. 1992.

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

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

WILCOX, J. C.; SWAILES, G. E. Uniformity of water distribution by some under tree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, Ottawa, v. 27, n. 11, p. 565-583, Nov. 1947.

ZAPATA, N. et al. Form on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in wind areas. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 87, n. 2, p. 187-199, Jan. 2007.

**ANEXO A**

Tabela 1A	Varição da velocidade e direção do vento nos 57 ensaios de campo, em função das pressões de serviço dos aspersores Naan/5024 e Agropolo/NY, operando isoladamente .....	79
Tabela 2A	Varição da velocidade e direção do vento nos 24 ensaios de campo, em função das pressões de serviço dos aspersores Naan/5024 e Agropolo/NY, operando em linhas laterais.. .....	81
Tabela 3A	Fração intensidade média de aplicação de água em função da fração do raio de alcance dos perfis adimensionais dos aspersores Naan/5024 e Agropolo/NY.. .....	82
Tabela 4A	Alcances relativos entre o aspersor e a extremidade da área molhada, tomada nas direções a favor (AA), contra (AC) e perpendicular (AP) ao vento .....	83

Tabela 1A Variação da velocidade e direção do vento nos 57 ensaios de campo, em função das pressões de serviço dos aspersores Naan/5024 e Agropolo/NY, operando isoladamente

<b>Agropolo/NY (Bocal = 3,5 mm)</b>					
<b>Número do ensaio</b>	<b>Pressão de serviço (kPa)</b>	<b>Vento</b>			<b>Direção (graus)</b>
		<b>Velocidade (m s<sup>-1</sup>)</b>			
		<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>CV * (%)</b>	
1	194	0,23	0,42	1,82	239,10
2	194	0,58	0,74	1,27	104,31
3	194	0,85	0,89	1,03	301,37
4	194	0,94	1,21	1,28	310,31
5	194	1,02	0,91	0,89	258,67
6	194	1,09	0,79	0,72	247,66
7	194	1,37	1,00	0,73	20,87
8	194	2,20	1,09	0,50	265,36
9	194	2,45	1,16	0,47	217,86
10	194	2,92	1,31	0,44	343,57
11	245	0,00	-	-	-
12	245	0,42	0,49	1,15	270,99
13	245	0,47	0,74	1,57	78,88
14	245	0,62	0,75	1,22	274,43
15	245	0,62	0,90	1,47	223,85
16	245	0,62	0,73	1,16	327,90
17	245	0,82	1,03	1,26	341,13
18	245	1,12	0,91	0,81	348,34
19	245	1,17	0,97	0,83	272,94
20	245	1,33	1,07	0,80	210,79
21	245	1,46	1,11	0,76	273,46
22	245	1,48	1,14	0,77	309,89
23	245	2,08	0,62	0,29	279,95
24	245	2,40	1,51	0,62	239,64
25	294	0,68	0,74	1,09	298,64
26	294	0,68	0,73	1,06	27,35
27	294	0,78	0,69	0,88	230,86
28	294	0,85	0,83	0,98	270,55
29	294	1,36	0,96	0,70	315,22
30	294	1,40	1,24	0,89	209,37
31	294	1,64	0,97	0,59	348,06
32	294	2,01	0,80	0,40	320,81
33	294	2,13	0,73	0,32	206,45

...continua...

Tabela 1A, cont.

Naan/5024 (Bocal = 3,0 mm)					
Número do ensaio	Pressão de serviço (kPa)	Vento			Direção (graus)
		Velocidade (m s <sup>-1</sup> )			
		Média	Desvio padrão	CV * (%)	
34	245	0,00	-	-	-
35	245	0,00	-	-	-
36	245	0,23	0,34	1,48	251,82
37	245	0,58	0,77	1,31	78,69
38	245	0,78	1,02	1,29	78,69
39	245	1,40	0,93	0,66	279,68
40	245	1,46	0,91	0,62	297,94
41	245	1,46	0,87	0,60	255,84
42	245	2,05	1,23	0,60	254,16
43	294	0,00	-	-	-
44	294	0,45	0,69	1,54	281,22
45	294	0,87	0,51	0,58	263,66
46	294	1,06	0,74	0,69	277,48
47	294	1,13	0,99	0,88	40,03
48	294	1,36	1,02	0,75	267,33
49	294	1,68	1,14	0,68	239,31
50	294	2,15	1,32	0,61	247,56
51	343	0,00	-	-	-
52	343	0,29	0,41	1,40	315,43
53	343	0,61	0,57	0,93	287,89
54	343	0,92	0,77	0,83	292,97
55	343	1,12	0,82	0,73	246,87
56	343	1,29	0,92	0,71	261,82
57	343	2,40	0,78	0,32	239,64

Tabela 2A Variação da velocidade e direção do vento nos 24 ensaios de campo, em função das pressões de serviço dos aspersores Naan/5024 e Agropolo/NY, operando em linhas laterais

<b>Agropolo (bocal = 3,5 mm)</b>			
<b>Número do ensaio</b>	<b>Pressão de serviço</b>	<b>Vento</b>	
		<b>Velocidade</b>	<b>Direção</b>
	<b>(kPa)</b>	<b>(m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>(graus)</b>
1	194	1,25	164,89
2	194	1,27	144,09
3	194	1,33	152,73
4	194	2,30	180,73
5	194	2,50	159,18
6	245	1,49	155,64
7	294	0,67	220,00
8	294	1,13	188,20
9	294	1,36	232,30
10	294	3,07	167,73
<b>Naan (Bocal = 3,0 mm)</b>			
11	245	1,04	239,91
12	245	1,53	253,55
13	245	2,02	276,82
14	245	2,11	167,00
15	245	3,08	180,09
16	294	0,55	190,29
17	294	0,87	137,30
18	294	1,78	276,50
19	294	2,15	164,73
20	343	1,23	163,82
21	343	1,29	293,73
22	343	1,69	183,55
23	343	1,91	294,64
24	343	2,26	181,18

Tabela 3A Fração intensidade média de aplicação de água em função da fração do raio de alcance dos perfis adimensionais dos aspersores Naan/5024 e Agropolo/NY

<b>Aspersor</b>	<b>Naan/5024</b>			<b>Agropolo/NY</b>		
<b>Diâmetro do bocal (mm)</b>	3,0	3,0	3,0	3,5	3,5	3,5
<b>Pressão de serviço (kPa)</b>	245	294	343	196	245	294
<b>Fração do raio</b>	<b>Fração da intensidade média</b>					
0,025	1,398	1,298	1,183	0,329	0,498	0,708
0,075	1,265	1,191	1,106	0,356	0,533	0,717
0,125	1,132	1,083	1,029	0,382	0,568	0,726
0,175	0,999	0,975	0,952	0,409	0,603	0,735
0,225	0,866	0,867	0,875	0,435	0,638	0,744
0,275	0,733	0,760	0,798	0,462	0,709	0,753
0,325	0,682	0,731	0,798	0,580	0,879	0,904
0,375	0,778	0,841	0,935	0,724	1,016	1,055
0,425	0,885	0,959	1,065	0,801	1,119	1,093
0,475	1,026	1,099	1,179	0,890	1,266	1,153
0,525	1,148	1,219	1,280	1,054	1,488	1,250
0,575	1,276	1,322	1,365	1,403	1,724	1,397
0,625	1,481	1,407	1,421	1,761	1,942	1,542
0,675	1,686	1,493	1,476	2,156	1,933	1,638
0,725	1,753	1,522	1,464	2,048	1,877	1,537
0,775	1,552	1,381	1,315	1,734	1,445	1,390
0,825	1,259	1,179	1,118	1,191	0,744	1,103
0,875	0,726	0,874	0,822	0,488	0,274	0,676
0,925	0,208	0,401	0,406	0,191	0,049	0,351
0,975	0,043	0,119	0,116	0,067	0,017	0,089

Tabela 4A Alcances relativos entre o aspersor e a extremidade da área molhada, tomada nas direções a favor (AA), contra (AC) e perpendicular (AP) ao vento

Marca Modelo	Bocal mm	PS kPa	Vento		Distâncias				
			Vel.	Dir.	AA/R	AC/R	AP <sub>D</sub> /R	AP <sub>E</sub> /R	AP/R
			m s <sup>-1</sup>	graus	%	%	%	%	%
Agropolo/NY	3,5	194	0,00	-	100,0	100,00	100,00	100,00	100,00
	3,5	194	0,94	310,31	101,9	93,08	108,18	93,08	100,63
	3,5	194	1,02	258,67	104,4	99,37	104,40	86,79	95,60
	3,5	194	1,09	247,66	101,9	90,57	90,57	100,63	95,60
	3,5	194	1,37	20,87	103,1	90,57	104,40	90,57	97,48
	3,5	194	2,20	265,36	104,4	84,28	84,28	96,86	90,57
	3,5	194	2,45	217,86	104,4	90,57	90,57	93,08	91,82
	3,5	194	2,92	343,57	103,1	90,57	88,05	103,14	95,60
	3,5	245	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	3,5	245	1,12	348,34	100,31	91,74	100,31	99,08	99,69
	3,5	245	1,17	272,94	100,31	97,86	99,08	97,86	98,47
	3,5	245	1,33	210,79	110,09	90,52	106,42	91,74	99,08
	3,5	245	1,46	273,46	100,31	99,08	99,08	96,64	97,86
	3,5	245	1,48	309,89	101,53	94,19	99,08	100,31	99,69
	3,5	245	2,08	279,95	101,53	99,08	97,86	97,86	97,86
	3,5	245	2,40	239,64	111,31	89,30	91,74	92,97	92,35
	3,5	294	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	3,5	294	1,36	315,22	100,28	85,47	99,15	100,28	99,72
	3,5	294	1,40	209,37	101,42	85,47	86,61	93,45	90,03
	3,5	294	1,64	348,06	99,15	90,03	94,59	94,59	94,59
3,5	294	2,01	320,81	94,59	90,03	86,61	95,73	91,17	
3,5	294	2,13	206,45	100,28	86,61	84,33	98,01	91,17	
Naan/5024	3,0	245	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	3,0	245	1,40	279,68	101,13	98,35	110,82	92,81	101,82
	3,0	245	1,46	297,94	101,13	95,58	110,82	92,81	101,82
	3,0	245	1,46	255,84	110,82	95,58	95,58	92,81	94,20
	3,0	245	2,05	254,16	106,67	95,58	96,97	95,58	96,28
	3,0	294	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	3,0	294	1,06	277,48	104,00	90,67	108,00	89,33	98,67
	3,0	294	1,13	40,03	102,67	98,67	98,67	92,00	95,33
	3,0	294	1,36	267,33	104,00	104,00	106,67	89,33	98,00
	3,0	294	1,68	239,31	112,00	92,00	100,00	88,00	94,00
	3,0	294	2,15	247,66	113,33	93,33	94,67	92,00	93,33
	3,0	343	0,00	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	3,0	343	0,92	292,97	97,56	93,66	107,97	94,96	101,46
	3,0	343	1,12	246,87	107,97	94,96	94,96	93,66	94,31
	3,0	343	1,29	261,82	104,07	97,56	105,37	85,85	95,61
3,0	343	2,40	239,64	107,97	92,36	93,66	89,76	91,71	

## ANEXO B

### Método de Newton, adaptado de Burden e Faires (2003):

i) Na aplicação do método de Newton, para as estimativas das coordenadas  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$ , as Equações 5 e 6 são reescritas, respectivamente, na forma das Equações 24 e 25, representadas a seguir. Então, efetua-se o cálculo dos valores de  $fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$  e  $fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$ , que tem início com as seguintes estimativas:  $x_{v0} = x_v$ , e  $y_{v0} = y_v$ .

$$fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0}) = \left\{ \begin{array}{l} x_{v0} - [A + B \cdot (r/R) + C \cdot (r/R)^2] \cdot V - \dots \\ [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + F \cdot (r/R)^3] \cdot \dots \\ V \cdot \sqrt{\text{sen}^2 e \cdot \left(\frac{x_{v0}}{r}\right)^2 + \left(\frac{y_{v0}}{r}\right)^2} \cdot \frac{x_{v0}}{r} \end{array} \right\} - x_v$$

$$fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0}) = \left\{ \begin{array}{l} y_{v0} - [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + \dots \\ F \cdot (r/R)^3] \cdot V \cdot \sqrt{\text{sen}^2 e \cdot \left(\frac{x_{v0}}{r}\right)^2 + \left(\frac{y_{v0}}{r}\right)^2} \cdot \frac{y_{v0}}{r} \end{array} \right\} - y_v$$

ii) Caso os valores de  $fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$  e  $fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$  não sejam suficientemente próximos de zero, calcula-se o valor dos fatores de correção  $\Delta x_{v0}$  e  $\Delta y_{v0}$ , que devem ser adicionados, respectivamente, aos valores atuais de  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$ . Os valores das correções  $\Delta x_{v0}$  e  $\Delta y_{v0}$  são calculados pelas seguintes equações, com base em aproximação de  $fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$  e  $fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$  efetuada de acordo com uma série de Taylor truncada:

$$f_{x_{v0}}(x_{v0} + \Delta x_{v0}, y_{v0} + \Delta y_{v0}) = f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) + \dots$$

$$\left[ \Delta x_{v0} \cdot \left( \frac{\partial f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} \right) + \Delta y_{v0} \cdot \left( \frac{\partial f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} \right) \right]$$

$$f_{y_{v0}}(x_{v0} + \Delta x_{v0}, y_{v0} + \Delta y_{v0}) = f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) + \dots$$

$$\left[ \Delta x_{v0} \cdot \left( \frac{\partial f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} \right) + \Delta y_{v0} \cdot \left( \frac{\partial f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} \right) \right]$$

iii) Na aproximação acima, assumindo-se que os valores de  $\Delta x_{v0}$  e  $\Delta y_{v0}$  são suficientes para resultar em  $f_{x_{v0}}(x_{v0} + \Delta x_{v0}, y_{v0} + \Delta y_{v0}) = 0$  e  $f_{y_{v0}}(x_{v0} + \Delta x_{v0}, y_{v0} + \Delta y_{v0}) = 0$ , tem-se:

$$\Delta x_{v0} \cdot \left( \frac{\partial f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} \right) + \Delta y_{v0} \cdot \left( \frac{\partial f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} \right) = -f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})$$

$$\Delta x_{v0} \cdot \left( \frac{\partial f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} \right) + \Delta y_{v0} \cdot \left( \frac{\partial f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} \right) = -f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})$$

Os valores de  $\Delta x_{v0}$  e  $\Delta y_{v0}$ , quando expressos na forma de álgebra matricial, podem ser calculados por:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} & \frac{\partial f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} \\ \frac{\partial f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} & \frac{\partial f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_{v0} \\ \Delta y_{v0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) \\ -f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0}) \end{pmatrix}$$

Sendo os elementos da matriz Jacobiana apresentada acima computados pelas seguintes expressões:

- Derivada de  $fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$  em relação a  $x_{v0}$ :

$$\frac{\partial fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} = 1 - \frac{x_{v0} \cdot V}{R} \cdot \left\{ \left( \frac{B}{r} + \frac{2 \cdot C}{R} \right) + \left( \frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S \cdot x_{v0} + \dots \right.$$

$$\left. \left[ \left( \frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{x_{v0} \cdot \text{sen}^2(e)}{S} \right] + \left[ D + E \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot \frac{S}{x_{v0}} \right\}$$

- Derivada de  $fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$  em relação a  $y_{v0}$ :

$$\frac{\partial fx_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} = - \frac{y_{v0} \cdot V}{R} \cdot \left[ \left( \frac{B}{r} + \frac{2 \cdot C}{R} \right) + \left( \frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S \cdot x_{v0} + \dots \right.$$

$$\left. \left( \frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{x_{v0}}{S} \right]$$

- Derivada de  $fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$  em relação a  $x_{v0}$ :

$$\frac{\partial fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial x_{v0}} = - \frac{x_{v0} \cdot y_{v0} \cdot V}{R} \cdot \left[ \left( \frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S + \dots \right.$$

$$\left. \left( \frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{\text{sen}^2(e)}{S} \right]$$

- Derivada de  $fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})$  em relação a  $y_{v0}$ :

$$\frac{\partial fy_{v0}(x_{v0}, y_{v0})}{\partial y_{v0}} = 1 - \frac{y_{v0} \cdot V}{R} \cdot \left\{ \left( \frac{F}{R^2} - \frac{D}{r^2} \right) \cdot S \cdot y_{v0} + \dots \right.$$

$$\left. \left[ \left( \frac{D}{r^2} + \frac{E}{R \cdot r} + \frac{F}{R^2} \right) \cdot \frac{y_{v0}}{S} \right] + \left[ D + E \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot \frac{S}{y_{v0}} \right\}$$

iv) A resolução do sistema de equações é então realizado pela Regra de Cramer para encontrar os incrementos dos fatores  $\Delta x_{v0}$  e  $\Delta y_{v0}$ , considerando um número máximo de 20 iterações ou de modo que a soma algébrica dos valores absolutos

das funções  $f_{x_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})$  e  $f_{y_{v0}}(x_{v0}, y_{v0})$  assume valores próximos de zero (menor que 0,001). Sendo assim, as estimativas de  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$  são atualizadas (com base em  $\Delta x_{v0}$  e  $\Delta y_{v0}$ ) por:

$$x'_{v0} = x_{v0} + \Delta x_{v0}$$

$$y'_{v0} = y_{v0} + \Delta y_{v0}$$

em que  $x'_{v0}$  e  $y'_{v0}$  são os novos valores das coordenadas  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$ .

Buscando simplificar as equações que definem as coordenadas  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$  do modelo de Richards e Weatherhead (1993), fizeram-se as deduções das derivadas em função de  $\theta$  (ângulo formado entre a direção de lançamento do jato de água e a linha da direção do vento) e  $r$  (distância radial ao aspersor em condição de ausência de vento), conforme descrito a seguir.

Seguindo recomendações de Newell (2003), considerou-se a Equação 2 como sendo:

$$Ra = RD \cdot S$$

com

$$RD = \left[ D \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + E \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 + F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^3 \right] \cdot V$$

As Equações 5 e 6, quando escritas em função de “ $\theta$ ” e “ $r$ ”, assumem, respectivamente, as seguintes formas:

$$x_v = r \cdot \cos(\theta) - Dv - RD \cdot S \cdot \cos(\theta)$$

$$y_v = r \cdot \sin(\theta) - RD \cdot S \cdot \sin(\theta)$$

Para a estimativa das coordenadas  $x_{v0}$  e  $y_{v0}$ , as equações acima podem ser escritas, considerando as Equações 1 e 2, como:

$$f_{x_{v0}}(\theta, r) = \left\{ \begin{array}{l} r \cdot \cos(\theta) - [A + B \cdot (r/R) + C \cdot (r/R)^2] \cdot V - \dots \\ [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + F \cdot (r/R)^3] \cdot V \cdot S \cdot \cos(\theta) \end{array} \right\} - x_v$$

$$f_{y_{v0}}(\theta, r) = \left\{ r \cdot \sin(\theta) - [D \cdot (r/R) + E \cdot (r/R)^2 + F \cdot (r/R)^3] \cdot V \cdot S \cdot \sin(\theta) \right\} - y_v$$

Sendo assim, de acordo com Burden e Faires (2003), o método de Newton pode ser aplicado da seguinte maneira:

i) Fazem-se as estimativas iniciais de  $\theta$  e  $r$ .

ii) Caso os valores de  $f_{x_{v0}}(\theta, r)$  e  $f_{y_{v0}}(\theta, r)$ , obtidos a partir da estimativa inicial feita, não sejam suficientemente próximos de zero, calcula-se o valor dos fatores de correção  $\Delta\theta$  e  $\Delta r$ , que devem ser adicionados, respectivamente, aos valores iniciais de  $\theta$  e  $r$ . Os valores das correções  $\Delta\theta$  e  $\Delta r$  são calculados pelas seguintes equações, com base em aproximação de  $f_{x_{v0}}(\theta, r)$  e  $f_{y_{v0}}(\theta, r)$  efetuadas de acordo com uma série de Taylor truncada:

$$f_{x_{v0}}(\theta + \Delta\theta, r + \Delta r) = f_{x_{v0}}(\theta, r) + \left[ \Delta\theta \cdot \left( \frac{\partial f_{x_{v0}}(\theta, r)}{\partial \theta} \right) + \Delta r \cdot \left( \frac{\partial f_{x_{v0}}(\theta, r)}{\partial r} \right) \right]$$

$$f_{y_{v0}}(\theta + \Delta\theta, r + \Delta r) = f_{y_{v0}}(\theta, r) + \left[ \Delta\theta \cdot \left( \frac{\partial f_{y_{v0}}(\theta, r)}{\partial \theta} \right) + \Delta r \cdot \left( \frac{\partial f_{y_{v0}}(\theta, r)}{\partial r} \right) \right]$$

iii) Na aproximação acima, assumindo-se que os valores de  $\Delta\theta$  e  $\Delta r$  são suficientes para resultar em  $f_{x_{v0}}(\theta + \Delta\theta, r + \Delta r) = 0$  e  $f_{y_{v0}}(\theta + \Delta\theta, r + \Delta r) = 0$ , tem-se:

$$\Delta\theta \cdot \left( \frac{\partial f_{x_{v0}}(\theta, r)}{\partial \theta} \right) + \Delta r \cdot \left( \frac{\partial f_{x_{v0}}(\theta, r)}{\partial r} \right) = -f_{x_{v0}}(\theta, r)$$

$$\Delta\theta \cdot \left( \frac{\partial f_{y_{v0}}(\theta, r)}{\partial \theta} \right) + \Delta r \cdot \left( \frac{\partial f_{y_{v0}}(\theta, r)}{\partial r} \right) = -f_{y_{v0}}(\theta, r)$$

Os valores de  $\Delta\theta$  e  $\Delta r$ , quando expressos em termos de álgebra matricial, podem ser calculados por:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_{x_{v0}}(\theta, r)}{\partial \theta} & \frac{\partial f_{x_{v0}}(\theta, r)}{\partial r} \\ \frac{\partial f_{y_{v0}}(\theta, r)}{\partial \theta} & \frac{\partial f_{y_{v0}}(\theta, r)}{\partial r} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\theta \\ \Delta r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -f_{x_{v0}}(\theta, r) \\ -f_{y_{v0}}(\theta, r) \end{pmatrix}$$

Sendo os elementos da matriz Jacobiana apresentada acima computados pelas seguintes expressões:

- Derivada de  $f_{x_{v0}}(\theta, r)$  em relação a  $\theta$ :

$$\frac{\partial f_{x_{v0}}(\theta, r)}{\partial \theta} = -r \cdot \text{sen}(\theta) - RD \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \left( \frac{1}{S} - 2 \cdot S \right)$$

- Derivada de  $f_{x_{v0}}(\theta, r)$  em relação a  $r$ :

$$\frac{\partial f_{x_{v0}}(\theta, r)}{\partial r} = \cos(\theta) \cdot \left[ 1 - \frac{V}{R} \cdot \left[ \left[ B + 2 \cdot C \cdot \left( \frac{r}{R} \right) \right] + S \cdot \left[ D + 2 \cdot E \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + 3 \cdot F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \right] \right]$$

- Derivada de  $f_{y_{v0}}(\theta, r)$  em relação a  $\theta$ :

$$\frac{\partial f_{y_{v0}}(\theta, r)}{\partial \theta} = \cos(\theta) \cdot \left[ r - RD \cdot \left( S + \frac{\cos(\theta)^2 \cdot \text{sen}(\theta)^2}{S} \right) \right]$$

- Derivada de  $f_{y_{v0}}(\theta, r)$  em relação a  $r$ :

$$\frac{\partial f_{y_{v0}}(\theta, r)}{\partial r} = \text{sen}(\theta) \cdot \left[ 1 - \frac{S \cdot V}{R} \cdot \left[ D + 2 \cdot E \cdot \left( \frac{r}{R} \right) + 3 \cdot F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \right]$$

iv) A resolução do sistema de equações é, então, realizada pela regra de Cramer para encontrar os incrementos dos fatores  $\Delta\theta$  e  $\Delta r$ , de modo que a soma algébrica dos valores absolutos das funções  $f_{x_{v0}}(\theta, r)$  e  $f_{y_{v0}}(\theta, r)$  assumam valores próximos de zero (menor que 0,001). Sendo assim, as estimativas de  $\theta$  e  $r$  são atualizadas (com base em  $\Delta\theta$  e  $\Delta r$ ) por:

$$\theta' = \theta + \Delta\theta$$

$$r' = r + \Delta r$$

em que  $\theta'$  e  $r'$  são os novos valores de  $\theta$  e  $r$ .