

ÍNDICE DE CAPACIDADE DO PROCESSO NA AVALIAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

ANDRÉ L. JUSTI¹, MARCIO A. VILAS BOAS², SILVIO C. SAMPAIO²

RESUMO: Analisar a qualidade da irrigação, além de avaliar seu bom funcionamento, é uma forma de verificar a viabilidade de sua implantação e operação. Como a uniformidade de distribuição é um dos parâmetros mais utilizados para essa avaliação, este trabalho objetivou utilizar técnicas de engenharia de qualidade, usando o índice de capacidade do processo (C_{pi}) para avaliar a uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação por aspersão convencional. Os ensaios foram conduzidos no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola, UNIOESTE, com dois aspersores modelo Super10, marca NAANDAN, espaçados 9 m entre si, durante 25 irrigações de 1 h cada. Os dados climáticos foram coletados a cada 10 min, por uma estação meteorológica sem fio. Encontraram-se um CUC médio de 79,72% e velocidade do vento média de 1,85 m s⁻¹. Foram aplicados os testes de controle de qualidade, elaborando os gráficos de controle de Shewhart e calculado o índice de capacidade do processo (C_{pi}), sendo que os resultados obtidos permitem afirmar que a utilização do índice de capacidade do processo torna-se uma ferramenta poderosa para classificar sistemas de irrigação em função de sua uniformidade de distribuição.

PALAVRAS-CHAVE: Controle de qualidade, velocidade do vento, uniformidade de distribuição.

PROCESS CAPACITY INDEX IN THE UNIFORMITY EVALUATION OF SPRINKLER IRRIGATION

ABSTRACT: Analyzing the irrigation quality, besides evaluating its good operation, is a form of verifying the viability of its implantation and operation. As the distribution uniformity is one of the most used parameters for that evaluation, this work aimed to use techniques of quality engineering, by using the process capacity index (C_{pi}) to evaluate the uniformity of water distribution in overhead irrigation by sprinkler. The research was carried out at the Experimental Center of Agricultural Engineering, UNIOESTE, with 2 sprinklers Super10 model, NAANDAN, spaced 9m between themselves, during 25 irrigations with 1 h each. The Weather data were collected every 10 min. by a wireless weather station. It was found a medium CUC of 79.72% and a medium wind speed of 1.85 m s⁻¹. It was applied quality control tests, elaborating SHEWHART control charts and it was calculated the process capacity index (C_{pi}). The obtained results allow us to affirm that the use of the process capacity index becomes a powerful tool to classify overhead irrigations in function of distribution uniformity.

KEYWORDS: Quality control, wind speed, distribution uniformity.

INTRODUÇÃO

A uniformidade de distribuição de sistemas de irrigação possui um papel importante na otimização do uso da água, com repercussões diretas na eficiência e na produção (CARRIÓN et al., 2001), e, geralmente, a uniformidade de distribuição é a principal maneira usada para determinar se um sistema de irrigação é aceitável ou não (BRENNAN, 2008).

Em campo, a importância de uniformidade de irrigação e sua influência no rendimento e eficiência de aplicação são bem visíveis. São usados frequentemente vários parâmetros de desempenho para descrever a distribuição de água de irrigação no campo, sendo que um dos mais

¹ Eng^o Agrícola, Doutorando Irrigação e Drenagem, UNESP, Botucatu - SP, Fone: (0XX14) 8129.7970, aljusti@fca.unesp.br

² Professor, Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UNIOESTE/CASCAVEL/CCET/PGEAGRI/RHESA, Fone: (0XX45) 3220.3262, ssampaio@unioeste.br; vilasboas@unioeste.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 12-1-2009

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 13-1-2010

importantes é a uniformidade de distribuição (CLEMMENS & MOLDEN, 2007). Dentre os coeficientes de uniformidade, o mais utilizado é o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC).

Diversos fatores influenciam na uniformidade de distribuição, desde os fatores de projeto até os climáticos, sendo que, na irrigação por aspersão, um dos mais importantes é a velocidade do vento.

Segundo CARRIÓN et al.(2001), para avaliar os efeitos da velocidade do vento na uniformidade de distribuição da irrigação por aspersão, é necessário mensurar a distribuição de água em campo sob diferentes condições de vento, para então proceder ao cálculo do coeficiente de uniformidade.

Como o CUC é um coeficiente para apenas um ensaio, para avaliar a uniformidade de distribuição ao longo de um ciclo de cultura ou do tempo, buscou-se utilizar o índice de capacidade do processo, aplicando um estudo de engenharia de qualidade, pois as técnicas de controle estatístico de qualidade foram desenvolvidas para avaliar a variabilidade ao longo do tempo (ciclo) do processo (MONTGOMERY, 2001).

Buscou-se, com este trabalho, analisar a uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação por aspersão, utilizando o índice de capacidade do processo.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram conduzidos no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola, NEEA, pertencente à Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, coordenadas 24°54' de latitude sul e 53°31' de longitude oeste, com altitude média de 750 m e clima subtropical temperado úmido, de acordo com a classificação climática de Köppen. A precipitação média anual é de 1.971 mm e a temperatura média anual é de 19,6 °C.

O conjunto avaliado constituiu-se de uma linha lateral com dois aspersores marca NAANDAN, modelo Super10, não compensante, bocal azul que, conforme o fabricante, para uma pressão de serviço de 300 kPa, possui vazão de 395 L h⁻¹, gerando um diâmetro irrigado de 16 m e, para o espaçamento de 9 x 9 m, possui coeficiente de uniformidade de até 92%. Na Figura 1, apresenta-se o esquema do sistema montado em campo.

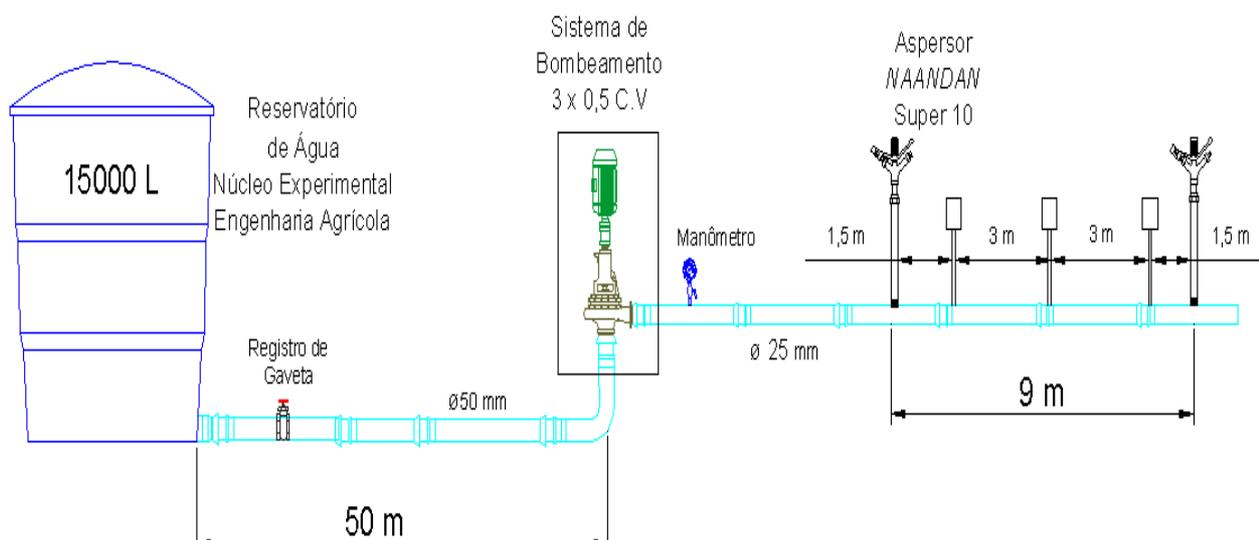


FIGURA 1. Esquema do sistema avaliado. **Evaluated system layout.**

O modelo Super10 é um conjunto composto por um adaptador F de ½", fixado em uma haste galvanizada de 8 mm diâmetro por 1,2 m de altura, ligado à lateral por um tubo de polietileno, com diâmetros externo e interno de 13 e 12 mm, respectivamente.

A linha lateral foi montada utilizando tubo de polietileno de 25 mm de diâmetro. A tubulação da linha principal utilizou tubos de PVC com 50 m de comprimento, operando com três bombas associadas em série, marca THEBE, modelo M2B-12X, com potência de 0,5 cv, 3.500 rpm, com vazão máxima de $5,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e uma pressão máxima de 260 kPa.

Foram realizados 25 ensaios, número de amostras recomendadas por MONTGOMERY (2001) para aplicação dos testes de controle de qualidade, com tempo de operação de 1 h, buscando manter em todos os ensaios as mesmas características de operação do sistema, ou seja, mesma pressão e tempo, fatores climáticos, que foram monitorados utilizando uma estação meteorológica sem fio (Wireless Weather Station) marca La Crosse, modelo WS-2310, sendo que as variações da velocidade do vento foram monitoradas em intervalos de 10 min.

Foi utilizado, para avaliação da uniformidade de distribuição de água, o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), dado pela eq.(1):

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

em que,

CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, %;

X_i - precipitação no coletor de ordem i, mm;

\bar{X} - média aritmética das precipitações, mm, e

n - número de coletores.

Para o cálculo do índice de capacidade do processo (C_{pl}), dado pela eq.(2), quanto à média amostral, foi fixado como valor-alvo a lâmina média informada pelo fabricante, que para a pressão de serviço de 300 kPa é $4,9 \text{ mm h}^{-1}$, e como limite inferior, a lâmina média do ensaio, cujo CUC foi 80,05%, por ser o mais próximo do aceitável pela norma, fixando assim a lâmina de $2,82 \text{ mm.h}^{-1}$.

$$C_{pl} = \frac{LCL - \bar{x}}{3\sigma} \quad (2)$$

em que,

LCL - limite inferior de especificação, mm;

\bar{x} - média amostral, mm, e

σ - desvio-padrão amostral da variável em estudo.

Para a construção dos gráficos de controle estatístico de qualidade de Shewhart, foi necessário calcular os Limites Inferior e Superior de Especificação, obtidos pelas eqs.(3) e (4), respectivamente.

$$LCL = \mu - 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$UCL = \mu + 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

em que,

μ - média dos ensaios, %;

n - número de ensaios, e

σ - desvio-padrão amostral.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, apresenta-se a estatística descritiva, onde foram calculados a média, desvio-padrão, coeficiente de variação, valores de máximo e mínimo para o CUC, a velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura. Foi realizado o teste de normalidade de Anderson-Darling, a

5% de significância, onde todas as variáveis apresentaram distribuição normal. O valor médio encontrado de CUC para as 25 irrigações foi 79,72%, e a velocidade do vento médio, 1,85 m s⁻¹. Ao longo do experimento, os valores máximos de CUC e velocidade do vento foram 89,45% e 2,97 m s⁻¹, respectivamente. Os valores de desvio-padrão obtidos a partir dos dados foram 3,74 e 0,70% para CUC e velocidade do vento, respectivamente. Quanto ao coeficiente de variação para o CUC, foi 4,72%, e para a velocidade do vento, 37,98%. Quanto aos fatores umidade relativa e temperatura, foram encontrados valores entre 30 e 58% para umidade relativa e 27,30 e 41,80 °C, e valores médios de 46,04% e 32,59 °C.

TABELA 1. Estatística descritiva dos dados coletados em campo (CUC, umidade relativa, temperatura e velocidade do vento). **Exploratory analysis of data collected on field (CUC, relative humidity, temperature and wind speed).**

Análise	CUC (%)	Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Umidade Relativa (%)	Temperatura (°C)
Norma para o CUC	80	--	--	--
Média	79,72	1,85	46,04	32,59
Desvio-Padrão	3,74	0,70	8,19	3,94
Variância	14,05	0,49	67,12	15,56
Coefficiente de Variação	4,72	37,98	17,80	12,10
Mínimo	72,25	0,44	30,00	27,30
Máximo	89,45	2,97	58,00	41,80
Teste de Normalidade (Anderson-Darling)	Não se rejeita*	Não se rejeita*	Não se rejeita*	Não se rejeita*

* Nível de 5% de significância.

DECHMI et al. (2003) observaram em seu estudo do espaçamento na aplicação de água por aspersão no milho, que a uniformidade em 48% dos ensaios foi menor que o aceitável, sendo que os valores extremos de uniformidade corresponderam aos maiores e menores valores de vento. Salientaram, ainda, o que reforça os resultados obtidos neste experimento, que, para o sistema que avaliaram, grande parte da variabilidade, em torno de 90%, decorreu em função da velocidade do vento.

Houve tendência do CUC em diminuir com o aumento da velocidade do vento, sendo que a maior parte dos ensaios foi conduzida em condições de vento com velocidade acima de 1,5 m s⁻¹. Essa tendência apresentada caracteriza uma relação entre CUC e velocidade do vento, pois como se percebeu neste estudo, um parâmetro aumenta em função do decréscimo de outro, sendo que, ao testar a regressão linear, encontrou-se um coeficiente de determinação R² = 83,6%. Percebe-se, pela Figura 2, que ocorreu uma concentração dos ensaios com valor de CUC acima de 80% entre as velocidades de 0,5 e 1,5 m s⁻¹ e 11 irrigações resultaram em coeficientes de uniformidade abaixo de 80%, sendo que as mesmas resultaram da irrigação com velocidade do vento entre 2,0 e 3,0 m s⁻¹.

SOUZA et al. (2008), estudando o desempenho de um sistema de irrigação por aspersão convencional em vila rural, em função dos fatores climáticos, obteve relação entre CUC e velocidade do vento semelhante a este estudo, com valores de uniformidade também abaixo do mínimo aceitável de 80%, e obtendo um CUC médio de 77,9%. Sendo este um valor semelhante ao encontrado com este trabalho, pois o valor médio do CUC foi 79,48%, também ficando abaixo do mínimo para tal parâmetro, obtendo regressão linear com coeficiente de determinação R² = 74%.

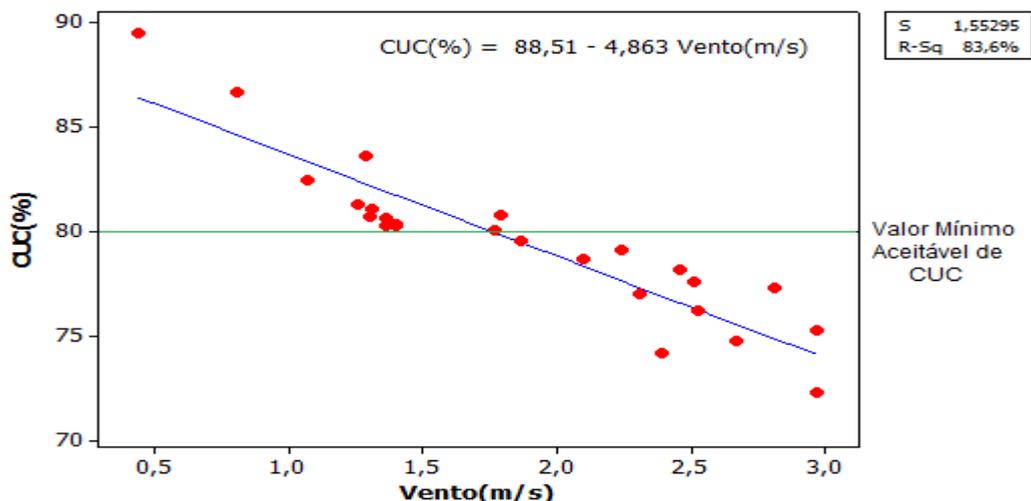


FIGURA 2. Relação entre CUC e velocidade do vento. **Relation between CUC and wind speed.**

Resultado semelhante foi encontrado também por AZEVEDO et al. (2000), estudando a influência de fatores climáticos em sistemas por aspersão de alta pressão, que relataram que, quando a velocidade do vento aumentou de 1 para 7 m.s⁻¹, o CUC caiu de 83 para 42%, ou seja, 50% menos de uniformidade com o aumento da velocidade do vento. Mesmo não operando com velocidade do vento alta, conforme o aumento desde fator, o CUC decaiu, chegando a 48% dos ensaios, ficando abaixo de 80%. Já PLAYÁN et al. (2006), estudando a uniformidade de distribuição de água usando modelos balísticos, utilizando três modelos de aspersores, verificaram que, em todos os casos, com o aumento da velocidade do vento, a uniformidade foi afetada sensivelmente, sendo que, para a pressão de serviço de 300 kPa, ao testar a regressão linear, encontraram coeficiente de determinação R² de até 73%.

Na Figura 3, podemos observar o comportamento do sistema de irrigação estudado ao longo dos 25 ensaios e verifica-se que um dos ensaios esteve acima do Limite Superior de Controle (UCL = 87,52%), e nenhum dos ensaios obteve CUC menor que o Limite Inferior de Controle (LCL = 71,45%). O restante dos ensaios permaneceu dentro dos limites, sendo que o valor médio foi 79,49%. Exceto o ensaio 8 (CUC = 89,45%), os demais ensaios estão sob controle, porém tendo grande variação em relação ao valor médio.

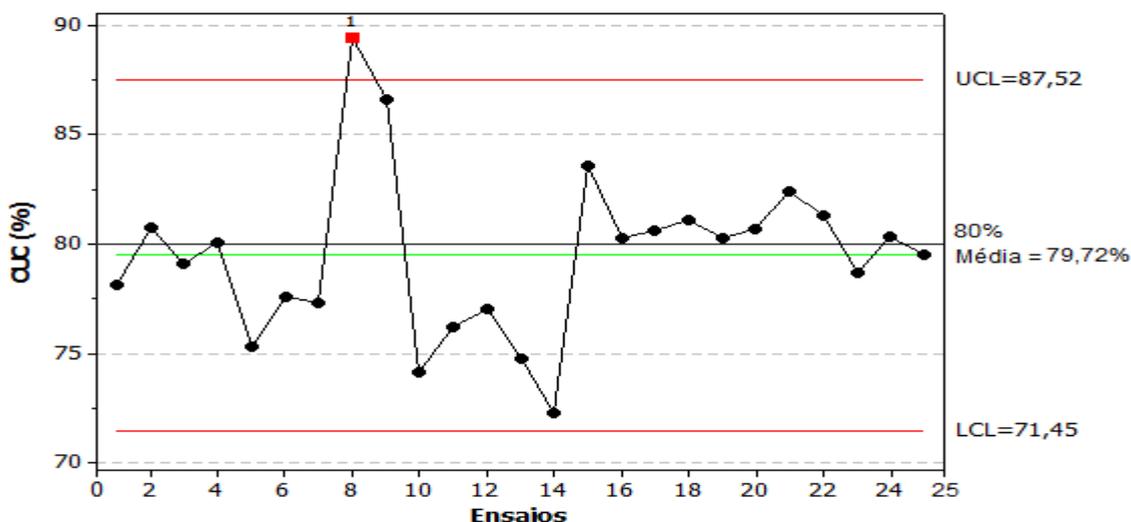


FIGURA 3. Controle de qualidade de Sewhart apresentando os limites superior e inferior de especificação, dados pelas eqs.(3) e (4), média e valor de referência para o CUC (80%). **Quality control graph showing the upper and lower limits of specification, given by equations 3 and 4, average and reference value to CUC (80%).**

O sistema apresentou um ensaio com desempenho acima do limite superior, o que é considerado aceitável, pois foi encontrado o maior coeficiente de uniformidade, chegando próximo ao indicado pelo catálogo do fabricante, o qual afirma que, para a pressão de serviço usada no estudo, o emissor pode chegar a coeficientes de uniformidade de até 92%. Já a média foi inferior ao valor mínimo aceitável para o CUC (80%), fato esse ocorrido em função de fatores diversos, sendo a velocidade do vento o fator de maior influência em tal variação.

Na Tabela 2, apresentam-se os valores calculados da capacidade do processo (C_{pl}), ao longo dos 25 ensaios, indicando que, para um CUC entre 70 e 75%, o índice de capacidade do processo obtido foi 2,26; quando os valores de CUC estão entre 75 e 80%, o índice de capacidade do processo encontrado foi 2,97 e, quando o CUC foi maior que 80%, o índice de capacidade do processo foi 3,00.

TABELA 2. Índice de capacidade do processo. **Process capacity index.**

	CUC (%)	fi	Cpl
Irrigação	70 - 75	3	2,26
	75 - 80	9	2,97
	> 80	13	3,00
	Total	25	

Conforme a uniformidade de distribuição aumenta, o índice de capacidade também aumenta, ocorrendo uma relação entre tais variáveis expressa pela equação $CUC (\%) = 46,07 + 10,55 C_{pl}$, com coeficiente de determinação $R^2 = 78\%$.

Quanto aos valores de C_{pl} , MONTGOMERY (2001) afirmou que, para considerar processos novos aceitáveis, o valor mínimo do índice de capacidade do processo (C_{pl}) deve ser 1,60, e o sistema estudado obteve índices acima de 2,00, sendo um sistema novo, em seu primeiro ano de uso.

Resultados semelhantes quanto à viabilidade da utilização do controle de qualidade foram encontrados por CHEN et al. (2007), que afirmaram, após estudar a capacidade do processo para medidas unilaterais, que esse índice, utilizando gráficos de controle, pode ser usado não somente para monitorar a estabilidade do processo, mas também para monitorar a qualidade do mesmo, acompanhando índices de especificação e avaliando sua estabilidade.

CONCLUSÕES

O sistema de irrigação estudado apresentou coeficiente de uniformidade de distribuição médio muito próximo do mínimo aceitável, tendo grande parte dos ensaios resultado em valores de CUC acima de 80%.

Entre o CUC e a velocidade do vento, foi obtido um coeficiente de determinação para regressão linear de 83,6%, e entre o CUC e o índice de capacidade do processo, esse coeficiente foi 78%.

O aumento do índice de capacidade do processo mostrou-se diretamente proporcional ao aumento da uniformidade de distribuição.

O índice de capacidade do processo mostrou-se capaz de diagnosticar se a irrigação tem capacidade de se manter sob controle e constante, ou seja, se será capaz de manter níveis aceitáveis de uniformidade.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, J.H.; BERNARDO, S.; RAMOS, M.M.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R. Influência de fatores climáticos e operacionais sobre a uniformidade de distribuição de água, em um sistema

de irrigação por aspersão de alta pressão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.2, p.152-158, 2000.

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, 2008.

CARRIÓN, P.; TARJUELO, J.M.; MONTERO, J. SIRIAS: A simulation model for sprinkler irrigation: I. A description of model. *Irrigation Science*, Heidelberg, v.20, n.2, p.73-84, 2001.

CHEN, K.S.; HUANG, H.L.; HUANG, C.T. Control charts for one-sided capability indices. *Quality & Quantity*, Amsterdam, v.41, n.3, p.413-427, 2007.

CLEMMENS, A.J.; MOLDEN, D.J. Water uses and productivity of irrigation systems. *Irrigation Science*, Heidelberg, v.25, n.3, p.247-261, 2007.

DECHMI, F.; PLAYÁN, E.; CAVERO, J.; FACI, J.M.; MARTINEZ-COB, A. Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (*Zea mays*). *Irrigation Science*, Heidelberg, v.22, n.2, p.67-77, 2003.

MONTGOMERY, D.C. *Introduction to statistical quality control*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 500 p.

PLAYÁN, E.; ZAPATA, N.; FACI, J.M.; TOLOSA, D.; LACUEVA, J.L.; PELEGRÍN, J.; SALVADOR, R.; SÁNCHEZ, I.; LAFITA, A. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.84, p.89-100, 2006.

SOUZA, E.A.M.; SOUZA, P.C.; VILAS BOAS, M.A. Avaliação do desempenho de sistemas de irrigação por aspersão convencional fixo e gotejamento em vila rural. *Irriga*, Botucatu, v.11, n.1, p.47-62, 2008.