

Samuel Silva^{1*}

José Dantas Neto²

Iêdo Teodoro³

Marcos A. L. Santos⁴

Anderson Bruno A. de Andrade⁵

Mailson A. Cordão⁶

*Autor para correspondência

Recebido para publicação em 05/04/2015. Aprovado em 06/05/2015.

¹Mestrando em Engenharia Agrícola na UFCG, sam_capela@hotmail.com

² Prof. Dr. do CTRN/UFCG, zedantas1955@gmail.com

³ Prof. Dr. do CECA/UFAL, iedoteodoro@ig.com.br

⁴Mestrando em Agronomia na UNESP-Botucatu-SP, Brasil, liodorio@hotmail.com

⁵Graduando em Agronomia, UAGRA /CCTA/UFCG, Pombal, PB, bdeandrade3@gmail.com

⁶Graduando em Agronomia, UAGRA /CCTA/UFCG, Pombal, PB

Qualidade da irrigação por gotejamento em cultivos consecutivos de cana-de-açúcar

RESUMO

A análise qualitativa da irrigação é essencial para se ter máxima eficiência no uso da água. Assim, este trabalho teve, como objetivo, avaliar a qualidade da irrigação via gotejamento durante três anos de utilização na cultura da cana-de-açúcar. As avaliações foram realizadas no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, nos anos de 2009, 2010 e 2011. Os coeficientes calculados foram: coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), uniformidade estatística (Us) e eficiência global da irrigação (Ea). Para a análise de controle estatístico e capacidade do processo foram calculados os índices de capacidade potencial para processos centrados (Cp) e capacidade efetiva para processos não centrados (Cpk). Os valores de CUD variaram de 94,66 a 98,85%; entretanto, CUC e Us estiveram no intervalo de 97,31 a 98,91% e de 95,82 a 98,45, respectivamente. A Ea foi de 92,8; 93,9 e 89,9% no primeiro, segundo e terceiro ano, respectivamente. O processo de irrigação por gotejamento na cana-de-açúcar mostrou-se adequado nesses três anos, visto que os índices de capacidade se mantiveram acima do limite mínimo requerido.

Palavras-chave: uniformidade de distribuição de água, eficiência de aplicação de água, controle estatístico.

Drip irrigation quality in consecutive crops of sugarcane

ABSTRACT

The qualitative analysis of irrigation is essential to have maximum water use efficiency. Thus, this study aimed to assess the drip irrigation quality in three years within the sugarcane crop. Assessments were performed at the Center of Agrarian Sciences of Federal University of Alagoas, in the years 2009, 2010 and 2011. The calculated coefficients were: uniformity distribution coefficient (CUD), uniformity coefficient of Christiansen (CUC), statistical uniformity (Us) and overall efficiency of irrigation (Ea). For the analysis of statistical control and process capability the indexes of potential capability for centered processes (Cp) and effective capability for non-centered processes (Cpk) were calculated. CUD values ranged from 94.66 to 98.85%. However, CUC and Us were in the range from 97.31 to 98.91% and from 95.82 to 98.45, respectively. The Ea was 92.8, 93.9 and 89.9% in the first, second and third year, respectively. The process of drip irrigation in the sugarcane has been adequate in these three years, since the capability indices remained above the minimum required limit.

Key words: water uniformity of distribution, water application efficiency, statistical control

INTRODUÇÃO

A irrigação por gotejamento é muito utilizada nos canaviais do Nordeste brasileiro (Souza et al., 2012) e em outras culturas, em virtude da sua alta eficiência no uso da água (Boas et al., 2011; Martins et al., 2011; Yao et al., 2010). Porém, para maximizar a eficiência do sistema de irrigação é preciso avaliar o desempenho hidráulico, a uniformidade de distribuição de água pelos emissores e realizar ajustes necessários na operação e no manejo (Peixoto et al., 2005; Silva et al., 2007; Benfício et al., 2009; Caitano et al., 2011;) visto que, de acordo com Nascimento et al. (2009), a eficiência e a uniformidade dos sistemas de irrigação localizada são afetadas pela variação de vazão dos emissores, ao longo da linha lateral, principalmente por fatores internos, como: variação de pressão por perda de carga e por desnível geométrico, obstrução de emissores e variações de temperatura da água ao longo da linha de emissão. Merriam & Keller (1978) afirmam que a uniformidade do sistema também é influenciada por falhas no manejo, por mudanças físicas dos componentes, pelo envelhecimento dos emissores e pelo controle de qualidade nos processos de fabricação.

Observam-se, na avaliação qualitativa do sistema de irrigação, a variabilidade entre os emissores, decorrentes do processo de fabricação e a variabilidade durante o processo de irrigação no campo utilizando-se gráficos de controle e índices de especificação (Chen et al., 2007). Essas técnicas podem ser usadas não apenas para monitorar a uniformidade da vazão, mas também para monitorar a qualidade do emissor com relação aos limites de especificação, de vez que a vazão do emissor está inevitavelmente sujeita à variação ao longo do tempo de uso podendo, em certo momento, não atender às especificações.

A análise de capacidade do processo é o método mais adequado para avaliar se a vazão do emissor atende às especificações de fabricação; no entanto, para esse tipo de análise o processo precisa estar na condição de controle estatístico, em que as inferências sobre o comportamento do processo são feitas a partir de um modelo de probabilidade. De modo geral, o modelo mais utilizado é o da curva normal de Gauss (Montgomery, 2001). Como a variação de vazão tem distribuição normal é possível utilizar conceitos estatísticos para se fazer análises quantitativas e, assim, observar a qualidade da irrigação (Frizzone et al., 1998).

Os índices de capacidade potencial para processos centrados (C_p) e capacidade efetiva para processos não centrados (C_{pk}) são os mais utilizados em análises de capacidade sendo que, quanto maior o seu valor melhor o processo consegue atender às exigências (Pearn & Lin, 2004). Conforme os autores, se $C_p < 1$, o processo não é capaz e se deve recorrer a outro que atenda às especificações. Se $1 \leq C_p \leq 1,33$ a capacidade do processo está em torno da diferença entre as especificações; neste caso, deve-se utilizar cartas de controle para manter o processo estável; e se $C_p > 1,33$, a capacidade do processo é adequada e está dentro da tolerância exigida; se, porém, a faixa ocupada pelo processo no histograma de probabilidade é menor que a metade da faixa de tolerância, pode-se dizer que o mesmo é excelente ou

altamente confiável e não é preciso tomar maiores cuidados com o processo.

Tendo em vista a deficiência de estudos visando à análise qualitativa de sistemas de irrigação por gotejamento na cana-de-açúcar, o objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade da irrigação via gotejamento, durante três anos de utilização na referida cultura utilizando-se a análise de controle estatístico e da capacidade do processo.

MATERIAL E MÉTODOS

As avaliações foram realizadas no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (longitude: 09° 28' 02" S; 35° 49' 43" W; altitude: 127 m) em Rio Largo, AL, nos anos de 2009 (gotejadores novos), 2010 (um ano de uso) e 2011 (dois anos de uso), numa área experimental de 0,5 ha. O sistema de irrigação utilizado foi composto por mangueiras gotejadoras de 22 mm de diâmetro, com gotejadores autocompensantes espaçados de 0,5 m e 2,0 m entre linhas, pressão de serviço de 16 mca e vazão nominal de 1,0 L h⁻¹, instalados superficialmente em um experimento com cana-de-açúcar.

Para a coleta dos dados utilizou-se o método de avaliação proposto por Keller & Karmeli (1974), os quais recomendam a obtenção de vazão em quatro pontos ao longo da linha lateral, ou seja, no primeiro gotejador, nos gotejadores situados a 1/3 e a 2/3 do comprimento da lateral e no último gotejador. As linhas laterais, selecionadas ao longo da linha de derivação, foram a primeira, as situadas a 1/3 e a 2/3 do comprimento e a última linha lateral. Nesses gotejadores foram coletados os volumes de água durante 30 minutos, com três repetições.

A uniformidade de vazão foi avaliada através do coeficiente de uniformidade de distribuição CUD (Keller & Karmeli, 1974), coeficiente de uniformidade de Christiansen CUC (Christiansen, 1942) e coeficiente de uniformidade estatística U_s (Favetta & Botrel, 2001) conforme as Eqs. 1, 2 e 3, respectivamente.

$$CUD = 100 \frac{q_{25\%}}{q_m} \quad (1)$$

Em que:

CUD – coeficiente de uniformidade de distribuição (%)

$q_{25\%}$ - média do menor quartil das vazões observadas (L h⁻¹)

q_m - vazão média dos gotejadores (L h⁻¹)

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_m|}{nq_m} \right) \quad (2)$$

Em que:

CUC-coeficiente de uniformidade de Christiansen (%)

q_i -vazão de cada gotejador (L h⁻¹)

q_m - vazão média dos gotejadores (L h⁻¹)

n- número de gotejadores avaliados

$$U_s = 100(1 - CV) \quad (3)$$

Em que:

U_s -uniformidade estatística (%)

CV -coeficiente de variação de vazão dos gotejadores (%)

Os respectivos intervalos de confiança do Coeficiente de Variação (CV) foram determinados através da metodologia de Bralts & Kesner (1983) que utilizam a combinação das Eqs. 4 e 5, a nível de 1% de probabilidade de erro.

$$P \left(CV - t_{\left(\frac{\alpha}{2}\right)} S_{CV} \leq CV \leq CV + t_{\left(\frac{\alpha}{2}\right)} S_{CV} \right) = 1 - \alpha \quad (4)$$

Em que:

t_{α} -valor de t student para os dados

α -nível de significância desejado

S_{CV} - desvio padrão do coeficiente de variação, calculado pela Eq. 5

$$S_{CV} = \frac{CV}{\sqrt{2n}} \sqrt{1 + 2(CV^2)} \quad (5)$$

Em que:

n - número de observações

Os valores de eficiência global da irrigação (E_a) foram estimados pela Eq. 6, a partir da uniformidade de distribuição (CUD) e da eficiência de armazenamento de água no solo (K_s).

$$E_a = K_s CUD \quad (6)$$

Em que:

K_s - representa a razão água transferida/água aplicada

O coeficiente de transmissividade ou de armazenamento de água no solo (K_s) utilizado, foi de 0,95, conforme a classificação de Keller & Karmeli (1974), devido à textura do solo da área experimental (média-argilosa), ao clima (tropical semiúmido) e à profundidade do sistema radicular da cana-de-açúcar (< 0,75 m).

Os valores de vazão dos gotejadores foram submetidos ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (K-S) com a modificação de Lilliefors (1967) para verificar a distribuição normal dos dados, com 0,05 de significância.

A probabilidade normal de ocorrência de determinada vazão entre os gotejadores do sistema foi determinada segundo as Eqs. 7 e 8.

$$P = 0,5 - |f(x; \mu, \sigma) - 0,5| \quad (7)$$

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\left(\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (8)$$

Em que:

P - probabilidade

f - retorna a distribuição cumulativa normal para a média especificada e o desvio padrão, partindo do infinito negativo até o valor de x

x -valor cuja distribuição se deseja obter

μ -média aritmética da distribuição

σ -desvio padrão da distribuição

Para explicar a distribuição normal dos dados foi ajustado um modelo matemático de distribuição normal de Gauss para os valores de probabilidade calculados, através do software SigmaPlot 10.0:

$$P = y_0 + ae^{-\left[-0,5\left(\frac{|x-x_0|}{b}\right)^c\right]} \quad (9)$$

Em que:

P - probabilidade

a, b, c, y_0 e x_0 - coeficientes de ajuste da equação

x - vazão do gotejador ($L h^{-1}$)

Para quantificar a aproximação dos dados estimados aos observados aplicou-se o coeficiente de concordância de Willmontt, representado pela letra “d” (Willmontt, 1981). O coeficiente d expressa a concordância relativa entre as estimativas e os dados observados, variando de zero, que indica nulidade, a 1, que indica exatidão perfeita. A estimativa do modelo proposto também foi avaliada pelo teste estatístico t de Student.

A avaliação realizada em cada ano foi considerada espaço amostral para a análise do controle de qualidade da vazão nos gotejadores e baseada nos gráficos de controle de Shewhart (1931), que são ferramentas eficientes no atendimento às normas de qualidade, além de serem utilizados para identificar quando um processo se encontra fora de controle. Este gráfico é representado por uma Linha Central (LC) ou linha média (LM), que reproduz o valor médio da característica de qualidade e duas outras linhas horizontais denominadas, respectivamente, Limite Superior de Controle (UCL) e Limite Inferior de Controle (LCL). Os dois limites ficam a uma distância de três desvios-padrão da média da população, conforme as Eqs. 10 e 11 (Shewhart, 1931). O gráfico possibilita a apresentação de pontos amostrais dentro dos limites de controle, o que equivale a não rejeitar a hipótese de que o processo está sob controle estatístico e pontos fora dos limites equivalem a rejeitar esta hipótese, conforme Montgomery (2001).

$$UCL = \mu + 3\sigma = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{s}}{c_4} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i}{n} + 3 \frac{\sum_{i=1}^n s_i/n}{c_4} \quad (10)$$

$$LCL = \mu - 3\sigma = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{s}}{c_4} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i}{n} - 3 \frac{\sum_{i=1}^n s_i/n}{c_4} \quad (11)$$

Em que:

μ - média da população

σ - desvio padrão da população

\bar{X} -média da população estimada a partir das médias das amostras

\bar{s} - desvio padrão da população estimado a partir dos desvios padrões das amostras

x_i - média da amostra

s_i - desvio padrão da amostra

c_4 - fator de correção usado para se estimar σ e depende do número de amostras n

Determinaram-se, para avaliar a capacidade dos gotejadores em atender à especificação de fabricação, os índices de capacidade potencial para processos centrados (C_p) e de capacidade efetiva para processos não-centrados (C_{pk}) (Pearn & Lin, 2004), ou seja, estudou-se a variação de vazão observada ao longo dos anos esteve mesmo dentro dos limites de especificação do fabricante, empregando-se as seguintes equações:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (12)$$

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right) \quad (13)$$

Em que:

USL - limite superior de especificação

LSL - limite inferior de especificação

μ - média observada do processo

σ - desvio padrão dos dados observados

C_{pu} - índice de capacidade para a distância entre a média do processo e USL

C_{pl} - índice de capacidade para a distância entre a média do processo e LSL

Os limites de especificação utilizados para a tolerância de variação de vazão corresponderam à variação de $\pm 15\%$ da média-alvo, a qual foi a vazão nominal dos gotejadores ($1,0 \text{ L h}^{-1}$).

O índice que representa percentualmente o quanto a faixa do processo ocupa o campo de tolerância (ICP), foi determinado pela Eq. 14, em que o processo, em condições ideais de capacidade, deve ter uma folga de pelo menos 10% em cada lado do histograma, isto é, deve ocupar no máximo 80% do campo de tolerância.

$$ICP = \frac{1}{C_p} \times 100 \quad (14)$$

A taxa de rejeição do produto (em %) foi determinada em função dos gotejadores que apresentaram vazão além dos limites de especificação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de CUD, CUC e U_s para o sistema de irrigação por gotejamento avaliado durante três anos em cultivos de cana-de-açúcar na região de Rio Largo, estão apresentados na Tabela 1. Os dados obtidos em campo indicam, através dos valores de CUD, que o sistema de irrigação tinha uniformidade excelente nos três anos (97,63; 98,85 e 94,66%), conforme a classificação de Bralts & Kesner (1983). A diferença entre o primeiro e o último ano foi de 2,97%. Os valores de CUC revelam que o sistema também teve uniformidade excelente nos três anos (98,32; 98,91 e 97,31%), de acordo com os critérios de classificação de Bernardo et al. (2006), sendo que no último ano se observa uma redução de 1,01% em referência ao primeiro. Esta mesma classificação foi encontrada para os valores de U_s (97,91; 98,45 e 95,82%, os quais constam na Tabela 1, seguidos dos respectivos valores do intervalo de confiança), conforme os critérios de Favetta & Botrel (2001), porém a redução de U_s no mesmo período foi de 2,09%. Observa-se que CUC foi, em média, nos três anos, 1,2% maior que CUD e 0,8% maior que U_s . A U_s foi maior que CUD em torno de 0,4% nos três anos. Esta alta uniformidade ocorreu porque foram adotadas práticas criteriosas de operação do equipamento, como melhoria no sistema de filtragem, limpeza e substituição das fitas gotejadoras entupidas ou danificadas, o que fez com que o sistema apresentasse pouco número de gotejadores entupidos. Souza et al. (2006) encontraram, ao avaliar a uniformidade de distribuição de sistemas de irrigação por gotejamento, 38,7% dos lotes avaliados com CUD acima de 90%.

Tabela 1. Vazão média dos emissores (q_m), média das 25% menores vazões dos emissores ($q_{25\%}$), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), uniformidade estatística (U_s) com seu respectivo Intervalo de confiança (IC) e Eficiência global da irrigação (E_a) por gotejamento durante 2009, 2010, 2011 além de avaliação média dos 3 anos (Av. Média)

Parâmetros utilizados na avaliação	Valores obtidos			Av. Média
	2009	2010	2011	
q_m (L h^{-1})	1,04	1,10	1,09	1,07
$q_{25\%}$ (L h^{-1})	1,01	1,09	1,03	1,04
CUD (%)	97,63	98,85	94,66	97,05
CUC (%)	98,32	98,91	97,31	98,18
U_s (%)	97,91	98,45	95,82	97,40
IC (%)	12,41	12,41	12,43	12,42
E_a (%)	92,8	93,9	89,9	92,2

O sistema apresentou eficiência excelente nos dois primeiros anos de aplicação e boa no terceiro ano (Tabela 1), conforme Merriam & Keller (1978) em que, para ser excelente, a eficiência deve estar acima de 90%. Esta alta eficiência ocorreu porque houve manutenção adequada do sistema de irrigação em que se fizeram necessárias a análise e a calibração do sistema a fim de possibilitar sua

implementação, de modo que as demais irrigações pudessem ser conduzidas com bastante eficiência (Silva & Silva, 2005). Como o entupimento dos gotejadores causado por sólidos em suspensão também pode diminuir a eficiência do sistema de irrigação, em que, partículas de areia e silte podem ser conduzidas para o interior das fitas gotejadoras (Souza et al., 2012; Resende et al., 2004), a

excelente e boa eficiência foi obtida por meio da adoção de práticas de manejo, como limpeza periódica dos filtros, desentupimento dos gotejadores por meio de injeção de cloro no sistema e limpeza das linhas laterais, o que possibilitou pressão adequada nos pontos de emissão e, conseqüentemente, maior uniformidade na vazão.

A Figura 1 apresenta as análises de controle de qualidade para medidas individuais de vazão dos gotejadores representadas pelo gráfico de Shewhart, com a determinação da linha média, dos limites superior (UCL) e inferior (LCL) de controle estatístico, além dos limites de especificação (USL e LSL). Observa-se que, à medida que o sistema vai sendo utilizado no decorrer dos anos, ocorre aumento na variação de vazão dos gotejadores. Assim,

teoricamente, enquanto em uma fração da área cultivada ocorre irrigação excessiva, em outra ocorre déficit de água; no entanto, em todos os anos os limites superior (UCL) e inferior (LCL) de controle estiveram dentro dos limites superior (USL=1,15 L h⁻¹) e inferior (LSL=0,85 L h⁻¹) de especificação. Quanto à vazão, as médias obtidas nas avaliações (Tabela 1) foram superiores à média-alvo ou vazão nominal (1,00 L h⁻¹) em 3,6; 9,8; 8,1 e 7,2% nos 1º, 2º e 3º anos e na avaliação média, respectivamente. Esses valores estão próximos da metade do limite de variação especificada (7%), indicando que a variabilidade do processo permite atender às especificações adotadas para o gotejador.

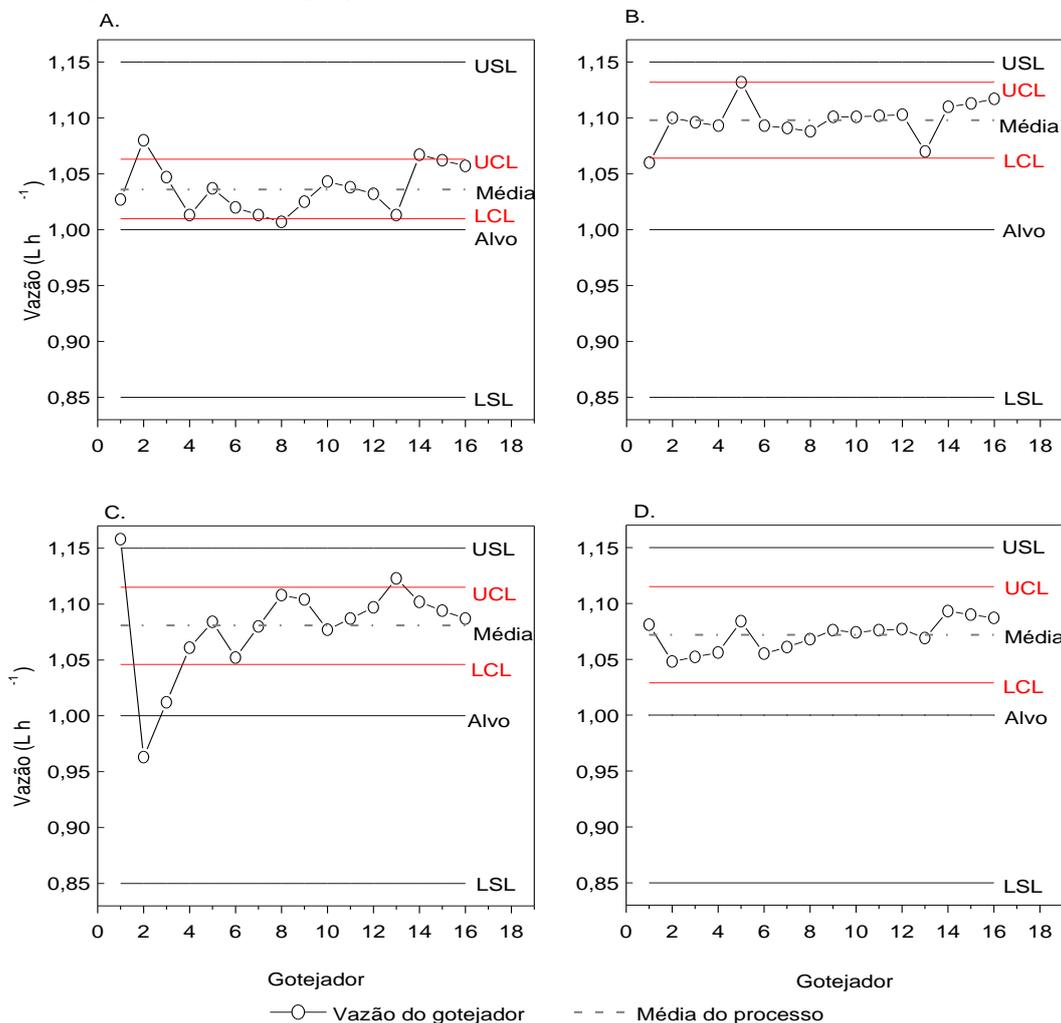


Figura 1. Limites de controle (UCL e LCL), limites de especificação (USL e LSL) e perfil de vazão de gotejadores utilizados na irrigação da cana-de-açúcar durante 2009 (A), 2010 (B), 2011 (C) e avaliação média dos 3 anos (D)

Martins et al. (2011) e Reis et al. (2005) também observaram que os sistemas de irrigação por gotejamento em estudo aplicavam água acima do necessário. Esta diferença entre as vazões coletadas e as vazões média e nominal, pode ser atribuída a gotejadores obstruídos ou à presença de bolsas de ar na parte final das linhas laterais (Souza et al., 2006). Haja vista que, apesar de serem realizadas práticas adequadas de manejo, essas variações foram inevitáveis devido ao fato de que o sistema esteve exposto à interferência de fatores hidráulicos e ambientais, não sendo possível ter um controle de 100%; assim, a sistematização de avaliações periódicas nos equipamentos

de irrigação auxilia a tomada de decisão quanto às melhorias a serem realizadas no mesmo.

Na Figura 1A observa-se, na avaliação dos gotejadores no primeiro ano, que dois excederam o UCL (1,063 L h⁻¹) e um esteve abaixo de LCL (1,010 L h⁻¹); no segundo ano (Figura 1B), apenas um foi maior que UCL (1,132 L h⁻¹) e um menor que LCL (1,064 L h⁻¹). A variação maior foi encontrada no terceiro ano (Figura 1C), em que dois gotejadores apresentaram vazão acima de UCL (1,115 L h⁻¹) e dois abaixo de LCL (1,046 L h⁻¹); apesar disto, a análise feita com a média das vazões de cada gotejador avaliado nos três anos (Figura 1D) mostra que todas as

vazões estiveram dentro dos limites estatísticos de controle (1,115 e 1,029 L h⁻¹) indicando que, quando o mesmo emissor é avaliado em anos diferentes, ocorrem variações na sua vazão, em virtude das peculiaridades e problemas específicos de cada período mas quando esses são resolvidos, contribuem para que a vazão dos gotejadores do sistema, como um todo, se mantenha dentro dos padrões.

Os resultados da aplicação do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov com a modificação de Lilliefors (1967), mostram que nos três anos em que o sistema foi avaliado a vazão dos gotejadores apresentou distribuição normal ($p > 0,15$) com 0,05 de significância (Tabela 2) mostrando que, apesar da redução da vida útil do sistema de irrigação (o qual apresenta desgaste à medida que vai sendo utilizado), as vazões dos gotejadores se mantiveram dentro da normalidade estatística.

Tabela 2. Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov com a modificação de Lilliefors (1967), para a vazão de gotejadores utilizados na irrigação da cana-de-açúcar durante 2009, 2010, 2011 e avaliação média dos 3 anos (Av. Média)

Ano	Normalidade a 5%			
	Valor	Vcrit	p-valor	Normal
2009	0,108	0,213	$p > 0,15$	Sim
2010	0,152	0,213	$p > 0,15$	Sim
2011	0,156	0,213	$p > 0,15$	Sim
Av. média	0,128	0,213	$p > 0,15$	Sim

O modelo de distribuição normal de Gauss usado para estimar os valores de probabilidade, apresentou coeficientes de ajuste significativos a 0,01 e 0,05 de probabilidade de erro em todos os anos, exceto no terceiro ano, em que um dos coeficientes não teve significância estatística (Tabela 3), pois a avaliação média mostrou o menor EPE ($\pm 0,0007$) e o maior foi observado no terceiro ano ($\pm 0,0029$); mesmo assim, os coeficientes de regressão

ajustados (R^2_{adj}) estiveram entre 0,9997 (1° e 3° ano) e 1 (avaliação média). A concordância entre os valores de probabilidade observados e estimados, foi elevada, com coeficiente de concordância de Willmontt (d) entre 0,9999 (1° e 3° anos) e 1 (2° ano e avaliação média); desta forma, os altos valores de R^2 e de “d” indicaram que o modelo foi capaz de explicar a probabilidade de ocorrência de determinada vazão entre os gotejadores do sistema.

Tabela 3. Valores ajustados pelo modelo de distribuição normal e os respectivos coeficientes de regressão ajustados (R^2_{adj}), além do erro padrão de estimativa (EPE) entre os valores de P observados e os estimados. Valores entre parênteses representam o erro padrão de estimativa dos coeficientes (a, b, c, y_0 e x_0) e d é o coeficiente de Willmontt

Parâmetros	Ano de avaliação			Av. média
	2009	2010	2011	
a	0,4877**($\pm 0,0037$)	0,482**($\pm 0,0032$)	0,489**($\pm 0,0045$)	0,5114**($\pm 0,0057$)
b	0,0048**($\pm 7,29 \times 10^{-5}$)	0,0062**($\pm 6,22 \times 10^{-5}$)	0,0061**($\pm 0,0001$)	0,0082**($\pm 4,79 \times 10^{-5}$)
c	1,342**($\pm 0,0257$)	1,3415**($\pm 0,0172$)	1,3273**($\pm 0,0241$)	1,2651**($\pm 0,0164$)
x_0	1,0362**($\pm 3,71 \times 10^{-5}$)	1,098**($\pm 1,68 \times 10^{-5}$)	1,0807**($\pm 5,33 \times 10^{-5}$)	1,0716**($\pm 9,75 \times 10^{-6}$)
y_0	-0,0028*($\pm 0,0013$)	-0,0032*($\pm 0,0012$)	-0,0017ns($\pm 0,0014$)	-0,0275**($\pm 0,0040$)
R^2_{adj}	0,9997	0,9999	0,9997	1,0000
EPE	0,0026	0,0016	0,0029	0,0007
d	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000

Na Figura 2 é possível observar, em todos os anos, que houve concentração da vazão próxima ao limite superior de especificação (1,15 L h⁻¹). Mesmo o processo sendo capaz (variabilidade intrínseca do processo menor que os limites de especificação), a centralização da vazão média resultaria em menor probabilidade de falha e maior capacidade do processo. A faixa de ocupação dos limites

de especificação pelas vazões dos gotejadores é representada pelo índice ICP, o qual aumentou de 17,7% para 28,6% do 1° para o 3° ano. Apesar de crescente, este índice esteve bastante abaixo do limite máximo ideal (80%) e reflete a alta uniformidade de distribuição, representada pelos coeficientes da Tabela 1.

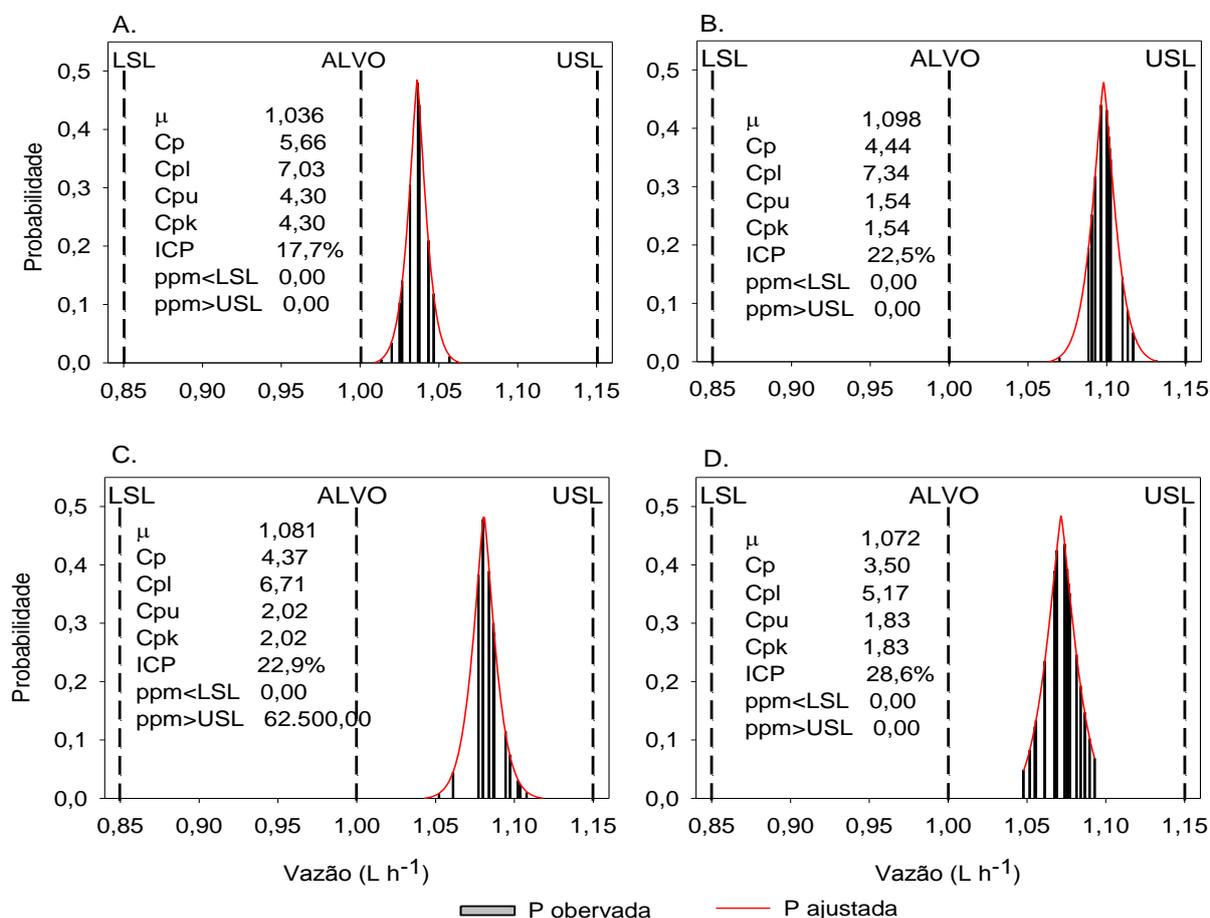


Figura 2. Probabilidade normal de vazão observada e ajustada pelo modelo normal de Gauss e limites de especificação (USL e LSL) para gotejadores utilizados na irrigação da cana-de-açúcar durante 2009 (A), 2010 (B), 2011 (C) e média dos 3 anos (D)

Tendo em vista a estabilidade estatística do processo e a distribuição normal dos dados para a vazão dos gotejadores, as capacidades potencial (Cp) e efetiva (Cpk) do processo foram estimadas conforme a Tabela 4. Geralmente, valores maiores que 1 indicam que o processo é capaz de atender à especificação adotada e valores menores que 1 revelam que o processo não é consistente. Na ocorrência deste último caso a qualidade dos gotejadores fabricados pode variar e a especificação não é atendida. Ainda que os valores maiores que 1 sejam considerados adequados, as empresas têm buscado valores mínimos de 1,33 e até 1,66 (Dudek-Burlikowska, 2005). Esses valores constituem apenas uma faixa de trabalho que assegura menor probabilidade de fabricação de gotejadores com vazão não prevista pelas especificações pré-estabelecidas.

Tabela 4. Índices de capacidade (Cp, Cpl, Cpu e Cpk) e probabilidade de falha no processo de vazão por gotejadores utilizados na irrigação da cana-de-açúcar durante 2009, 2010 e 2011 e avaliação média dos 3 anos (Av. média)

Parâmetro	2009	2010	2011	Av. média
Cp	5,66	4,44	4,37	3,50
Cpl	7,03	7,34	6,71	5,17
Cpu	4,30	1,54	2,02	1,83
Cpk	4,30	1,54	2,02	1,83
% total	0,00	0,00	0,00	0,00

% total: taxa de rejeição

Os valores de capacidade potencial do processo (Cp) foram iguais a 5,66, 4,44, 4,37 e 3,5 nos 1º, 2º e 3º anos e na avaliação média, respectivamente; no entanto, a capacidade efetiva do processo (Cpk) foi de 4,3, 1,54, 2,02 e 1,83 no respectivo período citado. Essas diferenças podem ser explicadas em função da não centralização da vazão média observada quando comparada aos limites de especificação. Como a vazão esteve concentrada próximo ao limite superior de especificação superior, o índice unilateral utilizado para explicar a capacidade do processo foi Cpu, o qual foi substituído por Cpk conforme a metodologia de cálculo. A taxa de rejeição foi nula nos três anos de avaliação indicando que até o terceiro ano de uso nenhum gotejador apresentou vazão além dos limites de especificação; assim, o processo de irrigação por gotejamento pode ser considerado capaz nos três primeiros anos de uso visto que não houve qualquer avaliação subsequente.

CONCLUSÃO

A vazão dos emissores utilizados para irrigação por gotejamento na cultura da cana-de-açúcar se mantém dentro do controle estatístico de qualidade e com alto padrão de uniformidade de distribuição e eficiência global, desde que sejam feitas todas as operações de manejo e manutenção recomendadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENÍCIO, F. R.; CARVALHO, C. M.; ELOI, W. M.; GONÇALVES, F. M.; BORGES, F. R. M. Desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão na cultura da goiaba em Barbalha-CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.3, p.55-61, 2009.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.
- BOAS, R. C. V.; PEREIRA, G. M.; REIS, R. P.; LIMA JÚNIOR, J. A.; CONSONI, R. Viabilidade econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura da cebola. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, p.781-788, 2011.
- BRALTS, V. F.; KESNER, C. D. Drip irrigation field uniformity estimation. **Transactions of the ASAE**, v.26, p.1369-1374, 1983.
- CAITANO, R. F.; LOPES, F. B.; SOUZA, F.; MENDONÇA, M. A. B. Desempenho dos sistemas de irrigação na cultura da banana no perímetro irrigado baixo Acaraú, Ceará. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.5, p.113-122, 2011.
- CHEN, K. S.; HUANG, H. L.; HUANG, C. T. Control charts for one-sided capability indices. **Quality & Quantity**, v.41, p.413-427, 2007.
- CHRISTIANSEN, E. J. **Irrigation by sprinkler**. Berkeley: University of California, 1942.142p. Bulletin, 670.
- DUDEK-BURLIKOWSKA, M. Quality estimation of process with usage control charts type X-R and quality capability of process Cp, Cpk. **Journal of Materials Processing Technology**, v.162-163, p.736-743, 2005.
- FAVETTA, G. M.; BOTREL, T. A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação de equações. **Scientific Agricultural**, v.58, p.427-430, 2001.
- FRIZZONE, J. A.; VIEIRA, A. T.; PAZ, V. P. DA S.; BOTREL, T. A. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, p.278-283, 1998.
- KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transaction of the ASAE**. v.17, p.678-684, 1974.
- LILLIEFORS, H. W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. **Journal of the American Statistical Association**, v.62, p.399-402, 1967.
- MARTINS, C. A. S.; REIS, E. F.; NOGUEIRA, N. O. Análise do desempenho da irrigação por microspray na cultura do café conilon. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, p.1-13, 2011.
- MERRIAM, J. L., KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. 276p.
- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 4.ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 500p.
- NASCIMENTO, A. K. S.; SOUZA, R. O. R. M.; LIMA, S. C. R. V.; CARVALHO, C. M.; ROCHA, B. M.; LEITE, K. M. Desempenho hidráulico e manejo da irrigação em sistema irrigado por microaspersão. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.3, p.39-45, 2009.
- PEARN, W.; LIN, P. Testing process performance based on capability index Cpk with critical values. **Computers & Industrial Engineering**, v.47, p.351-369, 2004.
- PEIXOTO, J. F. S.; CHAVES, L. H. G.; GUERRA, H. O. C. Uniformidade de distribuição da fertirrigação no distrito de irrigação Platô de Neópolis. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.5, p.0, 2005.
- REIS, E. F.; BARROS, F. M.; CAMPANHARO, M.; PEZZOPANE, J. E. M. Avaliação do desempenho de sistemas de irrigação por gotejamento. **Engenharia na Agricultura**, v. 13, p.74-81, 2005.
- RESENDE, R. S.; COELHO, R. D.; LEAL, M. L. S.; MATA, S. S. Susceptibilidade à intrusão radicular de gotejadores convencionais na irrigação subsuperficial de cana-de-açúcar. **Irriga**, v.9, p.150-165, 2004.
- SHEWHART, W. **Economic control of quality of manufactured product**. New York: D. Van Nostrand Company, 1931. 501p.
- SILVA, C. A.; SILVA, C. J. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, n.8, p.0, 2005.
- SILVA, M. L. O.; FARIA, M. A.; REIS, R. P.; SANTANA, M. J.; MATTIOLI, W. Viabilidade técnica e econômica do cultivo de safrinha do girassol irrigado na região de Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v.31, p.200-205, 2007.
- SOUZA, L. O. C.; MANTOVANI, E. C.; SOARES, A. A.; RAMOS, M. M.; FREITAS, P. S. L. Avaliação de sistemas de irrigação por gotejamento, utilizados na cafeicultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.541-548, 2006.
- SOUZA, W. J.; BOTREL, T. A.; COELHO, R. D.; NOVA, N. A. V. Irrigação localizada subsuperficial: Gotejador convencional e novo protótipo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.811-819, 2012.
- WILLMONTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1981.
- YAO, W. W.; MA, Y. Y.; LI, J.; PARKES, M. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, v.29, p.331-339, 2010.