

## **AValiação DE DESEMPENHO DO MICROASPESSOR EM LINHA LATERAL E SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DE SEU GRADIENTE DE ENERGIA**

**MADSON RAFAEL BARBALHO DA SILVA<sup>1</sup>; LÍVIA MARIA CAVALCANTE SILVA<sup>1</sup>; ANA CLÁUDIA DAVINO DOS SANTOS<sup>1</sup>; FABIANO SIMPLICIO BEZERRA<sup>1</sup>; CAIO SÉRGIO PEREIRA DE ARAÚJO<sup>1</sup> E MANASSÉS MESQUITA DA SILVA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, 52171-900, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: madsonbarbalhoagronomo@gmail.com; cavalcants.livia@gmail.com; aclauidavino@gmail.com; fabianoagro14@gmail.com; caiosergio.ufersa@gmail.com; manasses.ufrpe@gmail.com.

### **1 RESUMO**

Objetivou-se avaliar o desempenho do microaspersor Agropolo modelo MC20 em diferentes condições hidráulicas, gerando informações para um melhor dimensionamento de sistemas de microirrigação e manejo da água em áreas irrigadas. A condução do projeto hidráulico para simulação do gradiente de energia em linhas laterais, considerou-se informações determinadas através da escolha de componentes do projeto. Foram extraídos do catálogo comercial do fabricante os pares de valores referentes a vazão e a pressão e, a partir destes, gerou-se a curva vazão-pressão, onde a simulação foi feita pelo Método Algébrico - Christiansen (MA) e Método Iterativo (SBS) – Back-Step. Para ambos métodos o microaspersor se comportou de maneira semelhante, quando submetido a condições sugeridas pelo fabricante, num espaçamento entre emissores de 5,2 m, usando tubos de polietilenos de diâmetro interno de 13 mm e uma pressão de serviço de 20 mca, admitindo uma variação de 10% da pressão. Foram calculados os coeficientes de uniformidade de pressão (CU<sub>p</sub>) e de vazão (CU<sub>q</sub>), ambos com valores superiores à 95%, demonstrando a excelência no desempenho do emissor.

**Palavras-chave:** hidráulica, modelagem matemática, coeficiente de descarga.

**SILVA, M. R. B.; SILVA, L. M. C.; SANTOS, A. C. D.; BEZERRA, F. S.; ARAUJO, C. S. P.; SILVA, M. M.**

**PERFORMANCE EVALUATION OF THE SIDE LINE MICROSPERENT AND MATHEMATICAL SIMULATION OF ITS ENERGY GRADIENT**

### **2 ABSTRACT**

The objective was to evaluate the performance of the Agropolo model MC20 microsprinkler under different hydraulic conditions, generating information for a better design of micro-irrigation systems and water management in irrigated areas. The conduction of the hydraulic project to simulate the energy gradient in lateral lines, considered information determined through the choice of project components. The pairs of values referring to flow and pressure were extracted from the manufacturer's commercial catalog and, from these, the flow-pressure curve was generated, where the simulation was performed using the Algebraic Method -

Christiansen (MA) and Iterative Method (SBS) – Back-Step. For both methods, the microsprinkler behaved similarly, when subjected to conditions suggested by the manufacturer, in a spacing between emitters of 5.2 m, using polyethylene tubes with an internal diameter of 13 mm and a working pressure of 20 mca, admitting a 10% pressure variation. The uniformity of pressure (CU<sub>p</sub>) and flow (CU<sub>q</sub>) coefficients were calculated, both with values above 95%, demonstrating the excellence in the performance of the emitter.

**Keywords:** hydraulic, mathematical modeling, discharge coefficient.

### 3 INTRODUÇÃO

O conhecimento das características hidráulicas dos emissores é essencial para o correto dimensionamento e manejo operacional do sistema de irrigação (KELLER e BLIESNER, 1990). Os parâmetros hidráulicos de emissores na irrigação localizada, levam em consideração as seguintes características: relação entre vazão e pressão na entrada; a perda de carga localizada com a sua inserção no tubo; o regime de escoamento; a uniformidade de fabricação; o raio efetivo de molhamento e a uniformidade de distribuição espacial da água (ABNT, 2004; ABNT, 2006).

O desempenho hidráulico do emissor determina-se pela variação do fluxo em função da resposta às variações de pressão, determinado pelo expoente  $x$  (coeficiente de descarga) (LIMA, 1991). De acordo com Azevedo (1986) e Abreu et al. (1987) para  $x$  igual a zero a vazão é constante independente da variação de pressão, tornando o emissor autocompensante. Por mais precisos que sejam os processos de fabricação, os emissores apresentam diferenças milimétricas, cujas consequências se refletem nos valores do coeficiente de descarga, 'k', e no expoente de descarga, 'x' (AZEVEDO, 1986). De acordo com Dantas Neto et al. (1997), pequenas diferenças entre dois emissores aparentemente idênticos podem causar variações significativas na vazão do sistema. Em geral, a baixa eficiência nos projetos de irrigação localizada está relacionada à

desuniformidade de distribuição d'água (BARRETO FILHO et al., 2000).

A lâmina aplicada a planta pode ser afetada por variações na vazão dos emissores na área do projeto. Dentre os itens que a influenciam destacam-se o diâmetro dos bocais, geometria e rugosidade dos orifícios, e inclinação e velocidade de lançamento do jato (SILVA e SILVA, 2005). Abreu et al. (1987) afirmam que o desempenho hidráulico de um emissor é determinado, dentre outros fatores, pelo coeficiente de variação de fabricação, que é uma medida de variação de fluxo causada pela variação no processo de fabricação. O coeficiente de variação de fabricação pode afetar diretamente um projeto corretamente dimensionado (OLITTA, 1986). Nakayama e Bucks (1981) citam as principais causas de variação de fabricação, como sendo: variação na pressão e temperatura da água; heterogeneidade do material utilizado e o projeto do próprio emissor.

Segundo Pizarro Cabello (1986) um emissor perfeito teria o expoente  $x = 0$  (autocompensante), os de regime laminar  $x = 1$  e nos de regime turbulento  $x < 1$ ; para Frizzone et al. (2012) o emissor perfeito deve apresentar expoente "x" igual a zero, sendo anulado o efeito da variação de pressão na vazão do emissor. Já, Keller e Karmeli (1974) consideram de regime laminar os emissores com expoente  $x = 1$  e de regime turbulento os com  $x = 0,5$ .

Objetivou-se com este trabalho avaliar o desempenho do microaspersor Agropolo modelo MC20 de bocal amarelo e 2,0 mm de diâmetro em diferentes condições

hidráulicas, com vistas a gerar informações que possam contribuir para o dimensionamento de sistemas e manejo de áreas irrigadas com este emissor.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O processamento dos dados e cálculos foram realizados em planilha eletrônica. Na tabela 1, encontram-se os dados do microaspersor, retirados do manual disponibilizado pelo fabricante, utilizados para determinar a curva vazão-pressão por meio da equação de Keller e Karmeli (1975).

**Tabela 1.** Pontos da equação vazão-pressão dos microaspersor comercial.

<b>Agropolo MC20 – Bocal 2,00 mm R. 5,2 m</b>	
<b>Pressão (mca)</b>	<b>Vazão m<sup>3</sup>/h</b>
10	153,9
15	189,8
20	220,8
25	247,5
30	271,5
35	293,8

**Fonte:** Autores (2021).

Na tabela 2 encontram-se os dados utilizados para o dimensionamento da linha lateral. Como critério, adotou-se uma

variação admissível de 20% da pressão na linha lateral.

**Tabela 2.** Dados de entrada para simulação hidráulica da linha lateral.

<b>Dados de entrada</b>	<b>Unidade</b>
Pressão de serviço (Ps)	20 mca
Variação de vazão aceitável (q)	10 %
Espaçamento entre emissores (se)	5,2 m
Constante de proporcionalidade (k)	46,89 adimensional
Expoente de descarga (x)	0,5165 Adimensional
Diâmetro interno (Di)	13 mm
M	1,75 Adimensional
F	46,50.10 <sup>-6</sup> Adimensional

**Fonte:** Autores (2021).

Foram utilizadas as equações de Blasius, para determinação do f (fator de atrito); número de Reynolds, que determina o regime do escoamento; equação de Darcy

e Weisbach (equação 1), que é reconhecida como uma das maneiras mais precisas de prever a perda de carga.

$$hf = \frac{8 \cdot C}{\pi^{(2-m)} \cdot 9,81} \cdot \left(\frac{4}{v}\right)^{(-m)} \cdot \left(\frac{q}{Se}\right)^{(2-m)} \cdot Di^{-(5-m)} \cdot L^{(3-m)} \cdot F \quad (1)$$

Em que: hf – perda de carga admissível na linha lateral (mca); C – coeficiente de atrito tabelado (adimensional); m - coeficiente de Blasius (adimensional); v – viscosidade cinemática da água (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>); q – vazão nominal do emissor (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>); Se – espaçamento entre os emissores (m); Di – diâmetro da linha lateral (mm); L – comprimento da linha lateral (m); F – fator de correção (adimensional); Q – vazão total da linha lateral (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).

O dimensionamento da linha lateral foi realizado para um tubo de polietileno, ou seja, conduto liso, com diâmetro interno de 13 mm. Para maior praticidade, as equações de Blasius e do Número de Reynolds foram substituídas na Equação Universal da perda de carga, e por meio de manipulações algébricas foi obtida uma única equação. O fator de correção proposto por Wu e Gitlin (1975), foi utilizado para variação de pressão ao longo da linha lateral.

Para o Método Algébrico (MA) – Christiansen, utilizou-se os dados extraídos da equação vazão-pressão ( $k = 46,889$  e  $x = 0,5165$ ) e considerou-se os valores pré-fixados (espaçamento entre emissores, diâmetro interno do tubo, expoente de descarga e pressão de serviço). Diante disto, foram calculados: vazão nominal (qn), comprimento da linha lateral (L), número de emissores (n), comprimento ajustado da linha lateral (Lajust), perda de carga permissível (hf<sup>\*</sup>) e o diâmetro interno corrigido (Di). Na aplicação do Método Iterativo (SBS) – Back Step, considerou-se os mesmos valores fixados na metodologia anterior nos cálculos. Inicialmente, com base na estimativa da perda de carga permissível (hf<sup>\*</sup>), estimou-se a pressão inicial da parcela (Ho) e em seguida calculou-se a pressão ao final da linha (Hn = H1). Foi calculado também o valor de K, utilizado na equação de hf nos trechos.

Para maior acurácia dos cálculos da perda de carga na linha lateral, levou-se em consideração a variação de velocidade, o número de Reynolds e a variação de descarga do emissor em cada posição (n). Entretanto, fixou-se a aplicação do método de Blasius para estimativa da hf<sup>\*</sup>, utilizando de cálculos iterativos numa condição que, se  $H_n < H_0$ , continua incrementando  $n = n + 1$ , até que  $H_n/H_0 = 1$ .

A priori, com base na estimativa da perda de carga permissível (hf<sup>\*</sup>), estimou-se a pressão inicial da parcela (Ho) e em seguida calculou-se a pressão ao final da linha (Hn=H1). Vale salientar que, apesar de iniciar-se os cálculos trecho a trecho com H1, esta pressão é a recebida pelo último aspersor. Isto pode ser melhor observado no gradiente de energia, figura 2. Portanto, calcula-se também o valor de K, que foi utilizado na equação de hf nos trechos.

Foram calculados os parâmetros de uniformidade tanto de vazão (q) quanto de pressão (p), afim de verificar a padronização de aplicação de água na simulação, a partir da equação 2.

$$CU (\%) = (1 - CV) \times 100 \quad (2)$$

Em que: CU – Coeficiente de uniformidade (%); CV – Coeficiente de variação (adimensional).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

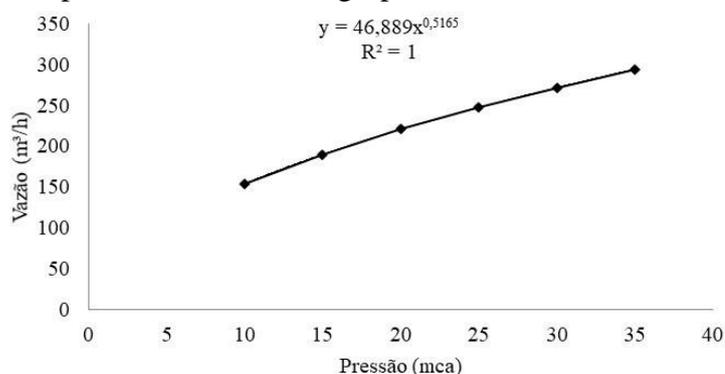
O ajuste das equações potenciais de vazão em função da pressão de serviço e do diâmetro do bocal, apresentou elevada correlação entre os valores de vazão e pressão o que pode ser confirmado pelo valor do coeficiente de determinação ( $R^2 = 1$ ), conforme observa-se na Figura 1.

O microaspersor Agropolo MC20 de bocal amarelo, apresentou expoente de

0,5165, classificando como regime turbulento. Segundo Frizzone et al. (2012) e Schimidt (2014) o emissor deve apresentar expoente “x” próximo ou igual a zero (autocompensante), pois apresenta baixa sensibilidade a variação de pressão e melhor

uniformidade de distribuição de água. Quando o coeficiente x for igual a 1 existe um regime de escoamento laminar e inferior a isto o regime é caracterizado como turbulento (PIZARRO CABELLO, 1996).

**Figura 1.** Curva vazão-pressão do emissor Agropolo MC20 de bocal amarelo.

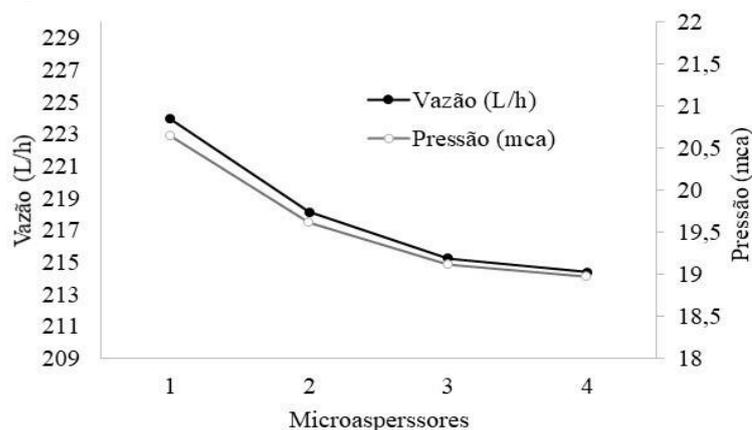


**Fonte:** Autores (2021).

Na Figura 2, observa-se uma variação de pressão ao longo da linha lateral de 8,1%, e variação de vazão de 4,3%. Desta maneira é possível afirmar que os critérios hidráulicos foram respeitados, permitindo

boa operacionalidade caso este cenário seja colocado em prática. O total das perdas de carga por atrito na linha lateral foi de 3,40 mca.

**Figura 2.** Variação da pressão e vazão na linha lateral em função da posição dos microaspersores.



**Fonte:** Autores (2021).

Observou-se que a relação entre vazão-pressão em função da distribuição do número de microaspersores decresceu ao longo da linha lateral (Figura 2) (Tabela 3). Resultados semelhantes foram obtidos por

Polycarpo et al. (2019) e Franco et al. (2020). Para Silva e Silva (2005), a uniformidade da aplicação da lâmina de irrigação ao longo da linha lateral, em sistemas de irrigação localizada, está

diretamente relacionada com a variação da pressão e vazão dos emissores, desta forma alterações na pressão ocasionadas pela perda de carga ocasionará variação na vazão. Esse comportamento está associado a perda de energia provocada pelo atrito e inserção dos microaspersores ao longo da linha, além de ser influenciado por seus processos de

fabricação (PINHEIRO et al., 2019). Portanto, a simulação hidráulica realizada no microaspersor comercial, demonstrou bom desempenho de gradiente de energia, ao dimensionar a linha lateral, fornecendo dados que podem ser utilizados como ferramenta de tomada de decisão na utilização desse equipamento no campo.

**Tabela 3.** Índices dos elementos dos vetores (H) e (q) para o cenário simulado pelo método SBS.

Emissor	H (mca)	q (L/h)	Q (L/h)	hf total (mca)
-	22,37	233,47	1.105,17	-
1	20,64	223,96	871,67	1,7293
2	19,62	218,13	647,73	1,0284
3	19,11	215,23	429,6	0,5013
4	18,97	214,37	214,37	0,1485

Fonte: Autores (2021).

Na tabela 4, observa-se os parâmetros obtidos quando se aplicou o teste de uniformidade de vazão e pressão para a simulação. O coeficiente de uniformidade de vazão resultou em 98,01% e o coeficiente de uniformidade de pressão foi de 96,14%.

Constata-se também que parâmetros de uniformidade obtiveram valores excelentes, levando em consideração que o sistema é localizado, garantindo a padronização de aplicação de água caso este cenário seja reproduzido na prática.

**Tabela 4.** Parâmetros de uniformidade de vazão e pressão obtidos na simulação.

Vazão dos Emissores		Pressão dos Emissores	
Média	217,92	Média	19,59
Tamanho	4,00	Tamanho	4,00
Mínimo	214,37	Mínimo	18,97
Máximo	223,96	Máximo	20,64
Amplitude Total	9,59	Amplitude Total	1,67
Desvio Padrão	4,33	Desvio Padrão	0,76
Coeficiente de Variação	0,019890205	Coeficiente de Variação	0,038640258
CUq	98,01	Cup	96,14

Fonte: Autores (2021).

Em relação ao critério de variação de vazão aceitável, o qual é de 10% (LUIDWIG, 2012), o percentual correspondente foi de 4,28%. Portanto, o microaspersor utilizado para o estudo atendeu os critérios hidráulicos necessários para uma boa resposta de aplicação de água ao sistema. Vale salientar que além dessa

avaliação matemática do emissor e da linha lateral, onde ele ficou inserido, é necessário o teste em campo, para validar o comportamento teórico do sistema.

## 6 CONCLUSÕES

O modelo matemático mostrou-se eficaz para o dimensionamento do gradiente de pressão e vazão ao longo da linha lateral, além de possibilitar avaliação quanto ao desempenho do sistema de irrigação localizado (microaspersão), servindo como método de auxílio na tomada de decisão na escolha do emissor a ser utilizado.

O microaspersor Agropolo de bocal amarelo apresentou um regime turbulento com menor influência da variação da pressão sob a vazão. Este resultado pode estar relacionado com a distribuição da água ao longo da linha lateral. A uniformidade superior a 96% mostra que, caso o cenário for executado, o emissor terá uma boa padronização de aplicação de água no sistema de irrigação.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABNT 2004: Associação brasileira de normas técnicas. Irrigação localizada: microaspersores - requisitos gerais e métodos de ensaio. PNBR 04:015.08 – 015. São Paulo, 2004, 11 p.
- ABNT 2006: Associação brasileira de normas técnicas. Equipamentos de irrigação agrícola – emissores e tubos emissores – especificação e métodos de ensaio. NBR. ISO 9261:2006. Rio de Janeiro, 2006, 17 p.
- ABREU, J. M. H.; LOPEZ, J. R.; REGALADO, A. P.; HERNANDEZ, J. F. G. **El Riego localizado**. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrárias, 1987, 317p.
- AZEVEDO, H. M. **Irrigação localizada**. Informe Agropecuário. Belo Horizonte, n.139. p. 40 - 53, 1986.
- BARRETO FILHO, A. A.; DANTAS NETO, J.; MATOS J. A.; GOMES E. M. Desempenho de um Sistema de Irrigação por Microaspersão, Instalado a Nível de Campo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.309-314, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300001>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/dXy3CDMNVCJtyZ4BhxY7CNK/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 3 nov. 2021.
- DANTAS NETO, J.; MEDEIROS, M. G. A.; AZEVEDO, C. A. V.; AZEVEDO, H. M. Performance hidráulica e perfil de distribuição de água do microaspersor NAAN 7110, sob diferentes condições de vento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.1, n.1, p.57-61, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v1n1p57-61>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/zKyCyPMK3S34zS74LwNN3WF/?lang=pt>. Acesso em: 1 nov. 2021.
- FRANCO, L. B.; PESSOA, U. C. M.; ALMEIDA, C. D. G. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C.; FRANCO, G. B.; FREIRE, M. M. Simulação matemática do comportamento hidráulico do gradiente de pressão em linhas laterais de microirrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 13, n. 6, p.3703-3713, 2019. DOI: [10.7127/rbai.v13n6001134](https://doi.org/10.7127/rbai.v13n6001134). Disponível em: <https://inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/1134>. Acesso em: 5 nov. 2021.

FRIZZONE, J. A.; LOURENÇO, P. S.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. (1. ed.). **Microirrigação, gotejamento e microaspersão**. Maringá: Editora EDUEM, 2012.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. (ed.). **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: Springer US, 1990.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, n. 2, p. 678-684, 1974. DOI: doi: 10.13031/2013.36936) @1974. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=36936>. Acesso em: 10 nov. 2021.

KELLER, J.; KARMELI, D. (ed.). **Trikler irrigation desing. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing**, 1975.

LIMA, V. L. A. **Caracterização hidráulica de tubulações laterais em microaspersão utilizando microtubos como dissipadores de energia**. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1991.

LUIDWIG, R. **Dimensionamento da linha lateral utilizando dois espaçamentos entre gotejadores**. 2012. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2012.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.1, n.24, p.77-80, 1981. DOI: doi: 10.13031/2013.34203) @1981. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=34203>. Acesso em: 5 nov. 2021.

OLITTA, A. F. L. Projeto de irrigação localizada. *In*: CURSO DE ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE IRRIGAÇÃO. Brasília: Programa Nacional de Irrigação, 1986. p.T11.  
PINHEIRO, A. G.; SILVA, J. L. B.; SILVA, D. A. O.; BATISTA, P. H. D.; RODRIGUES J. A. M.; SILVA, M. V. Simulação matemática do comportamento teórico-hidráulico de microaspersores e microtubos ao longo da linha lateral. **Revista Ambientale**, Arapiraca, v. 11, n. 2, p. 22-33, 2019. DOI: <https://doi.org/10.48180/ambientale.v11i2.95>. Disponível em: <https://periodicosuneal.emnuvens.com.br/ambientale/about>. Acesso em: 16 nov. 2021.

PIZARRO CABELLO, F. (3.ed.). **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación**. Madri: Ed. Mundi 1986.

POLYCARPO, J. S. M.; SILVA, M. A.; COUTINHO, A. S.; SOUZA, P. C. S.; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C. Simulação matemática do comportamento hidráulico de microaspersores ao longo da linha lateral. *In*: IV CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS COINTER – PDVAgro, 2019, Recife, 2019. p. 1-17. Disponível em: <https://cointer.institutoidv.org/inscricao/pdvagro/uploadsAnais2020/SIMULA%C3%87%C3%83O-MATEM%C3%81TICA-DO-COMPORTAMENTO-HIDR%C3%81ULICO-DE-MICROASPERORES-AO-LONGO-DA-LINHA-LATERAL.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2021.

SCHIMIDT, A. P. R. A. **Efeito da espessura da parede no desempenho hidráulico de mangueiras gotejadoras**. 2014. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2014.

SILVA, C. A.; SILVA, C. J. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, v. 2, n.8, p. 1-17, 2005. Disponível em:

<[http://www.fauf.br/imagens\\_arquivos/arquivos\\_destaque/Tm9d5yhlcpzey1x\\_2013-4-29-15-39-59.pdf](http://www.fauf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/Tm9d5yhlcpzey1x_2013-4-29-15-39-59.pdf)>. Acesso em: 18 nov. 2021.

WU, I. P.; GITLIN, H. M. Energy gradient line for drip irrigation laterals. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 101, n. 4, p. 323-326, 1975. DOI:

<https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001075>. Disponível em:

<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JRCEA4.0001075>. Acesso em: 20 nov. 2021.