

AVALIAÇÃO DO MODELO HYDRUS-2D NA DISTRIBUIÇÃO DO SOLUTO NO GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL

KATARINA LIRA GRECCO¹; DOUGLAS ROBERTO BIZARI² E CLAUDINEI FONSECA SOUZA³

¹Doutoranda, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba, SP, klgrecco@usp.br

²Professor, Departamento de Desenvolvimento Rural, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Anhanguera, km 174, 13600-970, Araras, SP, dbizari@cca.ufscar.br

³Professor, Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Anhanguera, km 174, 13600-970, Araras, SP, cfsouza@cca.ufscar.br

1 RESUMO

A competição pelo uso da água entre agricultura, indústria e população vem tornando-se intensa no decorrer dos anos, exigindo um uso racional deste recurso para produção de alimentos. O gotejamento subsuperficial pode auxiliar os produtores com a otimização de parâmetros operacionais como frequência e duração da irrigação, vazão, espaçamento e profundidade do gotejador. Estas informações podem ser obtidas por simulações numéricas através de modelos matemáticos. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o modelo HYDRUS-2D a partir de dados experimentais para a previsão das dimensões dos bulbos molhados gerados por gotejadores subsuperficiais de distintas taxas de aplicações (1,0 e 1,6 L h⁻¹). O modelo foi avaliado com base nos seguintes parâmetros estatísticos: Coeficiente de Determinação e Correlação (R² e R), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Erro Absoluto Médio (MAE). Os resultados indicaram que o deslocamento horizontal permaneceu o maior comparado com o deslocamento vertical em todos os bulbos molhados, tanto os observados nos ensaios experimentais como os estimados pelo modelo e a correlação entre ambos foi elevada, acima de 0,90 com erros abaixo de 16%. Conclui-se que o modelo HYDRUS-2D pode ser utilizado para estimar as dimensões do bulbo molhado, obtendo novas informações sobre o dimensionamento do sistema de irrigação.

Palavras-chave: bulbo molhado, concentração de nutriente, modelo matemático.

GRECCO, K. L.; BIZARI, D. R.; SOUZA, C. F.
EVALUATION OF HYDRUS-2D MODEL FOR SOLUTE DISTRIBUTION IN
SUBSURFACE DRIP

2 ABSTRACT

The competition for water use between agriculture, industry and population has become intense over the years, requiring a rational use of this resource for food production. The subsurface drip irrigation can help producers with the optimization of operating parameters such as frequency and duration of irrigation, flow, spacing and depth of the dripper installation. This information can be obtained by numerical simulations using mathematical models, thus the aim of this study

was to evaluate the HYDRUS-2D model from experimental data to predict the size of the wet bulbs generated by emitters of different application rates (1.0 and 1.6 L h⁻¹). The results showed that horizontal displacement (bulb diameter) remained the largest in all the bulbs, observed both in experimental trials and estimated by the model and the correlation between them was high, above 0.90 to below 16% error. We conclude that the HYDRUS-2D model can be used to estimate the dimensions of the wet bulb, and getting new information on the sizing of the irrigation system.

Keywords: wet bulb, nutrient concentration, mathematical model.

3 INTRODUÇÃO

Para agricultura irrigada ganhar mais eficiência no uso da água e dos nutrientes, é preciso utilizar a irrigação localizada, na qual parte da água é aplicada ao solo em pequenas quantidades, porém com alta frequência, diretamente sobre a região radicular, mantendo a umidade do solo, nessa região, próximo à capacidade de campo. A emissão de água realizada pelo gotejamento subsuperficial abaixo da superfície do solo, com frente de molhamento tangenciando a superfície (dependendo da profundidade), evita a exposição da superfície molhada e reduz as perdas por evaporação quando comparado à irrigação por gotejamento superficial, garantindo uma vantagem em relação à uniformidade de aplicação de água, sendo esta próxima a 100% (NOGUEIRA; COEHO; LEÃO, 2000; ALBUQUERQUE & MAENO, 2007).

A determinação direta das dimensões do bulbo molhado no campo é um processo demorado e caro, normalmente fora da realidade financeira da maioria dos produtores e sua obtenção por meio de tabelas, embora prática, é comum se constituam em uma aproximação grosseira. Uma alternativa seria a utilização de modelos matemáticos, os quais simulam o formato e as dimensões do bulbo molhado a partir de características relacionadas ao solo e ao gotejador utilizado (SATO; SOUZA; PERES, 2013).

van Genuchten & Šimůnek (2004) descreveram os diversos avanços nas últimas décadas para o entendimento de modelos que descrevem os processos de fluxo e transporte na zona que abrange o lençol freático até a superfície do solo, e além disso, um grande número de modelos conceituais vem sendo disponíveis para realização de simulações detalhadas da transição do fluxo da água no solo de uma condição saturada para não saturada, movimento de calor e transporte de solutos na subsuperfície.

Dentre esses modelos matemáticos, destaca-se o modelo HYDRUS-2D, cujas vantagens de utilização estão relacionadas como a rapidez em obter informações sobre a dinâmica da água e de solutos no solo. Entretanto, para a aplicação desse modelo é necessário o fornecimento de dados coletados experimentalmente, os quais apresentem certa confiabilidade, pois assim será possível alcançar o seu melhor desempenho, ou seja, representar por meio das simulações numéricas o que realmente está acontecendo em condições de campo. Caso contrário, sua aplicação poderá ser prejudicada, o que anulará os resultados da simulação.

Comparando as simulações do gotejamento subsuperficial entre o modelo HYDRUS-2D e os dados experimentais em um solo franco-arenoso com gotejadores de três vazões distintas (20, 40 e 60 L m⁻¹), Skaggs et al. (2004) verificaram que os dados estimados pelo modelo apresentaram uma boa concordância em relação aos dados observados, resultando no uso do modelo como ferramenta para a investigação e a concepção de práticas de manejo de irrigação por gotejamento.

Sendo assim, este trabalho propõe avaliar os bulbos molhados estimados pelo modelo HYDRUS-2D em relação aos observados nos ensaios experimentais, através de parâmetros estatísticas. Com a obtenção de uma correlação aceitável entre os dados, informações importantes sobre o gotejamento subsuperficial serão geradas, evitando a realização de novos ensaios no campo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados experimentais foram obtidos na casa de vegetação (140 m²) pertencente ao Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, no município de Araras, estado de São Paulo. O solo utilizado foi do grupo Neossolo Quartzarênico com as seguintes características físico-hídricas: 92,0% (areia), 2,0% (silte), 6,0% (argila), 1,41 g cm⁻³ (densidade do solo), 2,74 g cm⁻³ (densidade de partículas), 38,31% (porosidade) e 0,05 m h⁻¹ (condutividade hidráulica do solo saturado).

Para obtenção dos dados sobre concentração do nutriente no perfil de solo foram utilizados: um Reflectômetro TDR100 (Campbell Scientific) juntamente de placas com canais de multiplexação SDMX-50, o qual analisou o sinal eletromagnético automaticamente por um coletor de dados (CR1000-Datalogger-Campbell Scientific). As sondas de TDR utilizadas no ensaio foram construídas na própria universidade, seguindo metodologia de Souza et al. (2006b). O dimensionamento das sondas e a montagem dos recipientes preenchidos com o solo foram descritos detalhadamente em Bizari et al. (2014).

Os gotejadores utilizados foram da marca NaanDanJain modelo Amnon Drip PC AS, autocompensante (PC) que mantém a pressão constante para a uniformização da vazão. Em cada recipiente de PVC (500 L) foi instalado um gotejador na profundidade de 0,30 m com pressão de serviço de 2,0 bar, entretanto, com vazões diferentes para cada tratamento, sendo o Tratamento de 1,0 L h⁻¹ e o Tratamento de 1,6 L h⁻¹.

O ensaio experimental efetuou-se com aplicação da solução de nitrato de potássio (KNO₃) diluído em 1,0 L de água, cuja solução não ultrapassou 2,0 dS m⁻¹ de condutividade elétrica (CE), de modo a evitar o risco de salinização a partir da água de irrigação. Por meio de uma bomba injetora foram realizadas 10 aplicações da referida solução, com uma aplicação a cada hora, conforme metodologia descrita por Souza et al. (2006a).

Para obtenção dos dados de concentração de potássio nos ensaios foi necessária uma calibração para aquisição das seguintes equações:

$$CE_{Pasta} = 1,1471\theta + 1,5191CE_{TDR} + 0,0412 \quad (1)$$

em que: CE_{Pasta} é a condutividade elétrica da pasta saturada (dS m⁻¹); CE_{TDR} é a condutividade elétrica aparente obtida pela técnica da TDR (dS m⁻¹); θ é a umidade volumétrica (m³ m⁻³).

Considerado que a condutividade elétrica da pasta saturada seja igual à condutividade elétrica da solução, pode-se obter a concentração do nitrato de potássio:

$$C = \left(\frac{CE_S}{0,39}\right)^{\frac{1}{0,74}} \quad (2)$$

em que: C é a concentração de nitrato de potássio (mmol L⁻¹); CE_S é a condutividade elétrica da solução (dS m⁻¹).

Desta forma possibilitou-se conhecer a quantidade de íons do nitrato de potássio no solo através da técnica da TDR, demonstrando a importância de realização da calibração para a técnica empregada. Para o mapeamento superficial da distribuição dos solutos utilizou-se o software SURFER (Golden Software), que permitiu o espelhamento entre as metades do bulbo molhado, gerando um ponto médio resultante da sobreposição de uma metade com a outra, conforme realizado por Barros et al. (2009).

Šimůnek et al. (1994) desenvolveram um modelo numérico geral capaz de resolver a equação de Richards (1931) para duas dimensões, conhecida como SWMS-2D, ou, mais recentemente, como HYDRUS-2D, a partir da seguinte equação diferencial:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(K_r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (3)$$

Em que: θ é o teor de umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); h é a carga hidráulica (m); t é o tempo (s); r é a coordenada horizontal (m); z é a coordenada vertical (m) e K é a condutividade hidráulica do solo (m h^{-1}). Esse modelo, que é baseado em elementos finitos incorporados a uma interface gráfica, fornece a visualização dos resultados simulados.

O modelo HYDRUS-2D permite realizar o ajuste da curva de retenção pelo modelo de van Genuchten (1980), com intuito de descrever as propriedades hidráulicas dos solos não saturados.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\phi_m|^n)]^m} \quad (4)$$

Em que: θ é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r é a umidade residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s é a umidade no ponto de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); α , n e m são os parâmetros de ajuste da curva de retenção do solo.

Os valores obtidos no ajuste da curva de retenção para o respectivo solo foram: $0,03 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (θ_r), $0,32 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (θ_s), $6,701 \text{ m}^{-1}$ (α – GARDNER, 1986), $1,3466$ (n) e $0,5$ (I).

Com este modelo, foram realizadas simulações para estimar os bulbos molhados no solo, utilizando-se das mesmas condições dos ensaios experimentais. Para preparação do modelo foi necessário adicionar informações sobre o transporte dos íons de nitrato e potássio, dados sobre dispersividade (λ) são de Miranda et al. (2003) e os cálculos de dispersividade em água (*Diffus. W*) e em solução do solo (*Diffus. G*) a partir da metodologia de Miranda & Duarte (2002). Esses dados estão presentes na Tabela 1:

Tabela 1. Parâmetros de transporte dos íons nitrato e potássio: dispersividade (λ), dispersividade em água (*Diffus. W*) e em solução do solo (*Diffus. G*) no solo submetido à simulação

| Vazão (L h^{-1}) | Íon | λ (m) | <i>Diffus. W</i> ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$) | <i>Diffus. G</i> ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$) |
|--------------------------------|----------|---------------|--|--|
| 1,0 | Nitrato | 0,1177419 | 0,31 | 0,0858 |
| | Potássio | 0,0161662 | 0,0042 | 0,02283 |
| 1,6 | Nitrato | 0,1177419 | 0,22 | 0,0638 |
| | Potássio | 0,0161662 | 0,0030 | 0,02403 |

Após a preparação do modelo HYDRUS-2D para as simulações sob as condições encontradas nos ensaios experimentais, iniciaram-se os cálculos compilando as interações para

cada intervalo definido, para posteriormente, determinar os bulbos molhados em relação à concentração de nutriente.

Na comparação entre os dados de bulbo molhado observados nos ensaios experimentais em relação às simulações efetuadas pelo modelo HYDRUS-2D, foi necessária uma análise estatística para obter o grau de correlação entre os dados. Essa análise foi efetuada através dos seguintes parâmetros: Coeficientes de Determinação (R^2) e Correlação (R), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE – Equação 5) e Erro Absoluto Médio (MAE – Equação 6).

$$RMSE = \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}{n}} \right) * 100 \quad (5)$$

$$MAE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|}{n} \right) * 100 \quad (6)$$

Em que: a_i é o valor estimado pelo modelo HYDRUS-2D; b_i é o valor obtido pelo ensaio experimental e n é o número de aplicações no ensaio experimental.

Em relação aos valores dos coeficientes de determinação e correlação, quando mais próximo de 1, maior será a correlação entre as variáveis. Para o RMSE, cujo qual é uma medida de precisão, pois como eleva ao quadrado a diferença entre os valores estimados e observados, é mais sensível a erros, será sempre um valor positivo, o valor zero indica uma previsão perfeita e este valor aumenta conforme aumenta a diferença entre valores de previsão e observação. O parâmetro MAE indica a média do afastamento dos valores observados e estimados

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Figuras 1 e 2 foram observados os perfis de concentração de nutriente obtidos pela técnica da TDR para cada aplicação (de 1,0 a 10,0 L), para comparação entre os tratamentos. Cada isolinha representada por uma tonalidade de laranja possui valor de $0,01 \text{ mmol L}^{-1}$, sendo possível analisar a formação do bulbo molhado através do avanço da frente de molhamento no solo.

Analisando os bulbos molhados, no Tratamento de $1,0 \text{ L h}^{-1}$ o deslocamento horizontal manteve-se o maior em todas as aplicações (0,14 a 0,45 m). No deslocamento vertical obteve valores entre 0,03 a 0,21 m. Em média, os deslocamentos para este tratamento foram de 0,33 m (horizontal) e 0,15 m (vertical).

Para o Tratamento de $1,6 \text{ L h}^{-1}$, ocorreu o mesmo comportamento em relação ao deslocamento horizontal, com valores variando de 0,14 a 0,40 m e o deslocamento vertical de 0,03 a 0,21 m. Em média, os deslocamentos foram de 0,29 m (horizontal) e 0,15 m (vertical).

Em ambos os tratamentos, o maior valor de concentração do nutriente encontrada foi de $1,5 \text{ mmol L}^{-1}$ e o menor de $0,08 \text{ mmol L}^{-1}$.

Figura 1. Perfis de concentração de nutriente (mmol L^{-1}) entre cada aplicação de 1L no Tratamento de $1,0 \text{ L h}^{-1}$

Tratamento $1,0 \text{ L/h}$

Deslocamento horizontal (cm)

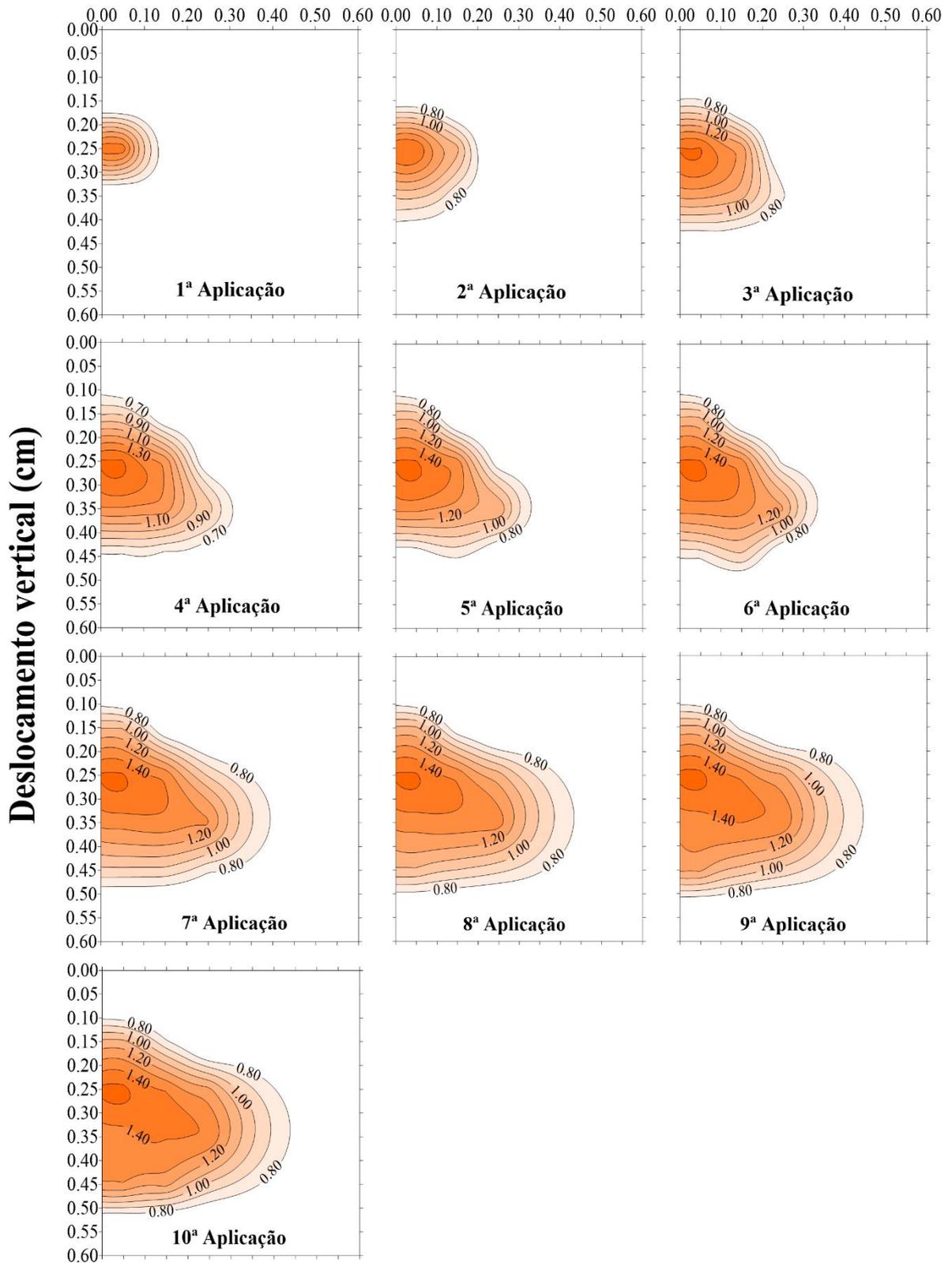
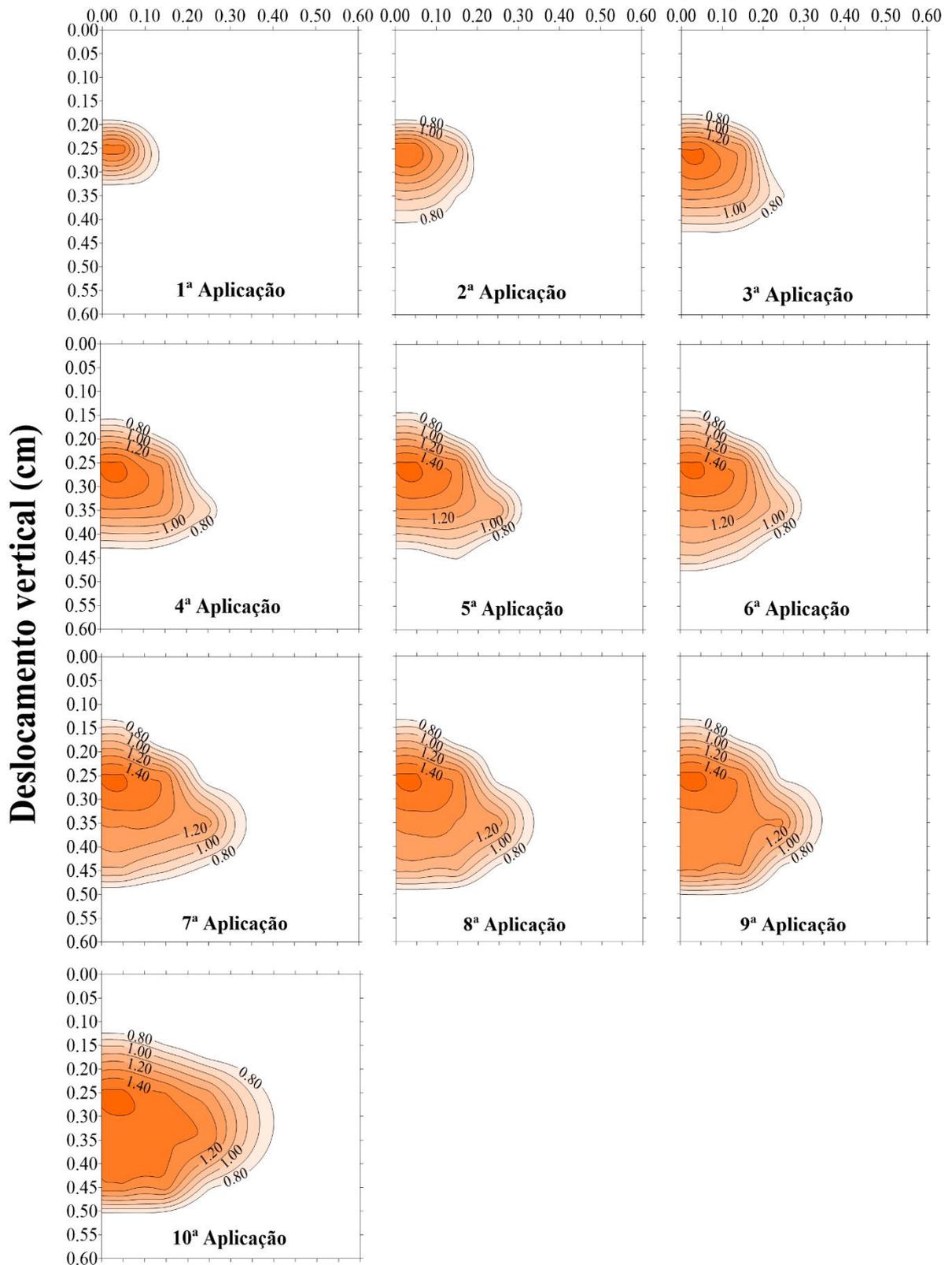


Figura 2. Perfis de concentração de nutriente (mmol L^{-1}) entre cada aplicação de 1L no Tratamento de $1,6 \text{ L h}^{-1}$

Tratamento $1,6 \text{ L/h}$

Deslocamento horizontal (cm)



Com o modelo HYDRUS-2D foi possível simular os perfis de concentração de nutriente através das condições encontradas nos ensaios experimentais, para os Tratamentos de 1,0 L h⁻¹ (Figura 3) e Tratamento de 1,6 L h⁻¹ (Figura 4).

Observando os bulbos simulados pelo modelo, no Tratamento de 1,0 L h⁻¹ o deslocamento horizontal manteve-se maior em todas as aplicações, com valores de 0,09 a 0,25 m, e o deslocamento vertical apresentou valores de 0,06 a 0,24 m. Em média, os valores de deslocamento foram de 0,18 m (horizontal) e 0,16 m (vertical).

Para o Tratamento de 1,6 L h⁻¹ o deslocamento horizontal permaneceu maior em todas as aplicações, com valores de 0,08 a 0,22 m e o deslocamento vertical variou de 0,06 a 0,21 m. Em média, os deslocamentos foram de 0,16 m (horizontal) e 0,15 m (vertical).

O maior valor da concentração do nutriente para ambas as vazões foram de 1,51 mmol L⁻¹ e o menor de 0,14 mmol L⁻¹. Na Tabela 2 estão apresentados os valores observados nos ensaios e estimados pelo modelo das dimensões do bulbo molhado, em relação ao deslocamento horizontal (x), vertical (z) e da ascensão pela capilaridade (y) para os bulbos gerados nos tratamentos.

Tabela 2. Valores observados nos ensaios experimentais e estimados pelo modelo HYDRUS-2D

| Tratamentos (L h ⁻¹) | Aplicações | Valores observados (m) | | | Valores estimados (m) | | |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------|------|------|-----------------------|------|------|
| | | x | z | y | x' | z' | y' |
| 1,0 | 1 ^a | 0,14 | 0,03 | 0,13 | 0,09 | 0,06 | 0,05 |
| | 2 ^a | 0,20 | 0,10 | 0,14 | 0,12 | 0,09 | 0,08 |
| | 3 ^a | 0,25 | 0,13 | 0,15 | 0,15 | 0,11 | 0,09 |
| | 4 ^a | 0,31 | 0,14 | 0,19 | 0,16 | 0,14 | 0,11 |
| | 5 ^a | 0,33 | 0,15 | 0,19 | 0,18 | 0,16 | 0,12 |
| | 6 ^a | 0,34 | 0,17 | 0,19 | 0,20 | 0,17 | 0,13 |
| | 7 ^a | 0,40 | 0,18 | 0,20 | 0,21 | 0,19 | 0,14 |
| | 8 ^a | 0,43 | 0,20 | 0,20 | 0,22 | 0,21 | 0,15 |
| | 9 ^a | 0,45 | 0,21 | 0,20 | 0,23 | 0,23 | 0,15 |
| | 10 ^a | 0,45 | 0,21 | 0,20 | 0,25 | 0,24 | 0,16 |
| 1,6 | 1 ^a | 0,14 | 0,03 | 0,10 | 0,08 | 0,06 | 0,06 |
| | 2 ^a | 0,19 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,09 | 0,07 |
| | 3 ^a | 0,25 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,11 | 0,09 |
| | 4 ^a | 0,27 | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,13 | 0,10 |
| | 5 ^a | 0,31 | 0,15 | 0,16 | 0,16 | 0,14 | 0,11 |
| | 6 ^a | 0,31 | 0,17 | 0,16 | 0,17 | 0,16 | 0,12 |
| | 7 ^a | 0,34 | 0,18 | 0,16 | 0,19 | 0,17 | 0,13 |
| | 8 ^a | 0,35 | 0,19 | 0,16 | 0,20 | 0,18 | 0,14 |
| | 9 ^a | 0,36 | 0,21 | 0,17 | 0,21 | 0,20 | 0,15 |
| | 10 ^a | 0,40 | 0,21 | 0,17 | 0,22 | 0,21 | 0,15 |

Figura 3. Perfis de concentração de nutriente (mmol L⁻¹) simulados pelo software HYDRUS-2D para o Tratamento de 1,0 L h⁻¹

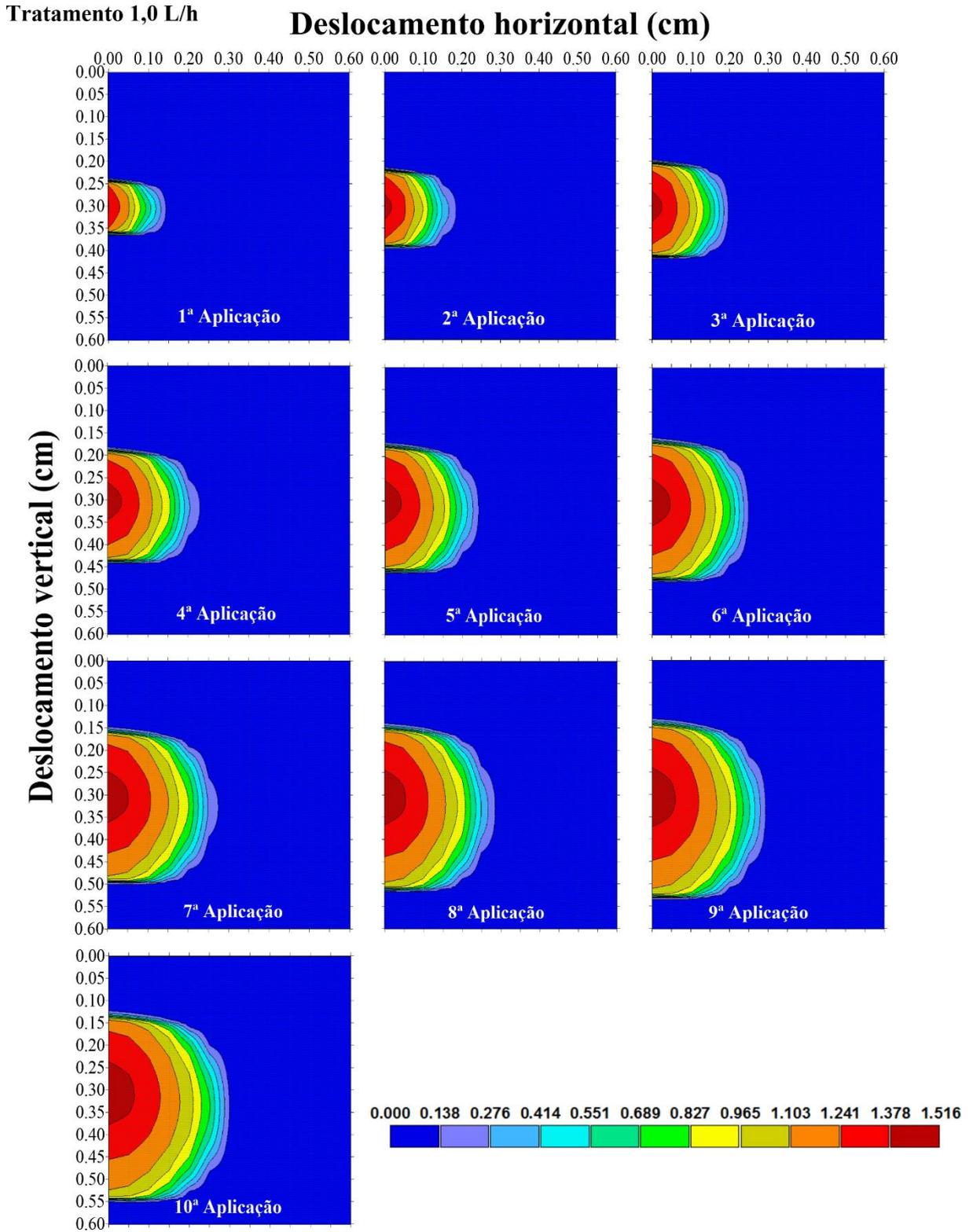
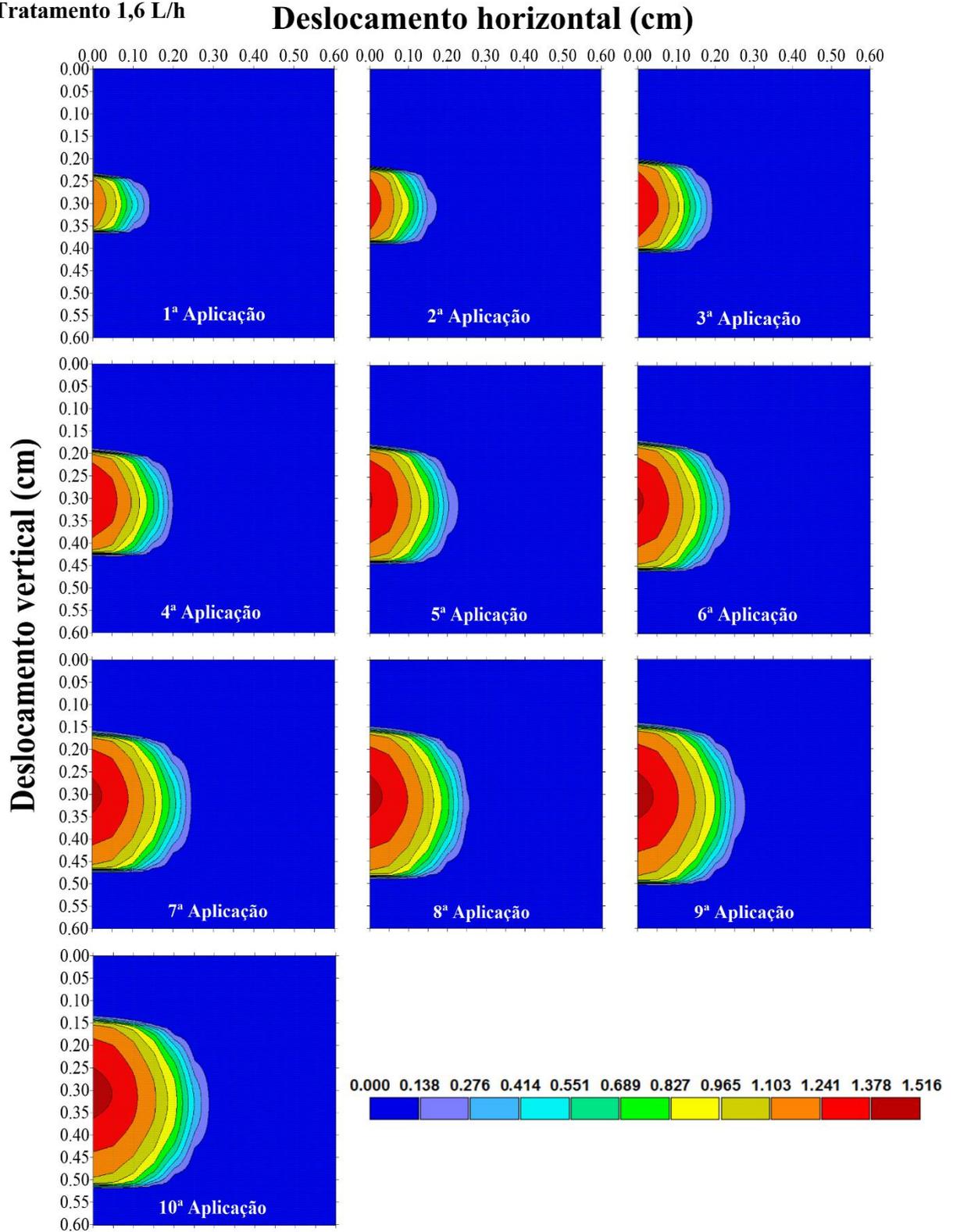


Figura 6. Perfis de concentração de nutriente (mmol L^{-1}) simulados pelo software HYDRUS-2D para o Tratamento de $1,6 \text{ L h}^{-1}$

Tratamento $1,6 \text{ L/h}$



Através dos valores observados e estimados das dimensões dos bulbos molhados, as análises estatísticas foram realizadas e apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros estatísticos utilizados para avaliação do modelo HYDRUS-2D

| Dimensões | Tratamento (L h ⁻¹) | R ² | R | RMSE (%) | MAE (%) |
|--------------------------------|------------------------------------|----------------|------|----------|---------|
| Deslocamento horizontal (x) | | 0,97 | 0,99 | 15,9 | 14,9 |
| Deslocamento vertical (z) | 1,0 | 0,93 | 0,96 | 1,7 | 0,8 |
| Ascensão pela capilaridade (y) | | 0,90 | 0,95 | 6,2 | 6,1 |
| Deslocamento horizontal (x) | | 0,98 | 0,99 | 13,4 | 13,0 |
| Deslocamento vertical (z) | 1,6 | 0,94 | 0,97 | 1,5 | 0,7 |
| Ascensão pela capilaridade (y) | | 0,92 | 0,96 | 3,5 | 3,4 |

Por meio das informações obtidas na análise notou-se que os valores do deslocamento horizontal, vertical e ascensão possuíram coeficientes de determinação (R²) como de correlação (R) elevados, significando o quanto é alta a explicação do modelo matemático para com os valores observados nos ensaios experimentais. Em relação ao RMSE e MAE, como ambos são medidas de precisão, no qual o valor zero representa uma previsão perfeita e este valor tende a aumentar conforme o aumento da diferença entre valores, observou-se que todos os deslocamentos apresentaram valores abaixo de 16,0%, portanto, próximos a uma boa concordância.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelos auxílios concedidos (Processos Fapesp: 2012/21151-4, 2012/18655-0 e 2012/09481-9) e ao CNPq.

7 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que o modelo HYDRUS-2D pode ser utilizado para estimar as dimensões do bulbo molhado em relação a concentração de nutriente para os gotejadores com vazões de 1,0 e 1,6 L h⁻¹, nas condições do presente ensaio, devido à alta correlação obtida entre os dados estimados pelo modelo e observados nos ensaios experimentais, adquirindo novas informações sobre o gotejamento subsuperficial.

8 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. E. P. de; MAENO, P. **Requerimento de água das culturas para fins de dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação localizada**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 76p.

BARROS, A. C.; FOLEGATTI, M. V.; SOUZA, C. F.; SANTORO, B. L. Distribuição de água no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.6, p. 700-707, 2009.

- BIZARI, D. R.; GRECCO, K. L.; OLIVEIRA, P. L. de; QUERIDO, D. C. M.; SOUZA, C. F. Soil solution distribution under subsurface drip fertigation determined using TDR technique. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.8, n.2, p. 139-146, 2014.
- GARDNER, W.H. **Water content**. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, p. 493-544, 1986.
- MIRANDA, J. H. de; DUARTE, S. N. Modelo para simulação da dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p. 235-241, 2002.
- MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; LIBARDI, P. L. Modelo para simulação do movimento de solutos no solo. In: **Anais IV Congresso Brasileiro da Sociedade Brasileira de Informática Aplicada à Agropecuária e Agroindústria (SBI-AGRO)**, Porto Seguro, p. 1-5, 2003.
- NOGUEIRA, C. C. P.; COELHO, E. F.; LEÃO, M. C. S. Características e dimensões do volume de um solo molhado sob gotejamento superficial e subsuperficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p. 315-320, 2000.
- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, New York, v.1, p. 318-333, 1931.
- SATO, L. M.; SOUZA, C. F.; PERES, J. G. Avaliação dos modelos matemáticos para dimensionamento do bulbo molhado na irrigação por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, v.18, n.1, p. 99-112, 2013.
- ŠIMŮNEK, J.; VOGEL, T.; van GENUCHTEN, M.T. **SWMS 2D: simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media**. Riverside: USDA, U.S. Salinity Laboratory, 1994. 216 p. (Research Report, 132).
- SKAGGS, T. H.; TROUT, T. J.; ŠIMŮNEK, J.; SHOUSE, P. J. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.130, n.4, p. 304-310, 2004.
- SOUZA, C. F.; FOLEGATTI, M. V.; MATSURA, E. E.; OR, D. Calibração da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para a estimativa da concentração da solução no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p. 282-291, 2006a.
- SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E.; FOLEGATTI, M.V.; COELHO, E.F.; OR, D. Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, Botucatu, v.11, n.1, p. 12-25, 2006b.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p. 892-898, 1980.

van GENUCHTEN; M. T.; ŠIMŮNEK, J. **Integrated modeling of vadose zone flow and transport processes**. In: FEDDES, R.A.; ROOIJ, G.H.; DAM, J.C. van. *Unsaturated zone modeling: Progress, challenges in applications*. Dordrecht: Kluwer Academic, Cap. 2, p. 37-69, 2004.