

## SIMULAÇÃO DE FORMAÇÃO DE FAIXA MOLHADA NA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL EM SOLO FRANCO

SÉRGIO LUIZ AGUILAR LEVIEN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Engenheiro Agrícola, D.Sc., Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, UFERSA, Mossoró-RN, e-mail: sergiolevien@ufersa.edu.br

### 1 RESUMO

A simulação permite acompanhar a evolução dos bulbos molhados, na irrigação por gotejamento superficial, ao longo do tempo, mediante a fixação do espaçamento entre emissores e da vazão do gotejador, podendo-se ao final obter os resultados que melhor se adequem às características do solo. Utilizando o modelo PSIGS simulou-se a formação de bulbos molhados sobrepostos e, por consequência, de uma faixa molhada ao longo da linha lateral, permitindo a determinação da forma e das dimensões da mesma. Selecionou-se a classe de solo franco (“loam soil”), utilizando-se cinco vazões (0,70; 1,00; 1,60; 2,30 e 3,00 L h<sup>-1</sup>), considerando-se o valor do teor de água inicial correspondendo ao potencial matricial inicial do solo de -60 kPa; e os tempos de aplicação de água no solo foram de 2 h; enquanto para testar a formação de faixa molhada estipularam-se diferentes separações entre emissores, de 0,30 a 0,60 m. Com estes dados selecionados estimou-se os valores do padrão de molhamento (largura máxima e profundidade máxima), tanto para bulbo molhado isolado como na formação de faixa molhada, para diferentes vazões, tempos de aplicação de água e separação entre emissores, através de simulação usando o modelo PSIGS. Os resultados obtidos pela simulação de um solo com textura franca com diferentes separações entre emissores mostram-se adequados à realidade e condizentes com a teoria, podendo ser aplicados no dimensionamento de instalações de irrigação por gotejamento superficial.

**Palavras-chave:** movimento de água no solo, volume de solo molhado, modelagem

### 2 INTRODUÇÃO

O fluxo de água e sua distribuição dentro do solo através de irrigação por gotejamento são diferentes daqueles obtidos com outros métodos de irrigação. Na irrigação por gotejamento a água é aplicada a partir de emissores espaçados e instalados em uma linha lateral do sistema de irrigação. Dois layouts típicos de gotejadores em linhas laterais determinam o padrão de distribuição de água no solo. No primeiro, os gotejadores são montados ou inseridos ao longo das linhas laterais do sistema de irrigação em intervalos de comprimento, que criam um volume de solo molhado distinto, também chamado de bulbo úmido, para cada emissor, sem sobreposição, e é usado, normalmente, na irrigação de pomares e culturas anuais amplamente espaçadas. No segundo, os gotejadores são posicionados ao longo das linhas laterais do sistema de irrigação, garantindo a sobreposição dos volumes de solo molhado pelos gotejadores adjacentes, criando uma faixa molhada, e é a escolha preferida para a irrigação de culturas anuais densamente cultivadas (PEREIRA, 2004; SNE, 2005; EVANS et al., 2007; SOUZA, 2009).

A distribuição da água e a forma do volume de solo molhado podem ser preditas pelas leis físicas de movimento capilar da água no solo tanto para uma fonte pontual como linear.

Com o avanço dos recursos computacionais, a modelagem matemática surgiu como uma solução alternativa e poderosa na predição do movimento tridimensional de água no solo, podendo-se processar a simulação de modelos complexos em um espaço de tempo aceitável.

A simulação permite acompanhar a evolução dos bulbos molhados, na irrigação por gotejamento superficial, ao longo do tempo, mediante a fixação do espaçamento entre emissores e da vazão do gotejador, podendo-se ao final obter os resultados que melhor se adequem às características do solo.

Na literatura há uma série de modelos que descrevem a infiltração de uma fonte pontual que pode ser usada para projetar, instalar e gerenciar sistemas de irrigação por gotejamento, mas muito poucos que descrevem a formação de uma faixa molhada. Entre estes modelos que simulam a formação de uma faixa molhada podemos citar os modelos HYDRUS 2D/3D (SIMUNEK et al., 1999; 2006; 2011) e PSIGS (SOUZA, 2009).

Segundo Evans et al. (2007), o padrão de molhamento produzido por um emissor de fonte pontual, em um solo homogêneo, é uma forma hemisférica tridimensional, ou próxima a isso, com um gradiente de umidade a partir do centro (ponto fonte) até a extremidade do volume formado. Já, o padrão de molhamento produzido por uma aplicação de fonte linear, por emissores próximos uns dos outros após os mesmos se fundirem, irá apresentar uma forma de meio cilindro bidimensional, no solo homogêneo. No entanto, em solo estratificado em camadas, os padrões de molhamento tenderão a ser confinados no interior da camada superior, de modo que o fundo do hemisfério ou meio-cilindro será relativamente plano, apresentando um padrão de molhamento na forma de um disco ou um retângulo.

Baseado no exposto anteriormente estimou-se os valores do padrão de molhamento, tanto para bulbo molhado isolado como na formação de bulbos molhados sobrepostos e, por consequência, de uma faixa molhada ao longo da linha lateral, permitindo a determinação da forma e das dimensões da mesma, em solo de textura franca, para diferentes vazões, tempos de aplicação de água e separação entre emissores, através de simulação usando o modelo PSIGS.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho é utilizado o software PSIGS (SOUZA, 2009) baseado em um modelo numérico desenvolvido para a simulação do movimento de água no solo sob irrigação por gotejamento superficial, em que o método de volumes finitos foi utilizado para a resolução da equação diferencial parcial de escoamento de água em meios porosos, considerando o solo um meio poroso estável, homogêneo e isotrópico. As propriedades hidráulicas do solo são modeladas usando as relações de van Genuchten-Mualem (VAN GENUCHTEN, 1980). O fluxo de água no solo é tratado tridimensionalmente para a determinação do seu movimento nas fases de infiltração e redistribuição. Através da consideração de condições de contorno adequadas, modelou-se a formação de bulbos molhados sobrepostos e, por consequência, de uma faixa molhada ao longo da linha lateral, permitindo a determinação da forma e das dimensões da mesma. O modelo permite acompanhar a evolução dos bulbos ao longo do tempo, mediante a fixação do espaçamento entre emissores e da vazão do gotejador, podendo-se ao final obter os resultados que melhor se adequem às características do solo.

Para realizar as simulações selecionou-se uma das doze classes de solos do USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos), sendo que os valores médios da classe foram obtidos utilizando os softwares SPAW (SAXTON et al., 1986; SAXTON; RAWLS,

2006) e ROSETTA (SCHAAP; LEIJ, 1998; SCHAAP et al., 2001). A classe de solo selecionada foi: solo franco (loam soil).

Os valores dos dados médios da classe de solo selecionada, obtidos pelo software SPAW, estão resumidos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Dados médios da classe de solo selecionada, do estudo de dinâmica de água no solo irrigado por gotejamento superficial

Classe de solo	Argila	Silte	Areia	Ds
	g kg <sup>-1</sup>			g cm <sup>-3</sup>
franco (loam)	180	400	420	1,57

Os valores dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980), obtidos pelo software ROSETTA, para dados médios da classe de solo selecionada, estão resumidos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, do estudo de dinâmica de água no solo irrigado por gotejamento superficial

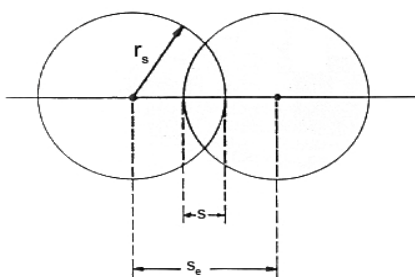
Classe de solo	Parâmetros				
	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	n	Ks
	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>		cm <sup>-1</sup>	-	cm h <sup>-1</sup>
franco (loam)	0,06090	0,39910	0,01112	1,47367	0,50152

As vazões de emissor selecionadas foram 0,70; 1,00; 1,60; 2,30 e 3,00 L h<sup>-1</sup>; o valor do teor de água inicial foi o correspondente, para o solo selecionado, ao potencial matricial inicial do solo de -60 kPa, ou seja, de solo úmido; e os tempos de aplicação de água no solo foram de 2 h, com resultados colhidos através de simulação em intervalos de 10 min, entre eles; enquanto para testar a formação de faixa molhada estipularam-se diferentes separações entre emissores, de 0,30 a 0,60 m, com intervalo de 0,10 m entre elas.

Considerou-se que a frente de molhamento do bulbo era a isolinha de umidade igual a 0,200 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>.

Com estes dados selecionados estimou-se os valores do padrão de molhamento (largura máxima e profundidade máxima), tanto para bulbo isolado como na formação de faixa molhada, para diferentes vazões, tempos de aplicação de água e separação entre emissores, através de simulação usando o modelo PSIGS.

A sobreposição superficial entre dois bulbos é representada na Figura 1, onde S é a distância de sobreposição, Se é o espaçamento entre emissores, e rs é o raio superficial do bulbo.



**Figura 1.** Sobreposição superficial entre bulbos molhados

Fonte: Pizarro (1990)

A sobreposição, chamada de  $S_p$ , é dada, então, por:

$$S_p = \frac{S}{r_s} \cdot 100 \quad (1)$$

em que a distância de sobreposição ( $S$ ) é dada por:

$$S = 2 \cdot r_s - S_e \quad (2)$$

#### 4 RESULTADOS

Na simulação avaliou-se a formação dos bulbos molhados na fase de infiltração, obtidos pelo modelo para quatro intervalos de tempo, observando-se desde a formação do bulbo isolado até a sua sobreposição ( $S_p$ ) com o bulbo vizinho, formando uma faixa molhada, a partir da redução do espaçamento entre os gotejadores ( $S_e$ ).

Os dados de entrada considerados para as simulações realizadas com o software PSIGS foram os apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Os valores de largura do bulbo ( $W$ ), sobreposição ( $S_p$ ) e profundidade ( $Z$ ) alcançadas para os tempos de aplicação de água e espaçamentos entre emissores simulados pelo modelo são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Valores da sobreposição entre bulbos molhados ( $S_p$ ) alcançada pelo bulbo molhado, para vazões de 0,70; 1,00; 1,60; 2,30 e 3,00 L h<sup>-1</sup>, tempos de aplicação de água de 30, 60, 90 e 120 min, e espaçamento entre emissores de 30, 40, 50 e 60 cm, em um solo de textura franca

q	t	Z	W	S <sub>e</sub>							
				cm							
				30		40		50		60	
S	S <sub>p</sub>	S	S <sub>p</sub>	S	S <sub>p</sub>	S	S <sub>p</sub>				
L h <sup>-1</sup>	min	cm	cm	cm	%	cm	%	cm	%	cm	%
0.70	30	11.9	27.8	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
0.70	60	14.8	33.6	3.6	21.43	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
0.70	90	16.9	38.0	8.0	42.11	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
0.70	120	18.6	41.6	11.6	55.77	1.6	7.69	0.0	0.00	0.0	0.00
1.00	30	12.6	31.2	1.2	7.69	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
1.00	60	15.4	37.8	7.8	41.27	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
1.00	90	17.6	42.0	12.0	57.14	2.0	9.52	0.0	0.00	0.0	0.00
1.00	120	19.4	46.0	16.0	69.57	6.0	26.09	0.0	0.00	0.0	0.00
1.60	30	12.9	36.4	6.4	35.16	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
1.60	60	15.9	44.6	14.6	65.47	4.6	20.63	0.0	0.00	0.0	0.00
1.60	90	18.4	49.8	19.8	79.52	9.8	39.36	0.0	0.00	0.0	0.00
1.60	120	20.5	54.0	24.0	88.89	14.0	51.85	4.0	14.81	0.0	0.00
2.30	30	13.1	41.6	11.6	55.77	1.6	7.69	0.0	0.00	0.0	0.00
2.30	60	16.5	51.0	21.0	82.35	11.0	43.14	1.0	3.92	0.0	0.00
2.30	90	18.9	57.6	27.6	95.83	17.6	61.11	7.6	26.39	0.0	0.00
2.30	120	20.9	61.8	31.8	102.91	21.8	70.55	11.8	38.19	1.8	5.83
3.00	30	13.3	46.4	16.4	70.69	6.4	27.59	0.0	0.00	0.0	0.00
3.00	60	16.7	57.8	27.8	96.19	17.8	61.59	7.8	26.99	0.0	0.00
3.00	90	19.1	64.4	34.4	106.83	24.4	75.78	14.4	44.72	4.4	13.66
3.00	120	21.2	69.2	39.2	113.29	29.2	84.39	19.2	55.49	9.2	26.59

Para os tempos e espaçamentos entre emissores utilizados na simulação, a sobreposição entre bulbos molhados ( $S_p$ ) variou de 0,00% a 113,29%.

Caso se deseje limitar o valor da sobreposição, pode-se alterar o espaçamento entre gotejadores ou modificar o tempo de aplicação de água, ou ainda, a vazão do gotejador (SOUZA, 2009).

Observando-se os dados apresentados na Tabela 3 e baseado na recomendação de Rodrigo López et al. (1992) de uma sobreposição variando entre 15% a 25%, seriam feitas várias orientações dependentes da vazão aplicada e da separação entre emissores. Para a vazão de  $0,70 \text{ L h}^{-1}$  recomendar-se-ia um tempo de aplicação de 60 min e separação entre emissores de 30 cm. Para a vazão de  $1,00 \text{ L h}^{-1}$  seria um tempo de 120 min e separação de 40 cm. Para a vazão de  $1,60 \text{ L h}^{-1}$  o tempo ideal seria de 60 min e espaçamento de 40 cm. Para a vazão de  $2,30 \text{ L h}^{-1}$  o tempo de 90 min e separação de 50 cm. E, para a vazão de  $3,00 \text{ L h}^{-1}$  seria recomendado um tempo de 30 min e separação de 40 cm ou tempo de 60 min e separação de 50 cm ou ainda tempo de 120 min e separação de 60 cm.

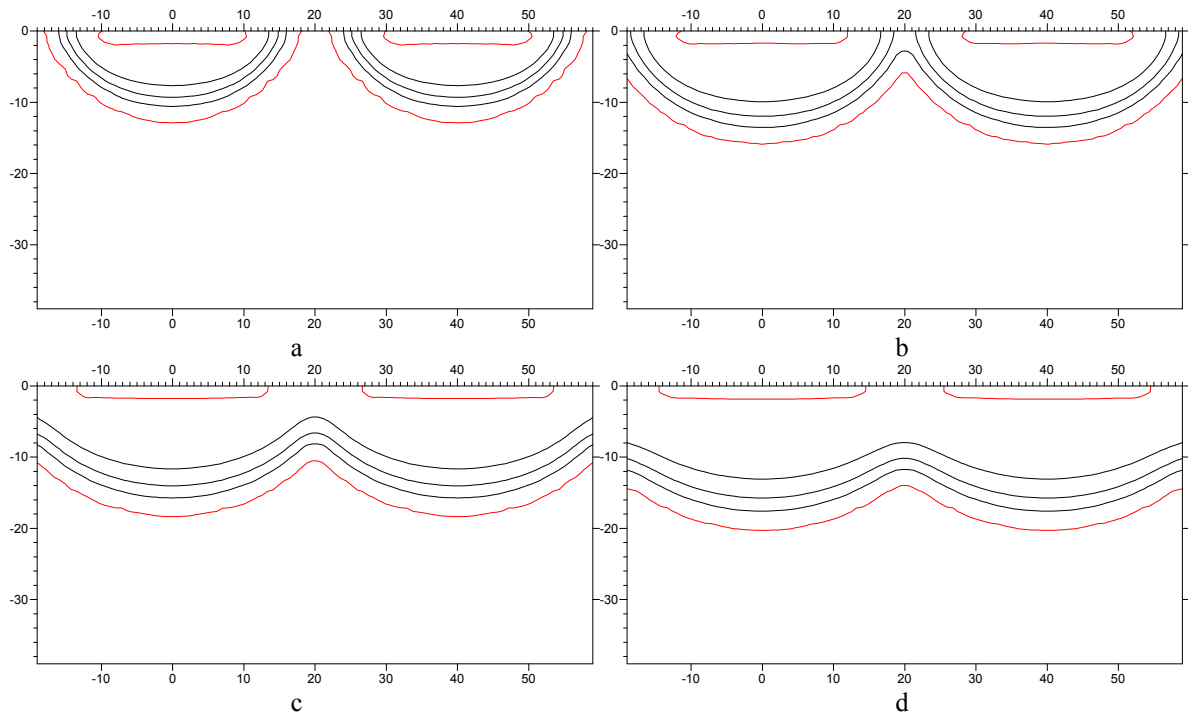
Já baseado na recomendação de Pizarro (1990) de uma sobreposição de 30% os valores seriam outros.

Os valores apresentados na Tabela 3 servem como referência para a escolha mais adequada em um projeto de um sistema de irrigação por gotejamento superficial, sabendo-se que ao dimensionar um sistema deve-se observar principalmente a profundidade molhada do bulbo gerado pelo emissor.

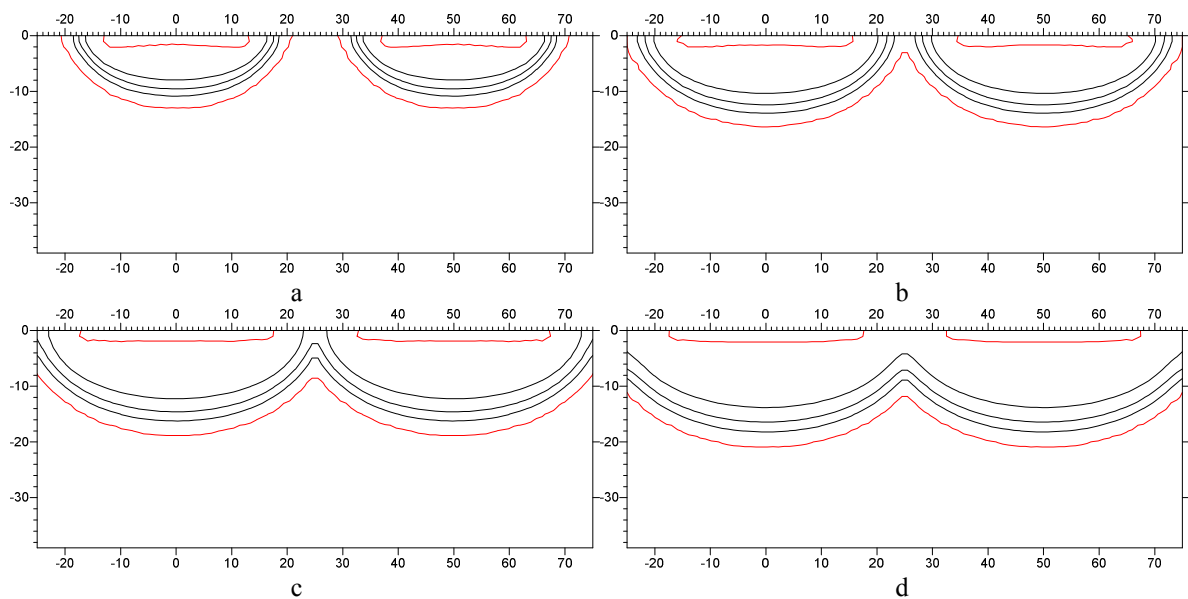
Nas situações simuladas, considerando-se as vazões aplicadas, os tempos de aplicação de água e as sobreposições, podem ser obtidas várias soluções para o problema, mas não se pode esquecer que, ao tentar formar uma faixa molhada no solo, espera-se que a mesma seja o mais homogênea possível sem muitas variações tanto na profundidade molhada ( $Z$ ) bem como na largura da mesma ( $W$ ).

Ao usar o modelo PSIGS, o mesmo possibilita visualizar o comportamento da formação da faixa molhada em diferentes tempos para uma mesma vazão e uma mesma separação entre emissores. Baseado nesta análise pode-se questionar se uma sobreposição de 20% ou 30% são ideais ou, quem sabe, pode-se concluir que, para um determinado solo, a sobreposição ideal seja maior (talvez 50%).

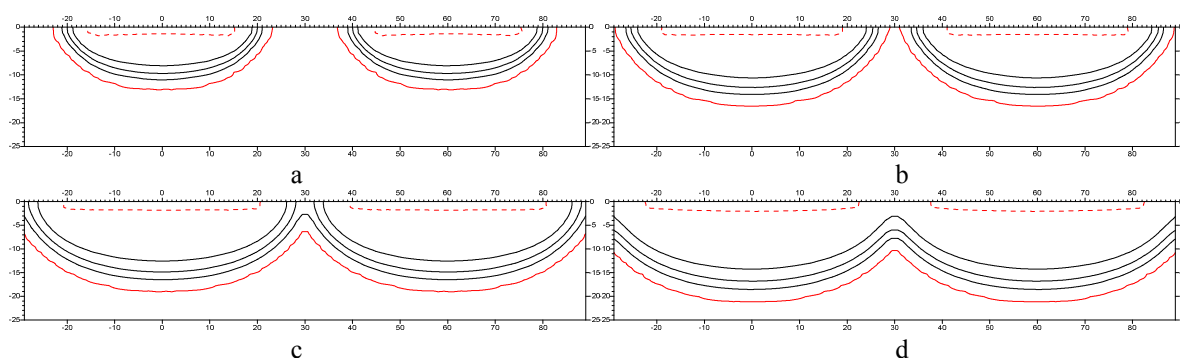
Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentados alguns exemplos de bulbos molhados formados para os espaçamentos entre os gotejadores de 40, 50 e 60 cm, depois de decorridos os tempos de 30, 60, 90 e 120 min de aplicação de água, com vazões de  $1,60$ ;  $2,30$  e  $3,00 \text{ L h}^{-1}$ .



**Figura 2.** Isolinhas de umidade da faixa molhada formada, vazão de  $1,60 \text{ L h}^{-1}$ , espaçamento entre emissores de 40 cm, tempos de aplicação de água de: a) 30 min, b) 60 min, c) 90 min, e d) 120 min



**Figura 3.** Isolinhas de umidade da faixa molhada formada, vazão de  $2,30 \text{ L h}^{-1}$ , espaçamento entre emissores de 50 cm, tempos de aplicação de água de: a) 30 min, b) 60 min, c) 90 min, e d) 120 min



**Figura 4.** Isolinhas de umidade da faixa molhada formada, vazão de  $3,00 \text{ L h}^{-1}$ , espaçamento entre emissores de 60 cm, tempos de aplicação de água de: a) 30 min, b) 60 min, c) 90 min, e d) 120 min

A análise das figuras demonstra a aplicabilidade de simulações com o modelo proposto como uma ferramenta a ser utilizada no dimensionamento do espaçamento entre gotejadores na linha lateral, durante a fase de desenvolvimento de projetos de irrigação por gotejamento superficial. Fixando-se um valor para a vazão do gotejador, pode-se simular a formação do bulbo molhado para diversos espaçamentos, adotando-se aquele que melhor atenda o sistema radicular das plantas, evitando-se, por exemplo, uma faixa molhada muito larga ou perda de água por percolação profunda.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos pela simulação de um solo com textura franca com diferentes separações entre emissores mostram que os mesmos são adequados à realidade e condizentes com a teoria, podendo ser utilizados como uma ferramenta no dimensionamento de instalações de irrigação por gotejamento superficial.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EVANS, R. G.; WU, I.; SMAJSTRALA, A. G. Microirrigation systems. In: HOFFMAN, G. J.; EVANS, R. G.; JENSEN, M. E.; MARTIN, D. L.; ELLIOTT, R. L. **Design and operation of farm irrigation systems**. 2. ed. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Chapter 17, p. 632-683, 2007.
- PEREIRA, L. S. **Necessidades de água e métodos de rega**. Publicações Europa-América, Mem Martins, Portugal. 2004. 312 p.
- PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación**. 2. ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 1990. 471 p.
- RODRIGO LÓPEZ, J.; HERNÁNDEZ ABREU, J. M.; PEREZ REGALADO, A.; GONZALEZ HERNANDEZ, J. F. **Riego localizado**. MAPA-YRIDA, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 1992. 405p.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J.; ROMBERGER, J. S.; PAPENDICK, R. I. Estimating generalized soil water characteristics from texture. **Soil Science Society of American Journal**, v.50, p.1031-1035, 1986.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Soil Science Society of American Journal**, v.70, p.1569-1578, 2006.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. **Soil Science**, v.163, p.765-779, 1998.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, v.251, p.163-176, 2001.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M. T. **The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media**. Version 2.0. USDA, ARS, USSS, Riverside, USA. 1999. 227p.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; SEJNA, M. **The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media**. Technical Manual, version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic. 2006. 213p.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T.; SEJNA, M. **The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media**. Technical Manual, version 2.0. PC Progress, Prague, Czech Republic. 2011. 258p.

SNE, M. **Drip Irrigation**. Centre for International Agricultural Development Cooperation (CINADCO), Ministry of Agriculture, Israel. 2005. 132 p.

SOUZA, L. A. A. **Fluxo tridimensional de água no solo: aplicação de volumes finitos na simulação da irrigação por gotejamento superficial**. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró. 128p, 2009.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.5, p.892-898, 1980.