

MODELAGEM DA DINÂMICA DO POTÁSSIO NO SOLO SOB IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO: VALIDAÇÃO DO MODELO

RENÉ N. C. RIVERA¹, SERGIO N. DUARTE², JARBAS H. DE MIRANDA³,
TARLEI A. BOTREL⁴

RESUMO: A compreensão do transporte simultâneo de água e solutos a partir de uma fonte pontual permite desenvolver estratégias eficientes na fertirrigação, sendo importante no dimensionamento, operação e manejo de sistemas de irrigação localizada. Assim, o presente trabalho teve como objetivo apresentar a validação de modelo matemático desenvolvido para simular o deslocamento simultâneo de água e potássio na irrigação por gotejamento. O desenvolvimento do modelo baseou-se na resolução numérica de equações diferenciais parciais de segunda ordem, aplicadas à fonte puntiforme sob fluxo transiente de água e solutos. O experimento de validação foi conduzido no Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho, fase arenosa, série “Sertãozinho”, no qual foi aplicada uma solução de cloreto de potássio com concentração de 500 mg L⁻¹ de K, com vazão de 3 L h⁻¹, durante 2 h. Os tempos de amostragem foram 24; 48 e 72 h após o início da irrigação. Observou-se que houve bom ajuste nos valores da distribuição conjunta de água e potássio no bulbo quando foram comparados os dados simulados pelo modelo e os obtidos experimentalmente. A distribuição do potássio ficou limitada às camadas mais internas do bulbo, mostrando que o deslocamento do cátion foi retardado ao interagir com a matriz do solo.

PALAVRAS-CHAVE: simulação, transporte de potássio, bulbo úmido.

POTASSIUM MODELING DYNAMICS IN THE SOIL UNDER DRIP IRRIGATION: MODEL VALIDATION

ABSTRACT: The understanding of simultaneous water and solute transport from a punctual source allow, in fertigation, to develop efficient strategies, important in design, operation and handling of drip irrigation systems. Thus, the present work has as objective to present a mathematical model validation applied to simulate the simultaneous water and potassium dynamic under drip irrigation. The model development was based on the numeric resolution of partial differential equations of second order from point sources under transient flow of water and solute. The validation experiment was done at ESALQ/USP/Brazil. The soil used was a Red Latosol, sandy texture, “Sertãozinho” series, where a potassium chloride was applied in a 500 mg L⁻¹ concentration of K, with a 3 L h⁻¹ flow, for 2 h. The sampling times were 24; 48 and 72 hr after the irrigation beginning. It was observed that there was a good adjustment in the distribution of water and potassium values in the bulb when compared the data simulated by the model and experimentally obtained. The potassium distribution was limited to the most internal bulb layers, showing the ion displacement was delayed due soil matrix interactions.

KEYWORDS: simulation, potassium transport, wet bulb.

¹ Eng^o Agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, Professor da Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolívia, Calle Héroes del Acre, 1850, Fone: (5912) 249.1558, renechipana@yahoo.com

² Prof. Dr., Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP, snduarte@esalq.usp.br

³ Prof. Dr., Departamento de Ciências Exatas, ESALQ/USP, jhmirand@esalq.usp.br

⁴ Prof. Associado, Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP, tabotrel@esalq.usp.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 7-6-2004

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 14-7-2006

INTRODUÇÃO

Há alguns anos, a técnica da quimigação vem ganhando aceitação nos sistemas de irrigação, devido às vantagens que apresenta. Deve-se ressaltar, entretanto, que ela deve ser aplicada de modo adequado, pois, caso contrário, pode levar a problemas econômicos e a danos ao meio ambiente (KENGET et al., 1979). Segundo MMOLAWA & OR (2000), os produtos químicos aplicados por meio da água de irrigação sofrem mudanças espacial e temporal no solo, variando sua distribuição no perfil, o que resulta em diferentes padrões de distribuição. Para CLOTHIER (1984), a compreensão do transporte simultâneo de água e solutos, em duas ou três dimensões, a partir de uma fonte pontual, permite desenvolver estratégias eficientes, sendo importante no dimensionamento, operação e manejo da fertirrigação.

Vários modelos matemáticos são usados para descrever o transporte de água e solutos em meios porosos. Modelos de infiltração para fontes puntiformes foram apresentados por BRANDT et al. (1971), WARRICK (1974) e WARRICK (1985), entre outros. Os altos custos envolvidos nas pesquisas de campo e os avanços computacionais fazem com que os modelos matemáticos, aliados às técnicas numéricas, se constituam em ferramentas bastante viáveis, possibilitando predição do destino e do comportamento da água e dos solutos na irrigação localizada. Segundo ZANINI (1991), o conhecimento da conformação dos bulbos para as diferentes condições de campo é muito importante para projetos de irrigação e para a prática da fertirrigação, e de maneira geral, os locais de maiores concentrações de K^+ coincidem com os locais de maiores valores de umidade, evidenciando seu caminhar por fluxo de massa, concordando com MALAVOLTA (1980), isto é, a distribuição de potássio no solo correlacionou-se à distribuição de água no solo, indicando que se pode ter elevado controle da localização desse íon no solo em função da fertirrigação e da irrigação.

Dentre esses solutos para fornecimento do íon potássio, o cloreto de potássio é um dos fertilizantes mais empregados, devido ao fato de que os efeitos da deficiência de potássio na produtividade das plantas são bastante pronunciados.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo apresentar a validação experimental de modelo matemático desenvolvido para simular o deslocamento simultâneo de água e potássio no solo sob irrigação por gotejamento.

MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do modelo foi baseado na solução numérica das equações diferenciais parciais (EDP) de segunda ordem aplicadas a fontes puntiformes sob fluxo transiente, permitindo determinar a distribuição simultânea de água e de solutos no solo, em função do espaço e do tempo. A eq.(1) representa a EDP utilizada para descrever a dinâmica do íon potássio no solo.

$$Fr \frac{\partial \theta C}{\partial t} = -\frac{\partial(qC)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[D\theta \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \frac{\partial(qC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D\theta \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (1)$$

em que,

Fr - fator de retardamento, adimensional;

θ - umidade atual do solo, $L^3 L^{-3}$;

D - coeficiente de dispersão-difusão, adimensional;

q - volume da solução que passa em uma unidade de área de solo na unidade de tempo, $L T^{-1}$, e

C - massa do soluto por unidade de volume de solução, $M L^{-3}$.

A solução foi implementada utilizando a técnica dos volumes de controle finitos, efetuando incrementos de espaço no sentido radial e vertical, e incrementos de tempo, levando-se em consideração as hipóteses descritas por BOTREL (1988) e CRUZ (2000), sendo a região de estudo assumida como tendo forma cilíndrica e composta de anéis concêntricos (Figura 1).

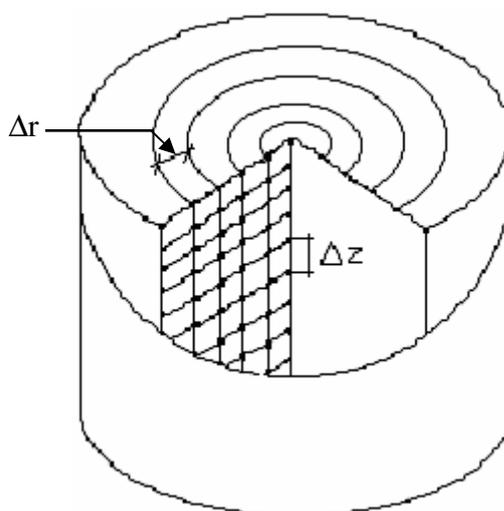


FIGURA 1. Esquema dos anéis concêntricos considerados na simulação para descrever a forma de bulbo úmido hemisférico.

O experimento de validação do modelo foi conduzido dentro de uma estufa pertencente ao Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP. O material de solo utilizado foi originado de um perfil classificado como Latossolo Vermelho, fase arenosa, série “Sertãozinho”. Nas Tabelas 1; 2 e 3, são apresentadas as características químicas, conforme metodologia de RAIJ & QUAGGIO (1983), e físico-hídricas, cuja análise granulométrica das amostras foi feita pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1997).

TABELA 1. Características químicas da terra utilizada.

pH (CaCl ₂)	MO* g kg ⁻¹	P mg dm ⁻³	S mg dm ⁻³	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al ³⁺	CTC	V	m
				-----m mol _c dm ⁻³ -----					-----%	
4,3	7	2	4	1,1	9	4	18	32,1	44	18

*Matéria orgânica

TABELA 2. Características físico-hídricas da terra utilizada.

Textura			Densidade		Porosidade (%)	Ko (cm h ⁻¹)
Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Global (g cm ⁻³)	Partículas (g cm ⁻³)		
67	6	27	1,37	2,41	43,195	10,221

TABELA 3. Parâmetros da curva de retenção, segundo o modelo de GENUCHTEN (1980).

Parâmetros da Curva de Retenção				
θ _r (cm ³ cm ⁻³)	θ _s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (adimensional)	m (adimensional)
0,113	0,482	0,029428	1,828069	0,452975

Foram determinados os parâmetros de transporte de potássio no bulbo úmido a partir da elaboração de uma curva de eluição (“breakthrough curve”), sendo utilizado como soluto o cloreto de potássio, com concentração de potássio de 500 mg L⁻¹. A aplicação foi feita em uma coluna de solo inserida em um tubo de PVC de 5 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O teste estendia-se até que a concentração da solução coletada (C) fosse igual à da solução aplicada (C₀). Com o intuito de auxiliar na estimativa das concentrações, foi elaborada uma curva de calibração da concentração de potássio em função da condutividade elétrica (CE) da solução. O teste foi finalizado quando a CE dos volumes coletados atingiram valor próximo a 1,7 dS m⁻¹, o qual representava, aproximadamente, uma concentração de 500 mg L⁻¹ de potássio.

Nas amostras coletadas, determinou-se em laboratório o teor de potássio por fotometria de chama. Os volumes de solução coletados foram de 15 mL, o que representava aproximadamente 0,082 volumes de poros. Esse volume foi controlado com balança de precisão de 0,01 g, assumindo-se que a solução tivesse densidade igual a um. Os teores de potássio obtidos foram utilizados como dados de entrada do programa CXTFIT (desenvolvido pelo U.S. Salinity Laboratory-USDA-Riverside-CA), para determinar os valores dos parâmetros de transporte de solutos no solo: o coeficiente de dispersão-difusão (D), a velocidade da água nos poros (V), a dispersividade (λ) e o fator de retardamento (Fr).

Para a validação propriamente dita, o solo foi seco ao ar e posteriormente peneirado através de uma malha de 5 mm. Em seguida, encheu-se uma caixa de polietileno, com a forma de um tronco de cone, de 2,0 m³ de capacidade, com 166 cm de diâmetro na parte superior, 142 cm de diâmetro na parte inferior e altura de 110 cm. Posteriormente, foi aplicada ao solo uma solução de cloreto de potássio à vazão de 3 L h⁻¹, durante 2 h. Na coleta de amostras para a determinação da umidade do solo e da concentração de potássio, empregou-se um trado do tipo “caneco”, sendo adaptado um sistema de encamisamento do orifício de coleta com um tubete de PVC, para evitar a contaminação das camadas inferiores. O diâmetro de coleta com o trado foi de 4,9 cm, possuindo altura de 10 cm, sendo o volume de solo coletado em cada amostragem igual a 190 cm³, o que equivalia aproximadamente a 260 g de solo seco. O tubete tinha diâmetro interno de 4,72 cm, sendo inferior ao diâmetro da ponta do trado, o que facilitou o encamisamento gradual, conforme se aprofundava.

Os pontos de amostragem foram localizados ao longo de uma malha formada pelos anéis concêntricos, tomando-se como eixo central o ponto em que estava localizado o emissor. Os tempos de amostragem foram: antes da irrigação, 24; 48 e 72 h após o início da irrigação. As amostras foram retiradas a dez profundidades (0 a 100 cm) e a oito distâncias radiais (0 a 80 cm), totalizando 90 amostras em cada tempo.

A amostragem para a determinação da concentração de potássio na solução do solo foi realizada juntamente com a amostragem de umidade. A determinação de potássio foi feita com base na retirada do extrato de saturação do solo. Primeiro preparou-se uma pasta saturada com o solo que foi retirado, deixando-o em repouso por 24 h. Posteriormente, o extrato foi retirado por meio de bomba de vácuo para ser submetido à análise. A concentração foi corrigida em função das umidades das amostras e das pastas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4, são apresentados os parâmetros de transporte do potássio obtidos com o modelo CXTFIT. Com base nessas informações e naquelas contidas nas Tabelas 2 e 3, foram efetuadas as simulações da distribuição simultânea de água e potássio.

TABELA 4. Parâmetros de transporte do potássio obtidos com o modelo CXTFIT.

Parâmetros de Transporte do Potássio			
V (cm min ⁻¹)	D (cm ² min ⁻¹)	R (adimensional)	λ (cm)
1,489	2,705	4,730	1,816655

Antes da irrigação, a umidade do solo variou, nas diferentes camadas, entre 0,119 e 0,128 cm³cm⁻³, sendo baixa e quase constante ao longo do solo. O conteúdo inicial de potássio na solução do solo também foi baixo, variando entre 16,1 e 23,4 mg L⁻¹, com valor médio de 20,5 mg L⁻¹.

De acordo com os dados obtidos, o conteúdo de umidade do solo dentro do bulbo após 24 h da irrigação, para as duas situações (dados simulados e observados), variou na faixa de 0,15 a 0,20 cm³cm⁻³, sendo que o bulbo tinha na superfície raio de aproximadamente 30 cm e profundidade de cerca de 40 cm, adquirindo, portanto, forma quase hemisférica, semelhante ao

encontrado por BOTREL (1988). Fora da região do bulbo, praticamente não houve mudança no conteúdo de água. O valor da umidade medida dentro do bulbo representa pouco menos da metade da umidade de saturação ($0,482 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), pois, no intervalo de tempo que decorreu desde a finalização da irrigação até o momento da amostragem, houve sensível redistribuição da solução, tal como citado por CRUZ (2000). Para os tempos de distribuição de 48 e 72 h após a irrigação, observou-se que as dimensões do bulbo ficaram quase constantes, para ambas as situações; entretanto, houve ligeira diminuição da umidade, principalmente nas células (espaço entre um anel e o subsequente) próximas ao ponto do emissor, o que levou ao acréscimo da umidade das células adjacentes (redistribuição interna).

Em geral, os valores de umidade obtidos experimentalmente se apresentaram semelhantes aos simulados pelo modelo, sendo as pequenas diferenças atribuídas, possivelmente, aos erros experimentais e às limitações do modelo (BOTREL, 1988; CRUZ, 2000).

Com respeito à distribuição do potássio, nas Tabelas 5 e 6 e na Figura 2, é apresentada a concentração do íon nas diferentes células, após 24 h da irrigação, para as duas situações (dados medidos e simulados). Pode-se verificar que o potássio foi retido nas camadas superficiais, sendo que tanto para os valores medidos quanto para os simulados, as maiores concentrações ficaram contidas em um raio de 10 cm na superfície e profundidade de 0 a 20 cm, onde as concentrações de potássio variaram de 62 até 817 mg L^{-1} . O volume de solo contendo potássio em quantidades consideráveis, ou seja, maiores do que 200 mg L^{-1} (“bulbo de potássio”), foi menor que o bulbo úmido, isto é, o deslocamento do cátion não acompanhou em sua totalidade o deslocamento da água (expressado pelo fator de retardamento), provavelmente pela adsorção de potássio ao complexo de troca do solo.

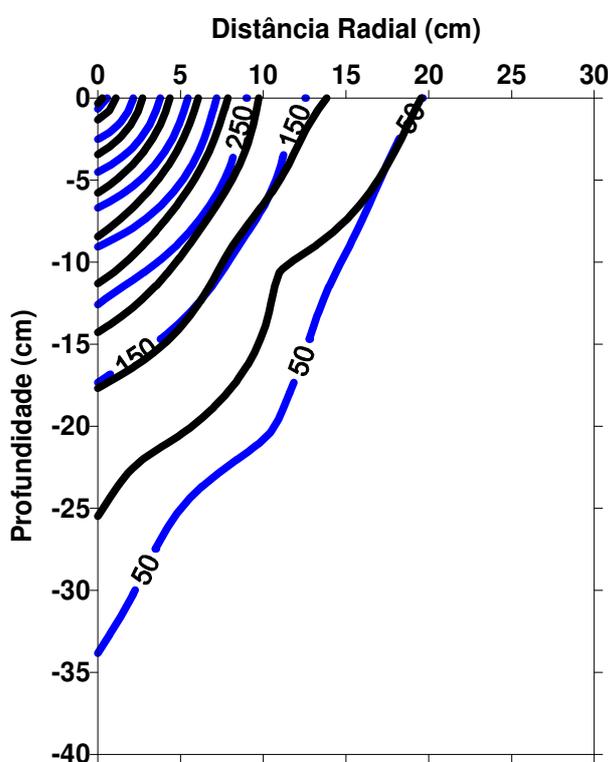
Os valores da concentração de potássio simulados pelo modelo apresentaram-se semelhantes aos observados no teste, seguindo o mesmo padrão de distribuição. Os valores obtidos experimentalmente, entretanto, mostraram-se inferiores aos gerados pelo modelo, o que pode ser devido à interação do potássio com os outros cátions presentes no complexo de troca do solo, como o Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} e o Al^{3+} (MMOLAWA & OR, 2000). Para tempo de redistribuição de 48 e 72 h após a irrigação, verificou-se que o conteúdo de potássio nas células do bulbo permaneceu quase inalterado, embora a concentração desse elemento tenha se elevado como resultado da diminuição do teor de água nas células. A diferença entre os valores simulados e os observados esteve em aproximadamente 10%, havendo, assim, 90% de confiabilidade, acreditando-se que as diferenças foram devidas às razões já explicadas.

TABELA 5. Concentração de potássio na solução do solo (mg L^{-1}), simulada pelo modelo, 24 h após a irrigação.

Profundidade (cm)	Distância Radial (cm)								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
0 - 10	817,458	235,706	42,811	19,635	21,060	23,330	23,400	23,400	23,400
10 - 20	398,168	62,900	20,329	19,122	22,093	22,596	20,280	20,280	20,280
20 - 30	87,038	20,866	17,784	20,660	22,459	22,481	22,500	22,500	22,500
30 - 40	22,003	18,123	20,476	21,809	21,822	21,822	21,820	21,820	21,820
40 - 50	18,832	20,216	21,059	21,069	21,069	21,069	21,070	21,070	21,070
50 - 60	20,289	20,417	20,419	20,420	20,420	20,420	20,420	20,420	20,420
60 - 70	20,130	20,130	20,130	20,130	20,130	20,130	20,130	20,130	20,130
70 - 80	20,100	20,100	20,100	20,100	20,100	20,100	20,100	20,100	20,100
80 - 90	18,940	18,940	18,940	18,940	18,940	18,940	18,940	18,940	18,940
90 - 100	16,070	16,070	16,070	16,070	16,070	16,070	16,070	16,070	16,070

TABELA 6. Concentração de potássio na solução do solo (mg L^{-1}), observada após 24 h da irrigação.

Profundidade (cm)	Distância Radial (cm)								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
0 - 10	787,215	194,230	44,503	31,258	21,543	17,289	18,497	23,400	23,400
10 - 20	312,681	98,059	20,313	21,803	20,249	20,280	20,280	20,280	20,280
20 - 30	98,861	54,287	18,259	18,258	22,500	22,500	22,500	22,500	22,500
30 - 40	65,007	21,369	16,293	21,820	21,820	21,820	21,820	21,820	21,820
40 - 50	24,915	13,860	14,368	21,070	21,070	21,070	21,070	21,070	21,070
50 - 60	19,315	16,972	15,683	20,420	20,420	20,420	20,420	20,420	20,420
60 - 70	18,735	16,759	16,893	20,130	20,130	20,130	20,130	20,130	20,130
70 - 80	15,724	20,100	20,100	20,100	20,100	20,100	20,100	20,100	20,100
80 - 90	16,252	18,940	18,940	18,940	18,940	18,940	18,940	18,940	18,940
90 - 100	18,247	16,070	16,070	16,070	16,070	16,070	16,070	16,070	16,070

FIGURA 2. Concentração do potássio (mg L^{-1}) no bulbo, simulada e observada, 24 h após a irrigação.

Em termos gerais, nos três tempos de redistribuição considerados, o conteúdo de potássio no solo simulado pelo modelo foi similar para as condições de experimentação e o deslocamento acompanhou parcialmente o deslocamento da água. O potássio apresentou taxas muito baixas de redistribuição e concentrou-se na superfície do solo e nas proximidades da fonte puntiforme, o que aparentemente demonstra que, além de ser retido nas camadas superiores ao ser adsorvido pela matriz do solo, o mesmo é transportado fundamentalmente pelo fluxo convectivo, junto com a água (denominado também de fluxo de massa), em forma proporcional à sua concentração (PREVEDELLO, 1996).

CONCLUSÕES

Houve bom ajuste dos valores da distribuição conjunta de água e potássio no bulbo quando se compararam os dados simulados pelo modelo com os dados obtidos experimentalmente. A

distribuição do potássio ficou limitada às camadas superficiais do bulbo, sendo o deslocamento do cátion retardado pela adsorção da matriz do solo.

REFERÊNCIAS

- BOTREL, T.A. *Simulação da distribuição espacial da água em solo irrigado com gotejador*. 1988. 80 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.
- BRANDT, A.; BRESLER, E.; DINER, N.; BEM-ASHER, J.; HELLER, J.; GOLDBERG, D. Infiltration from trickle source: I mathematical models. *Soil Science Society of America Proceedings*, Knoxville, v.35, n.5, p.675-82, 1971.
- CLOTHIER, B.E. Solute travel times during trickle irrigation. *Water Resources Research*, Washington, v.20, n.12, p.1848-52, 1984.
- CRUZ, R.L. *Modelização do balanço hídrico de uma cultura irrigada por um sistema de irrigação localizada*. 2000. 80 f. Tese (Livre-Docência em Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de métodos de análise do solo*, 1997. 212 p.
- GENUCHTEN, M.T. Van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.44, n.3, p.892-8, 1980.
- KENGET, J.C.W.; SCOTT, T.W.; LUGO-LOPEZ, M. A fertilizer management with drip irrigation in a oxisol. *Agronomy Journal*, Madison, v.71, n.6, p.971-80, 1979.
- MALAVOLTA, E. *Potássio, magnésio e enxofre nos solos e culturas brasileiras*. 2.ed. Piracicaba: Instituto Internacional de Pesquisa da Potassa, 1980. 91 p. (Boletim Técnico, 4)
- MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under a drip irrigation: a review. *Plant and Soil*, Wageningen, v.22, n.2, p.163-90, 2000.
- PREVEDELLO, C.L. *Física do solo com problemas resolvidos*. Curitiba: Sociedade Autônoma de Estudos Avançados em Física do Solo, 1996. 446 p.
- RAIJ, B. Van; QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solos para fins de fertilidade. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 52 p. (Boletim Técnico, 81).
- WARRICK, A.W. Time-dependent linearized infiltration: i) point source. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v.38, n.3, p.383-6, 1974.
- WARRICK, A.W. Point and line infiltration-calculations of the wetted soil surface. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v.49, n.6, p.1581-3, 1985.
- ZANINI, J.R. Distribuição de água e do íon K⁺ no solo, aplicados por fertirrigação em gotejamento. II - Teores de K⁺ no bulbo molhado. *ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna*, Brasília, v.46, n.1, p.24-38, 1991.