

AGRÁRIA

Revista Brasileira de Ciências Agrárias
v.1, n. único, p.65-71, out.-dez., 2006
Recife, PE, UFRPE. www.agraria.ufrpe.br
Protocolo 35 - 11/12/2006

Claudinei F. Souza¹

Ênio F. F. Silva²

Marcos V. Folegatti³

Dani Or⁴

Irrigação por gotejamento: disco saturado e área superficial molhada *versus* distribuição e armazenamento da água no solo

RESUMO

O objetivo principal do dimensionamento de um sistema de irrigação é escolher adequadamente os componentes e o *layout* do sistema para promover a distribuição homogênea da água (e fertilizante) para todas as plantas ao longo do campo. Desta forma, se propõe, neste trabalho, estudar a relação entre o disco saturado e a área superficial molhada, avaliando-se os efeitos da relação água-solo que possam afetar a distribuição e o armazenamento da água no solo, em função do tempo. O ensaio foi realizado em condições de solo deformado, sendo aplicado 1 L de água a cada hora até a frente de molhamento tocar no fundo do recipiente, por meio de gotejadores com diferentes vazões (2, 4 e 8 L h⁻¹). O monitoramento do volume de solo molhado foi realizado utilizando-se sondas de TDR. O tamanho do disco saturado e o avanço da frente de umedecimento da superfície do solo foram monitorados com uma régua milimetrada. Com os resultados apresentados nesta pesquisa pôde-se concluir que: existe relação direta entre a evolução do disco saturado e a área superficial molhada para condições de laboratório, a qual demonstrou a possibilidade em antecipar perdas de água durante o processo de formação do bulbo molhado.

Palavras-chave: irrigação, bulbo molhado, Sonda de TDR

Drip irrigation: saturated disc and superficial wetted area versus soil water distribution and storage

ABSTRACT

The mainly goal of a irrigation system design is to choose the appropriate components and layout to attain adequate distribution of water (and fertilizer) throughout the field. The experiment intends to study the evolution of the saturated disc versus superficial wetted area, evaluating the effect of the water-soil relationship that may affect the soil water's distribution and storage. The experiment was accomplished in deformed soil conditions, being applied 1 L of water every one hour until the wetted front to reached the bottom of box, by emitters with different rates (2, 4 and 8 L h⁻¹). The soil wetted volume measurements was carried out. The saturated disc and wetting front process was monitored by rule. The results could be concluded, that: there is a direct relationship between the saturated disc evolution and the superficial wetted area for laboratory conditions, which demonstrated the possibility in advancing water losses during wetted bulb formation process.

Key words: irrigation, wetted bulb, TDR probe

¹ Prof. Assistente, Dept°. de Engenharia Civil e Ambiental, UNITAU, claudinei@unitau.br

² Prof. Adjunto, Dept°. de Tecnologia Rural, UFRPE, Recife-PE, silva@dtr.ufrpe.br

³ Prof. Titular, Depto. Engenharia Rural, ESALQ/USP, Piracicaba-SP, mvfolega@esalq.usp.br

⁴ Prof. LASEP, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suíça

INTRODUÇÃO

Dentre os vários sistemas de irrigação, o gotejamento tem sido crescentemente utilizado, sobretudo pela sua maior eficiência no uso da água. A água é aplicada ao solo em pequenas quantidades, embora com alta frequência, diretamente sobre a região radicular, mantendo a umidade do solo nessa região, próximo à capacidade de campo (Keller & Karmelli, 1975). Esta região é conhecida como bulbo molhado, de onde as raízes da planta irrigada absorvem facilmente água e nutrientes.

A estimativa adequada da distribuição e do armazenamento da água dentro do bulbo molhado é de fundamental importância para a determinação do número de emissores por planta e da sua localização em relação à planta ou fileira de plantas (Bernardo et al., 2006). A superestimativa da porcentagem de solo molhado reduz a eficiência do sistema, onerando-o desde o superdimensionamento da estrutura hidráulica ao desperdício de água, energia e fertilizantes, enquanto a subestimativa poderá acarretar riscos de estresse à cultura e promover a má distribuição do sistema radicular (Souza & Matsura, 2004).

Além disso, é primordial a escolha adequada dos componentes e do *layout* do sistema para promover a distribuição precisa da água para todas as plantas cultivadas, considerando-se e respeitando fatores econômicos, operacionais e ambientais. Desta forma, o conhecimento da distribuição da água no solo torna-se de fundamental importância para a agricultura, sobretudo na estimativa de sua variação, na otimização do manejo do solo e da água.

Para algumas culturas como flores, plantios adensados, árvores jovens e plantas com raízes limitadas, é preciso sobrepor os volumes de solo molhado (bulbo molhado); assim, os espaçamentos entre os emissores devem sofrer adaptações para suprir as exigências de água da cultura, cujas adaptações devem estar baseadas nas propriedades hidráulicas do solo e à taxa de aplicação do emissor. Neste sentido, o disco saturado (poça d'água, que permanece sobre o solo durante o processo de infiltração) e o avanço da frente de umedecimento na superfície do solo, são informações intimamente relacionadas à variação espacial das propriedades físicas do solo, as quais adicionam variações na distribuição da água aplicada pelos gotejadores. Essas variações no volume de solo molhado são problemas concernentes à estimativa adequada do número de gotejadores por planta e de sua localização em relação às plantas ou fileiras de plantas; além disso, perdas por percolação decrescem a eficiência do sistema de irrigação e, em assim sendo, o sucesso de um sistema de irrigação por gotejamento só será possível se houver um entendimento do processo da distribuição da água no solo. A compreensão inadequada desses processos se associa, ao uso incorreto desta técnica, na maioria das vezes devido à utilização de informações empíricas, retiradas da literatura e apresentadas na forma de tabelas e fórmulas (Ould Mohamed El-Hafedh et al., 2001).

Para auxiliar a resolução desses problemas, testes em campo são sugeridos para gerar informações capazes de auxiliar

na estimativa do dimensionamento do sistema de irrigação por gotejamento. Geralmente, testes de campo não são realizados devido ao tempo necessário, trabalho árduo, recursos e cuidados experimentais envolvidos, principalmente por ser recomendada a abertura de trincheiras (Keller & Bliesner, 1990); desta forma, a prática se adianta à investigação científica e com isso surgem os problemas. Infelizmente, este fato tem implicado em prejuízos de produtividade e desestímulo ao uso da técnica do gotejamento, por parte de alguns agricultores.

Deste modo, uma alternativa seria o conhecimento da evolução do disco saturado e da área superficial molhada, que auxiliaria no dimensionamento do projeto e no manejo de irrigação, possibilitando a determinação de critérios de projeto, como área molhada pelo gotejador, dimensões do bulbo molhado, eficiência dos sistemas e posicionamento de sensores de umidade e de potencial.

Considerando-se que existe tendência internacional no uso da TDR para estudos da dinâmica da água no solo e deficiência de trabalhos realizados com solos brasileiros (Souza & Matsura, 2003) propõe-se neste trabalho, estudar a relação entre o disco saturado e a área superficial molhada, avaliando-se os efeitos da relação água-solo que possam afetar a distribuição e o armazenamento da água no solo, em função do tempo, utilizando-se a técnica da TDR.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na área experimental do Departamento de Engenharia Rural – ESALQ/USP, em um ambiente protegido de 100 m². Os recipientes utilizados foram caixas de PVC com dimensões de 0,65 m de altura e 1,10 m de diâmetro.

O solo deformado, pertencente ao grande grupo Latossolo Vermelho-Amarelo, foi coletado de uma camada superficial (0-0,30 m) no campo experimental da ESALQ/USP. Após seco, foi peneirado em tamis de 2 mm e colocado no recipiente plástico em camadas de 0,05 m que foram, a seguir, levemente compactadas, de forma a procurar reproduzir sua condição original de campo e proporcionar homogeneidade física do solo espacialmente. Determinaram-se as principais características químicas e físicas deste solo de acordo com a metodologia preconizada pela EMBRAPA (1997) e estão apresentadas na Tabela 1. Os valores de umidade do solo seco ao ar e capacidade máxima de retenção em “container”, foram de 2,01% e 21,44% à base de peso, respectivamente. As características

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo

Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil

Camada (m)	Densidade do solo (kg m ⁻³)	Porosidade Total (%)	Textura (g kg ⁻¹)			Ko m h ⁻¹
			Argila	Silte	Areia	
0 - 0,30	1100	46	185	120	695	0,16

Camada (m)	pH CaCl ₂	P µg cm ⁻³	MO (%)	H+Al	K	Ca	Mg	S	CTC	v (%)
0 - 0,30	4,6	5	0,69	31	1,8	24	9	35	65,6	53

físicas do solo, como a textura e condutividade hidráulica, tornam-se primordiais uma vez que influenciam diretamente nas características geométricas do bulbo molhado.

Utilizou-se, para o monitoramento da distribuição da água dentro do bulbo molhado, um testador de cabos (TEKTRO-NIX 1502 C, OREGON, EUA) equipado com uma interface RS 232, analisando-se o sinal eletromagnético automaticamente por um programa computacional (WINTDR 6.0 – UTAH STATE UNIVERSITY). Construíram-se as sondas de TDR (Time Domain Reflectometry) seguindo-se as metodologias propostas por Souza et al. (2006). A técnica da TDR é uma forma indireta para se estimar a umidade volumétrica do solo (θ); assim sendo, o uso de uma equação de calibração se torna imprescindível para a conversão da constante dielétrica aparente (K_a) em umidade volumétrica do solo; desta forma, utilizou-se a equação:

$$\theta = -0,0202 + 0,0257K_a - 0,0007K_a^2 + 1 \times 10^{-5} K_a^3$$

proposta por Tommaselli & Bacchi (2001) para o mesmo solo e local de estudo.

Em cada recipiente 36 sondas de TDR contínuas foram instaladas em um único eixo central para a estimativa da umidade do solo em todo o bulbo molhado, conforme a Figura 1. As sondas de medição foram distribuídas simetricamente com espaçamento de 0,10 m (Figura 1A), formando uma malha vertical e horizontal, de duas dimensões, em que cada sonda representa uma área de 0,01 m² (Figura 1B), promovendo “medidas pontuais” em duas direções, a partir do emissor; observou-se, então, a formação do bulbo molhado para as vazões de 2, 4 e 8 L h⁻¹ aplicando-se 1 L de água a cada hora, até a frente de molhamento tocar no fundo do recipiente. Um sistema com frasco de Mariote foi utilizado para manter a pressão no gotejador constante e conseqüentemente o fluxo de aplicação.

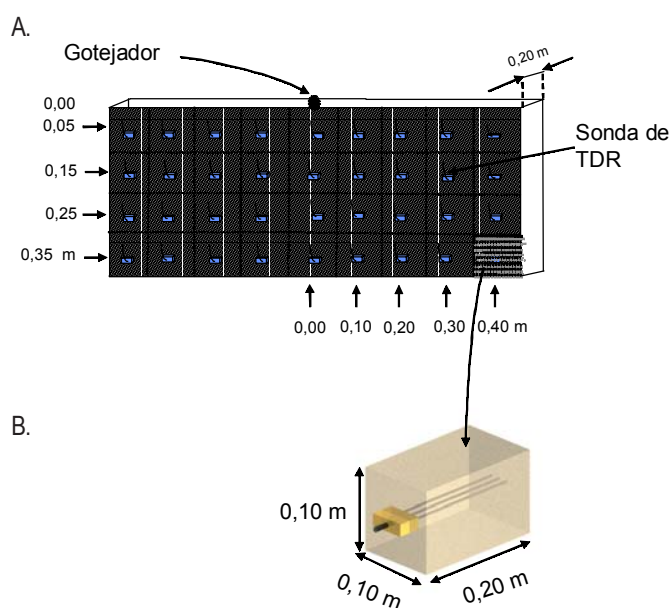


Figura 1. Esquema de montagem do ensaio experimental

Figure 1. Projection of experimental assembly

O tamanho do disco saturado formado no momento da infiltração e o avanço da frente de umedecimento da superfície do solo, foram monitorados por meio de uma régua milimetrada. Desta forma, pôde-se avaliar o disco saturado e a área superficial molhada, em função do tempo e do volume aplicado. Verifica-se, na Figura 2, o disco saturado e a área superficial molhada. Foram monitorados, também, a distribuição e o armazenamento da água no solo através das sondas de TDR após cada infiltração da água aplicada.



Figura 2. Modelo ilustrativo do disco saturado e da área superficial molhada

Figure 2. Saturated disc and wetted superficial area illustration

A partir de uma única sonda pontual foi possível estimar a umidade no solo. Conseqüentemente, a dinâmica da água no solo foi monitorada em função do tempo e volume aplicado. Essas medições foram analisadas através do programa “Surfer 8.0”, o qual apresentou os perfis de distribuição da água durante todos os ensaios. Complementando o procedimento descrito acima, assumiu-se um volume de controle central dentro do bulbo molhado (0,50 x 0,50 x 0,40 m, respectivamente, comprimento, largura e profundidade) para efetuar uma análise de uniformidade de distribuição comparativa, entre os valores de umidades individuais estimadas dentro do volume de controle; assim, os coeficientes de uniformidade de distribuição (CUD) foram calculados para as umidades estimadas após cada aplicação da água, seguindo-se a metodologia adaptada por Ould Mohamed El-Hafedh et al. (2001) e Wu & Gitlin (1983).

Os resultados da evolução do disco saturado e da área superficial molhada versus distribuição e armazenamento da água no solo, permitiram obter-se informações sobre as dimensões do bulbo molhado para auxiliar no dimensionamento e manejo da irrigação por gotejamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os discos saturados alcançaram estabilidade após a 6^a aplicação da água no solo, conforme a Figura 3. Inicialmente, as áreas dos discos saturados foram de 0,000078 m², 0,00008 m² e 0,005 m², atingindo os ápices em 0,0011 m², 0,0025 m² e 0,0132 m², simultaneamente para as vazões de 2, 4 e 8 L h⁻¹. A partir das estimativas da área superficial molhada no solo, verificou-se uma expansão desta condizente com a evolução do disco saturado para as diferentes vazões. Os raios horizontais dos bulbos alcançaram, para as vazões de 2, 4 e 8 L h⁻¹,

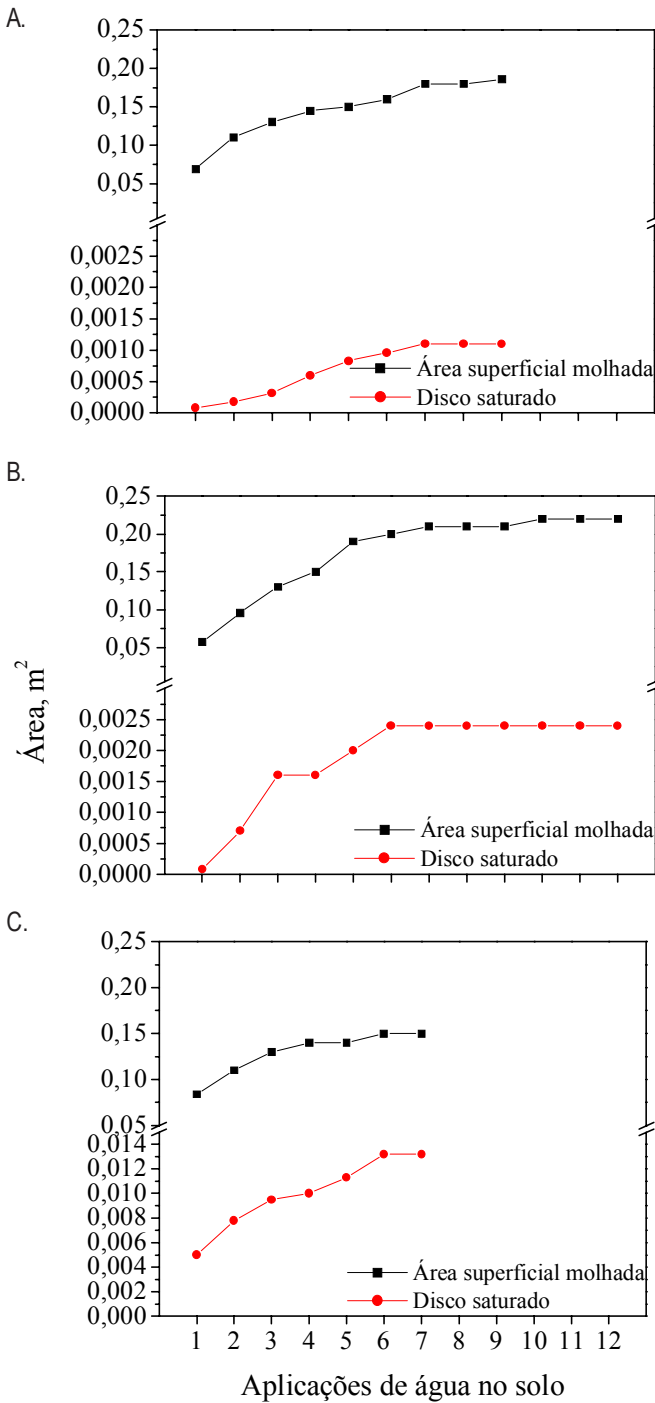


Figura 3. Área superficial molhada dos bulbos e disco saturado observados com aplicação de água no solo de 2(A), 4(B), e 8(C) L h⁻¹

Figure 3. Superficial wetted area of the soil volume and saturated disc observed with water application of 2(A), 4(B) and 8(C) L h⁻¹

0,15 m; 0,14 m; 0,16 m e 0,24 m; 0,27 m; 0,22 m, após a infiltração da 1ª e da última aplicação da água no solo, respectivamente. Também, nota-se uma tendência de estabilidade nesta variável uma aplicação após a consolidação notada na área do disco saturado. Os resultados concordam com Bresler (1978) e Ould Mohamed El-Hafedh et al. (2001) que descrevem um incremento no raio superficial horizontal do bulbo

molhado, em ensaios de campo, com o aumento do volume de água aplicado.

A porcentagem de área molhada depende de fatores relacionados ao espaçamento entre emissores, à vazão dos gotejadores e às propriedades físicas do solo, porém a área mínima ideal para o dimensionamento do sistema não está ainda definida, sendo razoável, segundo Keller & Bliesner (1990), considerar-se uma porcentagem inferior a 67% para regiões áridas, e superior a 33% para regiões de irrigação complementar, caso em que as porcentagens observadas (18, 23 e 15%), concomitantemente 2, 4 e 8 L h⁻¹, não concordam com o recomendado; entretanto, considerou-se a área superficial total da caixa de solo para este cálculo.

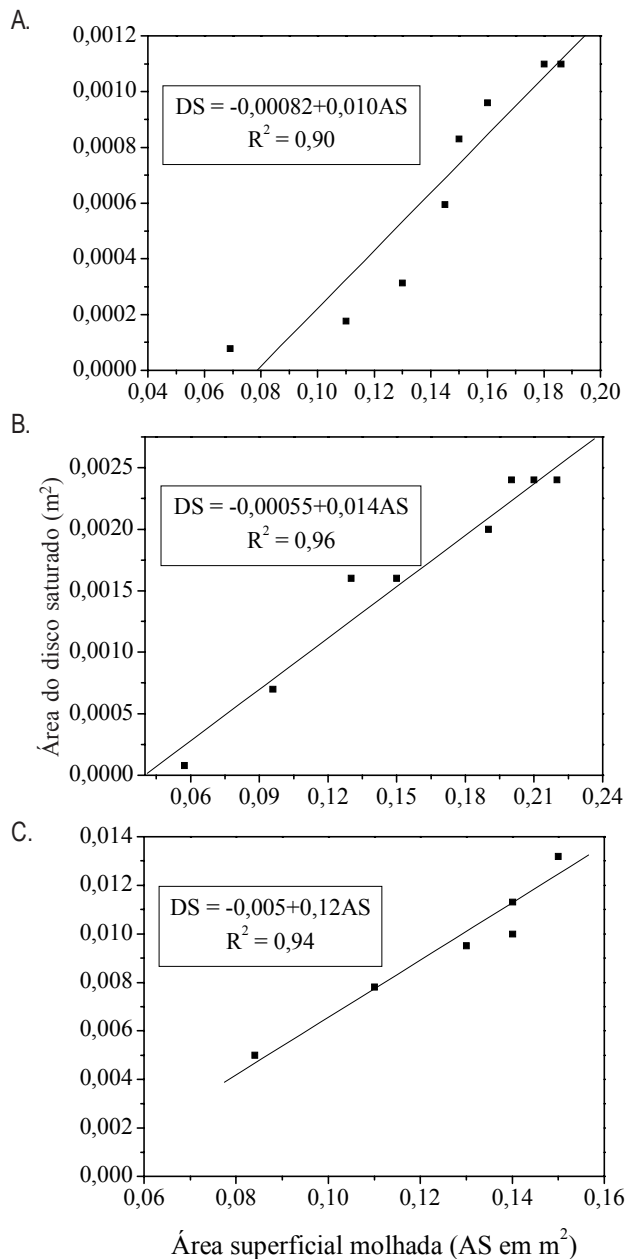


Figura 4. Área superficial molhada versus área do disco saturado sob aplicação de água no solo de 2(A), 4(B) e 8(C) L h⁻¹

Figure 4. Superficial wetted area versus saturated disc area under water application rates of 2(A), 4(B) and 8(C) L h⁻¹

Dentro deste contexto surge a necessidade de se alterar a área superficial molhada com a combinação de espaçamentos entre gotejadores. Uma área menor molhada reduz a perda de água por evaporação; obrigatoriamente, o fator econômico se impõe em contrapartida com seus investimentos no projeto, com o aumento de gotejadores e, sendo assim, essas evidências despertam a necessidade de se estudar diferentes combinações de espaçamento entre gotejadores. A Figura 4 demonstra existir forte correlação entre a área superficial molhada; a área do disco saturado para o solo em estudo, em função do bom ajuste representado pelo coeficiente de determinação (R^2) de 0,90; 0,96 e 0,94 para os ensaios com emissores de 2, 4 e 8 L h⁻¹, respectivamente. Demonstra-se que a dimensão do disco saturado pode estimar a área superficial molhada e entretanto, o conhecimento de variáveis, como volume total de água aplicado, vazão do emissor e condutividade hidráulica, permite determinar os parâmetros necessários para equacionar a evolução geométrica do disco saturado (Gardner, 1958), as quais devem participar de novos estudos para melhor compreensão dos fenômenos ocorridos que poderão auxiliar o manejo da irrigação a partir de simulações das dimensões do disco saturado em condições de incerteza, ou até mesmo na tomada de decisões durante o dimensiona-

mento do sistema de irrigação. Bresler (1978) usou cálculos baseados nas teorias de Wooding (1968), que envolveram a área do disco saturado para desenvolver critérios no dimensionamento de espaçamentos entre gotejadores.

Também, os resultados apontam que para o solo em estudo o movimento vertical da água é extremamente acentuado, pois o disco saturado e a área superficial molhada alcançaram a estabilidade após a 6ª aplicação da água no solo e o volume de solo molhado continuou ganhando profundidade, sendo superado o volume de controle. Por si só, justifica-se a importância de estudos sobre a relação entre o disco saturado e a área superficial molhada, visando reduzir perdas por percolação, uma vez que os resultados são capazes de antecipar uma tendência de provável contribuição com o aumento do lençol freático que, conseqüentemente, poderá induzir uma contaminação das águas subterrâneas e superficiais, caso seja utilizada a aplicação de insumos agrícolas via água de irrigação. Do mesmo modo, esta condição pode gerar um incremento nos custos variáveis da produção agrícola, com o desperdício de energia, mão-de-obra, fertilizantes, água etc.

Esta afirmativa pode ser mais bem compreendida através das Figuras 5, 6 e 7, nas quais apresentados os perfis de umi-

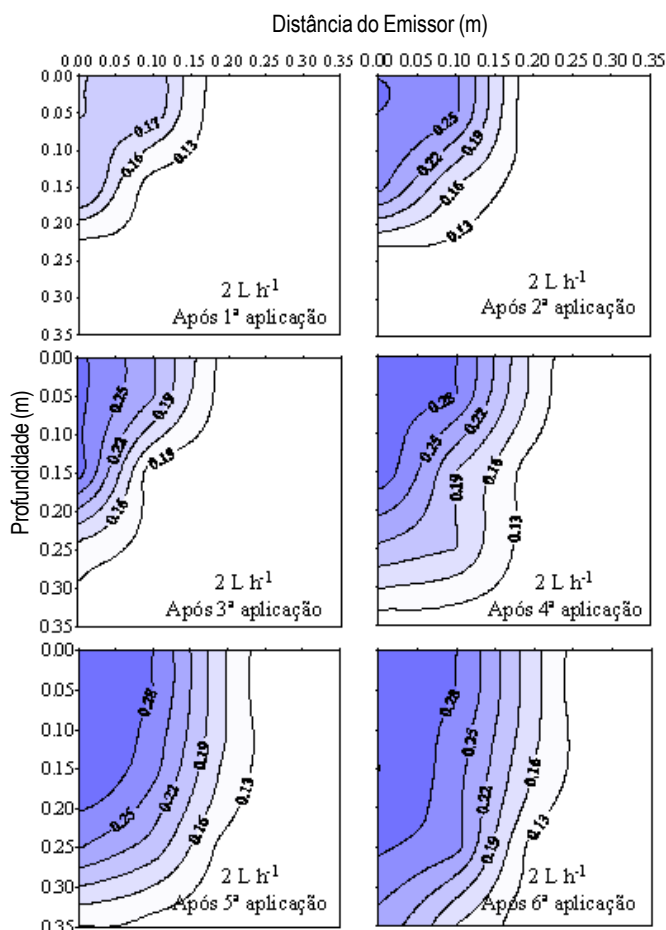


Figura 5. Comparação entre os perfis de umidade ($m^3 m^{-3}$) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo com vazão de 2 L h⁻¹

Figure 5. Profiles of soil moisture ($m^3 m^{-3}$) at the end of the infiltration process of each water application with 2 L h⁻¹

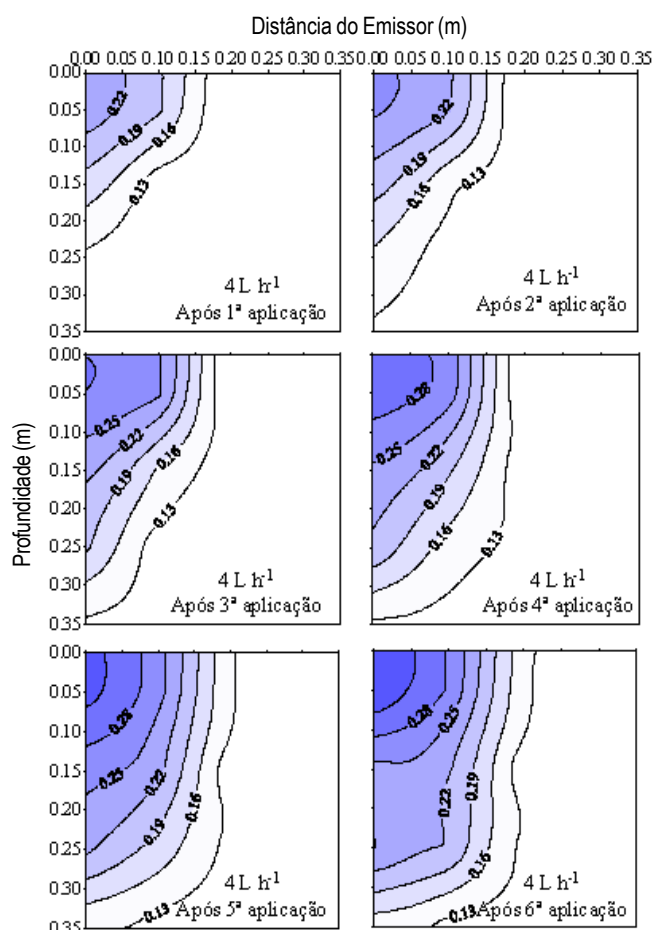


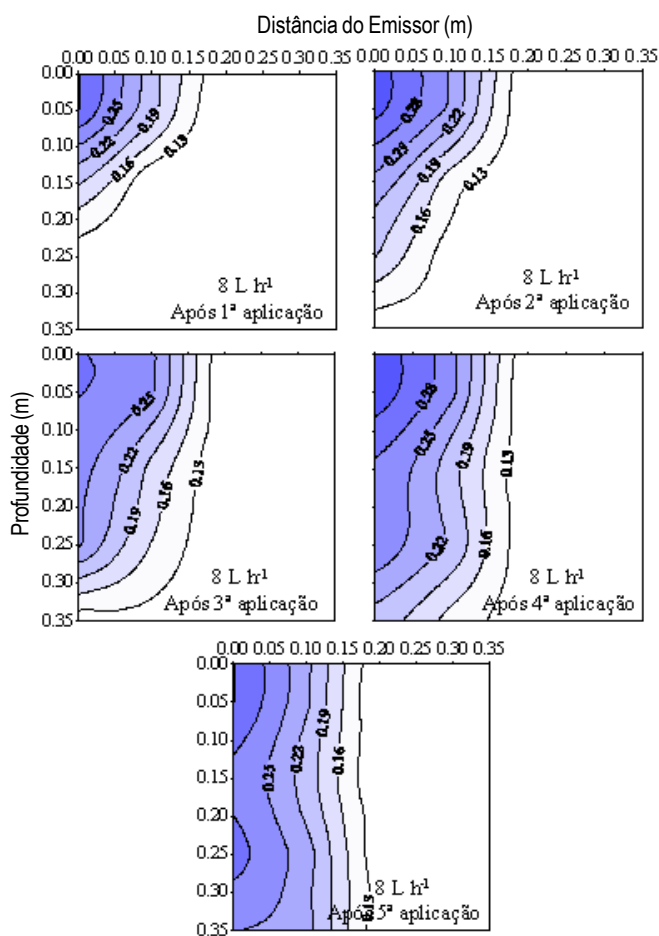
Figura 6. Comparação entre os perfis de umidade ($m^3 m^{-3}$) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo com vazão de 4 L h⁻¹

Figure 6. Profiles of soil moisture ($m^3 m^{-3}$) at the end of the infiltration process of water application rates of 4 L h⁻¹

Tabela 2. Volume de água estimado para o perfil de distribuição no solo sob gotejamento, sob vazão de 2, 4 e 8 L h⁻¹, nas aplicações da água no solo**Table 2.** Estimated volume of the soil distribution profile under drip irrigation, with application rates of 2, 4 and 8 L h⁻¹

Aplicação	Total estimado (L)	Disco saturado (m ²)	Área superficial molhada (m ²)	Armazenamento da água (L)				CUD* (%)
				Camada (m)				
				0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	
2 L h⁻¹								
1	0,94	7,8E-5	0,07	0,74	0,18	0,01	0,00	74,0
2	0,95	1,8E-4	0,11	0,51	0,34	0,10	0,00	64,4
3	0,95	3,1E-4	0,13	0,41	0,36	0,15	0,03	63,7
4	0,96	5,9E-4	0,14	0,24	0,27	0,35	0,11	65,7
5	0,97	8,3E-4	0,15	0,25	0,29	0,25	0,18	64,7
4 L h⁻¹								
1	0,92	8,0E-5	0,06	0,81	0,11	0,00	0,00	73,9
2	0,91	7,0E-4	0,10	0,53	0,23	0,15	0,00	67,6
3	0,94	1,6E-3	0,13	0,46	0,32	0,16	0,00	66,5
4	0,93	1,6E-3	0,15	0,39	0,33	0,20	0,01	66,6
5	0,96	2,0E-3	0,19	0,41	0,28	0,20	0,07	66,5
6	0,93	2,4E-3	0,20	0,37	0,30	0,19	0,07	68,7
8 L h⁻¹								
1	0,96	5,0E-3	0,08	0,88	0,08	0,00	0,00	64,2
2	0,96	8,0E-3	0,11	0,38	0,48	0,11	0,00	60,8
3	0,95	9,5E-3	0,13	0,09	0,24	0,37	0,25	65,1

* Coeficiente de uniformidade de distribuição

**Figura 7.** Comparação entre os perfis de umidade (m³ m⁻³) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo com vazão de 8 L h⁻¹**Figure 7.** Profiles of soil moisture (m³ m⁻³) at the end of the infiltration process of each water application rate of 8 L h⁻¹

dade do solo para as diferentes vazões, observados durante as aplicações da água no solo antes da frente de molhamento atingir o fundo da caixa de solo.

Nos ensaios foi possível identificar o armazenamento da água no perfil de solo estudado em função do disco saturado e da área superficial molhada (Tabela 2). O maior armazenamento ocorreu na camada de 0-0,10 m durante todas as aplicações da água no solo para as diferentes vazões e, em média, o ensaio com vazão de 4 L h⁻¹ armazenou maior volume de água nesta camada. O ensaio com vazão de 2 L h⁻¹ atingiu a 4^a camada (0,30 – 0,40 m) logo após a 3^a aplicação, o que demonstrou tendência de verticalização da distribuição da água para esta vazão. O monitoramento do ensaio com vazão de 8 L h⁻¹ revelou uma mescla entre as tendências dos ensaios anteriormente citados; entretanto, observou-se um forte movimento da água para as camadas profundas em curto período, sendo necessárias apenas quatro aplicações para a frente de molhamento atingir o fundo da caixa de solo. Tais observações condizem com a textura e elevada condutividade hidráulica do solo estudado.

Esses resultados demonstraram haver uma relação entre o armazenamento e o disco saturado para a formação do bulbo molhado no qual, diminuindo-se a área do disco saturado e, conseqüentemente, aumentando o volume aplicado, o armazenamento da água foi direcionado para a camada mais profunda do perfil do solo. A relação entre o armazenamento e a taxa de aplicação apresentou tendência em aumentar a distribuição da água em camadas superiores, o que ocorreu com o incremento da área do disco saturado, porém a vazão de 8 L h⁻¹ expôs um armazenamento em camada profunda dentro do perfil do solo estudado. Uma hipótese para este fe-

nômeno pode ser baseada na relação taxa de aplicação e taxa de infiltração, uma vez que rapidamente o disco saturado se ajustou em uma área 60 vezes superior ao disco saturado inicial medido para as demais vazões. Por outro lado, verifica-se que os coeficientes de uniformidade de distribuição (CUD) foram baixos, inferiores a 74 %; também, os valores possuem pequena amplitude em relação à média, CUD = 67 %; sendo assim, pôde-se concluir que o efeito da aplicação de diferentes volumes de água em diferentes áreas do disco saturado, não tem importância na melhoria da CUD, mas o aumento do volume de água aplicado e, conseqüentemente, maior área superficial molhada demonstrou, de início, agir de maneira direta no movimento da água no solo para as camadas mais profundas, revelando a sensibilidade da dinâmica da água perante pequenas variações do potencial total e condutividade hidráulica, em vista de a homogeneidade das características físicas do solo nas três direções.

De acordo com Souza & Matura (2004), a utilização de duas fontes para a infiltração da água no solo em irrigação por gotejamento demonstrou que o aumento da área de infiltração promoveu melhorias na distribuição da água no solo, aumentando a uniformidade de distribuição dentro do bulbo molhado. Uma distribuição melhor da água no solo disponibiliza, de forma homogênea, a água, dentro da zona radicular da cultura, o que reduz a perda por percolação.

Sugere-se que o disco saturado e a área superficial molhada sejam estudados em maior quantidade de eventos sucessivos e diferentes solos para que se alcance melhor entendimento do fenômeno ocorrido durante a dinâmica da água no solo a fim de promover informações objetivas que auxiliem o irrigante nas tomadas de decisões adequadas para o manejo da irrigação.

CONCLUSÕES

Existe uma relação direta entre a evolução do disco saturado e a área superficial molhada para condições de laboratório, a qual demonstrou a possibilidade em se antecipar perdas de água durante o processo de formação do bulbo molhado.

Os diferentes perfis de umidade demonstraram uma distribuição em gradiente da água no solo, tendo-se verificado maior armazenamento da água em camadas superiores do perfil com o aumento da área do disco saturado.

Para redução da percolação da água no solo em estudo, deve-se aplicar a água em dois ou mais gotejadores, visando aumentar a área do disco saturado e, conseqüentemente, obter um armazenamento maior em camadas superiores.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP, pelo suporte financeiro.

LITERATURA CITADA

- Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de irrigação. 8. ed. Viçosa: UFV. 2006, 625p.
- Bresler, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problem. Irrigation Science, Heidelberg, v.1, p.3-17, 1978.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- Gardner, W.R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water table. Soil Science Society of America Journal. v.85, p 228-232, 1958.
- Keller, J.; Bliesner, R. Sprinkle and trickle irrigation. New York: Chapman and Hall, 1990. 652p.
- Keller, J.; Karmelli, D. Trickle Irrigation Design. Glendora, Califórnia: Rainbird Sprinkler Manufacturing, 1975. 30p.
- Ould Mohamed El-Hafedh, A.V.; Daghari, H.; Maalej, M. Analysis of several discharge rate-spacing-duration combinations in drip irrigation system. Agricultural Water Management, Amsterdam, v.52, p.33-52, 2001.
- Souza, C.F.; Matura, E.E. Determination of the wetting front in drip irrigation using TDR Multi-wire probe. Agricultural Water Management, Amsterdam, v.59, n.3, p.205-216, 2003.
- Souza, C.F.; Matura, E.E. Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 8, p. 7-15, 2004.
- Souza, C.F.; Matura, E.E.; Folegatti, M.V.; Coelho, E.F.; Or, D. Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. Revista Irriga, v.11, p.12-25, 2006.
- Tommaselli, J.T.G.; Bacchi, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.36, p.1145-1154, 2001.
- WINTDR. Time Domain Reflectometry soil sample analysis program. Disponível em: <http://soilphysics.usu.edu/wintdr>. Acesso em: 19 de janeiro de 2007.
- Wooding, R.A. 1968. Steady infiltration from a circular pond. Water Resource Research. v.4, p.1259-1273, 1968.
- Wu, I.P.; Gitlin, H.M. Drip irrigation application efficiency and schedules. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.26, p.92-99, 1983.