Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento¹

Claudinei F. Souza² & Edson E. Matsura³

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Trabalho financiado pela FAPESP

² FEAGRI/UNICAMP. CP 6011, CEP 13083-970, Campinas, SP. E-mail: cfsouza@bol.com.br (Foto)

³ Departamento de Água e Solo, FEAGRI/UNICAMP

Protocolo 139 - 18/9/2002 - Aprovado em 6/2/2004

Resumo: O objetivo do dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento é escolher adequadamente o "layout" e os componentes do sistema para promover a distribuição precisa da água (e fertilizante) para todas as plantas, ao longo do campo. Com vistas a este propósito, avaliaram-se as contribuições capazes de fornecer elementos básicos para o dimensionamento da irrigação por gotejamento, utilizando-se sondas de TDR. Assim, o estudo experimental foi dividido em duas partes; na primeira, tem-se o efeito de irrigações sucessivas nas dimensões dos raios horizontal e vertical do bulbo molhado, analisado em condições de laboratório e, na segunda, o processo de distribuição da água na formação do bulbo molhado em campo. Com os resultados apresentados nesta pesquisa pôde-se concluir que: a umidade inicial do solo, o volume aplicado, a vazão do gotejador, o disco saturado e a condutividade hidráulica, são elementos importantes e devem ser conhecidos para o dimensionamento e o manejo adequado da irrigação.

Palavras-chave: bulbo molhado, relação água-solo, TDR

Water distribution in soil and drip irrigation design

Abstract: The principal objective of a drip irrigation system design is to choose the appropriate layout and components to obtain adequate distribution of water (and fertilizer) throughout the field. Based on this the contributions which are capable of furnishing the basic elements for the design of drip irrigation were evaluated using the TDR probes. The experiment was divided into two parts. In the first part, the effect of successive irrigations on the wetted volume (horizontal and vertical dimensions) were analyzed under laboratory conditions; and in the second one, the water infiltration and distribution processes were evaluated with respect to formation of the wetted volume in the field. It was concluded that: initial soil water content, applied volume, discharge rate, saturated disk and hydraulic conductivity are important elements and these must be known for an appropriate irrigation design and management.

Key words: wetted volume, water-soil relationship, TDR

INTRODUÇÃO

Segundo Dasberg & Bresler (1985), Azevedo (1986) e Dasberg & Or (1999) a irrigação por gotejamento compreende a aplicação de pequenas quantidades de água diretamente na zona radicular das plantas, através de fonte pontual ou linha de gotejadores sobre ou abaixo do solo, com pressões de operação variando entre 20-200 kPa e baixa vazão (1-30 L h⁻¹). Esta aplicação resulta em um volume de solo molhado, conhecido como bulbo molhado.

A irrigação por gotejamento ocupa uma significativa porção das áreas irrigadas no mundo e está em crescimento, mas somente em áreas específicas e para culturas economicamente rentáveis. A razão para esta limitação é econômica, pois o método possui alto custo de equipamentos, instalação e manutenção (Dasberg & Or, 1999).

Comparado com outros métodos de irrigação (Randall & Salvatore, 1988; Assaf et al., 1989; Shrivastava et al., 1994), o gotejamento possui várias vantagens, destacando-se o aumento da produtividade e a conservação da água. Para esta última, Wu & Gitlin (1983) concluem que uma eficiência de aplicação de 90% pode ser facilmente alcançada, cujo cálculo assume que a variação da vazão entre gotejadores não excede 20%, o qual é um critério conservador de acordo com Solomon & Keller (1978) e Dasberg & Or (1999); porém, Randall & Salvatore (1988), Assaf et al. (1989) e Shrivastava et al. (1994) destacam uma desvantagem não diretamente econômica, que é a falta de conhecimento dos processos que envolvem a distribuição da água no solo.

A variação espacial das propriedades físicas do solo adiciona variações na distribuição da água aplicada pelos gotejadores. Estas variações no volume de solo molhado são

um problema à estimativa adequada do número de gotejadores por planta e de sua localização em relação às plantas ou fileiras de plantas (Clothier et al., 1985; Or, 1996); além disso, perdas por percolação reduzem a eficiência do sistema de irrigação (Bouwer, 2000) e, em assim sendo, o sucesso de um sistema de irrigação por gotejamento será possível se houver um entendimento do processo da distribuição da água no solo. A compreensão inadequada desses processos associa-se, no Brasil, 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 e que podem ser encontrados na literatura (Wooding, 1968; Brandt et al. 1971; Raats, 1971; Philip, 1971; Ben-Asher et al., 1978; Clothier & Scotter, 1982; Clothier, 1984; Or, 1995; Ould Mohamed El-Hafedh et al., 2001). Deste modo, o conhecimento das propriedades físicas do solo relacionadas ao processo de distribuição de água, pode ser extremamente útil 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.

Para fornecer elementos básicos para o dimensionamento da irrigação por gotejamento, estudaram-se duas vazões de gotejadores em função das propriedades físicas do solo, avaliando-se os efeitos na relação água-solo, durante o processo de distribuição de água.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em duas partes. Na primeira, avaliou-se o efeito de irrigações sucessivas nas dimensões dos raios horizontal e vertical do bulbo molhado, analisado em condições de laboratório e, na segunda, o processo de distribuição da água na formação do bulbo molhado em campo. Desta forma e por meio de ambas as partes, avaliaram-se contribuições capazes de fornecer elementos básicos para o dimensionamento da irrigação por gotejamento.

O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho distroférrico, existente no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP, SP, cujas principais características físicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas do solo utilizado: densidade do solo (ρ_s), porosidade total (α), capacidade de campo – 6 kPa (CC), ponto de murcha permanente – 1500 kPa (PMP) e condutividade hidráulica saturada (K_s)

Camada m	ρ_s kg m ⁻³	α %	Textura - g kg ⁻¹			CC m ³ m ⁻³	PMP m ³ m ⁻³	K_s m h ⁻¹
			Argila	Silte	Areia			
0-0,2	1306	51	580	170	250	0,40	0,27	0,032
0,2-0,4	1361	49	590	170	240	0,39	0,26	0,031
0,4-0,6	1283	52	640	140	220	0,43	0,29	0,033
0,6-0,8	1288	51	660	130	210	0,43	0,29	0,032

A estimativa da variação da umidade do solo, no bulbo molhado, foi realizada com o auxílio de sondas de TDR multi-haste, com segmentos de 0,20 m, promovendo um perfil útil para leitura de até 0,80 m. Um testador de cabo Tektronix 1502 C¹ (Tektronix, Inc., Beaverton, Oregon) equipado com uma

interface RS 232, analisou o sinal eletromagnético das sondas, automaticamente, pelo programa WinTDR99 (Soil Physics Group – Utah State University). A forma construtiva da sonda e funcional do equipamento de TDR é descrita por Souza & Matura (2002).

Os bulbos molhados foram formados no solo a partir da aplicação de água através de gotejadores com vazões (Q) de 2 L h⁻¹ ($Q = 2,2H^{0,34}$) e 4 L h⁻¹ ($Q = 4,6H^{0,53}$), em que H é a pressão (m). Para o volume de água aplicado, assumiu-se a lâmina de 5 mm de evapotranspiração potencial para o dimensionamento (ETd) de um sistema de irrigação, por se tratar de uma ETd média representativa para o Estado de São Paulo. Os detalhes sobre a montagem e condução de cada parte experimental são apresentados, separadamente, a seguir:

Avaliação do efeito de irrigações sucessivas em laboratório

Com o intuito de se estudar e conhecer o efeito de irrigações sucessivas nas dimensões dos raios horizontal e vertical do bulbo molhado, aplicou-se a seguinte metodologia: o solo coletado no campo experimental foi destorroadado, secado ao ar e peneirado (peneira de 2 mm) e, posteriormente, acondicionado em duas colunas de PVC, 0,90 m de comprimento e 0,60 m de diâmetro, de tal forma a se manter uma densidade de 1200 kg m⁻³, e em cada coluna foram instaladas 10 sondas de TDR multi-haste segmentadas. As sondas foram distribuídas simetricamente em quatro direções, com espaçamentos de 0,08 m (Figura 1), a partir do gotejador colocado no centro da coluna; desta maneira, pode-se observar a formação do bulbo molhado, durante e após 3 irrigações de 1,5 L cada uma, realizadas no intervalo de 2 dias. Para reduzir o efeito da evaporação da água aplicada, cobriu-se a coluna com uma lona plástica.

Caracterização da distribuição da água no solo em campo

O experimento foi conduzido em uma área de 100 m², sem cultura instalada, no período de agosto a novembro de 2001.

Figura 1. Disposição simétrica das sondas de TDR multi-haste segmentadas na coluna de PVC

¹ Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores

Dez sondas multi-haste segmentadas foram usadas para o estudo da distribuição da água na formação do bulbo molhado, respectivamente, para as condições experimentais sem e com sobreposição de bulbos.

Ensaio sem sobreposição de bulbos

Em uma área experimental de 1 m², as sondas foram instaladas em duas direções opostas, com espaçamentos de 0,10 m, a partir do gotejador. Este procedimento foi repetido em duas áreas próximas, nas quais o efeito da declividade natural do solo na simetria da distribuição da água foi considerado instalando-se sondas na disposição vertical e horizontal, em relação ao declive do terreno (Figura 2). Após a instalação das sondas, aplicou-se o volume de água (5 L) sobre a superfície do solo.

Figura 2. Esquema de montagem do ensaio em campo (a favor e contra o declive) sem sobreposição

A metodologia descrita acima foi utilizada separadamente para as vazões desejadas e o monitoramento da distribuição da água dentro do bulbo molhado foi realizado em diferentes intervalos de tempo: antes da aplicação, após a infiltração, um dia depois da infiltração e dois dias após a infiltração. A área experimental foi coberta com uma lona plástica.

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 foram, também, acompanhados, utilizando-se uma régua milimetrada. No final de 2 dias após a infiltração, a distribuição da água dentro do bulbo molhado foi medida através do método gravimétrico, promovendo uma comparação entre as diferentes técnicas, enquanto os valores médios das mensurações realizadas nas diversas disposições de sondas, foram considerados resultados de um só bulbo molhado. Comparou-se, também, o volume de água armazenada no solo nos diferentes ensaios e nos variados intervalos de monitoramento, considerando-se que cada dois segmentos de sonda da TDR, posicionadas simetricamente em direções opostas, representam um anel concêntrico de solo. Desta forma, a umidade volumétrica média de cada anel foi multiplicada pelo seu respectivo volume de solo, o que possibilitou se obter os volumes de água parcial e total armazenados.

Ensaio com sobreposição de bulbos

Utilizou-se, neste ensaio, um gotejador semelhante ao usado anteriormente, para aplicar 4 L h⁻¹. Fez-se esta opção pelo fato

dos resultados do ensaio sem sobreposição indicarem ser seu uso viável para se estudar a sobreposição de bulbos molhados, devido ao maior movimento horizontal da água, quando comparado com a condição de 2 L h⁻¹.

Para a montagem do ensaio, as sondas foram distribuídas em uma linha na qual foram posicionados 2 gotejadores espaçados 0,50 m, conforme ilustrado na Figura 3. Após a montagem do ensaio aplicou-se um volume diário de 5 L de água sobre a superfície do solo, durante 5 dias, que foi dividido em duas partes iguais, ou seja, 2,5 L por gotejador.

Figura 3. Esquema de montagem do ensaio em campo, com sobreposição

O monitoramento da dinâmica da água no solo foi realizado em diferentes intervalos de tempo: antes da aplicação, após a infiltração e um dia após a infiltração; com o propósito de se comparar o efeito da sobreposição, o procedimento de aplicação e o monitoramento da dinâmica da água foram repetidos para um outro ensaio, para a condição sem sobreposição; complementando este procedimento, assumiu-se o volume central dentro dos diferentes ensaios para efetuar uma análise de uniformidade comparativa, com o propósito de se entender as diferenças entre os valores de umidade individuais estimados dentro do volume de controle. Desta forma, os coeficientes de uniformidade de Christiansen (1941) foram calculados para as umidades estimadas após cada aplicação de água, por meio da equação abaixo, seguindo-se a metodologia adaptada por Ould Mohamed El-Hafedh et al. (2001) e Wu & Gitlin (1983).

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\sum |\theta_i - \bar{\theta}|}{\bar{\theta}N} \right]$$

sendo:

CUC - coeficiente de uniformidade de distribuição de Christiansen, %

θ_i - umidade volumétrica estimada i, m³ m⁻³

θ - umidade volumétrica média, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$

N - número de pontos estimados

A área escolhida, com um volume de controle de $0,50 \times 0,50 \times 0,40 \text{ m}$, respectivamente, comprimento, largura e profundidade, é semelhante à área entre os gotejadores do ensaio com sobreposição; desta maneira, a comparação foi direcionada para uma área comum de ação dos gotejadores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação do efeito de irrigações sucessivas em laboratório

A frente de molhamento é significativo na aplicação da água em irrigação por gotejamento, porque indica os limites do volume de solo molhado. A Figura 4 apresenta a localização da frente de molhamento, considerando-se o efeito de irrigações

sucessivas nas dimensões dos raios horizontal e vertical do bulbo molhado, em função de duas vazões de gotejadores para condições semelhantes de propriedades físicas do solo. Os resultados apresentados demonstram que a vazão dos gotejadores e as propriedades físicas do solo exercem efeito diferenciado na forma do bulbo molhado. Aumentando a vazão do gotejador, observou-se aumento no raio horizontal e, diminuindo a vazão, ocorre acréscimo no raio vertical do bulbo molhado, devido à alteração da área de infiltração da água aplicada. Esses resultados estão em concordância com experimentos realizados por Bresler et al. (1971), Bresler (1978), Schwartzman & Zur (1986) e Keller & Bliesner (1990) os quais concluem que um aumento na vazão do gotejador resulta em um acréscimo no movimento horizontal e uma expansão menor no movimento vertical da água no bulbo, para um mesmo tipo de solo e volume de água aplicado.

Figura 4. Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para as vazões de 2 e 4 L h^{-1} ao final de 48 h de cada irrigação, para a condição inicial de umidade em laboratório de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$

Verificou-se, também, um incremento no movimento da água nos raios horizontais e verticais, devido ao efeito de irrigações sucessivas, resultados que coincidem com os de Nogueira et al. (1999) os quais encontraram aumento do volume de solo molhado em virtude das segunda e terceira irrigações, em condição de campo. Corroborando com este fato, Keller & Bliesner (1990) ressaltam a necessidade da realização de duas ou três irrigações sucessivas para dimensionar o bulbo molhado.

Para a discussão dos resultados, assumiu-se que o movimento da água foi determinado pela somatória dos potenciais da solução do solo explorando, basicamente, o potencial mátrico e o gravitacional. Geralmente, esses potenciais não exercem forças em igualdade, sendo esta diferença a responsável pela predominância ou não, do movimento vertical e/ou horizontal da água no solo. Durante a primeira irrigação teve-se, para ambas as vazões, um movimento da água devido à diferença do potencial total de água no solo, o que incrementou importância ao potencial mátrico. Na

condição de maior vazão (4 L h^{-1}) o fluxo da água superou rapidamente a velocidade de infiltração e promoveu um aumento do disco saturado, o que foi suficiente para aumentar o raio horizontal do bulbo molhado. No ensaio de menor vazão de gotejador, o potencial gravitacional exerceu importância para a formação do bulbo molhado, em razão do menor raio do disco saturado.

Caracterização da distribuição da água no solo em campo

Ensaio sem sobreposição de bulbos: Os diâmetros superficiais molhados horizontal e vertical dos bulbos em relação ao declive do terreno alcançaram, em média, respectivamente, 0,61 e 0,57 m, para o ensaio com a vazão de 2 L h^{-1} , e 0,68 e 0,70 m para a vazão de 4 L h^{-1} . O resultado demonstra uma diferença média de 5 %, a qual aponta boa simetria no movimento da água nos diferentes eixos estudados (vertical e horizontal), ocorrido pelo posicionamento das parcelas próximas e contíguas, com propriedades físicas similares. Tem-se, na Figura 5, os perfis de

Figura 5. Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) para as vazões de 2 e 4 L h^{-1} , em função do tempo, para condições de campo

umidade do solo para as diferentes vazões, em quatro diferentes intervalos de monitoramento. Nesta Figura, verifica-se maior evolução do movimento da água na direção horizontal, quando se dobra a vazão do gotejador, não se observando maior expansão na direção vertical para a menor vazão de gotejador. Esta última observação foi evidente nos resultados de laboratório, sendo agora justificada pela diferença entre as condições iniciais de umidade do solo. Para a condição de campo nota-se uma estratificação da umidade nos perfis do solo, entre os quais se percebe maior armazenamento de água para a condição inicial do ensaio de 4 L h⁻¹. Por exemplo, a isolinha referente a 0,24 m³ m⁻³ está a uma profundidade superior no perfil, quando comparado com o ensaio de 2 L h⁻¹, o que, provavelmente, aumentou a condutividade hidráulica não saturada nesta região devido à alteração do teor de água no bulbo molhado, facilitando o movimento da água aplicada na direção vertical. Deste modo, supõe-se que a estratificação diferenciada alterou a condutividade hidráulica, evidenciando-se o seu efeito no movimento da água no solo para as duas vazões de gotejadores em estudo, confirmando a importância da umidade inicial do solo para o dimensionamento adequado da irrigação por gotejamento; além disso, deve-se considerar as diferenças de estrutura do solo, em cujo laboratório se utilizou o solo deformado e, no campo, o solo é indeformado.

Ainda na Figura 5, os perfis de umidade do solo estimados logo após a infiltração, evidenciam a mudança crescente da frente de molhamento em relação à condição inicial do ensaio, e mostra que a evolução desta frente, nos dois dias monitorados, está concentrada durante o processo de infiltração. Assim, os resultados observados são de interesse prático no dimensionamento de sistemas de irrigação por gotejamento, especialmente quando o período de redistribuição da água é menor que a infiltração, possibilitando controlar o volume de solo molhado com a combinação da vazão do gotejador, de acordo com as propriedades físicas do solo.

Outra observação significativa diz respeito à estimativa do armazenamento da água (L) nos diferentes ensaios e nos diferentes intervalos de monitoramento. Utilizando-se sondas com segmentos de 0,20 m, obtiveram-se bons resultados na diferença do volume de água aplicado e estimado, subestimando em média 0,20 L (4 %). O mesmo se pode dizer da diferença média entre o armazenamento estimado pelo TDR e o medido pelo gravimétrico, sendo inferior em 0,36 L (0,25 %).

Alguns problemas foram observados durante os ensaios preliminares, como: os cabeçotes das sondas provocaram alteração na forma do disco saturado, confinando e alterando a formação do bulbo molhado. Para diminuir este impasse, ajustou-se a metodologia de laboratório para o campo, no qual as sondas foram instaladas em duas direções, com espaçamentos de 0,10 m; também, assumiu-se que a umidade a 0,10 m no eixo horizontal é igual no eixo central. Acredita-se que esta diferença de posicionamento de sonda contribuiu com o erro entre o volume aplicado e o estimado, uma vez que a maior umidade foi encontrada próxima à fonte pontual do emissor. O disco saturado alcançou 0,07 m de raio no ensaio de 2 L h⁻¹ e o confinado (para espaçamento de 0,08 m entre as sondas e o gotejador) tinha 0,03 m; para 4 L h⁻¹, o disco confinado teve 0,04 m, e com o cabeçote afastado foi de 0,13 m.

Neste mesmo ensaio foi possível identificar-se a distribuição da água no perfil de solo estudado (Tabela 2) e, que, para ambas as vazões, o maior armazenamento ocorreu na camada de 0-0,20 m durante todo o intervalo de monitoramento e, em média, 55 e 84 % da água aplicada foram distribuídos nesta camada, e 34 e 16 % na camada de 0,20-0,40 m, respectivamente para as vazões 2 e 4 L h⁻¹. Monitorou-se o movimento da água para a terceira camada (0,40-0,60 m) apenas para a vazão 2 L h⁻¹ e em nenhuma das condições de vazão a água atingiu a última camada (0,60-0,80 m). Esses resultados confirmam as observações anteriores sobre a importância da escolha da vazão do gotejador em relação ao volume pretendido de solo molhado e, também, demonstram haver uma relação entre a vazão do gotejador e a distribuição da água dentro do bulbo molhado no qual, aumentando-se a vazão do gotejador, a distribuição da água foi maior na superfície do solo e, diminuindo-se a vazão, observa-se uma distribuição que atinge maior profundidade.

Tabela 2. Volume de água (L) estimado para o perfil de distribuição da água no solo sob gotejamento, com vazões de 2 e 4 L h⁻¹, nos diferentes intervalos de monitoramento

Intervalos	Volume Total Estimado (L)	Distribuição da Água (L)			
		Camada (m)			
		0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8
2 L h ⁻¹					
Após a infiltração	4,82	2,92	1,37	0,53	0
5 h após a infil	4,20	2,07	1,64	0,49	0
1 dia após a infil	3,99	2,15	1,45	0,39	0
2 dias após a infil	3,33	1,90	1,18	0,25	0
4 L h ⁻¹					
Após a infiltração	4,77	4,00	0,77	0	0
5 h após a infil	3,92	3,07	0,85	0	0
1 dia após a infil	2,76	2,25	0,51	0	0
2 dias após a infil	1,90	1,77	0,13	0	0

Ensaio com sobreposição de bulbos: O ensaio em que se objetiva estudar o efeito da sobreposição, tem resultados interessantes, referentes à distribuição da água no solo.

A forma em que a água foi aplicada, dividindo-se o volume desejado e se promovendo a sobreposição de bulbos, apontou possibilidades dentro do manejo da irrigação em relação ao volume de solo molhado. As variações observadas na distribuição da água apontaram perspectivas de se alterar a área superficial molhada, melhorar a uniformidade de distribuição da água e rebaixar a frente de molhamento.

A partir de estimativas da umidade na superfície do solo, verificou-se uma expansão menor do raio superficial molhado horizontal, com a divisão do volume de água aplicado. Os raios horizontais dos bulbos alcançaram 0,24 e 0,28 m, para o ensaio com sobreposição, e 0,33 e 0,37 m para o sem sobreposição, respectivamente, após a infiltração das 3ª e 5ª aplicações da água (Figura 6). 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.

Outro efeito relacionado com a expansão da área superficial molhada, foi observado diferentemente para os respectivos ensaios, com e sem sobreposição. As áreas molhadas na da

Figura 6. Área superficial molhada dos bulbos observados para os ensaios após a 3ª e a 5ª aplicação da água (A) com sobreposição e (B) sem sobreposição

superfície do solo foram de 0,38 e 0,57 m² para o ensaio com bulbos sobrepostos e de 0,37 e 0,53 m² para o ensaio sem sobreposição, respectivamente, após as 3ª e 5ª aplicações. De acordo com esses resultados, o ensaio com sobreposição obteve uma área superficial maior molhada, devido ao fato de usar duas fontes para a infiltração da água no solo, o que demonstra e comprova que o aumento da área de infiltração promoveu mudanças na formação do bulbo molhado.

A percentagem de área molhada depende de fatores relacionados ao espaçamento, vazão dos gotejadores e 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 percentagem inferior a 67% para regiões áridas e superior a 33% para regiões de irrigação suplementar. Neste caso, as percentagens observadas concordam com o recomendado; entretanto, a área molhada sobreposta não ultrapassou 10%; os mesmos autores citados sugerem sobrepor em 20% os bulbos molhados para alcançar índices ideais de uniformidade de distribuição da água no solo. Paralelamente e dentro deste contexto, surge a importância de se poder alterar a área superficial molhada com a combinação de espaçamentos entre gotejadores. A menor área molhada reduz a perda de água por evaporação; obrigatoriamente, o fator econômico se impõe em contrapartida aos 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 7 apresenta uma avaliação da umidade média dentro do volume de controle, ajudando a se entender alguns problemas causados pela uniformidade de distribuição da água no

solo. Através da avaliação verificou-se que a capacidade de campo foi atingida na camada de 0-0,20 m, após a 3ª aplicação da água para o ensaio sem sobreposição de bulbos, mas a umidade média para o ensaio com sobreposição, estabilizou-se próximo à capacidade de campo, após a 4ª aplicação. Na camada de 0,20-0,40 m, a umidade média do ensaio com sobreposição foi calculada em 0,29 m³ m⁻³, sendo que o ensaio sem sobreposição alcançou 0,31 m³ m⁻³. Ambos os ensaios não atingiram a capacidade de campo, (0,39 m³ m⁻³), cujo resultado demonstra que a distribuição da água no solo foi dependente da forma de aplicação, sendo observados valores de umidade pontuais de até 0,44 m³ m⁻³ para o ensaio em que se usou apenas um gotejador para aplicar o volume desejado (Figura 8).

Figura 7. Umidade média, antes e após a aplicação da água, dentro do volume de controle, e coeficiente de uniformidade de distribuição da água aplicada (A) com sobreposição e (B) sem sobreposição

Os maiores coeficientes de uniformidade na camada 0-0,20 m foram observados para o ensaio realizado com sobreposição e, na camada 0,20-0,40 m, verificaram-se os melhores resultados para o ensaio sem sobreposição; sendo assim, pôde-se concluir que o efeito da sobreposição tem importância na melhoria da uniformidade da distribuição da água no solo, porque se obteve maior sobreposição entre os bulbos na camada de 0-0,20 m, corrigindo a uniformidade de distribuição com a redução do gradiente de umidade (Figura 8).

Figura 8. Comparação entre as distribuições de água no solo para os ensaios com e sem sobreposição de bulbos

Mesmo com menor sobreposição na camada 0,20-0,40 m e, conseqüentemente, menor coeficiente de uniformidade, a pequena sobreposição ocorrida promoveu um significativo movimento da água para a camada de 0,40-0,60 m revelando, mais uma vez, a sensibilidade da dinâmica da água perante pequenas variações do potencial total e da condutividade hidráulica.

CONCLUSÕES

1. Para as condições de estudo foi necessária a realização

de 2 ou 3 irrigações sucessivas para o dimensionamento do bulbo molhado.

2. A umidade inicial do solo, o volume aplicado, a vazão do gotejador, o disco saturado e, principalmente, a condutividade hidráulica, são elementos importantes e devem ser conhecidos para o dimensionamento e o manejo adequado da irrigação.

3. Para as condições de estudo, ao se dobrar a vazão do gotejador diminuiu-se o movimento vertical da água e se aumentou o movimento horizontal, de forma a favorecer a redução da percolação da água.

4. O volume aplicado por dois gotejadores, sobrepondo os bulbos molhados, aumentou a uniformidade de distribuição da água no solo, porém esta operação reduziu a umidade média dentro do volume de solo molhado evidenciando-se, assim, a necessidade de se estudar combinações de espaçamento entre gotejadores.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Doutores: Roberto Testezlaf, Dani Or e Alberto Colombo, pelo apoio técnico.

LITERATURA CITADA

- Assaf, R.; Levin, I.; Bravdo, B.A. Optimization of water for fruit trees by a computerized irrigation system. *Agronomy Journal*, Madison, v.9, p.451-456, 1989.
- Azevedo, H.M. Irrigação localizada. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.12, p.40-53, 1986.
- Ben-Asher, J.; Lomen, D.O.; Warrick, A.W. Linear and non-linear models of infiltration from a point source. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.42, p.3-6, 1978.
- Bouwer, H. Integrated water management: Emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.45, p.217-228, 2000.
- Brandt, A.; Bresler, E.; Diner, N.; Ben-Asher, J.; Heller, J.; Goldberg, D. Infiltration from a trickle source. I Mathematical models. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.35, p.675-683, 1971.
- Bresler, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrigation Science*, New York, v.1, p.3-17, 1978.
- Bresler, E.; Heller, J.; Diner, N.; Ben-Asher, J.; Brandt, A.; Goldberg, D. Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.35, p.683-689, 1971.
- Christiansen, J.E. The uniformity of application of water by sprinkler systems. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, v.22, p.89-92, 1941.
- Clothier, B.E. Solute travel times during trickle irrigation. *Water Resources Research*, Washington, v.20, p.1848-1852, 1984.
- Clothier, B.E.; Scotter, D.R. Constant-flux infiltration from a hemispherical cavity. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.46, p.696-700, 1982.
- Clothier, B.E.; Scotter, D.R.; Harper, E.R. Three-dimensional infiltration and trickle irrigation. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.28, p.497-501, 1985.
- Dasberg, S.; Bresler, E. Drip irrigation manual. Bet Dagan: International Irrigation Information Center, 1985. 95p. Publication 9
- Dasberg, S.; Or, D. Drip Irrigation. Berlin: Springer, 1999, 162p.
- Keller, J.; Bliesner, R. Sprinkle and trickle irrigation. New York: Chapman and Hall, 1990, 652p.
- Nogueira, C.C.P.; Leão, M.C.S.; Coelho, E.F. Volume de solo molhado por emissor posicionado na superfície e abaixo da superfície do solo. In: Congresso Agrícola Internacional de Ingeniería, 3, 1999, Chillán. Anais... Chillán: Universidad de Concepción, 1999.
- Or, D. Stochastic analysis of water monitoring for drip irrigation management in heterogeneous soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.59, p.1222-1233, 1995.
- Or, D. Drip irrigation in heterogeneous soils: steady-state field experiments for stochastic model evolution. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.60, p.1339-1349, 1996.
- 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.
- Philip, J.R. General theorem on steady infiltration from surface sources, with application to point and line sources. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.35, p.867-871, 1971.
- Raats, P.A.C. Steady infiltration from point sources, cavities, and basins. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.35, p.689-695, 1971.
- Randall, H.C.; Salvatore, J.L. Root growth and water status of trickle-irrigated cucumber and tomato. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, Mount Vernon, v.113, p.830-835, 1988.
- Schwartzman, M.; Zur, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.112, p.242-253, 1986.
- Shrivastava, P.K.; Parikh, M.M.; Sawani, N.G.; Raman, S. Effect of drip irrigation and mulching on tomato yield. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.25, p.179-184, 1994.
- Solomon, K.; Keller, J. Trickle irrigation uniformity and efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.104, p.293-306, 1978.
- Souza, C.F.; Matsura, E.E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, p.63-68, 2002.
- WinTDR99. <http://soilphysics.usu.edu/wintdr>. 15 mai. 2004.
- Wooding, R.A. Steady infiltration from a circular pond. *Water Resources Research*, Washington, 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.