

# Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial<sup>1</sup>

## Wet bulb dimensions in surface drip irrigation

Celsemy Eleutério Maia<sup>2\*</sup>, Sérgio Luiz Aguilar Levien<sup>3</sup>, José Francismar de Medeiros<sup>2</sup> e José Dantas Neto<sup>4</sup>

**Resumo** - Informações da geometria do bulbo molhado são importantes para o dimensionamento e o manejo da irrigação localizada. Para isso, foram instalados seis experimentos em diferentes solos com o objetivo de avaliar as dimensões do bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial em função da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água, usando o modelo potencial. Concluiu-se que as dimensões do bulbo molhado podem ser estimadas satisfatoriamente usando o modelo potencial para os solos avaliados.

**Palavras-chave** - Modelagem de água e solo. Infiltração de água no solo. Manejo da irrigação.

**Abstract** - Information on the geometry of wetted soil volume under trickle irrigation is important for design and operation of this irrigation system, and also for the management of the irrigation. For this, six experiments were installed in different soils with the objective of evaluate the dimensions of the wetted bulb as function of emitter discharged and water application time, using the power model. It was concluded that the wetted bulb dimensions can be predicted satisfactorily using the power model for all the soils tested.

**Key words** - Water and soil modeling. Soil water infiltration. Irrigation management.

---

\* Autor para correspondência

<sup>1</sup>Recebido para publicação em 01/06/2009; aprovado em 21/12/2009

Parte da tese de doutorado do primeiro autor

<sup>2</sup>Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológica, UFERSA, BR 110, km 47, Costa e Silva, Mossoró-RN, Brasil, 59625-900, celsemy@ufersa.edu.br, jfmedeir@ufersa.edu.br

<sup>3</sup>Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológica, UFERSA, sergiolevien@ufersa.edu.br

<sup>4</sup>Departamento de Engenharia Agrícola, UFCG, zedantas@deag.ufcg.edu.br

## Introdução

A agricultura irrigada vem se desenvolvendo consideravelmente nos últimos anos em todo o país, em especial com a fruticultura na região Nordeste, onde se destacam as culturas da uva e da manga, no Vale do São Francisco, e do melão e da banana na região oeste do Estado do Rio Grande do Norte, contribuindo significativamente para o saldo da balança comercial pelas exportações destas para o mercado europeu e americano.

A irrigação localizada tem aumentado de modo contínuo nos últimos anos em todo o mundo. No Brasil, a expansão da irrigação localizada não só tem sido contínua, como tende a acelerar, em decorrência, principalmente, da expectativa de aumento das áreas plantadas com fruteiras em diversas regiões. A irrigação por gotejamento, pelas suas características inerentes de alta uniformidade de aplicação de água e manutenção contínua de ótimos teores de umidade no solo próximo ao sistema radicular, tem sido o sistema mais utilizado. Para Coelho e Or (1999), os altos investimentos requeridos na implantação do sistema de irrigação localizada poderão, entretanto, não ser compensados se não forem utilizadas técnicas adequadas de manejo de irrigação que visem à racionalização do uso da água e o aumento da produtividade.

Informações da geometria do bulbo molhado são importantes para o dimensionamento e manejo da irrigação localizada, principalmente para estimar o volume de solo molhado, a vazão do emissor e o tempo de aplicação de água.

O conhecimento da forma e do tamanho do volume molhado do solo é um aspecto importante a considerar para otimizar o uso da água, evitando percolação profunda. A avaliação da forma e do tamanho do volume molhado permite definir aspectos importantes, tais como lâmina e frequência de irrigação, número de gotejadores e dimensionamento hidráulico (COOK et al., 2006), como também no manejo da irrigação (HAO et al., 2007).

O movimento de água no solo sob irrigação localizada com ponto de emissão superficial é utilizado como um índice para o dimensionamento e o manejo da água de irrigação, devido seu conhecimento ser essencial para a determinação do espaçamento entre os emissores. O espaçamento dos emissores deve ser de tal maneira que uma faixa molhada se forme, porém a sobreposição exagerada, além do maior custo devido ao maior número de emissores, diminuirá a eficiência de aplicação da água de irrigação.

A determinação da profundidade máxima atingida pelo bulbo molhado por um emissor na superfície do solo é importante para prever as perdas de água e nutrientes aplicados. Para isso, soluções analíticas, que levam em consideração a assimetria da infiltração da água no solo, são

as mais utilizadas, porém são válidas apenas para fluxo em condições de steady-state (LUBANA; NARDA, 2001).

O objetivo desse trabalho foi avaliar as dimensões do bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial em função da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água em seis solos da região oeste do Estado do Rio Grande do Norte, usando o modelo potencial.

## Material e métodos

Para uma compreensão do comportamento do bulbo molhado, foi feito levantamento dos principais solos utilizados na fruticultura irrigada do Rio Grande do Norte, mais precisamente no Agropólo Assu-Mossoró. A região é caracterizada, segundo a classificação de Gaussen, com bioclima da região de 4 ath tropical quente de seca acentuada, com índice xerotérmico entre 200 e 150 e sete a oito meses secos. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo BSw<sup>h</sup>, isto é, seco, muito quente e com estação chuvosa no verão atrasando-se para o outono, apresentando temperatura média anual de 27,4 °C, precipitação pluviométrica anual bastante irregular, com média de 673,9 mm, e umidade relativa de 68,9% (CARMO FILHO et al., 1991).

Foram selecionados seis solos com diferentes características físicas e mineralógicas, classificados como Luvissole Crômico, Argissolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háplico, Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico, de acordo com Embrapa (2006). Antes da montagem do sistema de irrigação, os solos foram preparados de forma a simular as reais condições de plantio, com aração e passagem da grade de disco de forma cruzada.

Para determinar com maior precisão o tamanho do bulbo molhado (diâmetro da área molhada e profundidade) foi utilizado um sistema de irrigação portátil, onde foram dispostos oito emissores por linha, distribuídos aleatoriamente na parcela, ao longo de uma tubulação de polietileno de 16 mm de diâmetro, abastecida por dois depósitos de água, sendo um de 1.000 L e outro com 500 L. Para regular a vazão e a pressão, foram utilizados reservatórios reguladores, conectados aos primeiros, que mantinham um nível constante através de um sistema de bóia, sendo sua haste alterada de forma que sua carga hidráulica se mantivesse estável. As diferentes vazões foram obtidas pelos diferentes comprimentos dos microtubos inseridos na tubulação de polietileno. Estes, juntamente com a carga hidráulica constante, geraram diferentes vazões (1; 2; 4 e 8 L h<sup>-1</sup>) nas saídas dos mesmos, que eram fechados quando concluído cada tempo de irrigação. O espaçamento utilizado entre os emissores foi tal que não houvesse sobreposição, ou seja, interferência dos emissores laterais.

Os experimentos foram instalados em delineamento com blocos inteiramente casualizados, no esquema de parcela subdividida, com três repetições, cujos tratamentos foram compostos pelos fatores tempo de aplicação de água e vazão do emissor, sendo o tempo, a parcela e a vazão, a subparcela. As repetições constaram de linhas de irrigação com quatro diferentes tempos (1; 2; 4 e 7 h) e, dentro de cada tempo, as vazões (1; 2; 4 e 8 L h<sup>-1</sup>) obtidas por microtubos de tamanhos diferenciados que proporcionam os valores desejados sob as mesmas condições de carga hidráulica.

Para cada vazão, após os tempos pré-determinados de 1; 2; 4 e 7 h, foram abertas trincheiras no centro do bulbo molhado, abaixo do emissor, onde se realizou as medições das dimensões do bulbo com fita métrica com precisão de 1,0 mm. Para avaliar o efeito da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água na formação do bulbo molhado observou-se as seguintes características: diâmetro superficial ( $D_s$ ), diâmetro máximo ( $D_{max}$ ), profundidade máxima ( $Z_{max}$ ) e profundidade onde ocorre  $D_{max}$  ( $Z_{D_{max}}$ ). Além dessas medidas foram medidos os diâmetros a cada 5 ou 10 cm de profundidade para avaliação do formato do bulbo molhado. Para avaliar as dimensões do bulbo molhado ( $D_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $D_s$  e  $Z_{D_{max}}$ ) em função da vazão do emissor ( $q$ ) e do tempo de aplicação de água ( $t$ ) usou-se o modelo potencial  $y = a \cdot x^b$ , com os coeficientes sendo testados pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade.

## Resultados e discussão

Avaliando os valores de  $D_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $D_s$  e  $Z_{D_{max}}$  em função da vazão do emissor ( $q$ ), o modelo potencial se ajustou bem aos dados, como se pode observar pelos elevados valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), com exceção para o Neossolo Flúvico que, apesar de se observar os mais baixos valores de  $R^2$  para algumas medições, ainda não se verificou um bom ajuste para algumas delas, principalmente  $Z_{D_{max}}$  (Tabelas 1; 2; 3 e 4). A mesma falta de ajuste para este solo, também, foi verificada quando se avaliou as dimensões do bulbo em função do tempo de aplicação de água ( $t$ ) (Tabelas 5; 6; 7 e 8). A explicação, para o baixo ajuste neste solo, provavelmente ocorra devido à alta heterogeneidade deste. Segundo Resende et al. (2002), estes solos são provenientes de depósitos aluviais, sendo muito variável a pequenas distâncias, tanto na horizontal, como na vertical.

Outra característica observada nas Tabelas 1 a 8, foi o aumento do coeficiente  $a$  do modelo potencial ( $y = a \cdot x^b$ ), tanto para o aumento da vazão do emissor para um mesmo tempo de aplicação de água, como, também, para o tempo de aplicação de água, para cada vazão testada. Isto implica, por exemplo, que as dimensões do bulbo molhado para vazão

de 1,0 L h<sup>-1</sup>, aumentam com o tempo de irrigação, como, também, que as dimensões do bulbo molhado para o tempo de 1,0 h aumentam com o acréscimo da vazão do emissor.

O modelo potencial, para avaliar as dimensões do bulbo molhado em função da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água, também foi usado com bons resultados em outros trabalhos, tais como Thorburn et al. (2003), Li et al. (2004) e Thabet e Zayani (2008). Uma característica do uso do modelo potencial é que a taxa de aumento das dimensões do bulbo molhado é maior para as vazões mais baixas e menores tempos de irrigação, diminuindo com o aumento de  $q$  e  $t$ . Esse comportamento também foi observado por Khan et al. (1996) em experimento de campo onde avaliaram o modelo potencial para estimar as dimensões do bulbo molhado para o manejo da irrigação localizada por gotejamento superficial. Porém, mesmo as dimensões do bulbo aumentando a taxas menores com aumento de  $q$  e  $t$ , Bresler (1977) observou que, para solos arenosos, o diâmetro máximo do bulbo não excede os 60 cm, mesmo para emissores com alta vazão e algumas horas de aplicação de água, porém DeTar (2004) também trabalhando com solos arenosos observou, para certas condições, diâmetro molhado superior aos obtidos por Bresler (1977). Pelos dados observados neste trabalho, para o Neossolo Quartizarênico,  $D_{max}$  em função de  $q$  e  $t$  só não foi superior a 60 cm no tempo de 1,0 h. Isto indica que, para determinada condição, tanto a vazão do emissor como o tempo de aplicação de água, não apenas determina o volume molhado, mas também a sua geometria.

Avaliando os coeficientes  $a$  e  $b$  do modelo potencial, tanto para as dimensões do bulbo em função de  $q$  quanto de  $t$ , verificou-se que foram semelhantes, ou seja, para todos os solos a média do coeficiente  $a = f(q)$  foi de 34,45; 22,19; 30,62 e 7,73, para  $D_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $D_s$  e  $Z_{D_{max}}$ , respectivamente. Para  $a = f(t)$  estes valores foram de 33,67; 22,73; 32,84 e 6,92, também, para  $D_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $D_s$  e  $Z_{D_{max}}$ , respectivamente. Para o coeficiente  $b = f(q)$  os valores foram de 0,35; 0,38; 0,29 e 0,51, para  $D_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $D_s$  e  $Z_{D_{max}}$ , respectivamente, e, para  $b = f(t)$  valores de 0,38; 0,40; 0,25 e 0,65, também, para  $D_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $D_s$  e  $Z_{D_{max}}$ , respectivamente. É importante salientar que estes resultados foram obtidos em solos previamente preparados de forma semelhante, simulando o preparo realizado normalmente pelo agricultor, o que pode ter contribuído para uma maior uniformidade do perfil entre os solos, principalmente na camada até 30 cm, independente da textura, estrutura e densidade desta camada. Obviamente que a camada superficial contribui sobremaneira para a distribuição de água no solo, porém, a formação do bulbo molhado pode ter sido, também, influenciada pelas camadas mais subsuperficiais, partes que permaneceram intactas, ou seja, sem preparo, o que pode alterar a capacidade de infiltração e/ou funcionar como uma barreira à infiltração de água ou fluxo subterrâneo.

**Tabela 1** - Diâmetro máximo molhado ( $D_{max}$ , cm), em função da vazão do emissor ( $L\ h^{-1}$ ), para cada tempo de aplicação de água (h), em cada solo estudado

| Solo                       | Tempo (h) | Equação                            | R <sup>2</sup> |
|----------------------------|-----------|------------------------------------|----------------|
| Luvissolo Crômico          | 1         | $D_{max} = 26,05 \cdot q^{0,3102}$ | 0,9844         |
|                            | 2         | $D_{max} = 32,11 \cdot q^{0,3022}$ | 0,9956         |
|                            | 4         | $D_{max} = 37,31 \cdot q^{0,3407}$ | 0,9991         |
|                            | 7         | $D_{max} = 42,66 \cdot q^{0,3747}$ | 0,9954         |
| Argissolo Vermelho-Amarelo | 1         | $D_{max} = 25,95 \cdot q^{0,2852}$ | 0,9771         |
|                            | 2         | $D_{max} = 31,27 \cdot q^{0,3285}$ | 0,9959         |
|                            | 4         | $D_{max} = 40,00 \cdot q^{0,2958}$ | 0,9235         |
|                            | 7         | $D_{max} = 43,92 \cdot q^{0,3583}$ | 0,9721         |
| Cambissolo Háplico         | 1         | $D_{max} = 24,07 \cdot q^{0,3223}$ | 0,9811         |
|                            | 2         | $D_{max} = 30,81 \cdot q^{0,3685}$ | 0,9974         |
|                            | 4         | $D_{max} = 40,07 \cdot q^{0,3136}$ | 0,9662         |
|                            | 7         | $D_{max} = 46,69 \cdot q^{0,3535}$ | 0,9925         |
| Neossolo Quartzarênico     | 1         | $D_{max} = 27,21 \cdot q^{0,2687}$ | 0,9655         |
|                            | 2         | $D_{max} = 32,19 \cdot q^{0,3033}$ | 0,9627         |
|                            | 4         | $D_{max} = 38,47 \cdot q^{0,3317}$ | 0,9929         |
|                            | 7         | $D_{max} = 44,67 \cdot q^{0,3862}$ | 0,9827         |
| Latossolo Vermelho         | 1         | $D_{max} = 21,96 \cdot q^{0,3707}$ | 0,9811         |
|                            | 2         | $D_{max} = 26,16 \cdot q^{0,4097}$ | 0,9978         |
|                            | 4         | $D_{max} = 36,07 \cdot q^{0,3545}$ | 0,9844         |
|                            | 7         | $D_{max} = 45,07 \cdot q^{0,3219}$ | 0,9027         |
| Neossolo Flúvico           | 1         | -                                  | -              |
|                            | 2         | $D_{max} = 24,74 \cdot q^{0,4128}$ | 0,9774         |
|                            | 4         | $D_{max} = 35,02 \cdot q^{0,4732}$ | 0,9427         |
|                            | 7         | $D_{max} = 39,87 \cdot q^{0,4270}$ | 0,9909         |

Os coeficientes foram significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade

**Tabela 2** - Profundidade máxima molhada ( $Z_{max}$ , cm), em função da vazão do emissor ( $L\ h^{-1}$ ), para cada tempo de aplicação de água (h), em cada solo estudado

| Solo                       | Tempo (h) | Equação                            | R <sup>2</sup> |
|----------------------------|-----------|------------------------------------|----------------|
| Luvissolo Crômico          | 1         | $Z_{max} = 15,42 \cdot q^{0,3322}$ | 0,9895         |
|                            | 2         | $Z_{max} = 20,13 \cdot q^{0,3485}$ | 0,9765         |
|                            | 4         | $Z_{max} = 26,10 \cdot q^{0,3193}$ | 0,9703         |
|                            | 7         | $Z_{max} = 30,45 \cdot q^{0,4252}$ | 0,9747         |
| Argissolo Vermelho-Amarelo | 1         | $Z_{max} = 18,13 \cdot q^{0,3585}$ | 0,8998         |
|                            | 2         | $Z_{max} = 20,99 \cdot q^{0,4381}$ | 0,9820         |
|                            | 4         | $Z_{max} = 29,84 \cdot q^{0,3960}$ | 0,9894         |
|                            | 7         | $Z_{max} = 35,27 \cdot q^{0,4351}$ | 0,9817         |
| Cambissolo Háplico         | 1         | $Z_{max} = 14,60 \cdot q^{0,4136}$ | 0,9944         |
|                            | 2         | $Z_{max} = 17,70 \cdot q^{0,4288}$ | 0,9855         |
|                            | 4         | $Z_{max} = 21,43 \cdot q^{0,5464}$ | 0,9752         |
|                            | 7         | $Z_{max} = 34,70 \cdot q^{0,3485}$ | 0,9288         |

Tabela 2 - continuação

|                        |   |                                     |        |
|------------------------|---|-------------------------------------|--------|
| Neossolo Quartzarênico | 1 | $Z_{\max} = 14,56 \cdot q^{0,4472}$ | 0,9823 |
|                        | 2 | $Z_{\max} = 18,75 \cdot q^{0,4127}$ | 0,9154 |
|                        | 4 | $Z_{\max} = 27,10 \cdot q^{0,4184}$ | 0,9559 |
|                        | 7 | $Z_{\max} = 33,06 \cdot q^{0,4062}$ | 0,8836 |
| Latosolo Vermelho      | 1 | $Z_{\max} = 15,54 \cdot q^{0,4330}$ | 0,9658 |
|                        | 2 | $Z_{\max} = 22,51 \cdot q^{0,3415}$ | 0,9855 |
|                        | 4 | $Z_{\max} = 25,24 \cdot q^{0,4314}$ | 0,9369 |
|                        | 7 | $Z_{\max} = 30,36 \cdot q^{0,5170}$ | 0,9957 |
| Neossolo Flúvico       | 1 | $Z_{\max} = 08,50 \cdot q^{0,5211}$ | 0,8367 |
|                        | 2 | $Z_{\max} = 12,87 \cdot q^{0,1808}$ | 0,6740 |
|                        | 4 | $Z_{\max} = 17,10 \cdot q^{0,1314}$ | 0,6953 |
|                        | 7 | $Z_{\max} = 22,21 \cdot q^{0,1453}$ | 0,9914 |

Os coeficientes foram significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade

**Tabela 3** - Diâmetro superficial molhado ( $D_s$ , cm), em função da vazão do emissor ( $L h^{-1}$ ), para tempo de aplicação de água (h), em cada solo estudado

| Solo                       | Tempo (h) | Equação                        | R <sup>2</sup> |
|----------------------------|-----------|--------------------------------|----------------|
| Luvissolo Crômico          | 1         | $D_s = 25,38 \cdot q^{0,2895}$ | 0,9956         |
|                            | 2         | $D_s = 29,30 \cdot q^{0,2360}$ | 0,9877         |
|                            | 4         | $D_s = 32,31 \cdot q^{0,2847}$ | 0,9957         |
|                            | 7         | $D_s = 38,94 \cdot q^{0,2579}$ | 0,9914         |
| Argissolo Vermelho-Amarelo | 1         | $D_s = 24,20 \cdot q^{0,2592}$ | 0,9896         |
|                            | 2         | $D_s = 29,14 \cdot q^{0,2824}$ | 0,9988         |
|                            | 4         | $D_s = 32,56 \cdot q^{0,2799}$ | 0,9919         |
|                            | 7         | $D_s = 37,87 \cdot q^{0,2481}$ | 0,9893         |
| Cambissolo Háplico         | 1         | $D_s = 22,63 \cdot q^{0,3449}$ | 0,9648         |
|                            | 2         | $D_s = 28,88 \cdot q^{0,3856}$ | 0,9935         |
|                            | 4         | $D_s = 35,59 \cdot q^{0,3004}$ | 0,9555         |
|                            | 7         | $D_s = 45,16 \cdot q^{0,2246}$ | 0,8425         |
| Neossolo Quartzarênico     | 1         | $D_s = 25,65 \cdot q^{0,2170}$ | 0,8923         |
|                            | 2         | $D_s = 29,47 \cdot q^{0,2472}$ | 0,9972         |
|                            | 4         | $D_s = 33,64 \cdot q^{0,2343}$ | 0,9401         |
|                            | 7         | $D_s = 37,90 \cdot q^{0,2159}$ | 0,9767         |
| Latosolo Vermelho          | 1         | $D_s = 21,34 \cdot q^{0,2437}$ | 0,9718         |
|                            | 2         | $D_s = 24,43 \cdot q^{0,2796}$ | 0,9217         |
|                            | 4         | $D_s = 31,25 \cdot q^{0,1945}$ | 0,8290         |
|                            | 7         | $D_s = 32,85 \cdot q^{0,2087}$ | 0,9289         |
| Neossolo Flúvico           | 1         | $D_s = 19,85 \cdot q^{0,4597}$ | 0,9742         |
|                            | 2         | $D_s = 24,00 \cdot q^{0,4392}$ | 0,8989         |
|                            | 4         | $D_s = 33,63 \cdot q^{0,4531}$ | 0,9361         |
|                            | 7         | $D_s = 38,38 \cdot q^{0,4314}$ | 0,9987         |

Os coeficientes foram significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade

**Tabela 4** - Profundidade onde ocorre  $D_{max}$  ( $Z_{Dmax}$ , cm), em função da vazão do emissor ( $L\ h^{-1}$ ), para cada tempo de aplicação de água (h), em cada solo estudado

| Solo                       | Tempo (h) | Equação                               | R <sup>2</sup> |
|----------------------------|-----------|---------------------------------------|----------------|
| Luvissolo Crômico          | 1         | $Z_{D\ max} = 02,34 \cdot q^{0,6664}$ | 0,8570         |
|                            | 2         | $Z_{D\ max} = 05,44 \cdot q^{0,5341}$ | 0,9696         |
|                            | 4         | $Z_{D\ max} = 8,36 \cdot q^{0,4457}$  | 0,9927         |
|                            | 7         | $Z_{D\ max} = 09,87 \cdot q^{0,5303}$ | 0,9052         |
| Argissolo Vermelho-Amarelo | 1         | $Z_{D\ max} = 04,41 \cdot q^{0,5071}$ | 0,9385         |
|                            | 2         | $Z_{D\ max} = 05,87 \cdot q^{0,5447}$ | 0,9626         |
|                            | 4         | $Z_{D\ max} = 11,26 \cdot q^{0,3722}$ | 0,9477         |
|                            | 7         | $Z_{D\ max} = 13,71 \cdot q^{0,4707}$ | 0,9736         |
| Cambissolo Háplico         | 1         | -                                     | -              |
|                            | 2         | $Z_{D\ max} = 03,99 \cdot q^{0,3197}$ | 0,7424         |
|                            | 4         | $Z_{D\ max} = 06,86 \cdot q^{0,5175}$ | 0,9324         |
|                            | 7         | $Z_{D\ max} = 08,19 \cdot q^{0,6054}$ | 0,9916         |
| Neossolo Quartzarênico     | 1         | $Z_{D\ max} = 02,96 \cdot q^{0,6355}$ | 0,8331         |
|                            | 2         | $Z_{D\ max} = 04,53 \cdot q^{0,6710}$ | 0,9604         |
|                            | 4         | $Z_{D\ max} = 07,90 \cdot q^{0,6055}$ | 0,9520         |
|                            | 7         | $Z_{D\ max} = 11,79 \cdot q^{0,5862}$ | 0,9378         |
| Latosolo Vermelho          | 1         | $Z_{D\ max} = 03,81 \cdot q^{0,6767}$ | 0,9517         |
|                            | 2         | $Z_{D\ max} = 07,63 \cdot q^{0,4637}$ | 0,9501         |
|                            | 4         | $Z_{D\ max} = 10,58 \cdot q^{0,4815}$ | 0,9604         |
|                            | 7         | $Z_{D\ max} = 14,88 \cdot q^{0,4311}$ | 0,9977         |
| Neossolo Flúvico           | 1         | -                                     | -              |
|                            | 2         | -                                     | -              |
|                            | 4         | -                                     | -              |
|                            | 7         | -                                     | -              |

Os coeficientes foram significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade

**Tabela 5** - Diâmetro máximo molhado ( $D_{max}$ , cm), em função do tempo de aplicação de água (h), para cada vazão do emissor ( $q$ ), em cada solo estudado

| Solo                       | Vazão ( $L\ h^{-1}$ ) | Equação                            | R <sup>2</sup> |
|----------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------|
| Luvissolo Crômico          | 1                     | $D_{max} = 25,72 \cdot t^{0,2623}$ | 0,9907         |
|                            | 2                     | $D_{max} = 33,82 \cdot t^{0,2481}$ | 0,9950         |
|                            | 4                     | $D_{max} = 39,73 \cdot t^{0,3134}$ | 0,9983         |
|                            | 8                     | $D_{max} = 48,39 \cdot t^{0,3213}$ | 0,9975         |
| Argissolo Vermelho-Amarelo | 1                     | $D_{max} = 25,38 \cdot t^{0,3105}$ | 0,9984         |
|                            | 2                     | $D_{max} = 31,43 \cdot t^{0,3149}$ | 0,9941         |
|                            | 4                     | $D_{max} = 40,09 \cdot t^{0,3727}$ | 0,9971         |
|                            | 8                     | $D_{max} = 45,64 \cdot t^{0,3551}$ | 0,9711         |
| Cambissolo Háplico         | 1                     | $D_{max} = 23,62 \cdot t^{0,3437}$ | 0,9973         |
|                            | 2                     | $D_{max} = 31,12 \cdot t^{0,3582}$ | 0,9992         |
|                            | 4                     | $D_{max} = 40,13 \cdot t^{0,3412}$ | 0,9917         |
|                            | 8                     | $D_{max} = 46,95 \cdot t^{0,3618}$ | 0,9633         |

Tabela 5 - continuação

|                        |   |                                     |        |
|------------------------|---|-------------------------------------|--------|
| Neossolo Quartzarênico | 1 | $D_{\max} = 26,02 \cdot t^{0,2594}$ | 0,9984 |
|                        | 2 | $D_{\max} = 34,17 \cdot t^{0,2845}$ | 0,9875 |
|                        | 4 | $D_{\max} = 40,10 \cdot t^{0,3420}$ | 0,9939 |
|                        | 8 | $D_{\max} = 45,44 \cdot t^{0,3737}$ | 0,9944 |
| Latosolo Vermelho      | 1 | $D_{\max} = 21,01 \cdot t^{0,3531}$ | 0,9920 |
|                        | 2 | $D_{\max} = 28,05 \cdot t^{0,3848}$ | 0,9964 |
|                        | 4 | $D_{\max} = 37,58 \cdot t^{0,3588}$ | 0,9801 |
|                        | 8 | $D_{\max} = 47,40 \cdot t^{0,2923}$ | 0,9649 |
| Neossolo Flúvico       | 1 | $D_{\max} = 21,49 \cdot t^{0,3618}$ | 0,9605 |
|                        | 2 | $D_{\max} = 26,26 \cdot t^{0,3893}$ | 0,9393 |
|                        | 4 | $D_{\max} = 38,52 \cdot t^{0,3921}$ | 0,9092 |
|                        | 8 | $D_{\max} = 10,09 \cdot t^{1,3697}$ | 0,7796 |

Os coeficientes foram significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade

**Tabela 6** - Profundidade máxima molhada ( $Z_{\max}$ , cm), em função do tempo de aplicação de água (h), para cada vazão do emissor (q), em cada solo estudado

| Solo                       | Vazão (L h <sup>-1</sup> ) | Equação                             | R <sup>2</sup> |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------|
| Luvissolo Crômico          | 1                          | $Z_{\max} = 15,26 \cdot t^{0,3533}$ | 0,9959         |
|                            | 2                          | $Z_{\max} = 19,91 \cdot t^{0,3714}$ | 0,9867         |
|                            | 4                          | $Z_{\max} = 24,97 \cdot t^{0,4190}$ | 0,9542         |
|                            | 8                          | $Z_{\max} = 29,64 \cdot t^{0,4210}$ | 0,9857         |
| Argissolo Vermelho-Amarelo | 1                          | $Z_{\max} = 18,49 \cdot t^{0,3180}$ | 0,8834         |
|                            | 2                          | $Z_{\max} = 20,70 \cdot t^{0,4665}$ | 0,9909         |
|                            | 4                          | $Z_{\max} = 30,48 \cdot t^{0,3497}$ | 0,9953         |
|                            | 8                          | $Z_{\max} = 38,92 \cdot t^{0,4231}$ | 0,9927         |
| Cambissolo Háplico         | 1                          | $Z_{\max} = 13,80 \cdot t^{0,3869}$ | 0,8793         |
|                            | 2                          | $Z_{\max} = 19,15 \cdot t^{0,4291}$ | 0,9814         |
|                            | 4                          | $Z_{\max} = 23,46 \cdot t^{0,4839}$ | 0,9717         |
|                            | 8                          | $Z_{\max} = 35,78 \cdot t^{0,3520}$ | 0,9368         |
| Neossolo Quartzarênico     | 1                          | $Z_{\max} = 14,41 \cdot t^{0,4175}$ | 0,9829         |
|                            | 2                          | $Z_{\max} = 18,72 \cdot t^{0,4185}$ | 0,9708         |
|                            | 4                          | $Z_{\max} = 28,43 \cdot t^{0,4625}$ | 0,9999         |
|                            | 8                          | $Z_{\max} = 34,60 \cdot t^{0,3611}$ | 0,9443         |
| Latosolo Vermelho          | 1                          | $Z_{\max} = 15,47 \cdot t^{0,3553}$ | 0,9427         |
|                            | 2                          | $Z_{\max} = 23,24 \cdot t^{0,3405}$ | 0,9979         |
|                            | 4                          | $Z_{\max} = 27,80 \cdot t^{0,3491}$ | 0,9142         |
|                            | 8                          | $Z_{\max} = 35,09 \cdot t^{0,4680}$ | 0,9880         |
| Neossolo Flúvico           | 1                          | $Z_{\max} = 08,85 \cdot t^{0,4529}$ | 0,9943         |
|                            | 2                          | $Z_{\max} = 13,15 \cdot t^{0,3246}$ | 0,9903         |
|                            | 4                          | $Z_{\max} = 12,41 \cdot t^{0,3937}$ | 0,9709         |
|                            | 8                          | -                                   | -              |

Os coeficientes foram significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade

**Tabela 7** - Diâmetro superficial molhado ( $D_s$ , cm), em função do tempo de aplicação de água (h), para cada vazão do emissor ( $q$ ), em cada solo estudado

| Solo                       | Vazão (L h <sup>-1</sup> ) | Equação                        | R <sup>2</sup> |
|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------|
| Luvissolo Crômico          | 1                          | $D_s = 24,68 \cdot t^{0,2223}$ | 0,9703         |
|                            | 2                          | $D_s = 31,05 \cdot t^{0,1985}$ | 0,9786         |
|                            | 4                          | $D_s = 37,55 \cdot t^{0,1767}$ | 0,9827         |
|                            | 8                          | $D_s = 43,62 \cdot t^{0,2136}$ | 0,9140         |
| Argissolo Vermelho-Amarelo | 1                          | $D_s = 24,40 \cdot t^{0,2234}$ | 0,9957         |
|                            | 2                          | $D_s = 29,17 \cdot t^{0,2202}$ | 0,9680         |
|                            | 4                          | $D_s = 36,40 \cdot t^{0,2112}$ | 0,9809         |
|                            | 8                          | $D_s = 42,49 \cdot t^{0,2158}$ | 0,9330         |
| Cambissolo Háplico         | 1                          | $D_s = 21,79 \cdot t^{0,3330}$ | 0,9898         |
|                            | 2                          | $D_s = 30,56 \cdot t^{0,3119}$ | 0,9990         |
|                            | 4                          | $D_s = 39,11 \cdot t^{0,2681}$ | 0,9323         |
|                            | 8                          | $D_s = 48,41 \cdot t^{0,1957}$ | 0,7578         |
| Neossolo Quartzarênico     | 1                          | $D_s = 25,30 \cdot t^{0,1980}$ | 0,9984         |
|                            | 2                          | $D_s = 29,58 \cdot t^{0,2334}$ | 0,9947         |
|                            | 4                          | $D_s = 37,96 \cdot t^{0,1309}$ | 0,9111         |
|                            | 8                          | $D_s = 39,64 \cdot t^{0,2280}$ | 0,9339         |
| Latosolo Vermelho          | 1                          | $D_s = 20,53 \cdot t^{0,2688}$ | 0,9279         |
|                            | 2                          | $D_s = 25,89 \cdot t^{0,1936}$ | 0,9600         |
|                            | 4                          | $D_s = 31,52 \cdot t^{0,2645}$ | 0,9468         |
|                            | 8                          | $D_s = 34,58 \cdot t^{0,2153}$ | 0,9941         |
| Neossolo Flúvico           | 1                          | $D_s = 19,19 \cdot t^{0,3342}$ | 0,9039         |
|                            | 2                          | $D_s = 26,80 \cdot t^{0,3827}$ | 0,9220         |
|                            | 4                          | $D_s = 39,39 \cdot t^{0,3362}$ | 0,9247         |
|                            | 8                          | $D_s = 48,45 \cdot t^{0,3252}$ | 0,9291         |

Os coeficientes foram significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade

**Tabela 8** - Profundidade onde ocorre  $D_{max}$  ( $Z_{Dmax}$ , cm), em função do tempo de aplicação de água (h), para cada vazão do emissor ( $q$ ), em cada solo estudado

| Solo                       | Vazão (L h <sup>-1</sup> ) | Equação                             | R <sup>2</sup> |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------|
| Luvissolo Crômico          | 1                          | $Z_{Dmax} = 02,28 \cdot t^{0,7928}$ | 0,8870         |
|                            | 2                          | $Z_{Dmax} = 05,24 \cdot t^{0,5901}$ | 0,9813         |
|                            | 4                          | $Z_{Dmax} = 06,96 \cdot t^{0,6318}$ | 0,9856         |
|                            | 8                          | $Z_{Dmax} = 08,78 \cdot t^{0,5948}$ | 0,9455         |
| Argissolo Vermelho-Amarelo | 1                          | $Z_{Dmax} = 04,00 \cdot t^{0,6214}$ | 0,9665         |
|                            | 2                          | $Z_{Dmax} = 06,15 \cdot t^{0,6287}$ | 0,9921         |
|                            | 4                          | $Z_{Dmax} = 10,29 \cdot t^{0,4893}$ | 0,9978         |
|                            | 8                          | $Z_{Dmax} = 11,18 \cdot t^{0,5948}$ | 0,9887         |
| Cambissolo Háplico         | 1                          | $Z_{Dmax} = 03,48 \cdot t^{0,4255}$ | 0,9153         |
|                            | 2                          | $Z_{Dmax} = 02,05 \cdot t^{1,0144}$ | 0,9203         |
|                            | 4                          | $Z_{Dmax} = 04,13 \cdot t^{0,8358}$ | 0,8494         |
|                            | 8                          | $Z_{Dmax} = 05,64 \cdot t^{0,8103}$ | 0,9848         |

Tabela 8 - continuação

|                        |   |  |        |
|------------------------|---|--|--------|
| Neossolo Quartzarênico | 1 | $Z_{D_{max}} = 02,62 \cdot t^{0,7482}$ | 0,9903 |
|                        | 2 | $Z_{D_{max}} = 05,73 \cdot t^{0,5406}$ | 0,9519 |
|                        | 4 | $Z_{D_{max}} = 05,94 \cdot t^{0,9048}$ | 0,9738 |
|                        | 8 | $Z_{D_{max}} = 11,83 \cdot t^{0,5524}$ | 0,9922 |
| Latossolo Vermelho     | 1 | $Z_{D_{max}} = 03,71 \cdot t^{0,7294}$ | 0,9803 |
|                        | 2 | $Z_{D_{max}} = 07,14 \cdot t^{0,5613}$ | 0,9561 |
|                        | 4 | $Z_{D_{max}} = 11,22 \cdot t^{0,4516}$ | 0,9858 |
|                        | 8 | $Z_{D_{max}} = 13,53 \cdot t^{0,5086}$ | 0,9980 |
| Neossolo Flúvico       | 1 | $Z_{D_{max}} = 02,56 \cdot t^{0,2763}$ | 0,7281 |
|                        | 2 | -                                      | -      |
|                        | 4 | $Z_{D_{max}} = 01,21 \cdot t^{0,9075}$ | 0,7996 |
|                        | 8 | -                                      | -      |

Os coeficientes foram significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade

Sendo o coeficiente  $a$  do modelo potencial ( $y = a \cdot q^b$ ) igual a dimensão do bulbo para  $q$  igual a  $1,0 \text{ L h}^{-1}$  e, desejando saber o valor de  $q$  para aumentar em 50% ( $q_{A50\%}$ ) ou 100% ( $q_{A100\%}$ ) as dimensões do bulbo em relação a  $q = 1,0 \text{ L h}^{-1}$ , os valores de  $q$  podem ser obtidos por  $q_{A50\%} = (3/2)^{1/b}$  e  $q_{A100\%} = 2^{1/b}$ , respectivamente. Devido à diminuição da taxa de crescimento das dimensões em função da vazão, pode-se observar nas Tabelas 1; 2; 3 e 4 que, para aumentar as dimensões do bulbo em 50% em relação a vazão de  $1,0 \text{ L h}^{-1}$  as vazões médias para os solos estudados foram de 3,31; 4,38; 4,64 e  $2,29 \text{ L h}^{-1}$  para  $D_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $D_s$  e  $Z_{Dmax}$ , respectivamente. Para aumentar em 100%, estes valores são de 7,87; 5,76 (não foram computados os valores do Neossolo Flúvico); 14,66 e  $4,21 \text{ L h}^{-1}$ , também, para  $D_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $D_s$  e  $Z_{Dmax}$ , respectivamente. Vale salientar que estes são valores médios e que algumas vazões necessárias para aumentar em 50% e 100% as dimensões do bulbo foram superiores à vazão máxima avaliada no experimento, que foi de  $8,0 \text{ L h}^{-1}$ , chegando em alguns casos a vazões estimadas para este objetivo de mais de  $100 \text{ L h}^{-1}$ , como no caso para  $Z_{max}$  no Neossolo Flúvico. Isso implica que, para aumentar as dimensões do bulbo de 50% para 100% quando comparada com a vazão de  $1,0 \text{ L h}^{-1}$ , o aumento da vazão dos emissores serão, em média, para todos os solos estudados de 2,33; 2,05; 2,94 e 1,79 vezes, para  $D_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $D_s$  e  $Z_{Dmax}$ , respectivamente. Schwartzman e Zur (1986) fazendo simulações para que não houvesse sobreposição do bulbo molhado, observaram, pela análise de sensibilidade, que, duplicando a vazão do emissor, resulta em um aumento de 10% no diâmetro e um decréscimo de 30% na profundidade molhada e que, o efeito, na mudança na vazão do emissor, é mais pronunciado em solos argilosos que em solos arenosos.

A relação entre  $D_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $D_s$  e  $Z_{Dmax}$ , em função de  $q$  e  $t$ , é importante para o dimensionamento e manejo da irrigação, porém uma boa combinação destes é necessário para se obter êxito na irrigação. Por exemplo, usando emissores de baixa vazão, o bulbo molhado pode apresentar a profundidade maior que largura, implicando que pode não haver superposição, porém com a vantagem da menor área de exposição para a evaporação da água do solo, contrário do que acontece quando se usa gotejadores de maior vazão. Nesse sentido, usando gotejadores com menor vazão, será necessário um maior número destes para suprir a demanda de água das plantas, aumentando o custo. Por outro lado, usando emissores de maior vazão, a taxa de aplicação da água pode ser superior a capacidade de infiltração do solo, conseqüentemente, apresentado um bulbo com maior largura. Assim, tanto altas como baixas vazões, juntamente com o tempo de irrigação, podem apresentar vantagens e desvantagens, porém a combinação de  $q$  e  $t$  será importante para a obtenção do volume de solo molhado, além de que a determinação da área superficial molhada fornece informação da perda por evaporação direta da água no solo (BARRETO et al., 2008).

## Conclusão

O diâmetro máximo, a profundidade máxima, a profundidade onde ocorre o diâmetro máximo e o diâmetro superficial podem ser estimados, tanto em função da vazão do emissor como do tempo de aplicação de água, usando o modelo potencial.

## Referências

- BARRETO, C. V. G. *et al.* Técnica de avaliação de bulbo úmido por múltiplos cortes em trincheira. **Irriga**, v. 13, n. 02, p. 160-169, 2008.
- BRESLER, E. Trickle-drip irrigation: principles and application to soil water management. **Advances in Agronomy**, v. 29, n. 03, p. 343-393, 1977.
- CARMO FILHO, F.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MAIA NETO, J. M. **Dados meteorológicos de Mossoró (Jan. de 1988 à Dez. de 1990)**. Mossoró: ESAM/FGD, 1991. 121 p.
- COELHO, E. F.; OR, D. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. **Plant and Soil**, v. 206, n. 02, p. 123-136, 1999.
- COOK, F. J. *et al.* Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, n. 9, p. 1353-1359, 2006.
- DeTAR, W. R. Using a subsurface drip irrigation system to measure crop water use. **Irrigation Science**, v. 23, n. 03, p. 111-122, 2004.
- EMPRESABRASILEIRADEPESQUISAAGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p.
- HAO, A. *et al.* Estimation of wet bulb formation in various soil during drip irrigation. **Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University**, v. 01, n. 52, p. 187-193, 2007.
- KHAN, A. A.; YITAYEW, M.; WARRICK, A. W. Field evaluation of water and solute distribution from a point source. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 122, n. 04, p. 221-227, 1996.
- LI, J.; ZHANG, J.; RAO, M. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. **Agricultural Water Management**, v. 67, n. 02, p. 89-104, 2004.
- LUBANA, P. P. S.; NARDA, N. K. Modeling soil water dynamics under trickle emitter: a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 78, n. 03, p. 217-232, 2001.
- RESENDE, M. *et al.* **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 4. ed. Viçosa-MG: Neput, 2002. 338 p.
- SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 112, n. 03, p. 242-253, 1986.
- THABET, M.; ZAYANI, K. Wetting patterns under trickle source in a loamy sand soil of south Tunisia. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, v. 03, n. 01, p. 38-42, 2008.
- THORBURN, P. J.; COOK, F. J.; BRISTOW, K. L. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. **Irrigation Science**, v. 22, n. 03/04, p. 121-127, 2003.