

RIBEIRO, MD; TESTEZLAF, R; FERRAREZI, RS. 2017. Validação de parâmetros operacionais para o manejo de mesas de subirrigação. *Horticultura Brasileira* 35: 549-556. DOI - <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620170412>

## Validação de parâmetros operacionais para o manejo de mesas de subirrigação

Maycon D Ribeiro<sup>1</sup>; Roberto Testezlaf<sup>2</sup>; Rhuano S Ferrarezi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná (UFPR), Jandaia do Sul-PR, Brasil; [mribeiro@ufpr.br](mailto:mribeiro@ufpr.br); <sup>2</sup>Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas-SP, Brasil; [bob@feagri.unicamp.br](mailto:bob@feagri.unicamp.br); <sup>3</sup>University of Florida (UF), Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS), Indian River Research and Education Center (IRREC), Fort Pierce-FL, United States; [rferrarezi@ufl.edu](mailto:rferrarezi@ufl.edu)

### RESUMO

A subirrigação requer que a definição do manejo hídrico e nutricional seja adequada ao equipamento e à cultura a ser cultivada para obter elevada eficiência de irrigação em comparação a outros sistemas. O objetivo desse trabalho foi avaliar os parâmetros operacionais de uma mesa de subirrigação em condições teóricas e experimentais, com a determinação do tempo de permanência da água no interior do equipamento para diferentes valores de lâmina e de vazões de adução. A primeira etapa consistiu em simular o desempenho da mesa de subirrigação, estimando-se o tempo de adução e drenagem do sistema para alturas de 1, 3 e 5 cm e vazões de 10, 20 e 30 L/min, a partir de equacionamentos teóricos da operação. A segunda etapa consistiu em avaliar experimentalmente a operação da mesa de subirrigação, validando a metodologia de simulação proposta. E a terceira etapa consistiu em aplicar as equações em simulações de parâmetros de manejo da mesa de subirrigação. Os valores teóricos de tempo de permanência de água na mesa variaram de 9,1 a 68,2 minutos, e os valores experimentais variaram de 9,5 a 78,4 minutos. A combinação vazão de adução e altura da lâmina controlou o tempo e altura de contato da água com o substrato e permitiu estabelecer configurações alternativas para realizar o manejo em diferentes condições de cultivo.

**Palavras-chave:** Ambiente protegido, irrigação, manejo de água, capilaridade.

### ABSTRACT

#### Modeling operational parameters for water management of ebb-and-flow benches

Subirrigation requires appropriate water and nutrient management based on the equipment specifications and crop cultivated in order to obtain high irrigation efficiency. Our objectives were to characterize the operation of an automated ebb-and-flow bench in theoretical and experimental conditions, determining the irrigation time inside the equipment at different water heights and water flows. The first step was to simulate the ebb-and-flow subirrigation bench performance, by estimating the application and drainage time for different water depths (1, 3 and 5 cm) and flow rates (10, 20 and 30 L/min) based on empirical equations. The second phase evaluated the ebb-and-flow subirrigation bench performance experimentally, validating the proposed simulation methodology. The third step consisted of applying equations to simulate water management parameters for the ebb-and-flow bench. The theoretical values of irrigation time ranged from 9.1 to 68.2 minutes and the experimental values ranged from 9.5 to 78.4 minutes. The combination of water flow and height controlled the contact time and height between the water and substrate and allowed the water management establishment for different cultivation conditions.

**Keywords:** Greenhouse, irrigation, water management, capillarity.

(Recebido para publicação em 23 de agosto de 2016; aceito em 19 de abril de 2017)

(Received on August 23, 2016; accepted on April 19, 2017)

A subirrigação se caracteriza pela aplicação de solução nutritiva (SN) na base dos recipientes de cultivo. Nesse sistema, a água e os nutrientes se movimentam verticalmente no meio de cultivo pela ascensão capilar (Ferrarezi *et al.*, 2014). A capilaridade é condicionada pelo ângulo de contato entre a água e os condutos capilares, forças de tensão superficial da água e microporosidade do substrato (Libardi, 2005), sendo utilizada com sucesso na irrigação a campo e em cultivos em ambiente protegido. Na subirrigação comercial, a SN não absorvida pelo

substrato após um determinado tempo de permanência é drenada do sistema, sendo armazenada em reservatórios e reutilizada posteriormente (Montesano *et al.*, 2010). A recirculação de SN reduz a quantidade de água e nutrientes requerida no sistema de produção, eliminando o descarte inapropriado de água e sais no meio ambiente. Além disso, a subirrigação aumenta a eficiência do uso de fertilizantes (Schmal *et al.*, 2011), diminui o requerimento de mão-de-obra e o custo de produção (Montesano *et al.*, 2010), e disponibiliza água e nutrientes sem interferir em outros processos de

produção como porosidade e nutrientes no substrato (Andriolo *et al.*, 2001). A subirrigação pode ser completamente automatizada para fornecer água e nutrientes de acordo com a demanda das culturas (Ferrarezi *et al.*, 2014; Ferrarezi & Testezlaf, 2017a,b). Adicionalmente, a tecnologia incrementa a produção por unidade de área, proporciona maior uniformidade e induz precocidade de produção (Barreto *et al.*, 2015; Dumroese *et al.*, 2006; Ferrarezi & Testezlaf, 2017a,b; Ferrarezi *et al.*, 2015).

Os principais equipamentos de

subirrigação para emprego em ambientes protegidos são as mesas de subirrigação, piso de inundação, bandejas móveis, manta capilar, sistemas de pavio e calhas em desníveis (Ferrarezi *et al.*, 2015). Dentre esses equipamentos, a mesa de subirrigação é a mais utilizada por sua versatilidade, pois se adapta a formas diferenciadas de manejo (Cox, 2014) e permite a irrigação de diversas culturas em recipientes de diferentes dimensões (Beytes, 2009).

O manejo hídrico das mesas de subirrigação depende do tipo de recipiente utilizado na produção, do requerimento hídrico das diferentes culturas, da capacidade de absorção de água e da capilaridade proporcionada pelo substrato (Schmal *et al.*, 2011). Esses parâmetros vão determinar as condições operacionais do sistema, como altura de SN, velocidade de umedecimento do meio e tempo de permanência ou contato da SN com as plantas. Essas condições operacionais vão definir a disponibilidade de água no sistema radicular das culturas após cada aplicação, sendo afetadas pelo tipo de sistemas de adução e drenagem da SN da mesa de subirrigação.

Pesquisas desenvolvidas por Elliott *et al.* (2012) e Ferrarezi *et al.* (2017) determinaram a umidade ideal do substrato em função da altura da lâmina de água e do seu tempo de contato com o mesmo. Barreto *et al.* (2012) avaliaram o processo de ascensão de água em dois substratos comerciais com duas granulometrias, e constataram elevação da umidade nos substratos com o aumento do tempo de permanência da solução. Dumroese *et al.* (2007) indicaram que o tempo de drenagem deve ser de três a cinco vezes maior que o tempo de adução no manejo de irrigação de mesas de subirrigação. Teixeira *et al.* (2010) afirmaram que a subirrigação tem potencial para apresentar eficiência de irrigação elevada. Pesquisas anteriores determinaram a eficiência da subirrigação (Ribeiro *et al.*, 2014), simularam o tipo de equipamento mais adequado para aplicação da subirrigação, e desenvolveram um equipamento usando critérios de ergonomia e engenharia (Ribeiro, 2013). No entanto, a falta de informações técnicas sobre os parâmetros operacionais dos equipamentos disponíveis no mercado

e a inexistência de manejo hídrico e nutricional específico para cada cultura limita a utilização da tecnologia, dificultando o estabelecimento de estratégias de manejo.

O objetivo desse trabalho foi avaliar os parâmetros operacionais de uma mesa de subirrigação em condições teóricas e experimentais, com a determinação do tempo de permanência da água no interior do equipamento para diferentes valores de lâmina e de vazões de adução.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Mesa de subirrigação

A mesa de subirrigação foi desenvolvida na Faculdade de Engenharia Agrícola (Feagri) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). O equipamento possuía dimensões de  $5,32 \times 1,58 \times 0,06$  m (comprimento  $\times$  largura  $\times$  altura) e área de  $8,40$  m<sup>2</sup>. A mesa foi construída em poliestireno de alto impacto (PSAI), com canaletas de drenagem em geometria do tipo espinha de peixe com ângulos de  $45^\circ$  (Figura 1A). Todas as canaletas de drenagem convergiam para uma das extremidades da mesa, onde havia um rebaixo na estrutura para captação da água de drenagem.

### Módulo experimental

O módulo experimental foi instalado em uma estufa localizada em Campinas-SP, Brasil ( $22^\circ 48' 57''$ S,  $47^\circ 03' 33''$ O, altitude 640 m). Esse módulo possuía os seguintes componentes: mesa de subirrigação, reservatório de polietileno de 500 L para armazenamento da água (Tanque Fortplus; Fortlev, Serra-ES), válvula de três vias de  $\frac{3}{4}''$  (Midwest GROMaster, Maple Park, IL), conjunto motobomba de  $\frac{1}{2}$  HP (BC-98 CV; Schneider, Joinville-SC), sensor de nível e painel de controle com relé programável (Smart II; Metaltex, São Paulo-SP) (Ribeiro, 2013).

A drenagem de uma mesa de subirrigação pode ocorrer de forma simultânea (ao mesmo tempo em que a adução) ou não simultânea com a adução (com as duas operações ocorrendo separadamente). Nosso módulo experimental apre-

sentava sistema de adução e drenagem não simultânea (Ribeiro, 2013). Ensaios preliminares indicaram que esse sistema de operação apresenta vantagens comparativas, como menor volume de água ou SN utilizada, menor tempo de funcionamento da motobomba e menor vazão de adução em relação ao sistema de dreno aberto, possibilitando menor consumo de água e nutrientes e menor custo ao produtor (Ribeiro, 2013).

A mesa de subirrigação foi instalada sobre uma estrutura de alumínio com regulagem de altura para permitir o nivelamento da mesa. A subirrigação era controlada automaticamente por um sensor de nível conectado a um painel elétrico, que controlava a adução do reservatório para a mesa. Quando a lâmina de água atingia o nível desejado no interior da mesa, o sensor emitia um sinal elétrico para o painel, que desligava a motobomba automaticamente. A drenagem da água ocorria por gravidade imediatamente após o desligamento da motobomba (Figura 1B).

### Caracterização dos parâmetros operacionais da mesa de subirrigação

A primeira etapa desse estudo consistiu em realizar simulações do desempenho da mesa de subirrigação, estimando-se o tempo de adução e drenagem do sistema a partir dos equacionamentos teóricos de funcionamento. Posteriormente, os valores estimados desses parâmetros foram comparados com dados coletados experimentalmente.

#### Equacionamento das operações de adução e drenagem

O tempo de adução para que a SN atinja a altura da lâmina requerida no interior da mesa pode ser estimado pela relação do volume requerido de solução para atingir essa altura pela vazão de adução, sendo que o volume requerido pode ser calculado pela multiplicação da área da mesa pela altura da lâmina requerida (Equação 1)

$$T_a = \frac{V_a}{Q_a} = \frac{(Ar \times h) \times 1000}{Q_a} \quad [\text{Eq. 1}]$$

em que:

$T_a$  = Tempo de adução da SN na mesa para a lâmina requerida (min);  
 $V_a$  = Volume de SN necessário para

atingir a lâmina requerida ( $L$ );  $Q_a$  = Vazão de adução da mesa (L/min);  $A_r$  = Área da mesa de subirrigação (8,40 m<sup>2</sup>);  $h$  = Lâmina requerida de água ou SN na mesa (m).

Da mesma forma, o tempo requerido para drenar a lâmina presente na mesa no final de cada evento de irrigação pode ser determinado pela Equação 2.

$$T_d = \frac{(A_r \times h) \times 1000}{Q_d} \quad [\text{Eq. 2}]$$

em que:

$T_d$  = Tempo de drenagem da SN da mesa de subirrigação (min);  $Q_d$  = Vazão de drenagem da mesa (L/min).

Entretanto, como a altura da lâmina de água dentro da mesa decresce com o tempo, a vazão de drenagem varia a cada instante, podendo ser expresso pela Equação 3.

$$Q_d = C_d \times S \times \sqrt{2 \times g \times \frac{dh}{dt}} \times 60000$$

[Eq. 3]

em que:

$C_d$  = Coeficiente de descarga do orifício do dreno (adotado 0,88);  $S$  = Área da saída de dreno (área: 2,85.10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>; diâmetro do orifício: 19,05 mm);  $g$  = Aceleração gravitacional (9,81 m/s<sup>2</sup>);  $dh/dt$  = Variação temporal da altura da lâmina de água no interior da mesa (m/s).

O coeficiente de descarga ( $C_d$ ) foi calculado a partir dos valores dos coeficientes de contração ( $C_c$ ) e de velocidade ( $C_v$ ) do dreno. O coeficiente de contração é definido como a relação da área da seção contraída de um fluxo (jato) e a área da abertura através da qual o fluido escoou (Pordeus, 2013). Como a carga hidráulica variava até o valor 5 cm para o diâmetro do orifício de 1,9 cm nos ensaios experimentais, essas condições foram classificadas como de baixa carga hidráulica para um orifício de pequenas dimensões, permitindo adotar um valor de contração do fluxo de água na saída de 0,9.

O  $C_v$  é considerado como sendo a razão da velocidade média real na seção reta de um fluxo (jato) e a velocidade média ideal que ocorreria se não houvesse atrito, sendo adotado para essa condição valor igual a 0,98 (Silva, 2013).

Uma solução para a Equação 3

foi adaptada de acordo com Azevedo Neto (2015), para determinar o tempo de drenagem da mesa de subirrigação (Equação 4).

$$T_d = \left( \frac{2 \times A_r}{C_d \times S \times \sqrt{2 \times g}} \times (\sqrt{h + h_{dreno}} - \sqrt{h_{dreno}}) \right) \div 60$$

[Eq. 4]

em que:

$T_d$  = Tempo de drenagem da mesa de subirrigação (min);  $h_{dreno}$  = Profundidade do dreno a partir da lâmina zero (0,035 m).

Outro parâmetro que deve ser levado em consideração na definição do manejo em mesas de subirrigação é o tempo de permanência da SN no

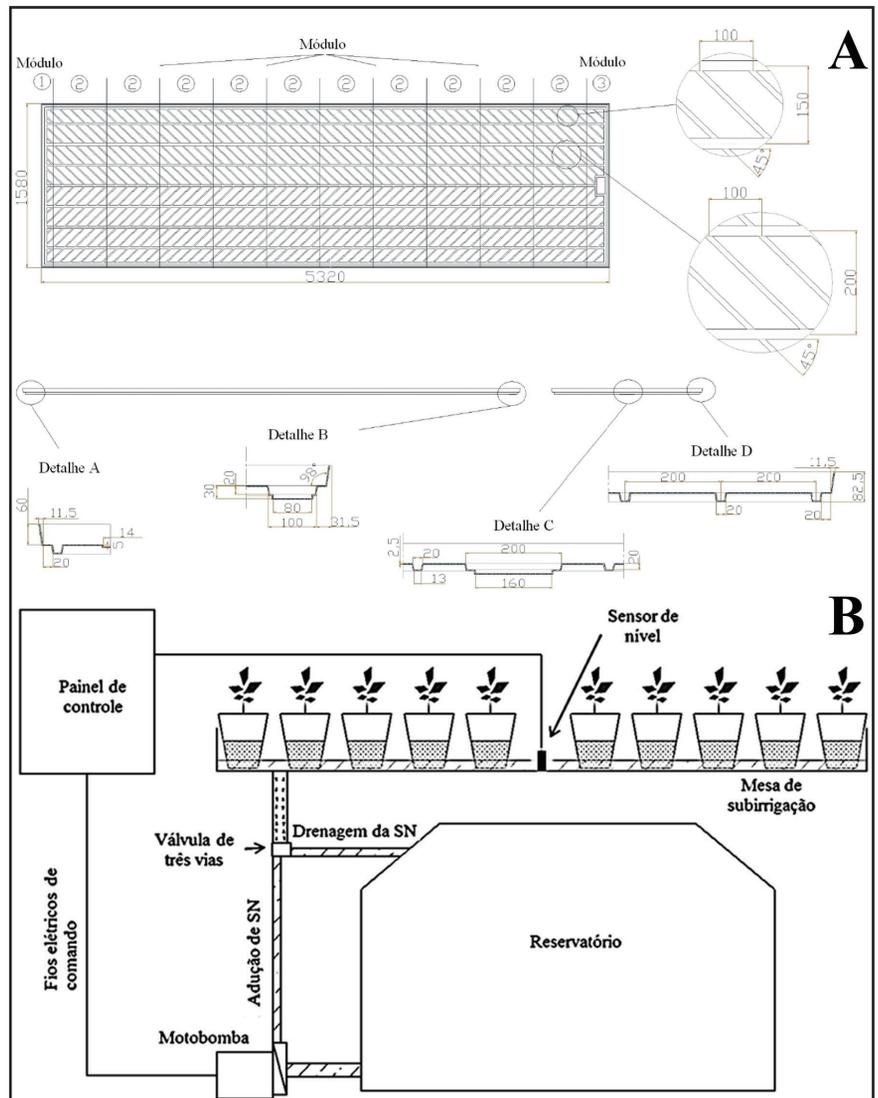
interior da mesa, que define o tempo de contato da solução com o substrato e as raízes das plantas, sendo estimado pela soma do tempo de adução e drenagem (Equação 5).

$$T_p = T_a + T_d \quad [\text{Eq. 5}]$$

em que:

$T_p$  = Tempo de permanência da SN no interior da mesa de subirrigação (min).

A partir das equações foram calculados os tempos teóricos de adução e de drenagem, volume utilizado e tempo de permanência para o sistema operacional, simulando-se valores de alturas de lâminas de 1, 3 e 5 cm, com as combi-



**Figura 1.** Representação da mesa de subirrigação (medidas em mm) (A) e do módulo experimental usado para validar os parâmetros operacionais para o manejo do sistema (B). SN = solução nutritiva {representation of the ebb-and-flow subirrigation bench parameters (dimensions in mm) (A) and the experimental setup used to validate the system (B). SN = fertilizer solution}. Campinas, FEAGRI/UNICAMP, 2013.

nações dos valores de vazão de adução de  $1,67 \cdot 10^{-4}$ ;  $3,33 \cdot 10^{-4}$  e  $5,00 \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s (correspondentes a 10, 20 e 30 L/min). O valor da vazão máxima foi definido pela capacidade máxima de bombeamento do conjunto motobomba utilizado, e a vazão mínima de 10 L/min foi definida como o valor limite para evitar o retorno de água para o reservatório pela válvula de três vias durante a adução.

#### Avaliação experimental das condições operacionais da mesa de subirrigação

Nessa segunda etapa foi realizada a avaliação experimental dos parâmetros de operação da mesa de subirrigação para validar a metodologia proposta anteriormente. A avaliação consistiu em medir o tempo para diferentes valores de lâmina armazenados no interior da mesa e para diferentes vazões de adução. Esses parâmetros foram avaliados para vazões pré-determinadas de 10, 20 e 30 L/min, obtidas pelo controle de um registro de gaveta, para as lâminas de 1, 3 e 5 cm. As medições foram repetidas três vezes para cada combinação experimental. O volume foi quantificado pelo uso de hidrômetros (Unimag-TU III; Tecnobrás, Americana-SP), e o tempo de adução monitorado por cronômetros (HS-10w; Cassio, São Paulo-SP).

Em cada ensaio para as condições de adução, o tempo e o volume drenados foram quantificados em intervalos de 1 min para cada combinação de altura (1, 3 e 5 cm) e vazão de adução (10, 20 e 30 L/min). O volume drenado foi quantificado pela leitura, de forma visual, em uma escala milimétrica instalada na parede do reservatório, calibrada para indicar o volume preenchido da caixa de água, em que cada milímetro na régua correspondia a 1,057 L. Com o valor do volume drenado da mesa e o respectivo valor de tempo, determinou-se o valor da vazão de drenagem para cada intervalo de tempo, ou seja, vazão unitária. A vazão média de drenagem foi determinada a partir do volume total drenado e do tempo total de drenagem. Foram realizados 27 ensaios experimentais para o procedimento de drenagem de cada altura em estudo (3 vazões  $\times$  3 alturas de lâmina  $\times$  3 repetições).

Em cada ensaio foram medidas as alturas da lâmina de água no interior

da mesa de subirrigação, a partir de régua graduada instalada no interior da mesa com espaçamentos regulares de  $0,40 \times 0,89$  m, totalizando 34 pontos de medida, permitindo o cálculo da altura média da água no interior da mesa.

Com a obtenção dos dados teóricos e experimentais dos parâmetros operacionais da mesa de subirrigação, realizou-se a comparação dos resultados verificando a validade das equações propostas para seu dimensionamento, projeto e manejo.

Foram realizadas regressões dos valores experimentais com os valores teóricos com intervalo de confiança de 95% com dados de tempo de permanência da água no interior da mesa.

#### Simulações dos parâmetros de manejo com recomendação de uso

Após a validação da metodologia, foi realizada a terceira etapa do trabalho, que consistiu na aplicação das equações matemáticas validadas nas simulações de parâmetros de manejo da mesa de subirrigação.

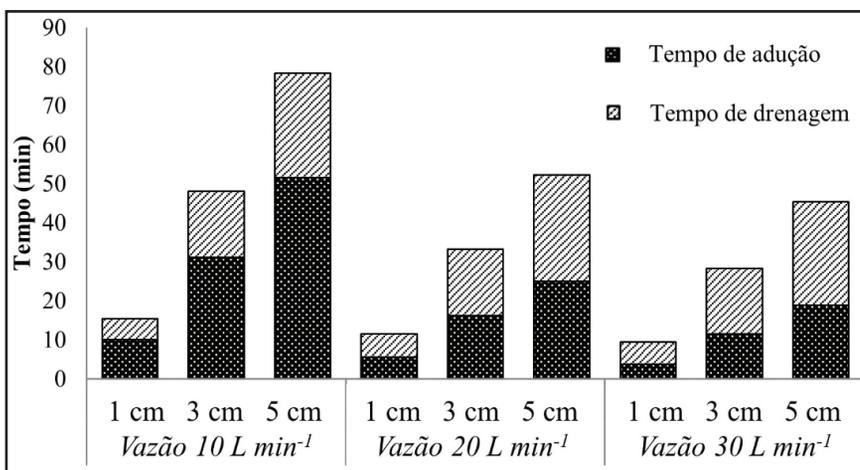
Foram calculados os valores do tempo de permanência no interior da mesa de subirrigação em função da altura de lâmina para as vazões de projeto para os seguintes diâmetros comerciais de drenos de  $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm),  $\frac{3}{4}$ " (19,0 mm), 1" (25,4 mm) e  $1\frac{1}{2}$ " (38,1 mm). A partir dos resultados dessas simulações, foi desenvolvida uma tabela operacional com combinações do diâmetro do orifício de

dreno com vazão de adução e drenagem e altura da lâmina, disponibilizando valores teóricos do tempo de permanência da água no interior da mesa para a definição adequada do manejo requerido em diferentes configurações de produção.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Validação da simulação dos parâmetros de operação da mesa de subirrigação

Os valores experimentais de vazão de adução foram estatisticamente iguais aos valores teóricos de 10 L/min (lâminas de 1 e 3 cm) e 20 L/min (lâminas de 1 e 5 cm) (Tabela 1,  $p > 0,05$ ). Todos os valores experimentais de vazão de adução ficaram abaixo dos valores teóricos de 30 L/min. Apesar do registro controlador operar totalmente aberto, a perda de carga gerada pelas tubulações e principalmente pela válvula de três vias gerou em média uma vazão de 27,04 L/min, inferior em 9,87% ao valor teórico de 30 L/min (Tabela 1,  $p < 0,05$ ). Os valores teóricos da vazão de drenagem foram menores que os experimentais para todas as alturas de lâminas ( $p < 0,05$ ), sendo que ocorreu uma variação média da vazão de drenagem de 12,6% em relação ao valor teórico na lâmina de 5 cm de 2,5 L/min (Tabela 1,  $p < 0,0002$ ).



**Figura 2.** Valores experimentais do tempo de permanência da água no interior da mesa de subirrigação em diferentes alturas de lâminas de irrigação (1, 3 e 5 cm) e vazão de adução (10, 20 e 30 L/min) usando diâmetro de orifício de 19,05 mm {experimental values of irrigation time inside the ebb-and-flow bench for different water depths (1, 3 and 5 cm) and flow rates (10, 20 and 30 L/min) using a 19.05-mm diameter orifice}. Campinas, FEAGRI/UNICAMP, 2013.

As médias dos volumes obtidos experimentalmente em suas respectivas alturas (103,7; 318,3; e 500,0 L), foram superiores aos teóricos (84, 252 e 420 L) em 23,5%, 26,3% e 19,1%, respectivamente para as alturas de 1, 3 e 5 cm (Tabela 1,  $p < 0,01$ ). Essa diferença ocorreu devido ao aparecimento de deformações causadas pelo peso da água no interior da mesa, o que consequentemente aumentou a sua capacidade volumétrica. Uma forma de evitar esse problema seria aumentar a resistência da estrutura de suporte da mesa. Pela mesma razão, observou-se que os valores das alturas das lâminas médias no meio da mesa foram maiores que os valores das alturas das lâminas de manejo propostos. Isso ocorreu porque a lâmina era controlada pelo sensor instalado na lateral da mesa, que não sofria deformações como em outros pontos no meio da mesa.

Foi observado que na condição limite de operação (vazão de 10 L/min e lâmina de 5 cm), a válvula de três vias retornava água bombeada para o reservatório. Esse retorno ocorria devido ao menor valor de velocidade de escoamento da tubulação nessa condição, quando comparada a vazões maiores, e também pela existência de uma carga hidráulica contra o fluxo de adução, fazendo com que a água retornasse ao reservatório no momento da adução.

O valor médio da vazão de drenagem experimental foi 15,1; 17,5 e 17,4 L/min, para as alturas de lâminas de 1, 3 e 5 cm, respectivamente (Tabela 1). Observa-se que o valor da altura de lâmina de 1 cm

apresentou a menor vazão de drenagem devido à menor carga hidráulica (altura da lâmina acima do dreno).

Os valores das lâminas coletadas para as alturas de 3 e 5 cm variaram em torno da média ao longo do processo e, próximo do final da drenagem, houve diminuição dos seus valores. Esse comportamento pode ter sido causado pela diminuição da carga hidráulica (altura da lâmina de água acima do orifício do dreno) e devido ao modelo de defletor de água na tubulação de adução e drenagem, cuja área de passagem de água era no sentido vertical, diminuindo a área de drenagem com a diminuição da lâmina de água no interior da mesa. Já no caso da lâmina de 1 cm, a queda nos valores de vazão de drenagem ocorreu rapidamente no início do processo, pois, além de ter menor carga hidráulica que as outras lâminas, o nível de água permaneceu em uma altura do defletor do dreno em que a área de passagem de água é menor.

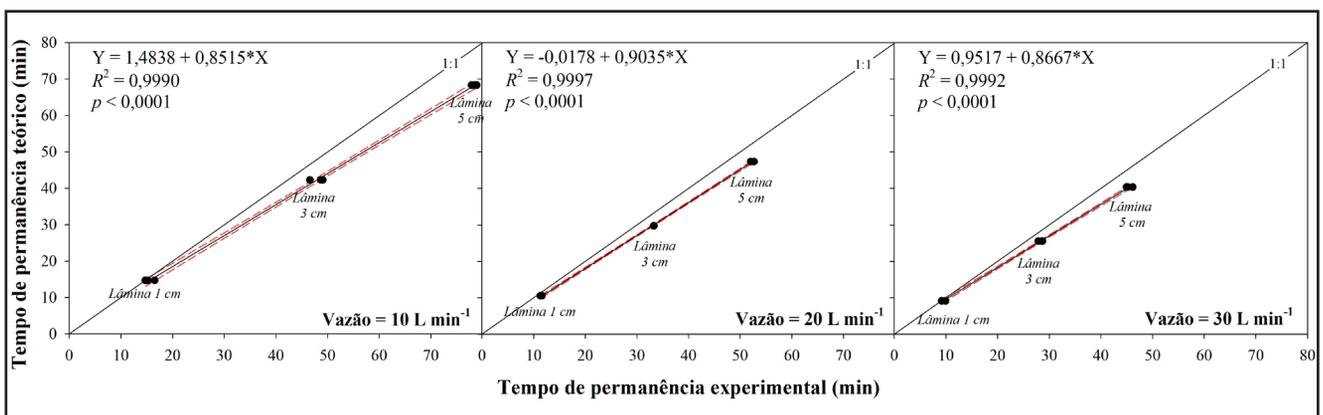
O tempo de adução para todas as combinações avaliadas foi maior que os valores teóricos (Tabela 2,  $p < 0,01$ ). Esse comportamento está diretamente associado ao volume de água aduzido na mesa, que era maior que o valor teórico devido às deformações da sua superfície, causando um maior tempo de adução de água na mesa.

O tempo de drenagem experimental foi igual aos valores teóricos nas lâminas de 3 cm para todas as vazões, e na lâmina de 1 cm para a vazão de 10 L/min (Tabela 2,  $p > 0,05$ ). Ainda, em relação ao

tempo de drenagem, a altura de lâmina de 1 cm diferenciou estatisticamente valores teóricos e experimentais nas vazões de 20 e 30 L/min ( $p < 0,0001$  e  $p = 0,0192$ , respectivamente). Os valores do tempo de drenagem experimental correspondentes à altura de lâmina de 5 cm foram superiores aos teóricos para todas as vazões de adução ( $p < 0,05$ ). Da mesma forma, esse comportamento pode ser explicado pelo maior volume de água na mesa em relação ao teórico, determinando um maior tempo de drenagem para as combinações que envolvem a lâmina de 5 cm (Tabela 2).

Na Figura 2 são apresentados os valores experimentais do tempo total de permanência de água no interior da mesa de subirrigação, calculados pela somatória do valor dos tempos de adução e drenagem. Esses valores indicam o tempo que a SN permanece em contato com o substrato e raízes das plantas, auxiliando na definição do manejo hídrico das culturas; porém, a altura da lâmina de água nesse tempo foi variável. Ferrarezi *et al.* (2017) testaram diferentes tempos e alturas de SN em um sistema de subirrigação usando três tipos de substratos, e verificaram que tanto a altura quanto o tempo da lâmina de água influenciam no conteúdo volumétrico de água dos substratos.

O maior tempo de permanência de água no interior da mesa ocorreu para a vazão de 10 L/min (Figura 2). O tempo de drenagem na mesa foi igual para as mesmas alturas de lâminas, assim as diferenças entre o tempo de permanência



**Figura 3.** Valores teóricos e experimentais do tempo de permanência da solução nutritiva no interior da mesa de subirrigação em diferentes alturas de lâminas de irrigação (1, 3 e 5 cm) e vazão de adução (10, 20 e 30 L/min) {ebb-and-flow subirrigation bench theoretical and experimental irrigation time values for different water depths (1, 3 and 5 cm) and flow rates (10, 20 and 30 L/min)}. Campinas, FEAGRI/UNICAMP, 2013.

da SN no seu interior são maiores com a redução da vazão de adução. Na altura de lâmina de 1 cm a redução do tempo de permanência foi de 25,7% e 39,2%, na lâmina de 3 cm a redução foi de 30,9% e 41,1% e na lâmina de 5 cm a redução foi de 33,4% e 42,1%, respectivamente para a vazão de 20 e 30 L/min em relação à vazão de 10 L/min.

As combinações de altura e vazão determinaram uma variação do tempo total de permanência de água na mesa de 9,5 a 78,4 min para a realização do manejo, a qual fornece flexibilidade de operação e permite realizar diferentes tipos de manejo hídrico e nutricional para diferentes culturas (Figura 2). Esses resultados estão em conformidade com Ribeiro *et al.* (2014), que avaliaram um sistema de subirrigação para mudas de eucalipto e verificaram que o manejo hídrico e nutricional empregava uma altura de lâmina média de 3,6 cm e um tempo de contato médio de 47 min. No entanto, é preciso enfatizar que cada cultura, sistema de produção, tipo de recipiente e substrato influencia no tipo de manejo (Schmal *et al.*, 2011). Assim, o sistema de adução, drenagem, vazão e altura da lâmina de água devem ser reguláveis, permitindo flexibilidade de operação.

A relação entre os valores teóricos e experimentais do tempo de permanência no interior da mesa foi linear (Figura 3,  $R^2 > 0,999$ ). Observa-se que os valores teóricos superestimam os valores experimentais, e essa diferença diminui com o aumento da vazão de adução. Isso ocorreu principalmente quando a mesa operava com altura de lâmina elevada, podendo ser explicadas pelo fato de que nas simulações não foram consideradas as deformações presentes na superfície da mesa, como esclarecidas anteriormente. As equações de ajuste obtidas foram: tempo teórico =  $1,4838 + 0,8515 * \text{tempo experimental}$  (vazão de 10 L/min); tempo teórico =  $-0,0178 + 0,9035 * \text{tempo experimental}$  (vazão de 20 L/min); e tempo teórico =  $0,9517 + 0,8667 * \text{tempo experimental}$  (vazão de 30 L/min) (Figura 3). Tais equações permitem estabelecer a relação entre os valores teóricos e experimentais, fornecendo resultados confiáveis para simular

a operação, manejo e dimensionamento da mesa de subirrigação.

### Simulações operacionais de manejo

Uma das opções de dimensionamento da mesa é a escolha do diâmetro de dreno empregado na mesa de subirrigação. A partir da definição do tempo de permanência de água no interior da mesa, é possível estimar o diâmetro de saída do dreno para atender a necessidade de manejo da cultura e avaliar se o tempo de contato da SN vai oferecer riscos de saturação prolongada do substrato, potencial para anoxia e contaminação por patógenos via água de irrigação (Fisher, 2011).

A partir dos valores disponíveis na

Tabela 3 é possível escolher o diâmetro do dreno que atenda às necessidades de manejo de altura da lâmina e tempo de permanência da SN no interior da mesa, ou, a partir de um determinado diâmetro de dreno, definir a vazão necessária para se atingir o tempo de permanência requerido pela mesa de subirrigação.

A simulação apresentada na Tabela 3 permite obter uma faixa de valores teóricos do tempo de permanência no interior da mesa entre 4,4 a 101,3 min, para quatro valores de diâmetros comerciais de drenos e três valores de vazão de adução. A partir da definição da vazão de projeto e da área do dreno da mesa de subirrigação, pode-se adequar a operação do sistema para diferentes tipos de cultura, pela determinação da

**Tabela 1.** Valores teóricos e experimentais de vazão de adução e de drenagem, altura da lâmina de água e volume aduzido avaliados na mesa de subirrigação {theoretical and experimental values of adduction and drainage flow rates, water depth and volume applied evaluated in the ebb-and-flow subirrigation bench}. Campinas, FEAGRI/UNICAMP, 2013.

Vazão de adução (L/min)			Vazão de drenagem (L/min)		
Teórica	Experimental	R <sup>2</sup>	Teórica	Experimental	R <sup>2</sup>
10	9,94 <sup>ns</sup>	0,5	13,38 a	14,61 b*	0,8283
10	10,40 <sup>ns</sup>	0,1741	14,81 a	17,47 b***	0,9979
10 a	9,73 b*	0,7391	16,04 a	17,13 b***	0,9986
20	19,73 <sup>ns</sup>	0,407	13,38 a	15,67 b*	0,8337
20 a	19,63 b***	0,9932	14,81 a	17,57 b***	0,9972
20	19,79 <sup>ns</sup>	0,2077	16,04 a	17,18 b**	0,9772
30 a	27,43 b***	0,9934	13,38 a	15,06 b**	0,9235
30 a	27,14 b***	0,9991	14,81 a	17,49 b***	0,9964
30 a	26,55 b**	0,8932	16,04 a	17,81 b***	0,9968
Altura da lâmina (m)			Volume aduzido (L)		
Teórica	Experimental	R <sup>2</sup>	Teórico	Experimental	R <sup>2</sup>
0,010	0,010 <sup>ns</sup>	0,013	84,06 a	99,30 b*	0,8778
0,030 a	0,035 b***	0,9998	252,17 a	322,90 b**	0,9778
0,050 a	0,057 b***	0,996	420,28 a	501,80 b***	0,9997
0,010 a	0,011 b*	0,75	84,06 a	108,70 b**	0,9491
0,030 a	0,035 b***	0,9983	252,17 a	319,00 b***	0,9999
0,050 a	0,057 b***	0,9982	420,28 a	496,20 b***	0,9845
0,010	0,010 <sup>ns</sup>	0,4571	84,06 a	103,20 b**	0,9269
0,030 a	0,035 b***	0,9923	252,17 a	313,00 b***	0,9908
0,050 a	0,056 b***	0,9992	420,28 a	502,20 b***	0,9919

ns = não significativo; p-valor >0,05; \*p-valor <0,05; \*\*p-valor <0,01; \*\*\*p-valor <0,0001. Médias seguidas de diferentes letras nas linhas diferem entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade {ns = not significant; p-value >0.05; \*p-value <0.05; \*\*p-value <0.01; \*\*\*p-value <0.0001; averages followed by different letters in the lines are significantly different at 5% probability by Tukey's test}.

**Tabela 2.** Valores teóricos e experimentais do tempo de adução e drenagem da mesa para diferentes valores de lâminas e vazões de adução avaliadas (theoretical and experimental values of adduction and drainage time of the ebb-and-flow for different values of water depth and flow rates evaluated). Campinas, FEAGRI/UNICAMP, 2013.

Q (L/min)	h (cm)	Tempo de adução (min)				Tempo de drenagem (min)			
		Teórico	Experimental*	p-valor	R <sup>2</sup>	Teórico	Experimental*	p-valor	R <sup>2</sup>
10	1	8,4 b	10,0 a	0,0040	0,8981	6,3	5,5	0,0503	0,6575
	3	25,2 b	31,1 a	0,0016	0,9354	17,0	17,0	0,6779	0,5354
	5	42,0 b	51,6 a	<0,0001	0,9942	26,2 a	26,8 b	0,0191	0,7830
20	1	4,2 b	5,5 a	0,0002	0,9755	6,3 a	6,0 b	<0,0001	1,0000
	3	12,6 b	16,3 a	<0,0001	0,9999	17,0	17,0	0,6779	0,5354
	5	21,0 b	25,1 a	<0,0001	0,9994	26,2 a	27,2 b	0,0044	0,8937
30	1	2,8 b	3,8 a	0,0004	0,9695	6,3 a	5,7 b	0,0191	0,7830
	3	8,4 b	11,5 a	<0,0001	0,9965	17,0	16,8	0,3739	0,2000
	5	14,0 b	18,9 a	0,0002	0,9773	26,2 a	26,5 b	<0,0001	1,0000

\*Média de três repetições. Médias seguidas de diferentes letras nas linhas diferem entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade (averages followed by different letters in the lines are significantly different at the 5% probability by Tukey's test).

**Tabela 3.** Valores simulados do tempo de permanência no interior da mesa em função da altura de lâmina requerida para os diâmetros comerciais de dreno de ½" (12,7 mm), ¾" (19,1 mm), 1" (25,4 mm) e 1½" (38,1 mm) e vazões de 10, 20 e 30 L/min {simulated values of irrigation time inside the bench in relation to the water depth required for commercial drain diameters of ½" (12.7 mm), ¾" (19.1 mm), 1" (25.4 mm) and 1½" (38.1 mm) and flow rates of 10, 20 and 30 L/min}. Campinas, FEAGRI/UNICAMP, 2013.

Vazão (L/min)	Altura (cm)	Diâmetros comerciais de dreno			
		½" (12,7 mm)	¾" (19,1 mm)	1" (25,4 mm)	1 ½" (38,1 mm)
Tempo de permanência (min)					
10	1	22,6	14,7	12,0	10,0
	2	43,7	28,7	23,5	19,8
	3	63,7	42,2	<b>34,8 *</b>	29,5
	4	82,9	55,4	45,9	39,1
	5	101,3	68,2	56,8	48,6
20	1	18,4	10,5	7,8	5,8
	2	<b>35,3 *</b>	20,3	15,1	11,4
	3	51,1	29,6	22,2	16,9
	4	66,1	38,6	29,1	22,3
	5	80,3	47,2	35,8	27,6
30	1	17,0	9,1	6,4	4,4
	2	32,5	17,5	12,3	8,6
	3	46,9	25,4	18,0	12,7
	4	60,4	<b>33,0 *</b>	23,5	16,7
	5	73,3	40,2	28,8	20,6

\*Se uma cultura exige que o tempo de contato das raízes com a solução nutritiva seja de 34,8 min na altura de 3 cm, o diâmetro do dreno a ser selecionado é de 1" (25,4 mm) para a vazão de 10 L/min, de ½" (12,7 mm) para 20 L/min ou de ¾" (19,1 mm) para 30 L/min (células em negrito) {if a crop requires an irrigation time of 34.8 min at a water depth of 3 cm, the recommended drain diameter should be 1" (25.4 mm) for the flow rate of 10 L/min, ½" (12.7 mm) for 20 L/min or ¾" (19.1 mm) for 30 L/min (cells in bold)}.

altura e tempo de permanência da SN no interior da mesa. Pode-se exemplificar a utilização da Tabela 3 com a seguinte situação: se uma cultura exige que o tempo de contato das raízes com a SN seja de 34,8 min na altura de 3 cm, o diâmetro do dreno selecionado deveria ser de 1" (25,4 mm) para a vazão de 10 L/min, de ½" (12,7 mm) para 20 L/min ou de ¾" (19,1 mm) para 30 L/min (Tabela 3, células em negrito).

Conclui-se que o equacionamento proposto para simular o desempenho operacional da mesa de subirrigação para os parâmetros de altura de lâmina e tempo de permanência de água mostrou-se adequado para auxiliar em projetos, operação e manejo da subirrigação. Os resultados das simulações forneceram a relação entre a vazão de adução, altura da lâmina, diâmetro do orifício de adução e drenagem, possibilitando a fixação do tempo de permanência de água no interior da mesa de subirrigação, e fornecendo configurações de operação para o manejo de diferentes condições de cultivo no modelo de mesa de subirrigação avaliado. O tempo de permanência de água no interior da mesa é inversamente proporcional à vazão de adução e à vazão de drenagem. Entretanto, recomenda-se que esse tempo não seja excessivo de forma a gerar um ambiente fitossanitário desfavorável à cultura.

## REFERÊNCIAS

- ANDRIOLO, JL; BOEMO, MP; BONINI, JV. 2001. Crescimento e desenvolvimento de mudas de tomateiro e melão empregando os métodos de irrigação por microaspersão, inundação subsuperficial e flutuação. *Horticultura Brasileira* 19: 200-203.
- AZEVEDO NETTO, JM. 2015. *Manual de Hidráulica*. 9.ed. São Paulo: Ed. Blucher. 632p.
- BARRETO, CVG; FERRAREZI, RS; ARRUDA, FB; TESTEZLAF, R. 2015. Growth and physiological responses of Rangpur lime seedlings irrigated by a prototype subirrigation tray. *HortScience* 50: 1-7.
- BARRETO, CVG; TESTEZLAF, R; SALVADOR, CA. 2012. Ascensão capilar de água em substratos de coco e pinus. *Bragantia* 71: 385-393.
- BEYTES, C. 2009. Greenhouses Upgrades Part I: A Transplanter! No, Booms! No, a Seeder. *Revista Grower Talks*. Disponível em: <<http://www.ballpublishing.com/GrowerTalks/ViewArticle.aspx?articleid=16909>>. Acessado em 19 de junho de 2011.
- COX, AD. 2014. Subirrigation for greenhouse crops. University of Massachusetts, Amherst. Disponível em <<http://ag.umass.edu/greenhouse-floriculture/fact-sheets/subirrigation-for-greenhouse-crops>>. Acessado em 29 de maio de 2014.
- DUMROESE, RK; JACOBS, DF; DAVIS, AS; PINTO, JR; LANDIS, TD. 2007. An introduction to subirrigation in forest and conservation nurseries and some preliminary results of demonstrations. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-50.
- DUMROESE, RK; PINTO, JR; JACOBS, DF; DAVIS, AS; HORIUCHI, B. 2006. Subirrigation reduces water use, nitrogen loss, and moss growth in a container nursery. *Native Plants Journal* 7: 253-261.
- ELLIOTT, G; MCAVOY, R; GENT, M. 2012. Subirrigation: Watering from the ground up. *Greenhouse Grower*. Disponível em <<http://www.greenhousegrower.com/article/26828/subirrigation-watering-from-the-ground-up>> Acessado em 16 de setembro de 2013.
- FERRAREZI, RS; FERREIRA FILHO, AC; TESTEZLAF, R. 2017. A retenção de umidade em substratos em subirrigação é influenciada pela altura de lâmina e tempo de permanência de água. *Horticultura Brasileira* 35: 186-194.
- FERRAREZI, RS; TESTEZLAF, R. 2017a. Automated ebb-and-flow subirrigation for citrus liners production. I. Plant growth. *Agricultural Water Management* 192: 45-57.
- FERRAREZI, RS; TESTEZLAF, R. 2017b. Automated ebb-and-flow subirrigation for citrus liners production. II. Pests, diseases and nutrient concentration. *Agricultural Water Management* 192: 21-32.
- FERRAREZI, RS; VAN IERSEL, MW; TESTEZLAF, R. 2014. Subirrigation automated by capacitance sensors for salvia production. *Horticultura Brasileira* 32: 314-320.
- FERRAREZI, RS; WEAVER, GM; IERSEL, MV; TESTEZLAF, R. 2015. Subirrigation: Historical overview, challenges, and future prospects. *HortTechnology* 25: 262-276.
- FISHER R. 2011. Troubled Waters? *Revista Grower Talks*. Disponível em: <<http://www.ballpublishing.com/GrowerTalks/ViewArticle.aspx?articleID=14336&highlight=ebb+and+flow>>. Acessado em 17 junho de 2011.
- LIBARDI, PL. 2005. *Dinâmica da água no solo*. São Paulo: Editora da USP, 335p.
- MONTESANO, F; PARENTE, A; SANTAMARIA, P. 2010. Closed cycle subirrigation with low concentration nutrient solution can be used for soilless tomato production in saline conditions. *Scientia Horticulturae* 124: 338-344.
- RIBEIRO, MD; FERRAREZI, RS; TESTEZLAF, R. 2014. Assessment of subirrigation performance in eucalyptus seedling production. *HortTechnology* 24: 231-237.
- RIBEIRO, MD. 2013. *Projeto de uma mesa de subirrigação para ambientes protegidos*. Campinas: UNICAMP. 105p. (Dissertação mestrado).
- SCHMAL, JL; DUMROESE, RK; DAVIS, AS; PINTO, JR; JACOBS, DF. 2011. Subirrigation for production of native plants in nurseries: concepts, current knowledge, and implementation. *Native Plants Journal* 12: 81-93.
- TEIXEIRA, PTL; SCHAFFER, G; SOUZA, PVD; TODESCHINI, A. 2010. Desenvolvimento vegetativo e acúmulo de massa seca com a adubação de porta-enxertos cítricos cultivados em tubetes. *Ciência Rural* 40: 2603-2607.
- SILVA, GQ. 2013. Hidráulica II: Estudo dos orifícios e bocais. *Escola de Minas/UFOP*, Departamento de Engenharia civil. Disponível em <[http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~gilbertoqueiroz/CIV225-%20Aula2\\_Orif%C3%87%C3%83O.pdf](http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~gilbertoqueiroz/CIV225-%20Aula2_Orif%C3%87%C3%83O.pdf)> Acessado em 11/07/2013.
- PORDEUS, RV. 2013. Jato livre. Notas de aula (Fenômenos de Transporte - Mecânica dos Fluidos – Medição de Vazão) Departamento de Ciências Ambientais. Ufersa, Mossoró, RN. Disponível em <<http://www2.ufersa.edu.br/porta/view/uploads/setores/111/CAP.%20IV%20MEDI%C3%87%C3%83O%20DE%20VAZ%C3%83O.pdf>> Acessado em 11 de julho de 2013.