

LISÍMETROS DE PESAGEM DE PRECISÃO PARA MEDIDAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM MUDAS PRÉ-BROTADAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

**LUÍS GUILHERME POLIZEL LIBARDI¹, ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA²,
ALEXANDRE BARCELLOS DALRI³**

¹ Engenheiro Agrônomo, Mestrando em Agronomia (Produção Vegetal), Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal - SP, Fone: (19) 99748-0277, lgplibardi@gmail.com.

² Engenheiro Agrônomo, Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Rural, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, (16) 3209-2637, rogeriofaria@fcav.unesp.br.

³ Engenheiro Agrícola, Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Rural, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, (16) 3209-7539, dalri@fcav.unesp.br.

Apresentado no
XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2017
30 de julho a 03 de agosto de 2017 - Maceió - AL, Brasil

RESUMO: A produção de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar é um método alternativo para o aumento de taxas de multiplicação da cultura. A reposição da necessidade hídrica da cultura é extremamente relevante e depende da evapotranspiração de cultura (ETc), que pode ser medida com acurácia por lisimetria de pesagem. Foram construídos e calibrados três lisímetros de pesagem com área evaporativa de 0,6909 m² (1179 mm x 586 mm), profundidade de 400 mm e apoiados sobre 3 células de carga com finalidade de mensurar lâminas de irrigação (LI) e ETc. A calibração dos lisímetros demonstrou linearidade ($R^2 > 0,9999$) entre sinal elétrico (mV) e massa equivalente (mm), com histerese mínima. Os valores de erro médio absoluto entre 0,0272 e 0,0382 mm, erro quadrático médio entre 0,0011 e 0,0024 mm² e índice de concordância de Willmott (d) igual à unidade indicam excelente precisão e acurácia nas medições dos equipamentos. Em teste com duração de dois dias com MPB da cultivar SP 80-1816, com 32 dias de ciclo, os valores diários de ETc e LI entre os lisímetros apresentaram variação máxima de 0,27 mm e de 0,42 mm, respectivamente. Portanto, o presente estudo permite afirmar que os lisímetros construídos são adequados nas estimativas de ETc de MPB para manejo de LI em cultivo protegido.

PALAVRAS-CHAVE: balanço hídrico, irrigação, necessidade hídrica

HIGH PRECISION WEIGHING LYSIMETERS FOR EVAPOTRANSPIRATION MEASUREMENTS OF SUGARCANE SEEDLINGS

ABSTRACT: The sugarcane seedlings production system (MPB) is an alternative method to enhance the crop multiplication rates. Crop water requirement supply is crucial and depends on crop evapotranspiration (ETc), which can be accurately measured by weighing lysimeter. Three lysimeters with 0.6909 m² (1179 mm x 586 mm) and 400 mm depth supported by 3 load cells were built and calibrated aiming to evaluate irrigation depth (ID) and crop evapotranspiration (ETc). The lysimeter calibration showed high linearity ($R^2 > 0.9999$) between electric signal (mV) and equivalent mass (mm), with minimum hysteresis. Mean absolute error varying from 0.0272 to 0.0382 mm, mean square error from 0.0011 to 0.0024 mm² and Willmott agreement index (d) equal to unit indicate excellent precision and accuracy measurement by the lysimeters. During two-day test using a 32 day-old MPB from SP 80-1816 cultivar, daily ETc and ID values presented maximum variations of 0.27 mm and 0.42 mm, respectively. Therefore, the results demonstrate that the lysimeters built in this study are suitable for evaluating MPB evapotranspiration and irrigation management in greenhouse applications.

KEYWORDS: irrigation, water balance, water requirement

INTRODUÇÃO

Apesar de sucessivos avanços no plantio mecanizado de cana-de-açúcar, o sistema tradicional de plantio apresenta consumo expressivo de colmos para a formação do canavial (1 hectare colhido para 4 hectares plantados). O sistema de produção MPB é mais eficiente para o plantio de cana-de-açúcar, pois há redução no consumo de colmos (1 hectare colhido para 37 hectares plantados). A produção de MPB consiste na formação de plântulas da cultura oriundas de gemas contidas nos entrenós dos colmos, plantados em tubetes contendo substrato e conduzidas em cultivo protegido, no qual a correta programação da irrigação é de grande importância. A irrigação deficitária geralmente causa perdas e menor qualidade na produção, enquanto que a irrigação excessiva aumenta a suscetibilidade da cultura a doenças, o custo de energia por bombeamento, o desperdício de água e a poluição ambiental devido à lixiviação de nutrientes (PARDOSSI & INCROCCI, 2011).

A reposição da quantidade de água consumida por uma cultura é fundamental para o sucesso da agricultura irrigada e sua determinação depende de inúmeras variáveis. O método FAO 56 (ALLEN et al., 1998) é considerado o mais adequado para determinação das exigências hídricas de cultivos. Nesse método, calcula-se a evapotranspiração da cultura (ETc) em função do produto entre o coeficiente de cultivo (Kc), determinado experimentalmente, e a evapotranspiração de referência (ETo), calculada com dados meteorológicos medidos no local. Na literatura não há informações sobre Kc de MPB sob cultivo protegido para se calcular a demanda de irrigação dessa cultura, diferentemente de outras espécies tradicionalmente cultivadas nesse ambiente.

Lisímetros de pesagem são considerados ferramenta-padrão em estudos de consumo hídrico de culturas (MARIANO et al., 2015). Esses equipamentos são pequenas parcelas representativas de uma grande área, construídos para medir componentes do balanço hídrico de uma superfície vegetada ou com solo nu, incluindo ETc, drenagem, escoamento superficial, precipitação e lâmina de irrigação. Com as medidas lisimétricas pode-se determinar experimentalmente o Kc pela razão entre ETc e ETo calculada ao longo do ciclo da cultura.

Neste contexto, o presente trabalho foi conduzido com os objetivos de expor detalhes da construção e calibração de três lisímetros de pesagem, assim como avaliar suas capacidades de medir ETc e lâmina de irrigação em condições específicas para produção de MPB em cultivo protegido.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de estudo

O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar da Usina São Martinho (São Martinho S/A), localizada na latitude 21°19'23'' Sul e longitude 48°06'47'' Oeste e 528 m de altitude, no município de Pradópolis, SP. De acordo com Köppen, o clima é classificado com subtropical úmido, Aw, com inverno seco e ameno e verão quente e chuvoso. A casa de vegetação do estudo é composta por 8 arcos de 7 m de largura com 24 vãos de 4,5 m de comprimento, totalizando a dimensão de 6048 m² (56 m de largura e 108 m de comprimento). O plástico instalado na cobertura da casa de vegetação é um filme difusor antivírus Ginegar Polysack, com espessura de 150 microns e tratamento contra raios ultravioletas com filtro de 15 % da radiação solar, enquanto que as frontais e laterais são constituídas de tela branca antiafideio com espessura de 150 microns e tratamento contra raios ultravioletas com filtro de 30 %.

O tipo de irrigação utilizado no estudo foi aspersão aplicada por barra irrigadora com largura total de 14 m, composta por 33 bicos (XR TEEJET 11001VS, TeeJet, Springfield, Illinois, USA) espaçados em 430 mm. A regulagem da lâmina de água aplicada é ajustada pela velocidade da barra, na qual a vazão é fixa em 2,6 L min⁻¹ bico⁻¹ e a velocidade é limitada em 8 m min⁻¹, o que possibilita aplicação de lâminas superiores a 0,67 mm a cada passada (FIGURA 1).

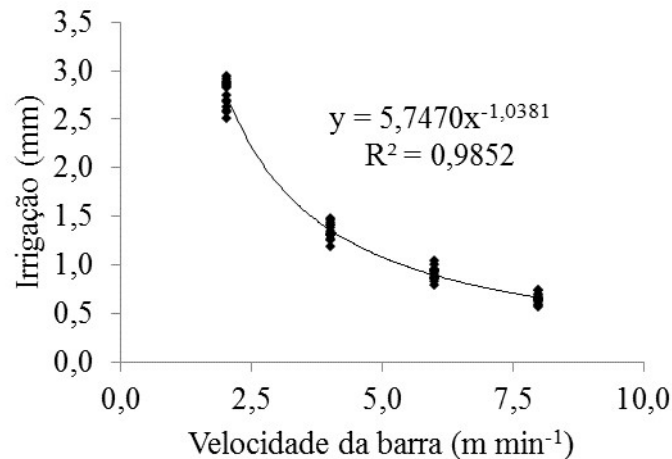


FIGURA 1. Irrigação (mm) em função da velocidade da barra de irrigação. **Irrigation (mm) as function of speed of irrigation bar.**

Confecção e instalação dos equipamentos

Foram instalados três lisímetros de pesagem (Lisímetro 1, Lisímetro 2 e Lisímetro 3) na casa de vegetação do estudo, cada qual confeccionado para suportar um conjunto de três bandejas compostas por 54 tubetes de 180 ml com MPBs, totalizando 162 plantas por lisímetro. A variação de massa de cada conjunto foi medida para inferência sobre as entradas (LI) e saídas (ET e D) de água do sistema.

Cada lisímetro foi confeccionado em formato de tanque retangular com dimensões de 1179 mm de comprimento, 586 mm de largura (0,6909 m²) e 400 mm de altura, fabricado em chapas de aço-carbono de 1,58 mm de espessura, soldadas e pintadas com tinta epóxi cinza para impedir a oxidação dos materiais. Com o intuito de facilitar a drenagem dos tanques, a chapa de fundo foi dobrada no sentido diagonal entre os quatro vértices, formando um sistema de escoamento em quatro águas, o qual direciona a água para uma saída no centro, constituída de tubo e registro manual, também de aço-carbono. Nesses tanques, foi construído um suporte para caixa de junção de células de carga na lateral de maior dimensão (1179 mm), o qual também foi confeccionado em aço-carbono de 12,7 mm, porém com dimensões de 200 mm de comprimento e 150 mm de largura. Nessa lateral, foi instalado um indicador de nível de líquidos com o objetivo de visualização do nível de armazenamento de água para tomada de decisão de drenagem do tanque. Sob cada tanque foram adaptadas três hastes roscáveis retráteis responsáveis pela sustentação em tripé do tanque dos lisímetros. As hastes dos tanques foram rosqueadas nas células de carga por meio de suportes fixados na face superior da célula. Da mesma forma, as células de carga foram fixadas por suportes soldados em base retangular de apoio de dimensões de 600 mm de comprimento, 400 mm de largura e 12,7 mm de espessura, assentada no solo por meio de quatro hastes pontiagudas de 150 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro, localizadas nas 4 extremidades da parte inferior para penetração e fixação dos lisímetros no solo. Os esquemas e custos dos lisímetros confeccionados são observados na FIGURA 2 e TABELA 1, respectivamente.

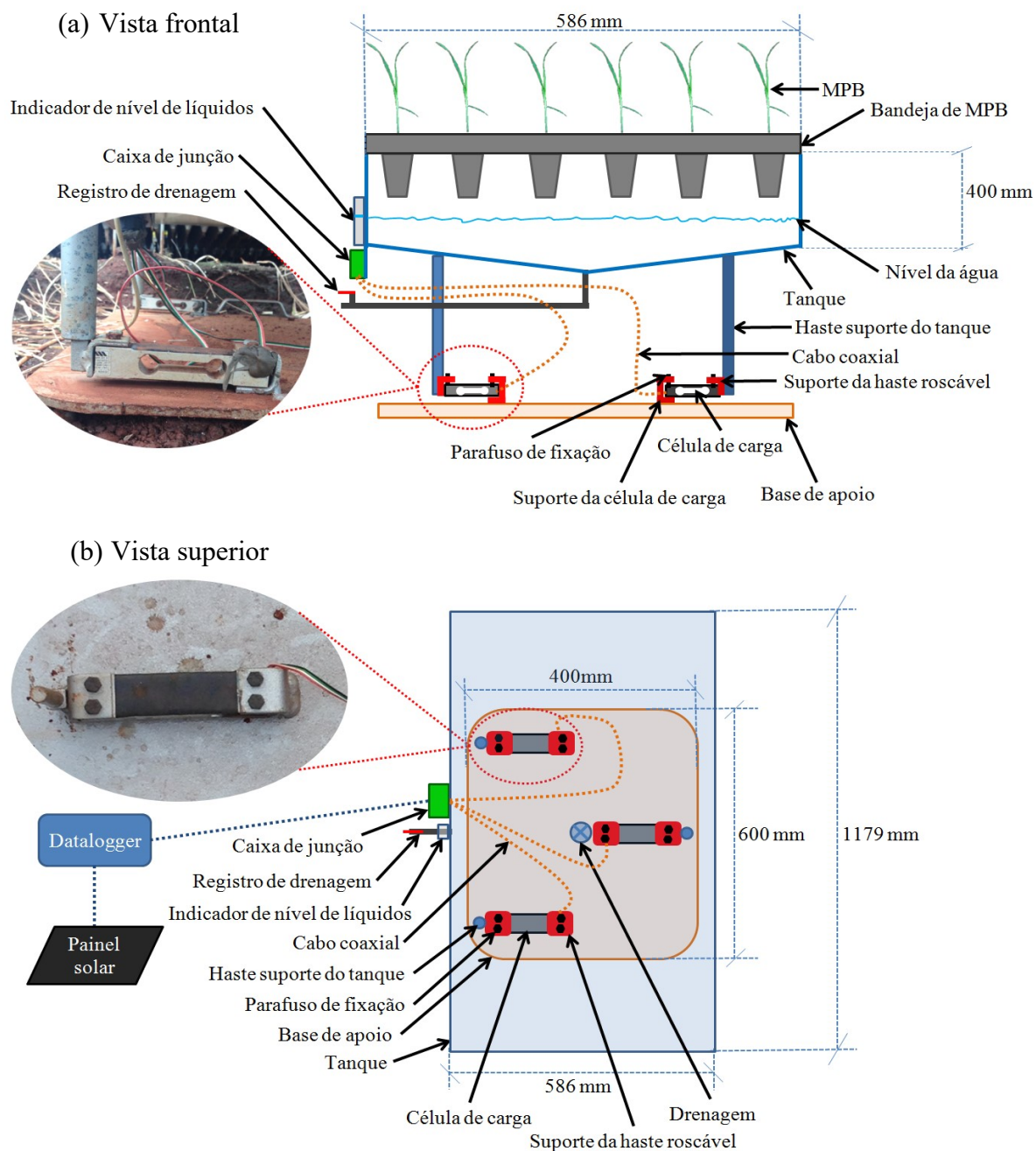


FIGURA 2. Esquema frontal (a) e superior (b) dos lisímetros. **Frontal (a) and top view (b) sketch of lysimeters.**

TABELA 1. Custos de materiais utilizados na confecção de um lisímetro do estudo. **Costs of the material used in the manufacture of a lysimeter study.**

Material	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
Mão de obra	1	204,6	204,6
Estrutura de aço-carbono	1	165,0	165,0
Registro de esfera aço-carbono 1/2"	1	21,0	21,0
Indicador de nível de líquidos	1	32,0	32,0
Célula de carga (GL-30)	3	266,2	798,6
Caixa de junção (413 A)	1	464,6	464,6
Total	-	-	1685,8

Iniciou-se a instalação com a demarcação do local dos lisímetros na casa de vegetação, seguida do nivelamento do solo e assentamento de base de apoio, fixação de células de carga nos suportes, posicionamento dos tanques sobre os suportes fixados na face superior das células de carga, ajustamento de hastes retráteis para nivelamento dos tanques e instalação de caixas de junção nos suportes. Ajustes de posicionamento foram feitos para garantir a livre flutuação dos tanques sobre as células de carga sem que houvesse interferência por apoio indevido de estruturas externas nos lisímetros. Em seguida, foi instalado o sistema de aquisição de dados, composto de datalogger, multiplexador e painel de carregamento solar de bateria com auxílio de suportes pré-fabricados e fixados em postes de sustentação da estrutura da casa de vegetação. Após a instalação estrutural, foi realizada a conexão de cabos entre células de carga, caixas de junção, datalogger, multiplexador, bateria e painel solar.

As células de carga utilizadas (GL-30 Alfa Instrumentos Eletrônicos Ltda., São Paulo, SP, Brasil) são fabricadas em alumínio com capacidade nominal de 30 kg, sensibilidade de $2,0000 \pm 10\% \text{ mV V}^{-1}$ e acuracidade de 0,03 % do fundo de escala segundo o fabricante. Os sinais elétricos emitidos pelas três células de carga de cada lisímetro foram conduzidos à caixa de junção (4134 A, Alfa Instrumentos Eletrônicos Ltda., São Paulo, SP, Brasil), fabricada em aço inox, que comporta conexão de até quatro células de cargas. Da caixa de junção o sinal elétrico conjugado foi enviado ao sistema de aquisição de dados, programado para realizar leituras de sinal elétrico gerado pelas células de carga a cada segundo e armazenar a média dos dados a cada 20 minutos. Esse sistema foi composto por multiplexador de canais diferenciais (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) e datalogger (CR10, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA). A alimentação elétrica do sistema foi realizada com bateria de tensão 12 V e corrente 7 A acoplada a um painel gerador de energia solar (SP20R-PW, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA). A transferência dos dados armazenados foi realizada diretamente para microcomputador ou indiretamente para módulo de memória que posteriormente teve os dados transferidos em microcomputador por meio de software (PC200W, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) específico para essa finalidade.

Foi instalada uma estação meteorológica com sensores para registro de temperatura e umidade relativa do ar no dossel (HC2S3-L, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) protegido com escudo de radiação de 12 placas, temperatura e umidade relativa do ar a 2 metros do solo (HC2SC3-L, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) protegido com escudo de radiação 12 placas, radiação solar global (CS300-L, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA), saldo de radiação solar (NR-LITE2, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) e de velocidade do vento a 2 metros do solo (A100LK, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA). O sistema de aquisição de dados dessa estação meteorológica foi configurado para realizar leituras a cada segundo e armazenar a média dos dados a cada 10 minutos por meio de datalogger (CR10X, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA), multiplexador de canais diferenciais (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) e bateria de tensão 12 V e corrente 7 A carregada por painel solar (SX10M, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA).

Calibração dos lisímetros

Após a instalação, a calibração dos três lisímetros foi realizada em 25 de setembro de 2016 e teve duração de 3 horas e 20 minutos (07:00 h às 10:20 h). Durante a calibração, a temperatura do ar no dossel oscilou de 15,4 °C a 28,4 °C, a umidade relativa do ar de 87,9 % a 54,3 % e a velocidade do vento a 2 m de 0,0 a 2,9 km h⁻¹.

A metodologia utilizada no processo de calibração dos lisímetros consistiu na correlação entre sinal elétrico (SE), emitido pelas células de carga, e massa do sistema, com o intuito de estabelecer a linearidade e histerese dessas medidas (FARIA et al., 2006). Iniciou-

se a calibração colocando-se massa de 26,4 kg nos tanques, equivalente à massa das três bandejas com mudas, com a finalidade de representar o peso morto em cada lisímetro. Em seguida, realizou-se a calibração procedendo-se à carga e descarga dos lisímetros, por meio de introdução e remoção de massa a cada 30 segundos. Durante esse intervalo de tempo foram realizadas duas leituras de sinal elétrico (mV), geradas pelas células de carga, a cada 10 segundos, iniciando as leituras após os primeiros 10 segundos para estabilização de leitura. Nesse processo, foram utilizados sacos plásticos herméticos contendo massas de areia aferidas em balança digital de precisão de 0,01 g e secas em estufa de circulação forçada de ar a 60 °C, durante 48 h anteriores à data da calibração. Os sacos plásticos totalizaram 40 unidades, dos quais 30 continham massa de 664,68 g (saco S1), equivalente a 0,962 mm, e 10 unidades possuíam massa de 66,47 g (saco S2), equivalente a 0,0962 mm. A massa equivalente em mm foi obtida pela relação entre a massa de areia pela área do lisímetro (1,179 m x 0,586 m, 0,6909 m²). Após medir a voltagem do lisímetro com massa equivalente ao peso morto (equivalente em mm igual a zero), foram adicionados em sequência sobre a superfície do lisímetro, três sacos S1, proporcionando massa equivalente a 14,4349 mm, três sacos S2, equivalente a 14,7195 mm, um saco S2, equivalente a 15,1043 mm, três sacos S2, equivalente a 15,3930 mm, e três sacos S1, equivalente a 29,8238 mm. Por fim, em sequência inversa, o mesmo procedimento foi realizado para a descarga dos lisímetros.

Teste dos lisímetros

Após a calibração, foi realizado teste de verificação da variação de massa nos lisímetros (M) para cálculo de ET_c, por meio da Equação 1.

$$ETc_i = M_{i+1} - M_i + \sum_{i=1}^n L_i - \sum_{i=1}^n D_i \quad (1)$$

em que,

- ET_{c_i} - evapotranspiração de cultura no lisímetro no dia “i”, mm;
- M_{i+1} - massa equivalente à 0h no dia subsequente ao dia “i”, mm;
- M_i - massa equivalente à 0h no dia “i”, mm;
- L_i - lâminas de irrigação em um determinado dia “i”, mm, e
- D_i - drenagem no dia “i”, mm.

Foram utilizadas bandejas com MPBs da cultivar SP 80-1816 com idade de 32 dias após o plantio (DAP), previamente selecionadas e produzidas de acordo com metodologia padrão do viveiro onde foi instalado o estudo. Essa metodologia é fundamentada nas etapas de corte e seleção de minirrebolos, plantio de minirrebolos em tubetes de 180 ml contendo bagaço de cana previamente envelhecido, cobertura dos minirrebolos com vermiculita e brotação dos minirrebolos em casa de vegetação climatizada (7 dias de permanência em temperatura de 30 °C e umidade relativa do ar de 90 %). Três bandejas, contendo as mudas caracterizadas, foram alocadas em cada lisímetro no dia 30 de setembro de 2016. Durante os dias 01 e 02 de outubro de 2016 foram avaliados os resultados de variação de ME nos lisímetros do estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A calibração dos respectivos lisímetros revelou elevada correlação ($R^2 > 0,9999$) entre ME (mm) e SE (mV) (FIGURA 3). A análise dos resultados demonstra elevada homogeneidade nas características de pesagem entre lisímetros, visto que a calibração revelou valores de coeficiente angular (a) das regressões lineares de cada lisímetro entre 72,0868 mm mV⁻¹ e 73,1104 mm mV⁻¹, ou seja, variação de 1,0236 mm mV⁻¹. Do mesmo modo, a variação encontrada desse coeficiente entre carga e descarga foi de 0,0443 mm mV⁻¹ para o lisímetro 1, 0,0868 mm mV⁻¹ para o lisímetro 2 e 0,4109 mm mV⁻¹ para o lisímetro 3. Para os valores de

coeficiente da regressão linear (b) houve oscilação de $-66,5319 \text{ mm mV}^{-1}$ à $-67,8924 \text{ mm mV}^{-1}$, ou seja, variação de $1,3605 \text{ mm mV}^{-1}$. Ambos os coeficientes apresentaram variações extremamente inferiores às encontradas por MARIANO et al. (2015). Quanto ao EAM relativo à calibração dos lisímetros, houve oscilação de $0,0272 \text{ mm}$ a $0,0382 \text{ mm}$, resultado também inferior aos encontrados por Mariano et al. (2015), HOWELL et al. (1995), ALLEN & FISCHER (1991) e FARIA et al. (2006) e semelhante ao de CAMPECHE (2002). Quanto ao EQM houve variação de $0,0011 \text{ mm}^2$ a $0,0024 \text{ mm}^2$. Nesse aspecto, é possível concluir que os lisímetros são de altíssima precisão e de que não há histerese significativa nas avaliações de ME nos três lisímetros do estudo. Além disso, os equipamentos apresentam elevada acurácia na medição de massa equivalente, visto que a análise do índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT et al., 1985) gerou valores de 1,0000 para os três lisímetros (TABELA 2), resultado semelhante ao observado por MARIANO et al. (2015). Portanto, os equipamentos são adequados às avaliações de ET de MPB com acurácia em torno de $0,1 \text{ mm}$, a qual é tolerável às aplicações em cultivo protegido.

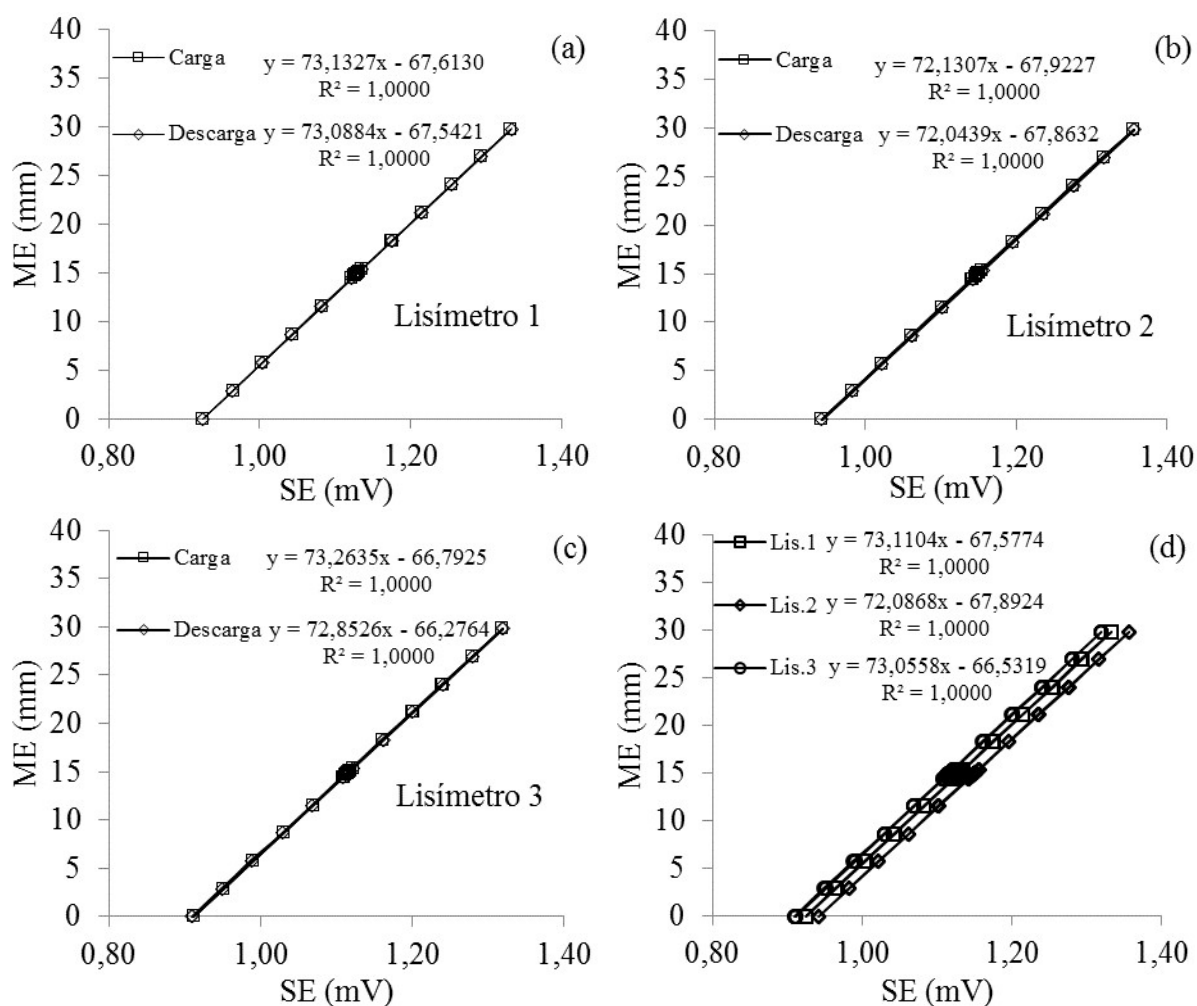


FIGURA 3. Relação entre massa equivalente (ME) e sinal elétrico (SE) para carga e descarga do (a) lisímetro 1 (a), lisímetro 2 (b), lisímetro 3 (c) e para valores conjuntos de carga e descarga nos três diferentes lisímetros (d). **Relationship between mass-equivalent (ME) and electric signal (SE) for loading and unloading of lysimeter 1 (a), lysimeter 2 (b), lysimeter 3 (c) and for loading and unloading together values on the different lysimeters (d).**

TABELA 2. Coeficientes da regressão linear da reta $y = ax + b$, coeficientes de determinação (R^2) entre ME (y) e SE (x), erro absoluto médio (EAM), erro quadrático médio

(EQM) e índice de Willmott (d) da calibração dos três lisímetros. **Linear regression coefficients of the line $y = ax + b$, coefficients of determination (R^2) between equivalent-mass (y) and electric signal (x), absolute mean error (EAM), mean square error (EQM) and Willmott index (d) by calibration of three lysimeters.**

Lisímetro	a	b	R^2	EAM	EQM	d
1	73,1104	-67,5774	1,0000	0,0272	0,0011	1,0000
2	72,0868	-67,8924	1,0000	0,0330	0,0017	1,0000
3	73,0558	-66,5319	1,0000	0,0382	0,0024	1,0000

Em seguida, após a execução da calibração, foi realizado teste de avaliação da variação de ME (mm) dos três lisímetros entre os dias 01/10/2016 e 02/10/2016. Nesse teste, foi possível observar eventos de LI e ET dos sistemas (FIGURA 4).

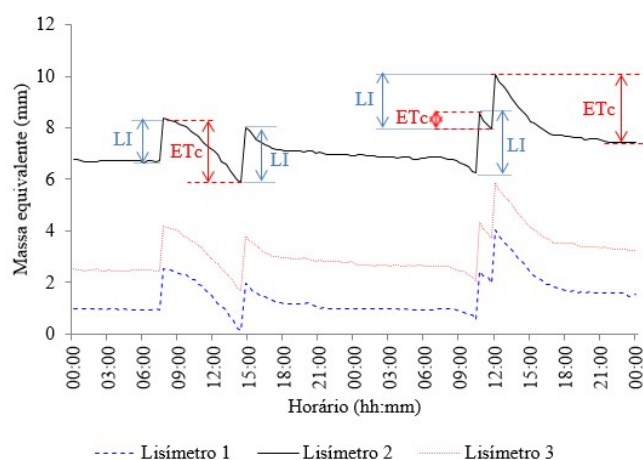


FIGURA 4. Massa equivalente (mm) registrada pelos três lisímetros durante o período de teste, com destaque para lâminas de irrigação (LI) e evapotranspiração de cultura (ETc). **Mass-equivalent (mm) registered by the three lysimeters during the test period, highlighting irrigation blades (LI) and crop evapotranspiration (ETc).**

As avaliações dos dois dias de teste permitem afirmar que ocorreram dois eventos de LI no dia 01/10/2016 (07h40 e 14h40), assim como no dia 02/10/2016 (10h40 e 12h00).

No primeiro dia (01/10/2016), a primeira LI atingiu 1,59 mm para o lisímetro 1, 1,69 mm para o lisímetro 2 e 1,74 mm para o lisímetro 3, gerando variação de 0,15 mm entre lisímetros, enquanto que a segunda LI atingiu lâmina de 1,86 mm para o lisímetro 1, 2,16 mm para o lisímetro 2 e 2,10 mm para o lisímetro 3, gerando variação de 0,30 mm entre lisímetros. Sendo assim, o primeiro dia totalizou valores de LI de 3,45 mm para o lisímetro 1, 3,85 mm para o lisímetro 2 e 3,84 mm para o lisímetro 3, gerando variação máxima de 0,20 mm entre lisímetros (FIGURA 5). Enquanto que a ETc totalizou 3,56 mm para o lisímetro 1, 3,72 mm para o lisímetro 2 e 3,70 mm para o lisímetro 3, gerando variação de 0,16 mm entre lisímetros. A ETo nesse dia, calculada pelo método de Penman & Monteith, gerou um valor de 3,47 mm (FIGURA 6).

No segundo dia (02/10/2016), a primeira LI foi de 1,91 mm para o lisímetro 1, 2,30 mm para o lisímetro 2 e 2,24 mm para o lisímetro 3, gerando variação de 0,39 mm entre lisímetros, enquanto que a segunda LI atingiu 2,10 mm para o lisímetro 1, 2,10 mm para o lisímetro 2 e 2,19 mm para o lisímetro 3, gerando variação de 0,09 mm entre lisímetros. Sendo assim, o segundo dia totalizou valores de LI de 4,01 mm para o lisímetro 1, 4,40 mm para o lisímetro 2 e 4,43 mm para o lisímetro 3, gerando variação de 0,42 mm entre lisímetros

(FIGURA 5). Enquanto que a ET_c totalizou um valor de 3,71 mm para o lisímetro 1, 3,98 mm para o lisímetro 2 e 3,91 mm para o lisímetro 3, gerando variação de 0,27 mm entre lisímetros. A ET_o nesse dia, calculada pelo método de Penman & Monteith, gerou um valor de 3,72 mm (FIGURA 6).

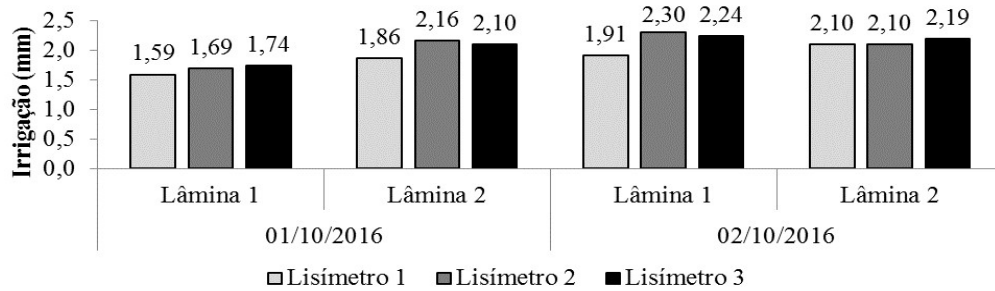


FIGURA 5. Irrigações registradas pelos três lisímetros durante o teste. **Irrigation registered by the three lysimeters during test.**

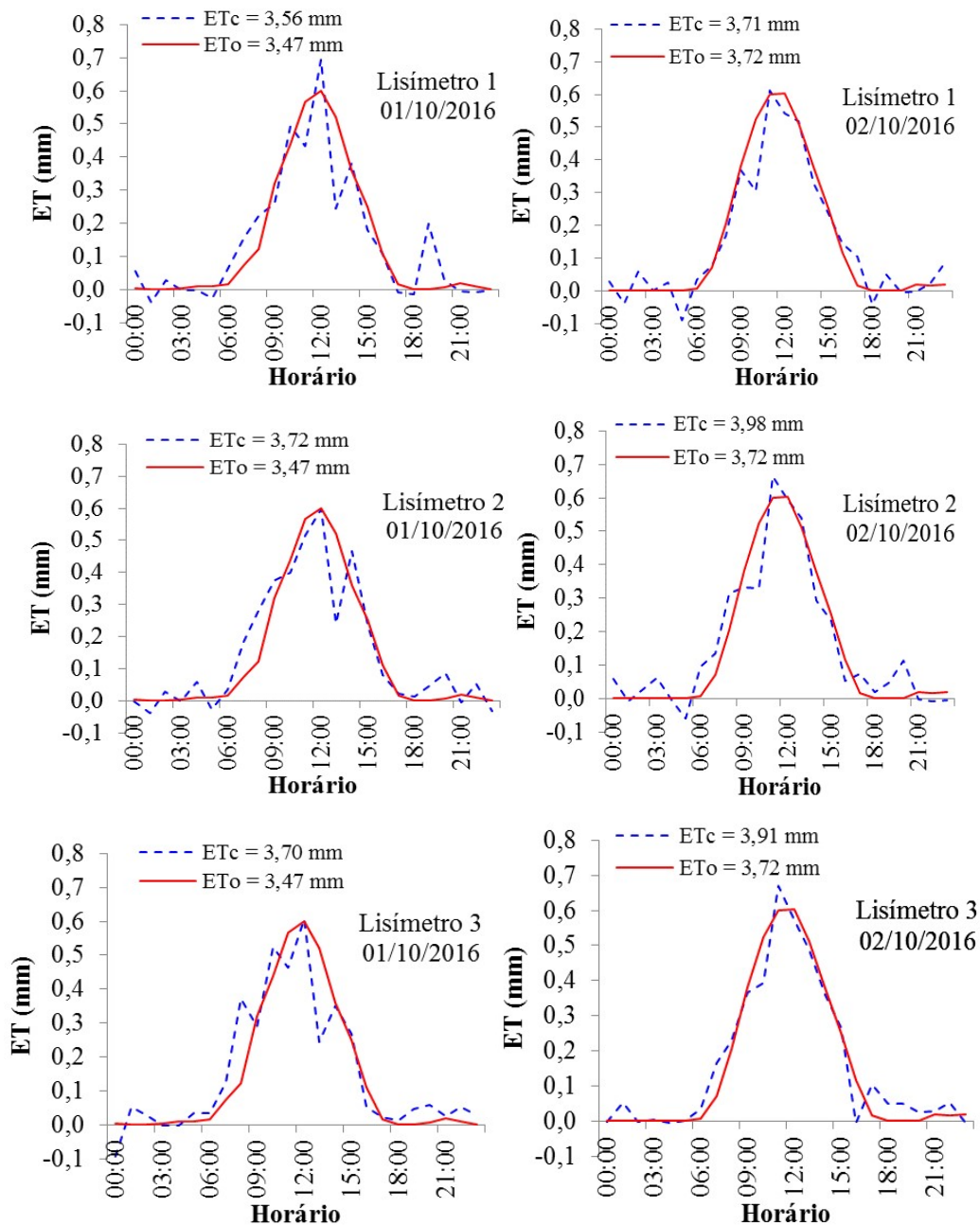


FIGURA 6. Valores horários de evapotranspiração de cultura (ETc) e evapotranspiração de referência (ETo – Penman & Monteith) para os três lisímetros durante o teste. **Hourly values of crop evapotranspiration (ETc) compared to reference evapotranspiration (ETo - Penman & Monteith) for the three lysimeters during test.**

CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos permite afirmar que os lisímetros construídos e calibrados apresentam alta correlação linear ($R^2 > 0,9999$) entre SE (mV) e ME (mm), assim como excelente precisão e acurácia na detecção de variações de ME em torno de 0,1 mm e baixíssima histerese. Conclusões verificadas pelos coeficientes de EAM entre 0,0272 e 0,0382, EQM entre 0,0011 e 0,0024 e $d = 1,0000$, valores toleráveis para medidas de consumo hídrico em cultivo protegido. Os testes realizados após a calibração, durante dois dias, evidenciaram comportamento extremamente semelhante entre lisímetros, quanto à ETc e LI, avaliadas durante período de dois dias (01/10/2016 e 02/10/2016). As avaliações diárias de ETc e LI entre os lisímetros apresentaram variação de 0,27 mm e de 0,42 mm, respectivamente. Sendo assim, a análise de resultados permite afirmar que as medidas desses equipamentos são perfeitamente ajustadas para o estudo.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; FISCHER, D.K. Direct load cell-based weighing lysimeter system. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T.A.; PRUITT, W.O.; WATER, I.A.; JENSEN, E. (Eds.) *Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements*. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 114-124.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) - Irrigation and drainage paper 56, Rome, 1998.
- CAMPECHE, L.F.S.M. *Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida “Tahiti” (Citrus latifolia Tan.)*. Piracicaba, 2002. 67p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- FARIA, R.T.; CAMPECHE, F.S.M.; CHIBANA, E.Y. *Construção e calibração de lisímetros de alta precisão*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 237-242, 2006.
- HOWELL, T.A.; SCHNEIDER, A.D.; DUSEK, D.A.; MAREK, T.H.; STEINER, J.L. *Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters*. Transactions of the ASAE, v.38, n.4, p.1019-1024, 1995.
- MARIANO, D. C.; FARIA, R. T.; FREITAS, P. S. L.; LENA, B. P.; JOHANN, A. L. *Construction and calibration of a bar weighing lysimeter*. Acta Scientiarum, v. 37, n. 3, p. 271-278, 2015.
- PARDOSSI, A.; INCROCCI, L. *Traditional and new approaches to irrigation scheduling in vegetable crops*. HortTechnology, v. 21, n. 3, p. 309-313, 2011.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. *Statistics for the Evaluation and comparison of models*. Journal of Geophysical Research, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.