



## ARTIGO CIENTÍFICO

# LISÍMETROS DE PESAGEM PARA MEDIDAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ESTUFA<sup>1</sup>

L. F. Palaretti<sup>2</sup>, R. T. Faria<sup>2</sup>, A. B. Dalri<sup>2</sup>, I. P. Martins<sup>3</sup>, C. Oliverio<sup>4</sup>, M. G. dos Santos<sup>5</sup>

**RESUMO:** Lisímetro de pesagem é utilizado para a determinação dos componentes do balanço hídrico, particularmente a evapotranspiração e evaporação. Este equipamento é muito preciso, no entanto, para maior confiabilidade, sua calibração deve ser executada *in situ*. O objetivo neste trabalho foi calibrar 12 lisímetros de pesagem para verificação da linearidade e existência de histerese das medidas, além de avaliar a precisão dos equipamentos. Os lisímetros apresentavam diâmetro e profundidade de 30 cm, sobre célula de carga acoplada a um sistema de aquisição e armazenamento de dados. A calibração foi realizada pela correspondência da adição e remoção de pesos, de massa conhecida, e a respectiva voltagem na célula de carga. Os dados de calibração foram lineares, com correlação significativa entre a massa e a voltagem. Os coeficientes angular e linear variaram de 762,78 a 1187,8 kg mV<sup>-1</sup> e -444,99 a -798,00 kg, respectivamente. O erro absoluto variou de 0,03 a 0,54, mostrando alta precisão dos lisímetros. O índice de concordância de Willmott foi de 0,99, mostrando a concordância entre os valores estimados e os observados, e a precisão na variação de massa foi de 0,79 mm. Conclui-se que os lisímetros são adequados para a determinação da evapotranspiração de cultivo.

**PALAVRAS-CHAVE:** evapotranspiração, célula de carga, balanço hídrico

## WEIGHING LYSIMETERS FOR GREENHOUSE EVAPOTRANSPIRATION MEASUREMENTS

**ABSTRACT:** Weighing lysimeters is used for water balance components determination, specially for evapotranspiration and evaporation. This equipment is accurate, but in order to obtain reliable data, their calibration must be performed *in situ*. The objective of this work was to calibrate 12 lysimeters to verify the measurements linearity and the existence of hysteresis,

<sup>1</sup> Artigo extraído de dissertação de mestrado – Financiamento: CNPq (Proc. nº 456791/2014-0);

<sup>2</sup> Professor. Doutor, UNESP/FCAV, CEP 14884-900, Jaboticabal, SP. Fone (16) 32097540. E-mail: lfpalaretti@fcav.unesp.br

<sup>3</sup> Mestre, Doutorando UNICAMP, Campinas, SP;

<sup>4</sup> Engenheira Agrônoma, UNESP/FCAV, Jaboticabal, SP

<sup>5</sup> Mestre, Doutorando UNESP/FCAV, Jaboticabal, SP

besides evaluating the equipment's accuracy. The lysimeters had diameter and depth of 30 cm, one load cell in each lysimeter and connected to a data acquisition and storage system. The calibration was performed by comparing the load and unload known mass with the load cell reading. The calibration data were linear, presenting a significant mass correlation in response to voltage. The angular and linear coefficients varied from 762.78 to 1187.8 kg mV<sup>-1</sup> and -499.99 to -798.00 kg, respectively. The absolute error ranged from 0.03 to 0.54, showing a high accuracy of the lysimeters. The Willmott concordance index was 0.99, showing the agreement between the estimated and observed values, and the accuracy for mass variation was 0.79 mm. It can be concluded that lysimeters are suitable for crop evapotranspiration determination.

**KEYWORDS:** evapotranspiration, load cell, water balance

## INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é um dos principais componentes do balanço hídrico e corresponde ao total de água perdida pela evaporação na superfície do solo e pela transpiração da planta para a atmosfera. Dentre os métodos disponíveis para a determinação da evapotranspiração e evaporação, a lisímetria de pesagem é considerada o padrão de medida. Lisímetros são tanques preenchidos com solo e apoiado sobre um sistema de pesagem cuja função é a obtenção da variação da massa do sistema e, indiretamente, a evapotranspiração (Faria et al., 2006). Aboukhaledet, Alfaro e Smith (1982) e Howell, Schneidere Jensen (1991) consideram lisímetros de pesagem como o melhor equipamento para medir com precisão a evapotranspiração de referência e evapotranspiração de culturas.

Há algumas décadas, a possibilidade de utilização de lisímetros de pesagem era dificultada devido ao alto custo. Com desenvolvimento da eletrônica, tornaram-se disponíveis sensores mais precisos, robustos e baratos, como as células de carga, e também sistemas de aquisição e armazenamento de dados mais sofisticados (Campeche, 2002; Faria et al., 2006).

A calibração dos lisímetros é uma etapa importante e necessária para a obtenção da equação de calibração, sendo esta obtida pela comparação entre a adição e remoção de peso de massa conhecida e o impulso elétrico emitido pelas células de carga. Para garantir a obtenção de uma equação de calibração adequada, esta deve ser feita no local de utilização e também, garantindo o mínimo de interferência externa durante o processo de calibração (Payero &

Irmak, 2008). Quando essa calibração é feita de forma incorreta, interpretações inconsistentes dos valores de evapotranspiração são obtidas.

Neste trabalho o objetivo foi calibrar de 12 lisímetros de pesagem em condição de campo, a fim de obter a equação de calibração do lisímetro, verificar a linearidade e existência de histerese das medidas, além de avaliar a precisão dos equipamentos.

## MATERIAL E MÉTODOS

Doze lisímetros de pesagem foram instalados no departamento de Engenharia Rural da UNESP - Jaboticabal, no Setor de Plasticultura, no mês de julho de 2016, localizado nas coordenadas 21° 14' 25,6'' e 48° 17' 11,3'', com altitude média de 582 m, com clima do tipo Aw, segundo a classificação de Koppen (Cepagri, 2016).

Lisímetros com 30 cm de diâmetro e 30 cm de profundidade foram preenchidos com solo até 2 cm da borda. O solo utilizado, obtido localmente, foi peneirado e colocado em cada lisímetro promovendo-se leve compactação de magnitude semelhante à densidade do solo original. O sistema de drenagem dentro do lisímetro foi construído de brita, areia e terra, colocados em camadas sequenciais totalizando 5 cm e coberto com manta bidim para evitar a perda de solo. Para escoamento da água de drenagem, uma mangueira foi instalada ao fundo do lisímetro, sendo mantida presa para cima; ao abaixá-la, a água drenada era coletada por uma proveta de 500 mL (Figura 1).

A massa de cada lisímetro foi aferida por uma célula de carga modelo GL 50 da empresa Alfa Instrumentos Eletrônicos S.A com capacidade de 50 quilogramas e precisão de 0,57 mm. A célula de carga do lisímetro foi conectada ao sistema de aquisição de dados, via cabo de 6 vias, composto por um multiplexador de canais diferenciais (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell Sci., Logan – USA) e um datalogger (CR10X Campbell Sci., Logan – USA). O sistema foi energizado por uma bateria de 12 V ligada a uma placa solar para garantir o suprimento de energia. Os dados armazenados foram transferidos para um computador portátil via cabo serial/USB utilizando-se o programa PC200W, e posteriormente trabalhado em planilha eletrônica.

\* **Figura 1.** Lisímetro de pesagem com drenagem por mangueira

A calibração foi realizada conforme metodologia proposta por Campeche (2002), com os lisímetros cobertos com plástico preto para evitar variação de massa causada pela evaporação da água do sistema. O procedimento se resume a colocação e retirada de cargas (massa padrão)

de forma gradual e crescente. As cargas foram compostas por sacos de areia de massa conhecida até 25 equivalentes-milímetro.

Foram utilizadas massas padrão para representar 1 e 5 equivalente-milímetro de água, confeccionados com sacos plásticos preenchidos com areia, fechados hermeticamente e pesados em balança de precisão de 0,01 g. Para se obter 5 equivalentes-milímetro foram utilizados 4 sacos de 0,35 kg, dividindo-se pela área do lisímetro (0,070686 m<sup>2</sup>); para 1 equivalente-milímetro foram utilizados 5 sacos de 0,07 kg, dividindo-se pela área do lisímetro, somando um total de 25 mm para cada lisímetro.

As leituras de voltagem tiveram início com os lisímetros descarregados (preenchidos apenas com solo). A seguir, foram acrescentadas e retiradas as massas padrão em intervalo de 2 minutos. As leituras foram realizadas a cada 3 segundos, obtendo-se a média a cada 30 segundos, com opção para alta resolução como voltagem de excitação (input range de 7,5 mV e 2.500 mV). A primeira média de leitura para cada massa foi desconsiderada, devido a oscilações provocadas pela variação de massa. Foram acrescentadas as massas de 5 mm sequencialmente até atingir 20 mm, seguidos de acréscimos de 1 mm até atingir 25 mm. A remoção das massas ocorreu de forma inversa aquela do acréscimo. As leituras foram repetidas 4 vezes, e para o resultado final, foi feito uma média das repetições.

A exatidão dos lisímetros foi determinada pelo erro absoluto (E) (Equação 1), que é a dispersão dos valores de massa estimada em relação à massa observada, pelo coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), obtida pela regressão linear realizada para cada lisímetro, e pelo índice de concordância (d) (Equação 2) proposto por Willmott (1992), sendo que este varia de 0 a 1, e quanto mais próximo o resultado de 1 mais perfeita é a concordância entre os valores estimados e observados.

$$E = Y_{obs} - Y_{est} \quad (1)$$

$$d = 1 - \frac{\Sigma(Y_{obs} - Y_{est})^2}{\Sigma(|Y_{est} - \bar{Y}_{obs}| + |Y_{obs} - \bar{Y}_{obs}|)^2} \quad (2)$$

Em que,

$Y_{obs}$  - valor da massa padrão utilizada para a calibração dos lisímetros;

$Y_{est}$  - valor obtido na calibração, em resposta à voltagem das células de carga;

$\bar{Y}_{obs}$  - valor médio das massas padrão utilizadas para a calibração dos lisímetros.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de calibração foram lineares para os 12 lisímetros, mostrando correlação significativa ( $R^2 = 0,999$ ) entre massa e voltagem (Tabela 1). A precisão para pesagem de variação de massa pode ser constatada devido à baixa variação do erro absoluto (E), com variação de 0,03 a 0,54 mm, e pelo índice de concordância “d” de 0,999 para todos os lisímetros. Esses resultados demonstram a alta concordância entre os valores observados e estimados.

**Tabela 1.** Coeficientes angular e linear (a e b) da equação do lisímetro\*, erro absoluto (E), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e índice de concordância de Willmott (d).

Lisímetro	a	b	$R^2$	E (mm)	d
1	790,83	-547,64	0,99	0,21	0,99
2	779,39	-550,05	0,99	0,11	0,99
3	771,66	-536,56	1,00	0,05	0,99
4	1187,80	-798,00	0,99	0,54	0,99
5	797,43	-549,18	0,99	0,13	0,99
6	794,47	-562,39	0,99	0,09	0,99
7	954,39	-523,93	0,99	0,42	0,99
8	810,14	-528,12	0,99	0,18	0,99
9	796,75	-576,45	1,00	0,03	0,99
10	762,78	-444,99	0,99	0,37	0,99
11	793,16	-559,81	0,99	0,14	0,99
12	784,35	-499,99	0,99	0,07	0,99

\*  $y = a x + b$ , sendo “y” a massa (kg) e “x” o sinal elétrico (mV)

Os coeficientes angulares e lineares variaram de 762,78 a 1187,8 mm  $mV^{-1}$  e -444,99 a -798,00 mm, respectivamente. Segundo Faria et al. (2006), essas diferenças ocorrem devido, principalmente, às características específicas do extensômetro elétrico de cada célula de carga e mecanismos de transmissão de força para o coeficiente angular, e à massa estática (peso morto) de cada conjunto, para o coeficiente linear. A similaridade nos valores dos coeficientes angulares dos doze lisímetros indica uniformidade no sistema de pesagem dos mesmos (Mariano et al., 2015).

O lisímetro 4 foi o que mostrou menor precisão para determinação de variações de massa, dado seu erro absoluto de 0,54 mm, porém esse valor não interferiu na sua capacidade de monitorar dados (Figura 3). Os demais lisímetros mostraram leituras exatas, sendo o lisímetro 9 o de maior exatidão ( $E = 0,03$  mm) e precisão ( $R^2 = 0,99$ ). Esses resultados revelam que as equações de regressão são adequadas e os lisímetros não apresentam histerese (Figura 2).

Faria, Campeche e Chibana (2006), Campeche et al. (2011) e Mariano et al. (2015), também obtiveram linearidades e altas correlações entre as variações da massa e a resposta de voltagem. Santos et al. (2008) observaram resultados de calibração semelhantes em todos os

lisímetros, mostrando que estes foram adequados para a determinação da evapotranspiração de referência.

\* **Figura 2.** Diagrama de dispersão entre massa e impulso elétrico medidas nos lisímetros

Para demonstrar a capacidade de monitoramento dos lisímetros com os componentes do balanço hídrico, apresenta-se, na Figura 3, a variação horária da massa em um dos lisímetros durante 4 dias do mês de julho de 2016. Nesse período não foi realizada drenagem, sendo que a variação de massa ocorreu somente pela evaporação do solo (totalmente descoberto), que foi de 3,16, 2,37, 0,79 e 3,16 mm, para os respectivos dias. No terceiro e quarto dia foram realizadas irrigações de 2,37 e 7,91 mm, respectivamente. Nota-se que a variação das medidas ocorre a cada 0,79 mm evaporado, sendo esta a precisão da célula de carga.

\* **Figura 3.** Variação horária de massa de um lisímetro de 16 a 19 de julho de 2016.

Resultados semelhantes foram obtidos por Faria, Campeche e Chibana (2006), Campeche et al. (2011) e Mariano et al. (2015), que ao realizarem calibrações e testes em lisímetros de pesagem, puderam também observar a capacidade de monitoramento dos mesmos.

## CONCLUSÕES

A calibração dos lisímetros apresentou linearidade e alta correlação da massa em resposta à voltagem medida no sistema de pesagem. Os sistemas testados foram considerados precisos, com coeficientes de determinação superiores a 0,99 e acurados, com erro absoluto inferior a 0,54 mm. Os valores do índice de concordância mostraram alta concordância entre os valores estimados e observados, com precisão em campo de 0,79 mm, sendo os lisímetros habilitados para a determinação de evapotranspiração de cultivo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (Processo nº 456791/2014-0) na execução do projeto do qual foi retirado o referido artigo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. Lysimeters. Rome: FAO, 68p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 39), 1982.

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.). 67f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CAMPECHE, L.F.S.M.; NETTO, A.O.A.; SOUSA, I.F.; FACCIOLI, G.G.; SILVA, V.P.R.; AZEVEDO, P.V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.5, p.519-525, 2011.

CEPAGRI. Clima dos municípios paulistas. Disponível em: [http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_279.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_279.html). Acesso em: 18/12/2016.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, n.1, p.237-242, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662006000100035>. Acesso em: 07/09/2016.

HOWELL, T.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeterdesing and use for evapotranspiration measurements. In: 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.). 67f. Tese (Doutorado em Agronomia)- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, p. 7, 2002.

MARIANO, D. C.; FARIA, R. T.; FREITAS, P. S. L.; LENA, B. P.; JOHANN, A. L. Construction and calibration of a bar weighnglysimeter. Acta Scientiarum Agronomy, v.37, n.3, p.271-278, 2015. Disponível em: [http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/19368/pdf\\_61](http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/19368/pdf_61). Doi: 10.4025/actasciagron.v37i3.19368.

PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters. Irrigation Science, 26, p. 191-202, 2008. DOI: 10.1007/s00271-007-0085-9.

SANTOS, F. X.; Rodrigues, J. J. V.; Montenegro, A. A. A.; Moura, R. F. Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo no semi-árido nordestino. Engenharia Agrícola,

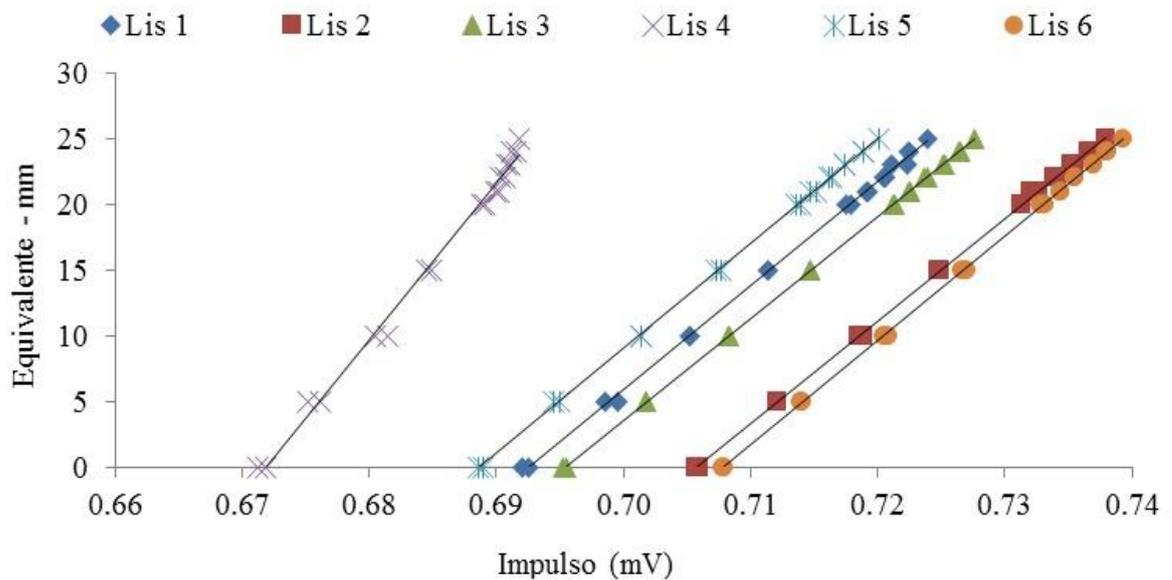
v.28, p.115-124, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000100012>. Acesso em: 26/08/2016.

WILLMOTT, C. J. Some comments on evaluation of model performance. Bulletin American Meteorological Society, v. 63, n. 11, Nov/1983. Disponível em: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0477%281982%29063%3C1309%3ASCOTE0%3E2.0.CO%3B2>. Acesso em 05/09/2016.



Figura 1. Lisímetro de pesagem com drenagem por mangueira

A



B

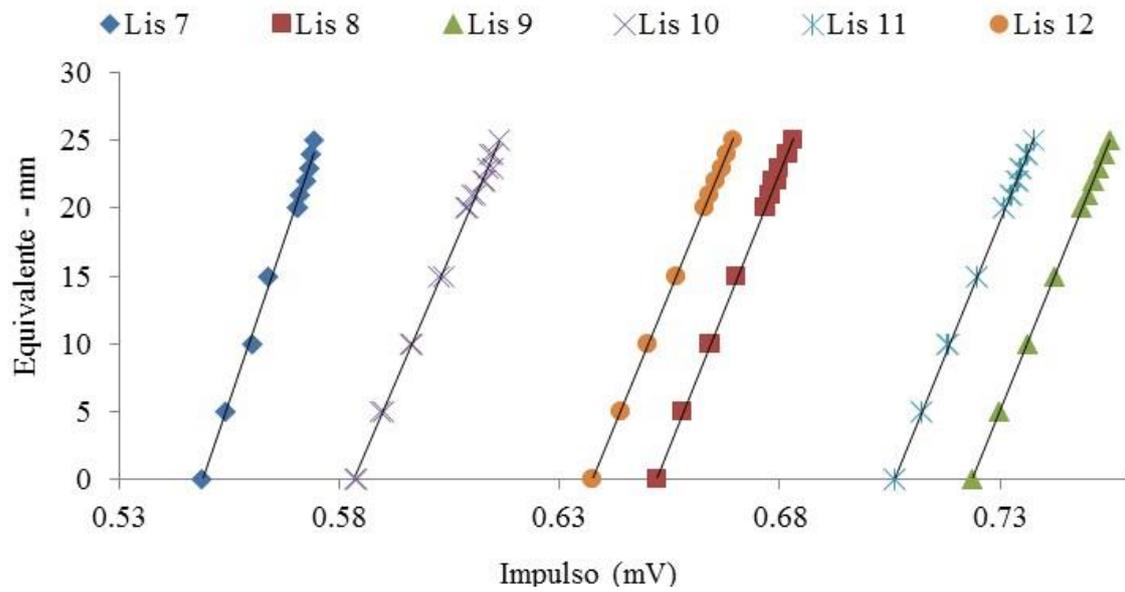


Figura 2. Diagrama de dispersão entre massa e impulso elétrico medidas nos lisímetros

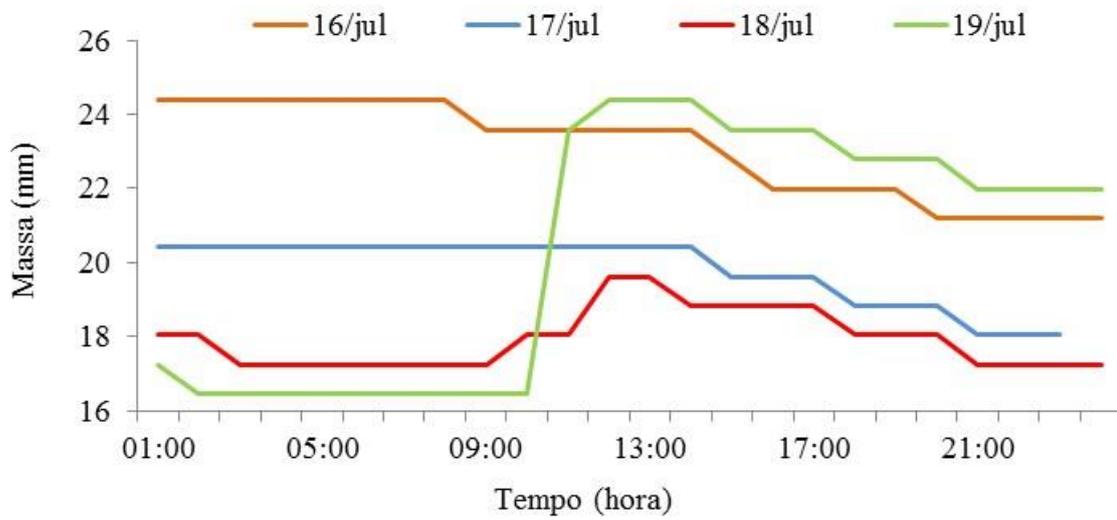


Figura 3. Variação horária de massa de um lisímetro de 16 a 19 de julho de 2016.