

## CONSTRUÇÃO DE LISÍMETRO DE PESAGEM DE SEÇÃO CIRCULAR PARA A MEDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $ET_0$ ): SISTEMA COM TRÊS CÉLULAS DE CARGA

DANIEL GONÇALVES GOMES JUNIOR<sup>1</sup>; ALEXANDRE DAL PAI<sup>2</sup> E ENZO DAL PAI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Doutorando, Dpto. de Engenharia Rural, Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Fazenda Experimental Lageado, Av. Universitária, 3780, 18610-034, Altos do Paraíso, Botucatu/SP/Brasil, daniel.g.jr@gmail.com

<sup>2</sup>Doutor, Dpto. de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Fazenda Experimental Lageado, Av. Universitária, 3780, 18610-034, Altos do Paraíso, Botucatu/SP/Brasil, dal.pai@unesp.br

<sup>3</sup>Doutor, Dpto. de Engenharia Rural, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Fazenda Experimental Lageado, Av. Universitária, 3780, 18610-034, Altos do Paraíso, Botucatu/SP/Brasil, enzo-dal.pai@unesp.br

### 1 RESUMO

A mensuração da evapotranspiração de uma determinada localidade é de suma importância para o uso racional da água nos sistemas agrícolas. Havendo esta medida, é possível quantificar com precisão a necessidade hídrica das culturas. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um lisímetro de pesagem, para medir a evapotranspiração de referência. Este equipamento é composto de uma estrutura de concreto armado em formato circular havendo um poço de visita, com um tanque de capacidade volumétrica de 1,5 m<sup>3</sup>. O sistema de pesagem possui um tripé de sustentação reforçado com estrutura de aço-carbono com três células de carga afixadas. As informações das células de carga foram armazenadas pelo uso de um *datalogger* 21-X da Campbell Scientific®. A manutenção da umidade do solo, quando na capacidade de campo, foi realizada em função das leituras obtidas do *datalogger* em conjunto com uso de tensiômetros/vacuômetros instalados para uma profundidade de 0,2 m dentro e fora do tanque, na zona tampão, sendo estabelecido um turno de rega médio de três dias. A metodologia empregada na construção, montagem, automação e calibração apresentou-se adequada, obtendo-se coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9998. Como resultado prático, o valor médio de 3,5 mm/dia de evapotranspiração é indicativo de uma boa funcionalidade do equipamento para o ambiente de estudo em questão.

**Palavras-chave:** fluxo de água, irrigação, requerimento hídrico.

GOMES JR, D. G.; DAL PAI, A.; DAL PAI, E.;  
CONSTRUCTION OF A CIRCULAR SECTION FOR WEIGHING LYSIMETER  
FOR THE MEASUREMENT OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ( $ET_0$ ):  
THREE LOAD CELL SYSTEM

## 2 ABSTRACT

Evapotranspiration measurement of a given locality is very relevant for the rational use of water in agricultural systems. With this measure, it is possible to quantify with greater precision the water requirement of crops. The main objective of this work was to develop a weighing lysimeter to measure reference evapotranspiration. This equipment is composed of a concrete structure in circular format, having a visiting well with a tank with volumetric capacity of 1.50 m<sup>3</sup>. The weighing system was designed on the basis of a reinforced support tripod with carbon steel frame and three load cells affixed. Load cell measurements were stored using a Campbell Scientific® 21-X *datalogger*. The soil moisture maintenance, when in the field capacity, was done according to the readings obtained from the *datalogger* in conjunction with tensiometers / vacuometers installed to a depth of 0.20 m inside and outside of the tank, and a three-day interval of irrigation was defined. The methodology presented in this work and used in the construction, automation and calibration processes was adequate, providing a coefficient of determination (R<sup>2</sup>) of 0.9998 proving that the equipment can provide accurate measurements. As a practical result for the study environment, the average evapotranspiration value of 3.5 mm/day is a good indicative of the equipment functionality.

**Keywords:** water flux, irrigation, water requirement.

## 3 INTRODUÇÃO

A necessidade de estudos a respeito da demanda hídrica atmosférica é um assunto atual e exige um amplo conhecimento dos fenômenos físicos que ocorrem na natureza. O uso racional de água no ambiente produtivo agrícola, urbano e industrial é algo considerado como de extrema importância. Com o passar dos anos e o desenvolvimento dos países numa escala global, o aumento populacional passou a ser considerado como um desafio do ponto de vista do setor produtivo agrícola e dúvidas começaram a surgir a respeito da sustentabilidade do sistema como um todo. (MARTÍ et al., 2015; RAPHAEL et al., 2018)

A tecnologia está cada vez mais difundida dentro da agricultura e diversos são os sistemas de irrigação que podem ser utilizados. O grau de sofisticação desses sistemas é dependente de sua eficiência em suprir no momento ideal e de modo preciso a demanda hídrica da cultura no campo. Isso é atingido com a aplicação correta de uma lâmina de água o que garante elevados graus

de produtividade das culturas. (MARTÍ et al., 2015; AMARAL et al., 2018)

Para se estabelecer uma boa prática de manejo da irrigação é de suma importância ter o conhecimento da evapotranspiração de referência de um determinado ambiente. Basicamente, a evapotranspiração é a combinação de dois processos separados, a transpiração da água pelas plantas e a evaporação da água seja na superfície das plantas ou em corpos livres de água, como nos lagos e rios. A evapotranspiração de referência (chamada de condição padrão) é considerada como sendo a evapotranspiração da água de uma superfície gramada com altura uniforme de 12 cm, albedo de 0,23, livre de doenças ou pragas, cobrindo completamente o terreno, sem deficiência nutricional e em um solo em plena capacidade hídrica. (ALLEN et al., 1998; PEREIRA, ANGELOCCI e SENTELHAS, 2007; LIU et al., 2017; RAFI et al., 2019)

Informações de evapotranspiração de referência podem ser obtidas por meio de medidas ou por meio de modelos de estimativa. Na literatura podem ser

encontrados diversos trabalhos sobre modelos de estimativa por apresentarem vantagens financeiras e operacionais. Há modelos mais simples que estão relacionados à temperatura, outros baseados na radiação solar e, os mais complexos, combinando aspectos de balanço de energia com processos de transferência de massa. (MARTÍ et al., 2015; LIU et al., 2017; RAPHAEL et al., 2018)

Apesar da praticidade dos modelos de estimativa da evapotranspiração, eles propagam imprecisões em função das condições de contorno e dos desvios inerentes dos equipamentos que monitoram os parâmetros meteorológicos utilizados na fase de modelagem. Essa imprecisão pode ser minimizada quando o valor é obtido por meio da medida realizada por lisímetros. Estes equipamentos são utilizados para monitorar parâmetros importantes do ciclo hidrológico (p. ex. precipitação, drenagem e evapotranspiração) e, em ambientes de pesquisa, são utilizados para calibrar modelos de estimativa de evapotranspiração. (PETERS et al., 2017; RAPHAEL et al., 2018; AMARAL et al., 2018; KOHFAHL et al.; 2019).

Os lisímetros são, basicamente, containers cilíndricos podendo possuir dimensões variáveis preenchidos de solo com ou sem presença de cultura vegetal, onde o balanço hídrico nesse sistema pode ser medido com precisão. O lisímetro de pesagem, atualmente, é o equipamento que consegue medir de forma mais precisa a evapotranspiração de referência garantindo dados com elevada resolução temporal (<

10 min) e ótima precisão (0,1 mm). (HOFFMANN et al., 2016; AMARAL et al., 2018; KOHFAHL et al.; 2019)

A literatura aponta que, a maioria dos estudos com lisimetria de pesagem se desenvolveram em países como Estados Unidos e Espanha, afirma-se que há uma grande necessidade de estudos em outras localidades do mundo (LIU et al., 2017).

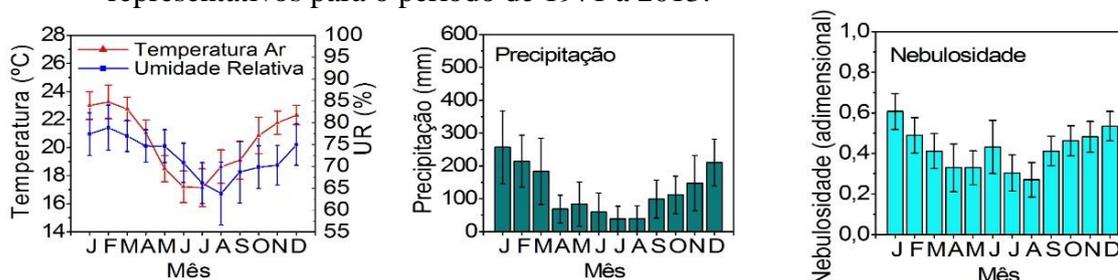
Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi construir um lisímetro de pesagem de seção circular para medir a evapotranspiração de referência.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Estação Evapotranspirométrica do Departamento de Engenharia de Bioprocessos da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” na cidade de Botucatu-SP (latitude 22°50' S, longitude 48°25' O e altitude média de 786 m).

O clima da localidade, segundo a classificação climática de Köppen, é o Cwa (subtropical úmido - mesotérmico), com predominância de verão quente e úmido e inverno seco (ESCOBEDO et al., 2011; DAL PAI et al., 2016). A figura 1 - disponível no site: [estacaolageado.fca.unesp.br](http://estacaolageado.fca.unesp.br) - apresenta a série climática dos dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e nebulosidade para Botucatu-SP no período de 1971 a 2013.

**Figura 1.** Série climática de dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e nebulosidade para a região de Botucatu-SP. Variação anual de dados representativos para o período de 1971 a 2013.



Fonte: <http://estacaolageado.fca.unesp.br/index.html>

Esta estação está presente em uma área com largura de 15 m e comprimento de 25 m (área aproximada de 375 m<sup>2</sup>) e possui sua superfície vegetada coberta por grama Batatais (*Paspalum notatum*) espécie vegetal que também foi inserida dentro do tanque. O solo utilizado é classificado como latossolo roxo distrófico, e o terreno apresenta uma declividade de 2%.

Para manter as características físicas do perfil do solo, correspondente à profundidade efetiva do sistema radicular, optou-se proceder com duas condições de contorno: **i)** entalhar blocos de solo; **ii)** trabalhar na profundidade de 0,00 – 0,45 m, correspondente a profundidade efetiva para o pleno desenvolvimento do sistema radicular. Foi delimitada uma área de formato quadrado de 4 m<sup>2</sup> de tal forma a ser ligeiramente superior ao diâmetro e, conseqüentemente, superior à área evaporativa do container do lisímetro. Neste mesmo local foram coletadas todas as amostras de solo utilizadas no experimento. A área de amostragem ficou permanentemente coberta com lona, tendo a sua superfície exposta ao tempo somente durante o momento da retirada dos blocos de solo.

Quanto à amostragem dos parâmetros físicos do solo da área de

estudo, amostras indeformadas em anéis de *kopeck*, em triplicata, foram retiradas do perfil do solo em profundidades variadas (0,00 – 0,15 m; 0,15 – 0,30 m; 0,30 – 0,45 m) para a determinação da densidade e umidade volumétrica (inicialmente de saturação e capacidade de campo). Para a determinação da densidade de partícula e granulométrica do solo, as amostras foram retiradas do perfil de profundidade inicial (0,00 – 0,15 m). Para a determinação da umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente, as amostras indeformadas foram retiradas em anéis de *kopeck*, em triplicata nas profundidades de 0,10, 0,20 e 0,30 m. Para análise de química e fertilidade do solo, as amostras foram retiradas com trado de rosca na profundidade de 0,20 m, as quais foram secas ao ar e encaminhadas ao laboratório.

Na etapa de recomposição do perfil do solo dentro do tanque, para determinação da umidade gravimétrica, amostras foram retiradas e secas em estufa por 48h e seus valores foram utilizados na calibração do lisímetro. O processo de amostragem e laboratorial foi baseado na metodologia da EMBRAPA (1997). Os blocos entalhados apresentaram dimensões variáveis, conforme estratificação apresentada no tabela 1.

**Tabela 1.** Camadas representativas de amostragem e principais características dos blocos utilizados para recompor o perfil do solo.

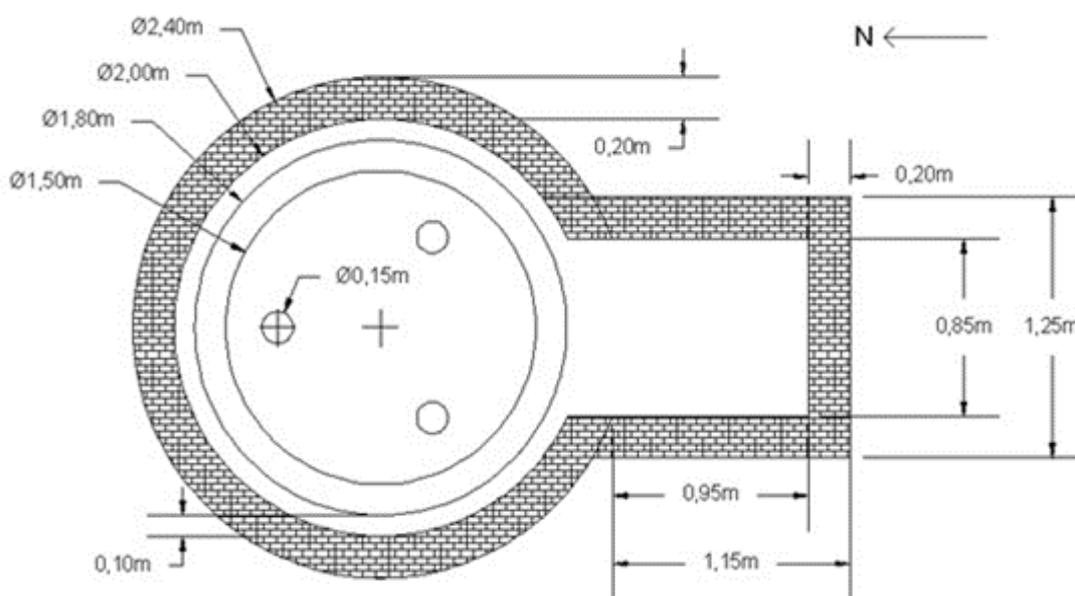
Camada representativa	Características do material
*0,00 – 0,10 m	Blocos quadrado-retangulares. Bem estruturados, com forte presença de sistema radicular;
*0,10 – 0,20 m	Blocos quadrado-retangulares, estrutura frágil, média a pouca presença de sistema radicular. Estruturado mais em função da porosidade natural do que pelo sistema radicular;
0,20 – 0,35 m	Amostras de tamanhos variados, raramente blocos bem definidos. Estrutura geralmente laminar com elevado grau de compactação e tendência de formação de trincas e rachaduras

\*Para a camada representativa de 0,00 – 0,20 m os blocos possuíam dimensões aproximadas de 0,10 m  $\pm$  2,00 cm tanto para altura, largura e comprimento.

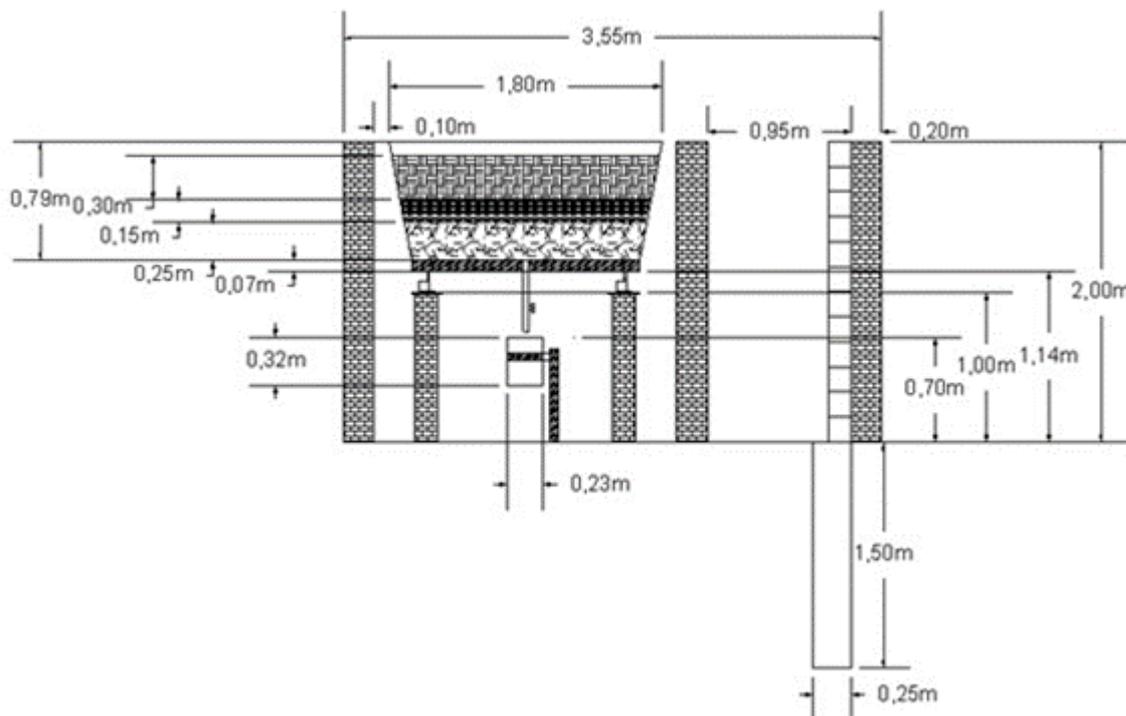
Quanto aos parâmetros construtivos do lisímetro, foi construída uma estrutura de pesagem composta de três células de carga dispostas nos vértices de um triângulo equilátero com o objetivo de distribuir uniformemente o peso sobre os sensores. Logo acima das células de carga há a chapa de aço-carbono (espessura de 0,00635 m; diâmetro de 1,50 m) utilizada como base de sustentação para o tanque que possui

capacidade volumétrica de 1,5 m<sup>3</sup>. Esta chapa possui o mesmo diâmetro da base do tanque e em seu centro há um corte circular com diâmetro de 0,080 m. Este lisímetro é composto de uma estrutura de concreto armado em formato circular havendo neste um poço de visitação para eventuais manutenções. A planta baixa do projeto será apresentada nas figuras 2 e 3:

**Figura 2.** Desenho esquemático da estrutura de alvenaria do lisímetro de pesagem, vista superior.



**Figura 3.** Desenho esquemático da estrutura de alvenaria do lisímetro de pesagem, vista frontal.



Uma flange (diâmetro interno de 0,032 m) foi inserida no fundo do tanque e possui um cano de PVC acoplado a um registro de esfera de mesmo material, possibilitando a drenagem do excedente de água quando necessário.

O piso da estrutura possui um pequeno declive que serve para o direcionamento do escoamento da água proveniente da precipitação e daquela que é drenada no fundo do tanque. Esta água escoava de forma direcionada para uma área de drenagem feita logo abaixo da escada de acesso, constituída de uma broca de 10 polegadas de diâmetro e 1,50 m de profundidade preenchida com brita nº 1. No topo da estrutura, acima do nível do solo, uma pequena borda de 0,05 m foi deixada para impedir entrada de água por escoamento superficial.

Os pilares de sustentação são de concreto armado e possuem formato cilíndrico com chapas “W” de aço-carbono anexadas para o reforço da estrutura. Na parte superior desses pilares foram soldadas

chapas de ferro para fixação das células de carga. A função de todo esse aparato construtivo é de distribuir uniformemente o peso e reforçar a capacidade de sustentação do tanque como um todo.

Para a aquisição de dados foi utilizado um microprocessador (*datalogger*) 21-X da empresa *Campbell Scientific*<sup>®</sup>, com intervalo de leitura do sinal emitido dos sensores a cada 5 segundos, sendo que uma média desses valores é produzida pelo microprocessador a cada 5 minutos. O sistema de pesagem é composto de três células de carga da marca Samel L-2T (2 mV/V  $\pm$  0,1%) com capacidade nominal de carga de 2 toneladas cada. O sistema como um todo possui capacidade para suportar até 6 toneladas. Dois pluviômetros eletrônicos da marca *Texas Electronics*<sup>®</sup> modelo TR-525M foram utilizados, um instalado em um pedestal presente na superfície gramada, próximo ao lisímetro, para a medida da precipitação e outro instalado logo abaixo do tanque, utilizado para medir o excedente de água

drenado (CARVALHO et al., 2013). O fator de conversão entre áreas é de 1:43, com área de captação do pluviômetro de 0,047 m<sup>2</sup> (diâmetro de 0,254 m) e área da superfície evaporativa do tanque de 2,01 m<sup>2</sup> (diâmetro de 1,60 m) (CARVALHO et al., 2013).

Quanto a recomposição do perfil do solo, primeiramente foi colocada uma camada inicial de brita até o bocal superior da flange do sistema de drenagem e, em seguida, foi colocada uma manta de drenagem do tipo bidim. Em seguida foi adicionada uma camada de brita nº1 de 0,25 m de altura e logo acima desta uma segunda manta de drenagem do tipo bidim. Após isso foi adicionada uma camada de 0,15 m de solo peneirado. Por último foram colocadas as camadas de blocos estruturados representativas de cada perfil do solo, sendo adicionada uma fração de solo peneirado quando necessário, principalmente em possíveis vãos formados entre os blocos.

Na calibração foi utilizado o procedimento do método de pares de entrada-saída de medidas de variação de peso pelas células de carga no sistema, que consiste no uso de “massas-padrão” – são sacos de rafia com brita nº1 em seu interior pesados em balança eletrônica. (JIA et al. 2006; CAMPECHE et al. 2011; CARVALHO et al. 2013; SCHMIDT et al. 2013). A calibração foi feita em função da capacidade total de água no solo (CTA ou CAD) calculada e ajustada a 74 mm (o intervalo hídrico ótimo para o solo do experimento é de 74 a 90 mm, aproximadamente). Ao todo foram utilizados 20 sacos ordenados do seguinte modo, em escala crescente de massa: 2 x 1 kg; 2 x 2kg; 2 x 4kg; 10 x 7,4 kg; 2 x 10 kg; 2 x 20 kg, equivalentes em milímetros a: 2 x 0,50 mm; 2 x 1 mm; 2 x 2 mm; 10 x 3,70 mm; 2 x 5 mm; 2 x 10mm, respectivamente.

Uma vez determinadas as “massas-padrão”, foi ajustada a programação do *datalogger* e estabelecido o intervalo de

leitura para cinco segundos. Lonas foram colocadas na superfície do solo para evitar a evaporação de água e garantir estabilidade da leitura. Anotado em escala de milivoltagem o ponto zero (tara) da leitura do sistema, deu-se início à calibração. Os sacos foram adicionados, um a um em escala crescente de massa, sobre a superfície do solo, com um intervalo de 15 a 20 segundos entre a adição de um com relação ao outro, sendo as anotações feitas em milivoltagem concomitantemente. Uma vez inserida toda a massa no sistema, os sacos foram retirados em escala decrescente de massa um a um até voltar ao marco zero de leitura do sistema. Estas medidas foram tomadas a fim de evitar variações bruscas de leitura e garantir maior precisão. Foram feitas três repetições e 60 valores de pares de entrada e saída foram anotados para a confecção da curva de calibração do equipamento.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Parâmetros físico-hídricos do solo

Para correta calibração de um lisímetro de pesagem, são necessárias informações precisas da água disponível no perfil do solo, as quais podem ser obtidas por meio da análise dos seus parâmetros físico-hídricos (DOORENBOS e KASSAN, 1979; ALBUQUERQUE e DURÃES, 2008; BERNARDO, SOARES e MANTOVANI, 2013). Neste sentido, o objetivo desta seção é realizar uma análise descritiva desses parâmetros, tais como: granulometria, densidade da partícula, umidade volumétrica (capacidade de campo e ponto de murcha permanente), densidade do solo, porosidade total e umidade gravimétrica. A tabela 2 apresenta os dados relativos à análise granulométrica do solo e a densidade das partículas, os quais são importantes para classificação do mesmo.

**Tabela 2.** Análise granulométrica e densidade da partícula ( $\rho_p$ ) do solo do local de estudo.

Profundidade	Areia	Argila	Silte	Umidade	* $\rho_p$
z (m)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )
0,00 – 0,15	46,9	36,0	17,1	17	2,72
0,15 – 0,30	---	---	---	17	2,74
0,30 – 0,45	---	---	---	16	2,70

\* Densidade das partículas obtida pelo método do balão volumétrico;

Conforme o triângulo textural de solos (FREIRE, 2006), o solo amostrado apresentou teor de 46,9% de areia, 36% de argila e 17,1% de silte, o que o classifica como Latossolo Franco Argilo-Arenoso (textura média). Já a tabela 3 apresenta as

médias dos valores das umidades volumétricas (capacidade de campo e ponto de murcha permanente), da densidade, da porosidade total (em função da umidade de saturação) e o intervalo hídrico da umidade do solo.

**Tabela 3.** Valores médios das umidades volumétricas ( $\theta_{CC}$ ;  $\theta_{PMP}$ ), densidade ( $\rho_s$ ), porosidade total ( $\alpha$ ) e intervalo hídrico da umidade do solo.

Profundidade	$\theta_{CC}$	$\theta_{PMP}$	$\rho_s$	$\alpha$	Intervalo hídrico $\theta_{CC} \rightarrow \theta_{PMP}$
z (m)	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)
0,00 – 0,15	40	18	1,05	47	22
0,15 – 0,30	36	17	1,11	44	18
0,30 – 0,45	30	16	1,53	32	14
Média	35	17	1,23	41	18

Os valores obtidos para densidade do solo variaram de 1,05 g/cm<sup>3</sup> a 1,53 g/cm<sup>3</sup>, com média de 1,23 g/cm<sup>3</sup> e foram considerados adequados de acordo com a literatura especializada para solos de textura média. Solos argilosos apresentam variação de 1,00 g/cm<sup>3</sup> a 1,25 g/cm<sup>3</sup>, enquanto que solos arenosos de 1,25 g/cm<sup>3</sup> a 1,40 g/cm<sup>3</sup> (REICHARDT e TIMM, 2004; AMARO, ASSIS e MOTA, 2008). De acordo com o quadro 1, a menor densidade (1,05 g/cm<sup>3</sup>) obtida para camada de solo de 0 m a 0,15 m deve-se à maior porosidade total, consequência direta da forte presença do sistema radicular neste perfil de solo.

A camada de 0,15 m a 0,30 m apresenta uma estrutura mais frágil com média ou pouca presença do sistema radicular, com densidade de 1,11 g/cm<sup>3</sup>. Já a camada de 0,30 m a 0,45 m apresenta uma

estrutura laminar, indicativa de elevado grau de compactação com tendência de formação de trincas e rachaduras, condizente com uma densidade mais elevada (1,53 g/cm<sup>3</sup>).

Quanto à porosidade total, o intervalo de variação foi de 32% a 47%, com média de 41%, valores também característicos de solos de textura média. Já para o intervalo hídrico da umidade do solo (diferença entre os valores das umidades volumétricas da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente), a variação foi de 14% (camada mais profunda) a 22% (camada superficial).

Portanto, a redução dos valores das umidades volumétricas e da porosidade total à medida que se aprofunda o perfil do solo mostra um bom processo de amostragem. De fato, camadas mais

profundas de solo apresentam maior densidade, sendo um indicativo da coesão da estrutura do mesmo devido à ação de compactação, o que minimiza o intervalo hídrico e, conseqüentemente, a quantidade de água disponível (NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK, 1991; REICHARDT e TIMM, 2004).

## 5.2 Calibração do lisímetro de pesagem

A calibração do lisímetro de pesagem seguiu a metodologia de pares de entrada-saída, simulando ganho (precipitação e irrigação) ou perda hídrica

(evapotranspiração e drenagem). Sacos de rafia, preenchidos com brita nº1, foram colocados em ordem crescente e depois retirados em ordem decrescente de massa, simulando assim as trocas hídricas, as quais são expressas por milímetro equivalente.

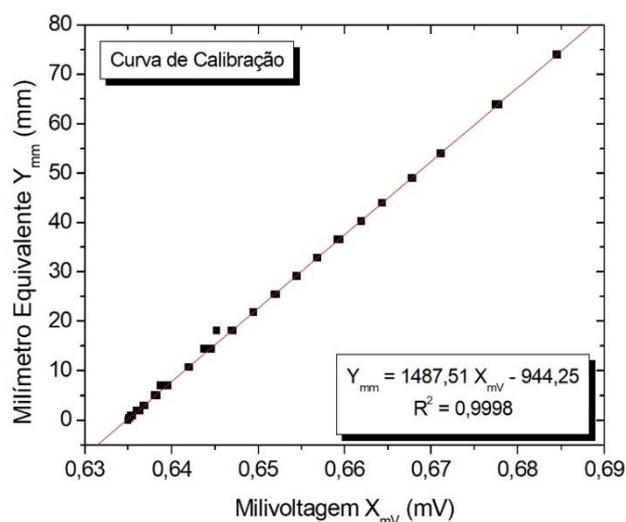
O uso da metodologia de pares de entrada-saída permite verificar a ocorrência de histerese nas células de carga, promovendo maior qualidade e confiabilidade às medidas realizadas (AMARAL et al., 2018). Os dados da fase de calibração de leitura das células de carga dos pares de entrada e saída, em milímetro equivalente, são apresentados na tabela 4.

**Tabela 4.** Calibração do lisímetro de pesagem, pares de entrada e saída.

n	milímetro		1ª Repetição		2ª Repetição		3ª Repetição	
	mm	$\Sigma$ mm	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
	0	0	0,6350	0,6350	0,6350	0,6350	0,6350	0,6350
1	0,5	0,5	0,6352	0,6352	0,6351	0,6352	0,6352	0,6351
2	0,5	1	0,6355	0,6355	0,6355	0,6355	0,6353	0,6355
3	1	2	0,6362	0,6361	0,6363	0,6361	0,6363	0,6360
4	1	3	0,6369	0,6368	0,6369	0,6368	0,6368	0,6367
5	2	5	0,6380	0,6382	0,6383	0,6381	0,6382	0,6382
6	2	7	0,6394	0,6394	0,6396	0,6387	0,6395	0,6395
7	3,7	10,7	0,6421	0,6420	0,6419	0,6419	0,6420	0,6420
8	3,7	14,4	0,6446	0,6444	0,6445	0,6444	0,6437	0,6444
9	3,7	18,1	0,6471	0,6471	0,6452	0,6469	0,6469	0,6470
10	3,7	21,8	0,6494	0,6495	0,6495	0,6494	0,6494	0,6494
11	3,7	25,5	0,6520	0,6521	0,6520	0,6519	0,6520	0,6519
12	3,7	29,2	0,6545	0,6544	0,6545	0,6545	0,6545	0,6545
13	3,7	32,9	0,6569	0,6569	0,6569	0,6569	0,6568	0,6569
14	3,7	36,6	0,6595	0,6594	0,6595	0,6595	0,6593	0,6592
15	3,7	40,3	0,6620	0,6619	0,6619	0,6619	0,6619	0,6619
16	3,7	44	0,6644	0,6643	0,6644	0,6644	0,6643	0,6643
17	5	49	0,6678	0,6677	0,6679	0,6678	0,6678	0,6677
18	5	54	0,6712	0,6712	0,6711	0,6711	0,6711	0,6711
19	10	64	0,6779	0,6778	0,6776	0,6775	0,6778	0,6777
20	10	74	0,6846	0,6846	0,6846	0,6846	0,6845	0,6845

A Figura 4 mostra a relação linear entre os milímetros equivalentes e a voltagem das células de carga, bem como a

equação de regressão linear entre os dois parâmetros (Equação 1).

**Figura 4.** Curva de calibração das células de carga do lisímetro de pesagem.

Os dados foram agrupados e plotados num diagrama X-Y, mostrando comportamento linear, tal como é possível de se observar na equação obtida e apresentada no gráfico. Sendo  $Y_{mm}$  é o valor do milímetro equivalente e  $X_{mV}$  o valor da milivoltagem medida nas células de carga do lisímetro de pesagem.

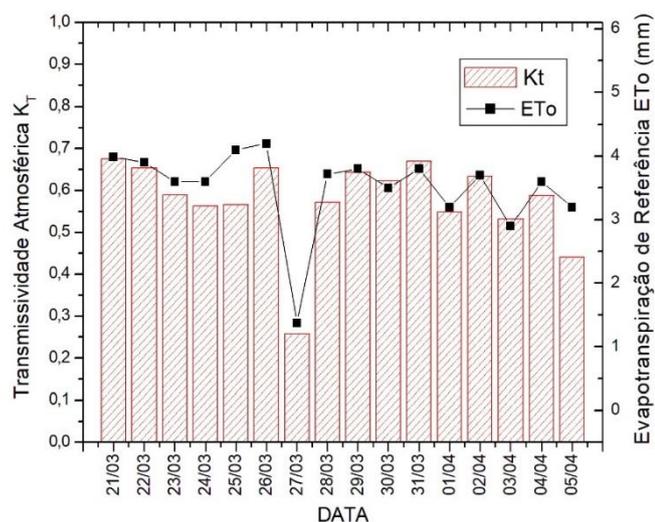
Pela Figura 4, o bom ajuste linear verificado entre os parâmetros é comprovado pelo elevado valor do coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,9998$ ). Pela disposição dos pontos verifica-se também que não ocorre histerese na leitura das células de carga. O coeficiente linear de  $-944,25$  mm representa a tara do sistema (solo seco, caixa d'água e chapa de ferro) e, segundo a relação das áreas, como 1 mm representa 2 kg de massa, logo o sistema apresenta aproximadamente 1888,5 kg. Já o coeficiente angular de 1487,5 mm/mV expressa a taxa de variação dos milímetros equivalente em função da milivoltagem. Em termos práticos significa que, para cada variação de 0,01 mV há uma variação de aproximadamente 14,9 mm.

### 5.3 Validação

Para validar o sistema de medida da evapotranspiração de referência, via lisímetro de pesagem, primeiramente foram considerados na análise uma sequência de dias em condições ideais de leitura, ou seja, com ausência de precipitação, ausência de drenagem e, preferencialmente, em dias de céu aberto (BLONQUIST JR, ALLEN e BUGBEE, 2010; ANAPALLI et al., 2018). O intervalo selecionado foi de 21/03/2017 a 05/04/2017. Apesar dos dias apresentarem ausência de precipitação, outro fator de relevância na análise da evapotranspiração é a nebulosidade (ALLEN et al., 1998; ESCOBEDO et al., 2009; BLONQUIST JR, ALLEN e BUGBEE, 2010), a qual pode ser expressa pela transmissividade atmosférica  $K_T$  (razão entre as irradiações solares global e extraterrestre). De acordo com ESCOBEDO et al. (2009), a transmissividade atmosférica  $K_T$  é utilizada para classificação da cobertura de céu: céu nublado ( $0 \leq K_T < 0,35$ ); céu parcialmente nublado ( $0,35 \leq K_T < 0,55$ ); céu parcialmente aberto ( $0,55 \leq K_T < 0,65$ ); e céu aberto ( $0,65 \leq K_T < 1$ ). A Figura 5 mostra a variação temporal da

transmissividade atmosférica  $K_T$  e a evapotranspiração de referência  $ET_0$  para o período considerado.

**Figura 5.** Valores da transmissividade atmosférica  $K_T$  e da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) medida pelo lisímetro de pesagem para o local de estudo (período de 21/03/2017 a 05/04/2017).



Pela Figura 5 é possível verificar uma associação entre os valores da transmissividade atmosférica e a evapotranspiração de referência. Entre os dias 21/03/17 a 25/03/17, para uma transmissividade atmosférica elevada em torno de 65%, observa-se uma evapotranspiração média de 3,8 mm, o que representa uma condição de máxima demanda evaporativa atmosférica para essa época do ano. No entanto, no dia 26/03, com aumento da nebulosidade ( $K_T \sim 0,25$ ), observa-se uma diminuição da evapotranspiração ( $ET_0 \sim 1,2$  mm), indicando que o lisímetro de pesagem foi sensível às mudanças físicas do ambiente. De certo, as nuvens servem como elemento bloqueador da radiação solar, o que interfere no fluxo radiativo que incide em superfície. Logo, uma menor disponibilidade de energia (calor latente de evaporação) no ambiente acarreta numa redução dos processos fisiológicos da planta, culminando numa diminuição de

suas taxas de evapotranspiração (BLONQUIST JR, ALLEN e BUGBEE, 2010; ANAPALLI et al., 2018). Por fim, o valor médio obtido de 3,5 mm para o período considerado está dentro da faixa de valores preconizados pela FAO (ALLEN et al., 1998) para o clima da região de estudo.

## 6 CONCLUSÃO

Estes resultados apresentados de resposta da sensibilidade da leitura do sistema são indicativos da eficácia da metodologia utilizada. Uma medida com a qualidade apresentada é dependente não só de excelentes medidas construtivas no que diz respeito principalmente do aprumo da estrutura como um todo, mas também, da estrutura de suporte que possui a principal função de distribuir igualmente o peso do tanque para os sensores.

Quanto aos parâmetros físicos do solo, a metodologia aplicada (com o uso de

blocos entalhados) apresentou-se amplamente funcional em casos onde não seja possível retirar o monólito inteiro pelo uso de maquinário. O valor médio de 3,5 mm/dia, também é um bom indicativo da qualidade e precisão de medida do

equipamento, pois, já é equiparável a modelos clássicos de estimativa que muitas vezes são exigentes de dados meteorológicos em larga escala temporal para a obtenção de resultados representativos.

## 7 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2008.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56)

AMARAL, A. M.; F. R, FILHO.; VELLAME, L. M.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; SANTOS, L. N. S. Uncertainty of weight measuring systems applied to weighing lysimeters. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 145, p. 208-216, 2018.

AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do solo: Conceitos e aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008.

ANAPALLI, S. S.; GREEN, T. R.; REDDY, K. N.; GOWDA, P. H.; SUI, R.; FISHER, D. K.; MOORHEAD, J. E.; MAREK, G. W. Application of an energy balance method for estimating evapotranspiration in cropping systems. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 204, p. 107-117, 2018.

BERNARDO S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2013.

BLONQUIST JR, J. M.; ALLEN, R. G.; BUGBEE, B. An evaluation of the net radiation sub-model in the ASCE standardized reference evapotranspiration equation: Implications for evapotranspiration prediction. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n.7, p. 1026-1038, 2010.

CAMPECHE, L. F. M. S.; AGUIAR NETTO, A. O.; 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**, Campina Grande, v.15, n.5, p.519-525, 2011.

CARVALHO, H. P.; MELO, B.; ATARASSI, R. T.; CAMARGO, R.; SILVA, da. C. R.; MORAES, M. R. B. Desenvolvimento de lisímetros de pesagem na cultura do café. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.29, n.6, p. 1750-1760, 2013.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, E.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. R.; CODATO, G. MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover. **Renewable Energy**, Oxford, v. 99, p. 754-763, 2016.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos de água sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. (Estudio FAO Riego Y Drenaje)  
EMBRAPRA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. **Renewable Energy**, Oxford, v. 36, n. 1, p. 169-178, 2011.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, Oxford, v. 86, n. 3, p. 299-309, 2009.

FREIRE, O. **Solos das regiões tropicais**. Botucatu: FEPAF, 2006.

HOFFMANN, M.; SCHWARTENGRÄBER, R.; WESSOLEK, G.; PETERS, A. Comparison of simple rain gauge measurements with precision lysimeter data. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 174-175, p. 120-123, 2016.

<http://estacaolageado.fca.unesp.br/index.html>

JIA, X.; DUKES, M. D.; JACOBS, J. M.; IRMAK, S. Weighing Lysimeters for Evapotranspiration Research in a Humid Environment. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, vol. 49(2), p. 401-412, 2006.

KOHFAHL, C.; MOLANO-LENO, L.; MARTÍNEZ, G.; VANDERLINDEN, K.; GUARDIOLA-ALBERT, C.; MORENO, L. Determining groundwater recharge and vapor flow in dune sediments using a weighable precision meteorological lysimeter. **Science of the total environment**, Amsterdam, v. 656, p. 550-557, 2019.

LIU, X.; XU, C.; ZHONG, X.; LI, Y.; YUAN, X.; CAO, J. Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 184, p. 145-155, 2017.

MARTÍ, P.; GONZÁLES-ALTOZANO, P.; LÓPEZ-URREA, R.; MANCHA, L. A.; SHIRI, J. Modeling reference evapotranspiration with calculated targets. Assessment and implications. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 149, p. 81-90, 2015.

PETERS, A.; GROH, J.; SCHRADER, F.; DURNER, W.; VEREECKEN, H.; PÜTZ, T. Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 549, p. 731-740, 2017.

RAFI, Z.; MERLIN, O.; LE DANTEC, V.; KHABBA, S.; MORDELET, P.; ER-RAKI, S.; AMAZIRH, A.; OLIVERA-GUERRA, L.; HSSAINE, B. A.; SIMONNEAUX, V.; EZZAHAR, J.; FERRER, F. Partitioning evapotranspiration of a drip-irrigated wheat crop: Intercomparing eddy covariance-, sap flow-, lysimeter- and FAO-based methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 265, p. 310-326, 2019.

RAPHAEL, O. D.; OGEDENGBE, K.; FASINMIRIN, J. T.; OKUNADE, D.; AKANDE, I.; GBADAMOSI, A. Growth-stage-specific crop coefficient and consumptive use of *Capsicum chinense* using hydraulic weighing lysimeter. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 203, p. 179-185, 2018.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 1ª ed, Barueri : Manole, 2004.

SCHMIDT, C. D. S.; PEREIRA, F. A. C. de.; OLIVEIRA, A. S. de.; GOMES JÚNIOR, J. F.; VELLAME, L. M. Design, installation, and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies. **Water resources and Irrigation Management**, Campina Grande, v.2, n.2, p.77-85, 2013.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R. **Meteorologia Agrícola**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2007.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **National Engineering Handbook**. Washington, 2. ed. Soil Conservation Service, 1991.