

XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

CALIBRAÇÃO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM HIDRÁULICA AUTOMATIZADO PARA A ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Antonio Henrique C. do Nascimento¹; Nadielan da S. Lima²; Suzana M. G. L. Montenegro³; João A. C. de Albuquerque Filho⁴; Ênio F. F. e Silva⁵ & Abelardo A. de A. Montenegro⁶

RESUMO – Este trabalho objetivou calibrar um lisímetro de pesagem hidráulica bem como testar um sensor de pressão hidrostática na automação das leituras de evapotranspiração. O lisímetro foi composto de um tanque interno em fibra de vidro tipo caixa d'água com borda circular possuindo área de 1,32 m² e volume de 1 m³. As leituras foram obtidas por dois sistemas: pistão de mercúrio (padrão) e por um sensor de pressão hidrostática para a automação através do coletor de dados tipo datalogger. A calibração do lisímetro consistiu na adição e retirada de massas padrão equivalente a um milímetro de lâmina de água, procedimento que foi realizado tanto parte central como nos quatro quadrantes do lisímetro. Os resultados mostram que a relação entre o acréscimo e decréscimo das massas padrão e a leitura registrada tanto no manômetro quanto no sensor de pressão, foram altamente lineares (R² de 0,999) em todos os quadrantes e parte central do lisímetro. A precisão do lisímetro de pesagem foi de 0,135 mm de ETo registrado pelo manômetro e de até 0,061 mm de ETo registrado pelo sensor, indicando que o sensor de pressão hidrostática foi mais sensível as variações de massas do lisímetro.

Palavras chave – Lisimetria, Coeficiente de calibração, Sensor de pressão hidrostática

ABSTRACT – This study aimed to calibrate a hydraulic weighing lysimeter test and a hydrostatic pressure sensor readings in the automation of evapotranspiration. The lysimeter consisted of an inner tank in fiberglass water tank type with circular edge having area of 1.32 m² and a volume of 1 m³. The readings were obtained by two systems: piston of mercury (standard) and a hydrostatic pressure sensor for automation through data logger datalogger type. Calibration of the lysimeter consisted in the addition and removal of standard mass equivalent to one millimeter sheet of water, which procedure was performed in both central and the four quadrants of the lysimeter. The results show that the relationship between increasing and decreasing the mass and the standard read and recorded in both the gauge pressure sensor were highly linear (R² 0.999) in all parts and the central part of the lysimeter. The accuracy of the weighing lysimeter was 0.135 mm ETo registered by pressure gauge and up to 0.061 mm ETo registered by the sensor indicating that the hydrostatic pressure sensor is more sensitive to variations of masses of the lysimeter.

Keywords – Lysimeters, Calibration coefficient, Hydrostatic pressure sensor

1) Doutorando em Engenharia agrícola, Depto de Tecnologia Rural, UFRPE, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos- CEP: 52171-900 - Recife/PE e-mail: tonyagronomia@gmail.com.

2) Doutorando em Engenharia agrícola, Depto de Tecnologia Rural, UFRPE, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos- CEP: 52171-900 - Recife/PE e-mail: nadielanlima@hotmail.com.

3) Prof. Associado, Universidade Federal de Pernambuco, Depto de Engenharia Civil, UFPE, Rua Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE - CEP: 50670-901 | Fone PABX: (81) 2126.8000 e-mail: suzanam@pq.cnpq.br

4) Prof. Associado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Depto de Tecnologia Rural, UFRPE, Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos- CEP: 52171-900 - Recife/PE e-mail: nadielanlima@hotmail.com. e-mail: jaudifax@otr.ufrpe.br

5) Prof. Associado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Depto de Tecnologia Rural, UFRPE, Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos- CEP: 52171-900 - Recife/PE e-mail: enio.silva@otr.ufrpe.br

6) Prof. Associado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Depto de Tecnologia Rural, UFRPE, Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos- CEP: 52171-900 - Recife/PE e-mail: abelardo.montenegro@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

A evapotranspiração de referência tem sido intensamente estudada por ser de fundamental importância no manejo da irrigação e na caracterização da demanda hídrica atmosférica (Campeche et al., 2011), tanto que tem-se trabalhado até com programas computacionais para monitoramento e caracterização da evapotranspiração (Silva et al., 2005).

Dentre os principais métodos de determinação da evapotranspiração, os lisímetros são os principais equipamentos, pois promovem leituras de forma direta e precisas. Isso se explica pelo controle mais rigoroso e adequado das condições do sistema solo-água-plantas. Segundo Vaughan et al. (2007) os lisímetros realizam medições diretas das perdas de água da superfície do solo e vegetação para a atmosfera e, portanto, fornecem os dados básicos para a validação de outros modelos de estimativa da evapotranspiração.

Para o correto funcionamento, os lisímetros de pesagem devem ser calibrados, sendo a calibração um dos principais procedimentos antes do funcionamento do lisímetro. Esta é realizada pela adição e retirada de pesos previamente conhecidos e tem por finalidade estabelecer uma relação entre o sinal de saída da célula de carga e a massa do sistema, verificando assim a linearidade e histerese da célula de carga, devendo ser preferencialmente calibrados *in situ*, nas mesmas condições climáticas do seu funcionamento (CAMPECHE, 2002). Faria et al. (2006) construíram uma bateria de dez lisímetros de pesagem e realizaram testes de calibração medindo a capacidade que estes tinham em responder variações de massa de água em condições de campo. A lisimetria de pesagem tem sido considerada a técnica padrão na determinação da evapotranspiração de cultura e de referência em diversos trabalhos (MENDONÇA et al., 2003; LÓPEZ-URREA et al., 2006; VAUGHAN et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2008, CAMPECHE et al., 2011). Conforme Campeche, (2002), esses equipamentos quando bem desenhados, calibrados e manejados medem precisamente e representativamente a evapotranspiração das culturas.

Os lisímetros de pesagem hidráulica, em sua maioria, são compostos por sistema de leitura com pistão de mercúrio (SILVA, 2000; SILVA et al., 2005; SANTOS et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2008), associando assim, redução de custos de construção e precisão nas leituras, entretanto geram problemas como desgaste do material ao longo do tempo e ainda gera problemas operacionais, uma vez que as leituras devem ser realizadas diariamente e pelo mesmo observador. Com o advento da microeletrônica, hoje é possível a automação dessas leituras, através de sensores que medem a pressão exercida pelo fluido do interior dos transdutores hidráulicos e armazenam esses dados em microprocessadores. De acordo com Campeche, (2002), a difusão e a disponibilidade comercial de sensores eletrônicos é um fator positivo, pois permitiram o uso cada vez mais comum e freqüente desses equipamentos, antes tido como equipamentos caros.

Baseado no exposto, este trabalho teve como objetivo a calibração de um lisímetro de pesagem hidráulica, bem como avaliar o funcionamento de um sensor eletrônico de pressão hidrostática, para a automação das leituras da evapotranspiração.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O trabalho foi conduzido na Estação Experimental de Agricultura Irrigada Prof. Ronaldo Freire de Moura, pertencente ao Campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE em Recife – PE, 8°01'05" de latitude sul e 34°56'48" de longitude oeste, e altitude de 6,4m. As médias anuais de umidade relativa de 79,8%, precipitação de 2417 mm, temperatura 25,5 °C (INMET, 2009). O solo do lisímetro foi classificado como Espodossolo Ferrihumilúvico Órticodúrico, Arênico, fase relevo plano, de acordo com a Embrapa (1999). As características físicas do solo estão descritas na Tabela 1. A metodologia para a determinação granulométrica e densidade do solo foi conforme a Embrapa (1997)

Tabela 1. Caracterização física das respectivas camadas de solo dos lisímetros.

Amostras - camadas (cm)	Granulometria (%)			Densidade (g cm ⁻³)	
	Areia	Silte	Argila	Global	Partícula
0 – 20	93,73	4,26	2,01	1,65	2,53
20 – 40	95,03	3,46	1,50	1,63	2,53
40 – 60	94,60	4,39	1,00	1,68	2,57

O lisímetro

O lisímetro é do tipo pesagem hidráulica e constituído de um reservatório em fibra de vidro com área superficial de 1,32 m², profundidade de 0,80 m e volume de 1 m³. O conjunto lisimétricofoicomposto dos seguintes componentes: sistema de pesagem hidráulica, sistema transmissor de pressão e sistema de leitura conforme a Figura 1.

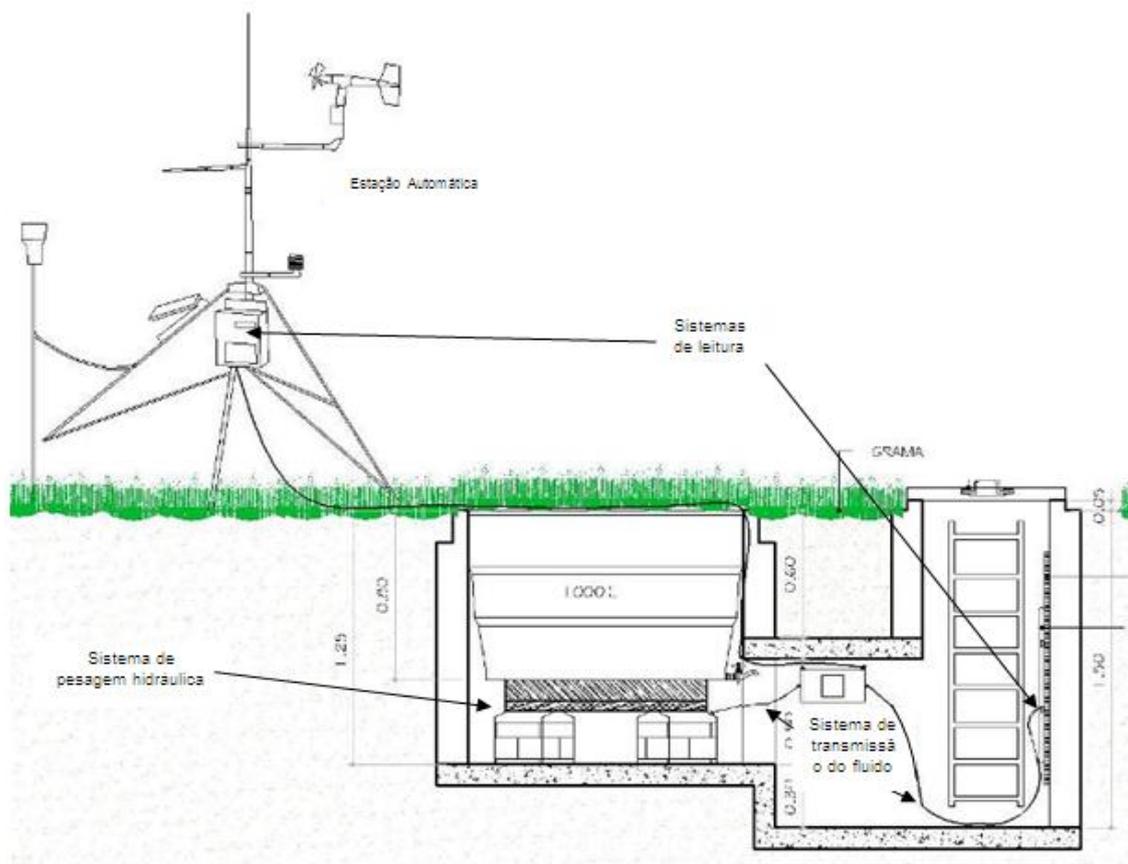


Figura 1. Vista lateral do lisímetro de pesagem hidráulica com seus componentes principais.

O sistema de leitura é composto por dois sistemas independentes: manômetro com pistão de mercúrio e sensor de pressão hidrostática. O mecanismo de leitura do manômetro foi baseado no desenvolvido por Oliveira (2007). O sensor de pressão hidrostática modelo MPX5100GP da Motorola, possui sensibilidade de 0,01 mV e capacidade de leituras de até 10 m.c.a (Figura 2). Este foi conectado a um microprocessador eletrônico tipo datalogger, modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, EUA), já situado na estação meteorológica, em que este armazena os sinais elétricos em mV.



Figura 2. Detalhe do sensor de pressão hidrostática conectado ao microprocessador data logger.

Ensaio de calibração

Antecedente a calibração procedeu-se a determinação do volume ideal do fluido (água) nos travesséis hidráulicos, extraindo-se volumes conhecidos até atingir uma superfície de contato entre os travesséis e a base o mais constante possível (SILVA, 2000; OLIVEIRA et al., 2008). Dessa forma o volume ideal do fluido é aquele correspondente ao ponto mínimo da equação polinomial encontrada na equação de regressão.

Os ensaios de calibração foram realizados nos dias 6 e 7 de fevereiro de 2012 de acordo com a metodologia apresentada por Campeche (2002) e Oliveira (2007). Conforme indica Faria et al. (2006) os ensaios de calibração foram procedidos em campo através da adição e retirada de massas conhecidas (Figura 3).

O processo de calibração foi dividido em duas etapas. A primeira etapa ocorreu no centro do lisímetro, em que foram adicionados e retirados 50 sacos de brita com peso de 1,3273 kg, representando 1,0 mm de lâmina evapotranspirada. Na segunda a superfície do lisímetro foi dividida em quatro quadrantes, onde foram adicionadas e retiradas as 25 massas padrão de mesma de mesma equivalência em cada quadrante. Esta última etapa foi realizada com o intuito de verificar a estabilidade do equipamento através do erro relativo médio posicional. Assim foi conseguido o coeficiente de calibração (k), que é a diferença da leitura em mm na régua do manômetro ou em mV no registrador eletrônico, dividido pela massa total de carregamento ou descarregamento colocada sobre a superfície do lisímetro, expresso por milímetros de lâmina de água. Os dados das calibrações foram submetidos a análise de regressão e correlação para verificar a relação existente entre os dois sistemas de leitura e verificar a linearidade de carregamento e descarregamento.,



Figura 3. Ensaio de calibração com carregamento e descarregamento de massas padrão no centro e nos quadrantes do lisímetro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conjunto de pontos obtidos pela variação de pressão em relação ao volume acumulado se ajustou bem ao modelo polinomial de 2ª ordem, demonstrado pelo elevado valor do coeficiente de determinação (R^2) de 0,9968 (Figura 4). O ponto mínimo da equação foi de 4 litros, então, considerando que o conjunto dos três travesseiros foram inicialmente preenchidos com 20 litros de água, o volume final ideal nos travesseiros foi de $(20 - 4 = 16 \text{ L})$ 16 litros, conforme indicado pelo modelo.

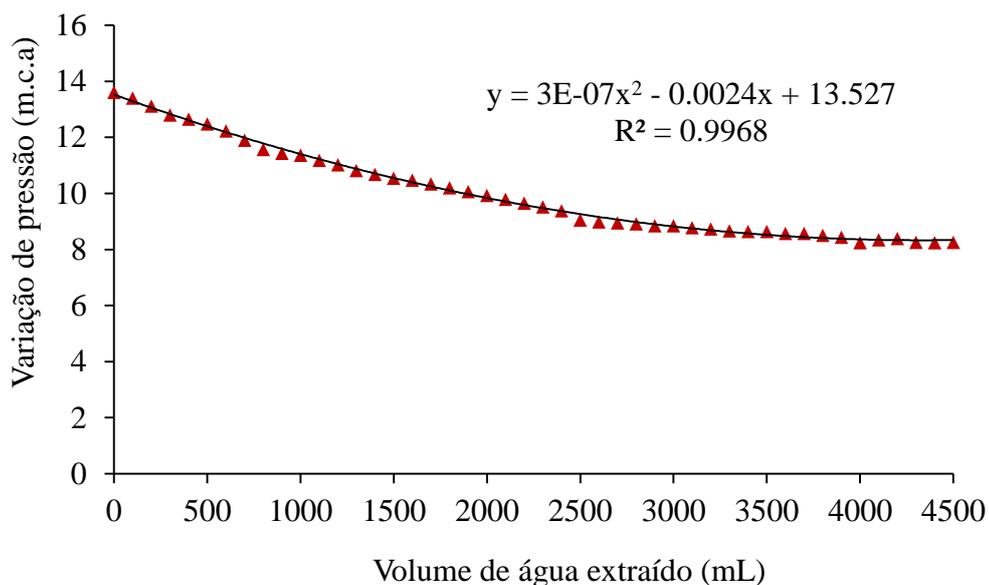
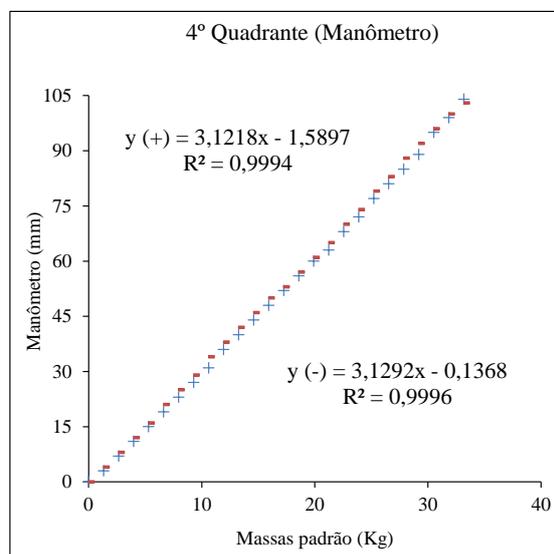
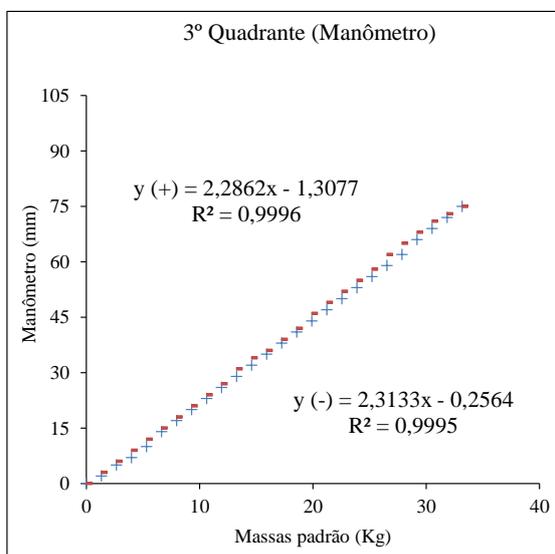
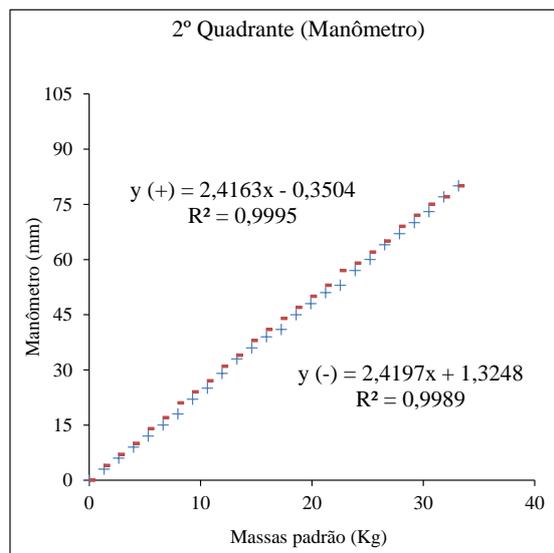
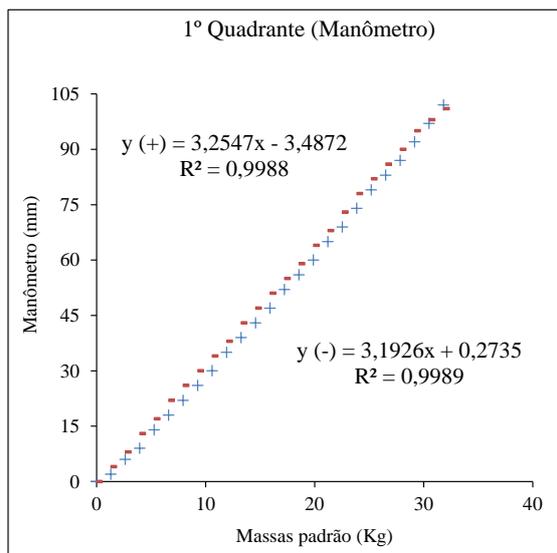


Figura 4. Variação de pressões nos travesseiros hidráulicos, em consequência das extrações sucessivas de volumes constantes de 100 mL de água.

Os resultados das calibrações com leituras no manômetro de mercúrio e no sensor de pressão são observados nas figuras 5 e 6, respectivamente. Podemos observar que tanto o manômetro como o sensor obteve comportamento linear, resultando em coeficientes de determinação (R^2) de 0,999, tanto no centro como em todos os quadrantes, para carregamento e descarregamento de massas padrão, indicando que as respostas nos sistemas de leituras do lisímetro se ajustaram bem ao modelo de regressão linear.



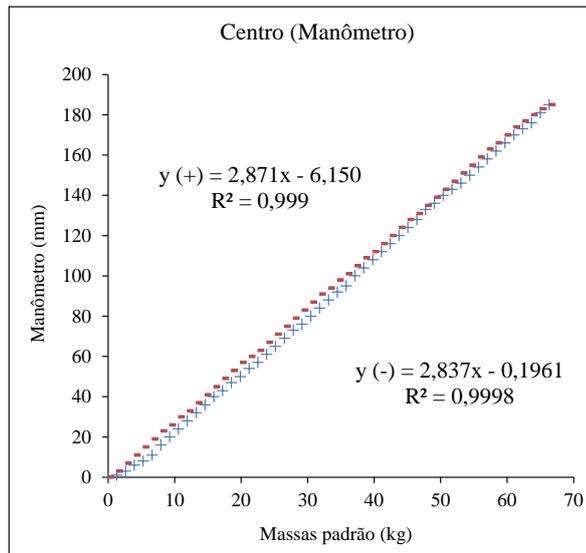
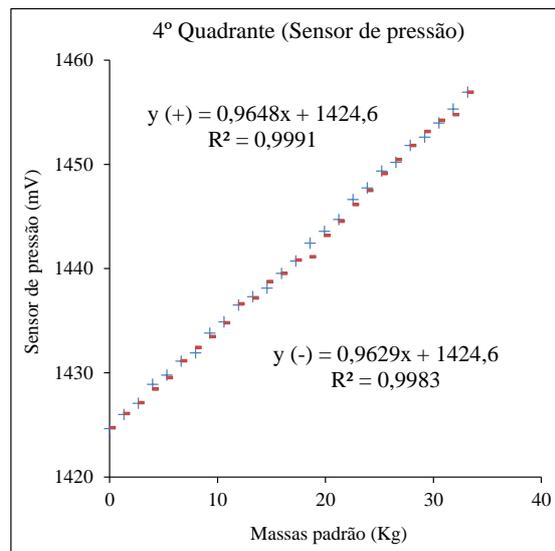
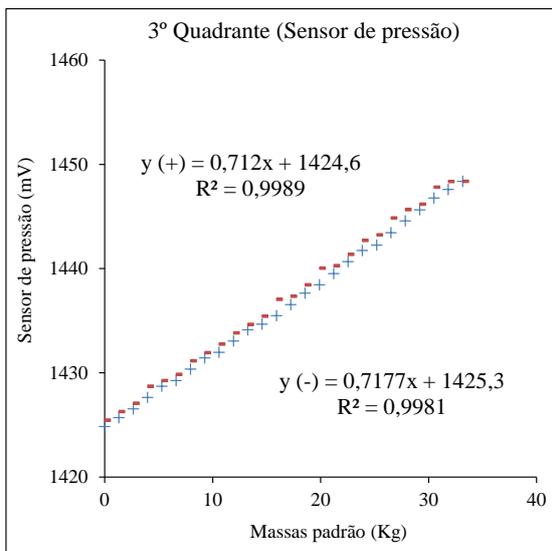
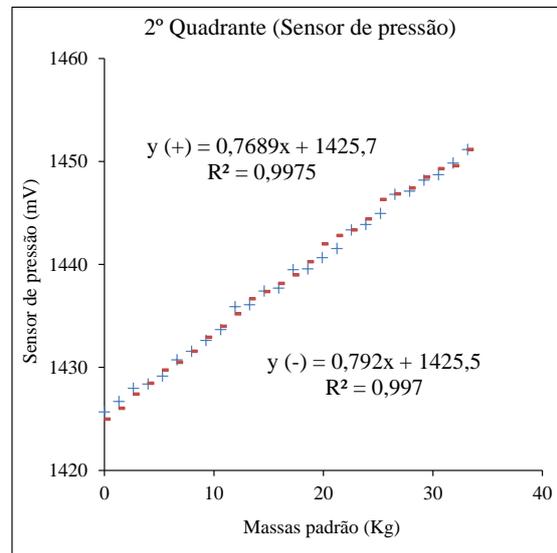
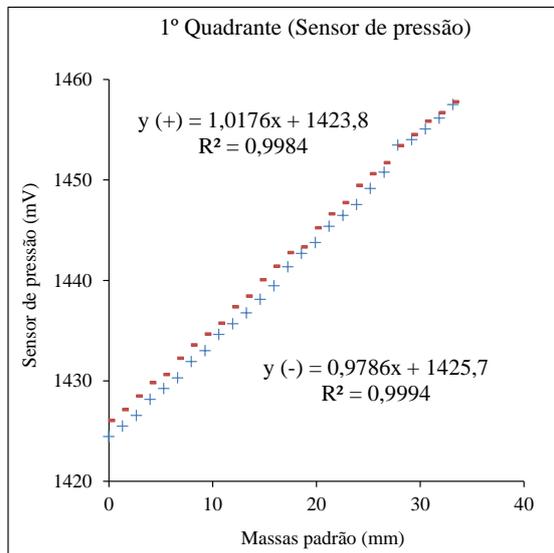


Figura 5. Curvas de calibração entre leituras observadas no manômetro e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) nos quadrantes e centro do lisímetro.



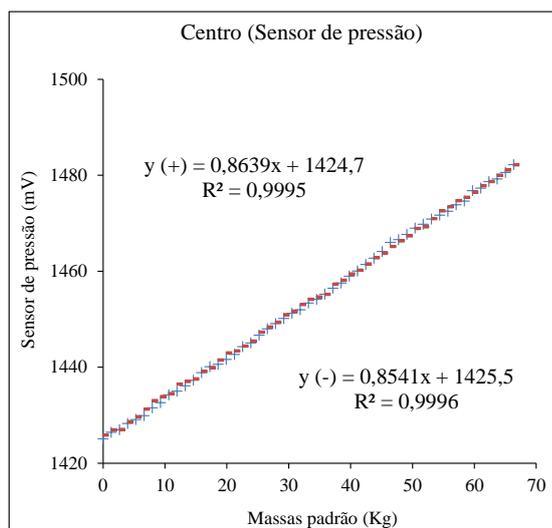


Figura 6. Curvas de calibração entre leituras observadas do sensor de pressão e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) nos quadrantes e centro do lisímetro.

Observa-se que os coeficientes de calibração (k) obtidos no manômetro variaram de 2,26 a 3,19 mm de leitura por peso adicionado ou retirado. No sensor de pressão este mesmo coeficiente variou de 0,70 a 1,00 mV de leitura por peso adicionado ou retirado (Tabela 2). O coeficiente de calibração (k) final para o lisímetro registrado no manômetro foi de 2,7882 mm kg⁻¹ ou 0,358 kg mm⁻¹, ou ainda que a variação de 1 mm de leitura no manômetro corresponde a adição ou retirada de 0,358 litros de água. No sensor de pressão o coeficiente de calibração foi de 0,8606 mV kg⁻¹ ou 1,161 kg mV⁻¹, ou seja, a cada mV de leitura no sensor de pressão é correspondente a 1,161 litros de água.

Tabela 2. Resumo dos coeficientes de calibração (k) e erro médio posicional do lisímetro de pesagem hidráulica.

Quadrantes do lisímetro	Coeficientes de calibração (k) (mm kg ⁻¹)	
	Manômetro	Sensor de pressão
1	3,1952	1,0047
2	2,4115	0,7891
3	2,2607	0,7093
4	3,1349	0,9727
Média dos quadrantes	2,7506	0,8690
Centro do lisímetro	2,7882	0,8606
Erro médio posicional	1,34 %	0,97 %

Os erros médios posicionais indicados na Tabela 2, indicam que o lisímetro alcançou uma estabilidade melhor, e conseqüentemente leituras mais consistentes, que os lisímetros construídos por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000), Santos (2004) e Oliveira et al. (2008) com erro médio posicional de 4%; 3,52%; 2,11%; 3,93% e 2,31 %; respectivamente. Black et al. (1968) citados por Silva et al. (2003), recomendam que o limite tolerável deve variar até 10 % de erro médio posicional.

A resolução do lisímetro foi estabelecida pela razão entre o menor valor de leitura e o fator de conversão resultando em precisões de até 0,135 mm de ETo no manômetro e de até 0,061 mm de ETo no sensor de pressão. Esta resolução manométrica do lisímetro foi compatível com as precisões encontradas por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000), Santos (2004) Silva (2005) e Oliveira (2007), respectivamente de 0,21; 0,29; 0,13; 0,10; 0,24 e 0,15 mm. É importante salientar que o sensor de pressão alcançou uma resolução semelhante aos lisímetros de pesagem com células de carga eletrônica construído por Campeche (2002) e Bomfim et al. (2004) que foram de 0,04 e 0,18 mm, respectivamente.

Os resultados dos ensaios de calibração permitiram obter a correlação entre os dados lidos no manômetro e no sensor de pressão, como mostra a Figura 8. Esta demonstrou que o modelo de regressão linear descreveu adequadamente a correlação entre os dois sistemas de leitura. O alto valor do coeficiente de determinação (0,9986) evidencia o comportamento linear existente entre os dois leitores testados. Silva (2005) conseguiu coeficientes de determinação similares ao presente estudo e alta correlação, quando comparou diferentes sistemas de leituras, na ocasião foi comparada leituras no manômetro, em célula de carga e em um transdutor de pressão hidrostática.

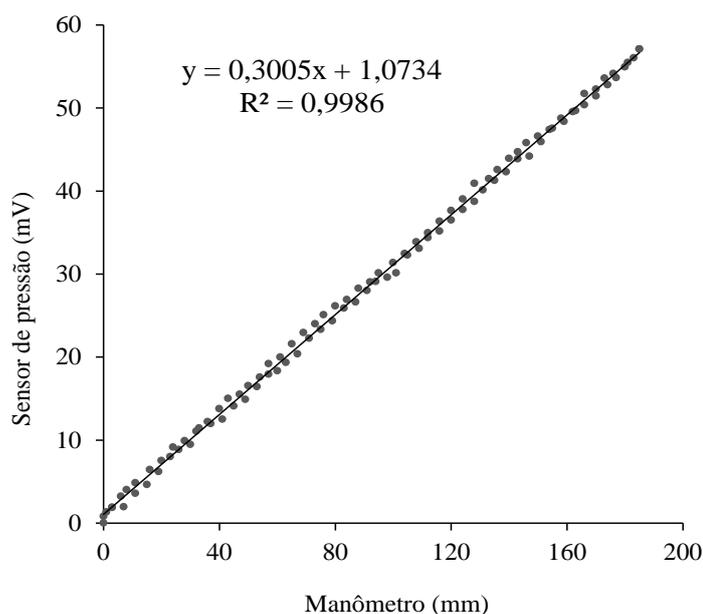


Figura 8. Correlação existente entre os valores observados no sensor de pressão e no manômetro de mercúrio para carregamento e descarregamento das massas padrão.

CONCLUSÕES

As calibrações produziram respostas altamente lineares para todos os quadrantes e centro do lisímetro, sendo encontrados coeficientes de determinação de 0,999, tanto nas leituras no manômetro quanto no sensor de pressão, validando esta metodologia de calibração.

O lisímetro teve sensibilidade de registrar lâminas de 0,13 mm de ETono manômetro e de até 0,06 mm de ETono sensor de pressão.

A automação das leituras através de sensores de pressão hidrostática, em lisímetros com mecanismo de pesagem hidráulica, é recomendável, pois este foi sensível em medir variações de pesos com melhor precisão que o manômetro de mercúrio.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à UFRPE e UFPE pela colaboração durante a construção do lisímetro, ao CT-HIDRO/CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado e a FINEP pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPECHE, L. F. S. M. Construção, calibração e análise de desenvolvimento de lisímetro de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida “Tahiti” (*Citruslatifolia*Tam.). Piracicaba: ESALQ/USP, Tese Doutorado, 64p. 2002.

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.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro.412p. 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de métodos de análise de solo. 2º ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento,p. 212. 1997.

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, p.237-242, 2006.

FLUMIGNAN, D.L. Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 200 p.2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. INMET-CLIMA. Disponível em:<<http://www.inmet.gov.br/html/clima.php>> . Acesso em: 26 ago. 2009.

LÓPEZ-URREA, R.; OLALLA, F. M. S.; FABEIRO, C.; MORATALLA, A. Testing evapotranspiration equation using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, v.85, p.15-26, 2006.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, p.275-279, 2003.

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.

SANTOS, F.X. Lisímetro de pesagem hidráulica e evapotranspiração de referência por diversos métodos no Agreste Pernambucano. Dissertação (Mestrado) em Agronomia – Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife – Pernambuco, 74 p. 2004.

SILVA, T.J.A. Aplicação de evapotranspirômetro de pesagem no estudo de relações entre a evapotranspiração de referência medida e estimada no semi-árido Nordeste. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 97p.2000. Dissertação de Mestrado.

SILVA, V.P.R.; BELO FILHO, A.F.; SILVA, B.B.; CAMPOS, J.H.B.C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.9, n.4, p. 547-553, 2005.

VAUGHAN, P. J.; TROUT, T. J.; AYARS, J. E. A processing method for weighing lysimeter data and comparison to micrometeorological ET_o predictions. *Agricultural Water Management*, v.88, p.141-146, 2007.