

DESEMPENHO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM HIDRÁULICA COM SENSOR DE PRESSÃO HIDROSTÁTICA E SISTEMA MANOMÉTRICO

NADIELAN DA SILVA LIMA¹; SUZANA M. G. L. MONTENEGRO²; JOÃO A. C. ALBUQUERQUE FILHO¹; ÊNIO F. FRANÇA E SILVA¹; ABELARDO A. A. MONTENEGRO¹ e ANTÔNIO H. C. NASCIMENTO¹

¹Departamento de Tecnologia Rural/UFRPE. R. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP 52.171-900, Recife, PE. Fone: (81) 3320-6264. E-mails: nadielanlima@hotmail.com; jaudifax@dtr.ufrpe.br; enio.silva@pq.cnpq.br; abelardo.montenegro@yahoo.com.br; tonyagronomia@yahoo.com.br;²Departamento de Engenharia Civil/UFRPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n. Cidade Universitária. CEP 50.740-530. Recife, PE. Fone: (81) 2126 7216. E-mail: suzanam@ufpe.br

1 RESUMO

Os lisímetros de pesagem hidráulica têm sido difundidos e aperfeiçoados para minimizar os problemas operacionais e apresentar boa precisão para detecção de mudanças de massa de água em condições de campo. Assim, objetivou-se construir, instalar e calibrar um lisímetro de pesagem hidráulica com um sensor de pressão hidrostática para automação das leituras, e analisar seu desempenho comparado ao tradicional sistema de leitura com pistão de mercúrio. O lisímetro constitui-se de um tanque interno em fibra de vidro com borda circular, possuindo área de 1,32 m² e volume de 1 m³, e um sistema de pesagem com três travessieiros hidráulicos flexíveis de butil-nylon de 100 mm de diâmetro. A calibração foi conduzida em recipientes de massa conhecida, representando uma faixa de variação de massa equivalente a 50 mm. Os resultados indicaram elevada linearidade entre as variações de massa e as respectivas leituras no sensor e manômetro. A precisão foi de 0,135 mm de ETo registrada pelo manômetro e de até 0,061 mm de ETo registrada pelo sensor, indicando que o sensor de pressão foi mais sensível as variações de massa do lisímetro. Os erros associados à histerese, estimativas de variação de massa e o erro médio posicional foram mais elevados no sistema manométrico.

Palavras-chave: evapotranspiração, coeficiente de calibração, lisimetria.

LIMA, N. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C.; SILVA, E. F. F.; MONTENEGRO, A. A. A.; NASCIMENTO, A. H. C.

PERFORMANCE OF A HYDRAULIC WEIGHING LYSIMETER WITH A HYDROSTATIC PRESSURE SENSOR AND A MANOMETRIC SYSTEM

2 ABSTRACT

Hydraulic weighing lysimeters have been widely used and improved to minimize operational problems, and provide good accuracy for detection of changes in soil water content under field conditions. The objectives of this study were to construct, install and calibrate a hydraulic weighing lysimeter with a hydrostatic pressure sensor for automation of readings, and analyze its performance as compared to the traditional reading system with mercury

piston. The lysimeter consisted of a tank with internal glass fiber, circular edge area of 1.32 m² and volume of 1 m³, and a weighing system with three hydraulic flexible pillow of butyl nylon 100 mm in diameter.

Calibration was conducted in known mass containers, which represented a range of mass variation of 50 mm. The results showed high linearity between mass variation and the sensor and manometer readings. Accuracy of 0.135 mm ETo recorded by the pressure gauge and up to 0.061 mm ETo by the sensor showed that the pressure sensor is more sensitive to mass variations than the lysimeter. Errors associated with hysteresis, estimates of mass variation and the average positional error were higher in the manometric system.

Keywords: evapotranspiration, calibration coefficient, lysimeters.

3 INTRODUÇÃO

O termo evapotranspiração é utilizado para designar o processo simultâneo de evaporação e transpiração de uma superfície vegetada (ROCHA et al., 2011). Esta tem sido intensamente estudada por ser de fundamental importância no manejo da irrigação e na caracterização da demanda hídrica atmosférica, além de ser fundamental em atividades ligadas à gestão de bacias hidrográficas e em modelagens meteorológicas e hidrológicas.

Dentre os principais métodos de determinação da evapotranspiração, os lisímetros são os principais equipamentos, pois promovem leituras de forma direta e precisa. Isso se explica pelo controle mais rigoroso e adequado das condições do sistema solo-água-plantas (CAMPECHE et al., 2011). De acordo com Vaughan et al. (2007), os lisímetros podem realizar medições diretas das perdas de água da superfície do solo e vegetação para a atmosfera e, portanto, fornecerem os dados básicos para a validação de outros modelos de estimativa da evapotranspiração. Aboukhaled et al. (1982), foram pioneiros em lisimetria, os quais definiram os lisímetros como tanques preenchidos com solo, localizados no campo, de forma a assemelhar-se às condições ambientais, vegetados ou não, cuja finalidade é quantificar a evapotranspiração de uma cultura em crescimento, de uma cobertura vegetativa de referência ou a evaporação de um solo. Este isolamento característico se limita apenas aos lados e a base do reservatório solo-ar-água, enquanto sua superfície deve ser tão representativa quanto possível da área ao redor não modificada.

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-se, assim, a linearidade e histerese da célula de carga, devendo ser preferencialmente calibrados *in situ*, ou seja, 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 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 traveseiros hidráulicos e armazenam esses dados em microcomputadores. 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 frequente desses equipamentos, antes tido como equipamentos caros.

Baseado no exposto objetivou-se construir, instalar e calibrar um lisímetro de pesagem hidráulica com um sensor de pressão hidrostática para automação das leituras, e analisar seu desempenho comparado ao tradicional sistema de leitura com pistão de mercúrio.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Construção e instalação do lisímetro

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. A umidade relativa média anual é de 79,8%, precipitação média anual de 2.457 mm e temperatura média de 25,5 °C (INMET, 2009). A área experimental possui dimensões de 18 x 14,2 m que resulta numa área de 255,6 m², totalmente coberta com grama Batatais (*Paspalumnotatum*), obedecendo às condições padrão, estabelecidas pelo boletim da FAO-56 (Allen et al., 1998), para a determinação da evapotranspiração de referência.

A instalação do lisímetro foi realizada, primeiramente, escavando-se o local de forma manual em camadas de 0,20 m até a profundidade de 0,60 m, restando apenas 0,20 m que foi preenchido com brita, para o sistema de drenagem, completando assim a profundidade da caixa lisimétrica interna que é de 0,80 m. As três camadas de solo foram acondicionadas ao lado do local de instalação. Essa metodologia utilizada na escavação do solo é necessária para que a reconstituição das condições iniciais do solo seja realizada de forma a manter a mesma sequência do perfil original.

O lisímetro de pesagem hidráulica foi 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, tipo caixa d'água. Foi construída uma parede externa de alvenaria (diâmetro de 1,60 m e altura de 1,25 m) para sustentação do solo circundante. Uma abertura para o túnel de acesso foi construída para possibilitar a verificação da água drenada, do sistema de leitura e das células de carga hidráulicas, viabilizando manutenções ocasionais (Figura 1). O conjunto lisimétrico constituiu-se dos seguintes componentes: sistema de drenagem, sistema de pesagem hidráulica, sistema transmissor de pressão e sistema de leitura, conforme a Figura 1.

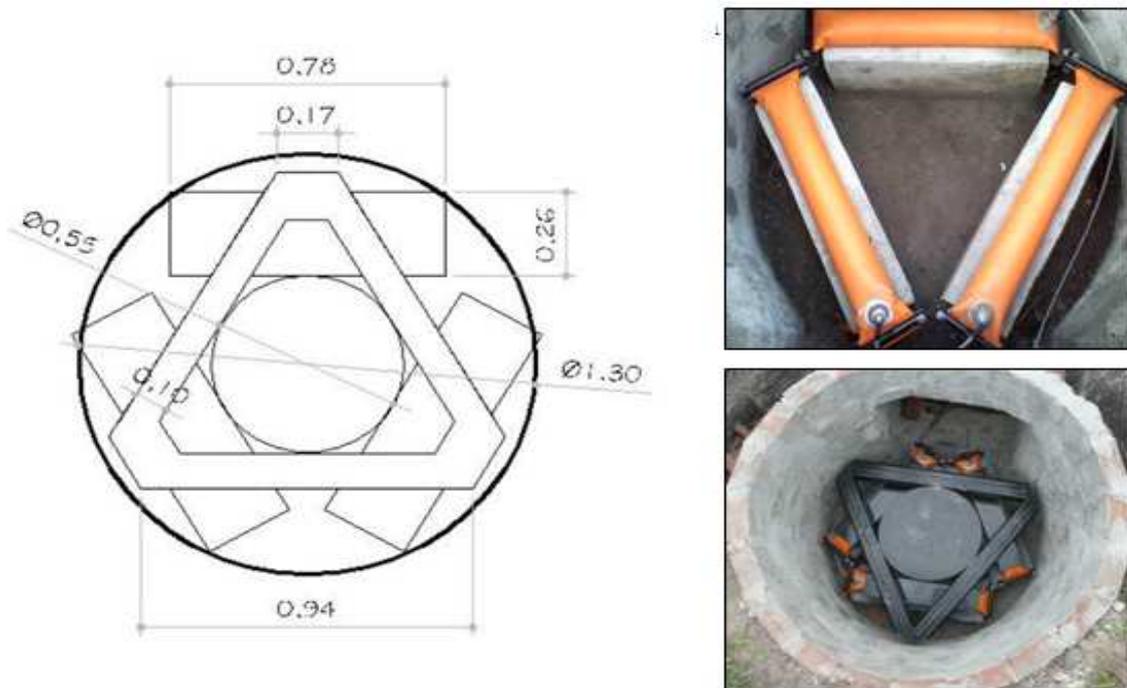


Figura 2. Detalhe do sistema de pesagem hidráulica com o estrado triangular sobre os travessieiros hidráulicos apoiados nas três bases de concreto.

Após montado o sistema de pesagem hidráulica, realizou-se o preenchimento da caixa com o solo conforme Campeche et al. (2011), sendo depositadas as camadas de solo na ordem inversa de sua retirada. Para cada camada completada, o solo recebeu uma leve compactação para promover uma maior acomodação deste solo dentro da caixa, lembrando que tal procedimento foi feito com o solo pouco úmido, evitando uma compactação maior das camadas de solo.

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 em uma régua graduada em milímetros e inclinada 30°. Este sistema permite um ganho de 0,5 mm em relação à régua na vertical. Sendo assim, uma lâmina de 1 mm na régua inclinada corresponde, na realidade, a uma lâmina de 0,5 mm (OLIVEIRA, 2007). O sensor de pressão hidrostática, modelo (MPX5100GP - Motorola), possui sensibilidade de 0,01 mV e capacidade de leituras de até 10 m.c.a (Figura 3). Este modelo foi acoplado ao registro de transmissão do fluido (água) e conectado a um microprocessador eletrônico tipo *datalogger*, modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, EUA), já situado na estação meteorológica, e que armazena os sinais elétricos em voltagem (mV).

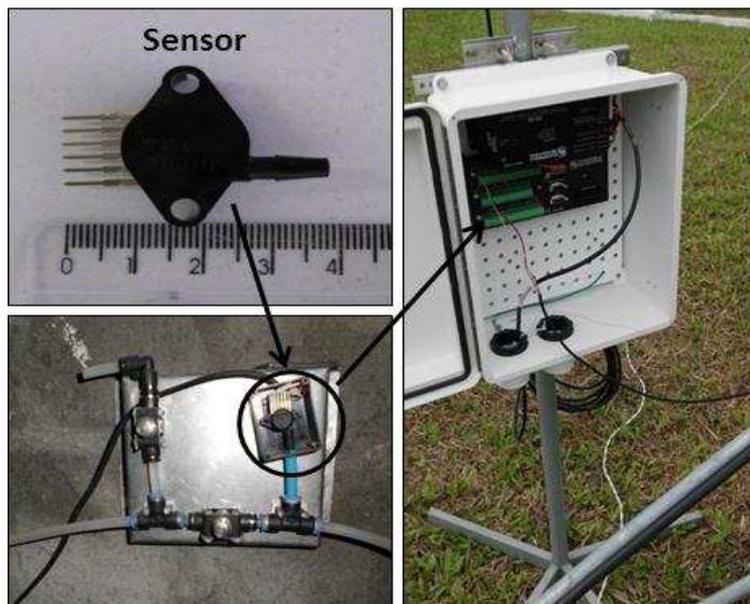


Figura 3. Detalhe do sensor de pressão hidrostática acoplado ao registro de transmissão do fluido e conectado ao microprocessador *datalogger*.

4.2 Calibração e testes no lisímetro

Antes dos ensaios de calibração, e com o lisímetro montado em campo, procedeu-se a determinação do volume ideal do fluido (água), no interior dos travesseiros hidráulicos. Este processo foi realizado com as três células hidráulicas totalmente preenchidas com 20 litros de água tratada com fervura e algicida. Em seguida tiveram início às extrações constantes de 100 mL de água em intervalos de um minuto, e quando observado no registro manométrico que a variação de pressão tornava-se desprezível, finalizou-se o ensaio (SILVA, 2000; OLIVEIRA et al., 2008). Segundo os autores, o estabelecimento do volume ideal de fluido nos travesseiros deve ser realizado, pois a superfície de contato entre os travesseiros e a base de apoio tem que permanecer o mais constante possível. Essa variação interfere na resposta da pressão transmitida ao sistema de leitura, e conseqüentemente, valores incorretos de pressão serão registrados. Dessa forma, o volume ideal de fluido é aquele correspondente ao ponto de mínimo da equação polinomial quadrática que ajusta os dados do ensaio pelo método de regressão.

Em seguida tiveram início os ensaios de calibração (Figura 4), sendo conduzidos em duas etapas. A primeira etapa ocorreu na parte central do lisímetro, em que foram adicionados e retirados 50 sacos plásticos com brita, de 1,3273 kg, equivalendo a 1,0 mm de lâmina evapotranspirada, em intervalos de um minuto, tanto para adição como para a retirada das massas padrão. Na segunda etapa, a superfície do lisímetro foi dividida em quatro quadrantes, onde foram adicionadas e retiradas 25 massas-padrão de mesma equivalência da primeira etapa, em cada quadrante. O total de massas-padrão foi reduzido pela metade nesta etapa, devido ao espaço físico de cada quadrante não comportar o total das massas. Esta última etapa foi realizada com o intuito de verificar a estabilidade do equipamento, através do erro médio posicional em relação ao centro do lisímetro. Os dados referentes às massas-padrão aplicadas e as respectivas leituras do manômetro e sensor, possibilitaram a obtenção dos coeficientes de calibração para o setor central e quadrantes do lisímetro.



Figura 4. Ensaios de calibração com carregamento e descarregamento de massas padrão no centro e nos quadrantes do lisímetro.

De posse dos coeficientes de calibração verificou-se a ocorrência da histerese. A variação desses erros se refere à diferença entre o sinal que é obtido pelo sistema de pesagem para um mesmo valor de massa, durante procedimentos opostos, neste caso o carregamento e o descarregamento. Desta forma, após a calibração do lisímetro, os dados foram aplicados a equações lineares ajustadas e, assim, determinou-se a histerese do lisímetro por meio da equação (1).

$$H = M_C - M_D \quad (1)$$

em que,

H = histerese (kg);

M_C = massa determinada no carregamento (kg); e

M_D = massa determinada no descarregamento (kg).

4.3 Análise do desempenho

Com base nos ensaios de calibração da parte central do lisímetro, o desempenho do equipamento para cada sistema de leitura independente, foi verificado por meio dos seguintes índices estatísticos: novo índice de concordância de Willmott (d_r), o erro absoluto médio (MAE, sigla em inglês), a raiz do erro quadrático médio (RMSE, sigla em inglês) apresentados por Willmott et al. (2011), o erro máximo (ME, sigla em inglês), o erro padrão (EP), e o coeficiente de determinação (R^2).

A precisão foi determinada por meio do coeficiente de determinação (R^2) obtida pela análise de regressão linear para cada sistema de leitura e ciclo de variação de massa dos ensaios de calibração. Os dados referentes às massas-padrão aplicadas e as respectivas leituras do manômetro e sensor foram submetidos à análise estatística de regressão.

A exatidão do equipamento foi determinada por meio do erro padrão (EP), que caracteriza a dispersão dos valores de massa mensurados pelos lisímetros em relação aos valores das massas padrões, bem como do novo índice de concordância (d_r) proposto por Willmott et al. (2011), para avaliar a aproximação entre a variação das massas para os ciclos de carregamento, descarregamento e do conjunto, e para avaliar a estimativa da variação de massa obtida com as equações de calibração. O MAE foi usado para estimar os erros,

representados pelas diferenças médias entre as massas preditas pelas equações de calibração (P) e as massas observadas (massas padrões) (O), bem como na estimativa da variação dos erros associados à histerese. O RMSE também caracteriza a dispersão dos valores de massa mensurados pelos sistemas de leituras em relação aos valores das massas padrões (sacos de brita).

A resolução é inerente à precisão dos instrumentos de leitura em detectar a menor lâmina de água adicionada ou retirada. No caso do referido lisímetro é o menor valor de ETo registrado para o conjunto sensor-*datalogger*, sendo a menor escala da divisão ou o último dígito que pode ser lido pelo equipamento de medição.

A sensibilidade foi obtida pela observação da menor variação do sinal elétrico emitido pelo sistema quando detectada uma mudança de massa do equipamento, determinada a partir dos dados plotados numa planilha eletrônica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características operacionais

Considerando os aspectos técnicos e operacionais, a área superficial do lisímetro de 1,32 m², difere da recomendação de Aboukhaled et al. (1982), de no mínimo 2,00 m². Entretanto, nos trabalhos de Silva (2000), Silva (2005), Santos et al. (2008) e Oliveira et al. (2008), as respectivas áreas superficiais de 1,79; 1,04; 2,08 e 1,52 m² também proporcionaram bons resultados operacionais. Do mesmo modo, também se verificou no lisímetro que a relação entre área de borda e a área superficial de 0,21 foi muito próxima das relações encontradas por Silva (2000), Santos (2004), Silva (2005) e Oliveira et al. (2008) de 0,48; 0,20; 0,10 e 0,18, respectivamente. Aboukhaled et al. (1982) relatam que relações entre área da borda e área superficial maiores que 10% podem afetar as leituras lisimétricas pelos efeitos do calor sensível, gerando maior energia das paredes para o centro do lisímetro.

Conforme metodologia apresentada procedeu-se a determinação do volume ideal do fluido, sendo obtido o conjunto de pontos da variação de pressão em relação ao volume de água extraído dos traveseiros hidráulicos, constatando-se que o mesmo se ajustou adequadamente ao modelo polinomial de 2^a ordem, com base no elevado valor do coeficiente de determinação (R^2) de 0,9968 (Figura 5). Determinando a primeira derivada, o ponto de mínimo da equação polinomial correspondeu a 4.000 mL, então, considerando que o conjunto de três traveseiros hidráulicos foi inicialmente preenchido com 20 litros de água, o volume ideal restante no interior dos traveseiros foi de $(20 - 4 = 16 \text{ L})$ 16 litros, conforme indicado pelo modelo polinomial.

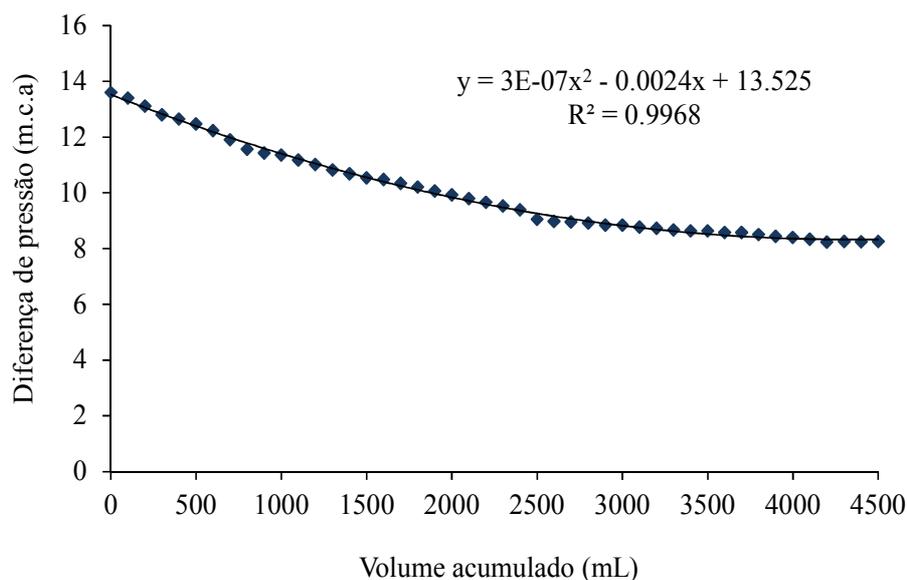


Figura 5. Variação de pressão nos traveseiros hidráulicos em função da variação das extrações sucessivas de volumes constantes de 100 mL de água.

5.2 Calibração do lisímetro

Os resultados das calibrações para as leituras no manômetro de mercúrio e no sensor de pressão, em função da variação de massa estão apresentadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Nessas figuras pode-se observar que tanto no manômetro como no sensor, a relação funcional desses dados foi linear, tendo em vista a magnitude dos coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99, tanto na parte central do lisímetro como em todos os quadrantes. Salienta-se também que os ajustes são específicos para cada ciclo de carregamento e descarregamento de massas padrão, indicando assim que as respostas para os dois sistemas de leituras do lisímetro se ajustaram adequadamente ao modelo de regressão linear. Estes resultados corroboram com os obtidos por Campeche et al. (2011) e Fernandes et al. (2012), tanto no carregamento quanto no descarregamento das massas-padrões, em que se ajustaram ao modelo linear, sendo os coeficientes de determinação de 0,997 e 0,998, respectivamente.

Carvalho et al. (2007) calibraram um lisímetro de pesagem eletrônica, utilizando uma célula de carga no município de Seropédica, Rio de Janeiro, e estes autores, assim como observado neste trabalho, encontraram resposta linear nos dois ciclos de calibração (carregamento/d Descarregamento) das massas padrão testadas no lisímetro, obtendo, assim, coeficientes de determinação equivalentes. Bomfim et al. (2004) também encontraram elevada linearidade na calibração de um lisímetro de pesagem após dois anos de uso em Limoeiro de Norte, Ceará.

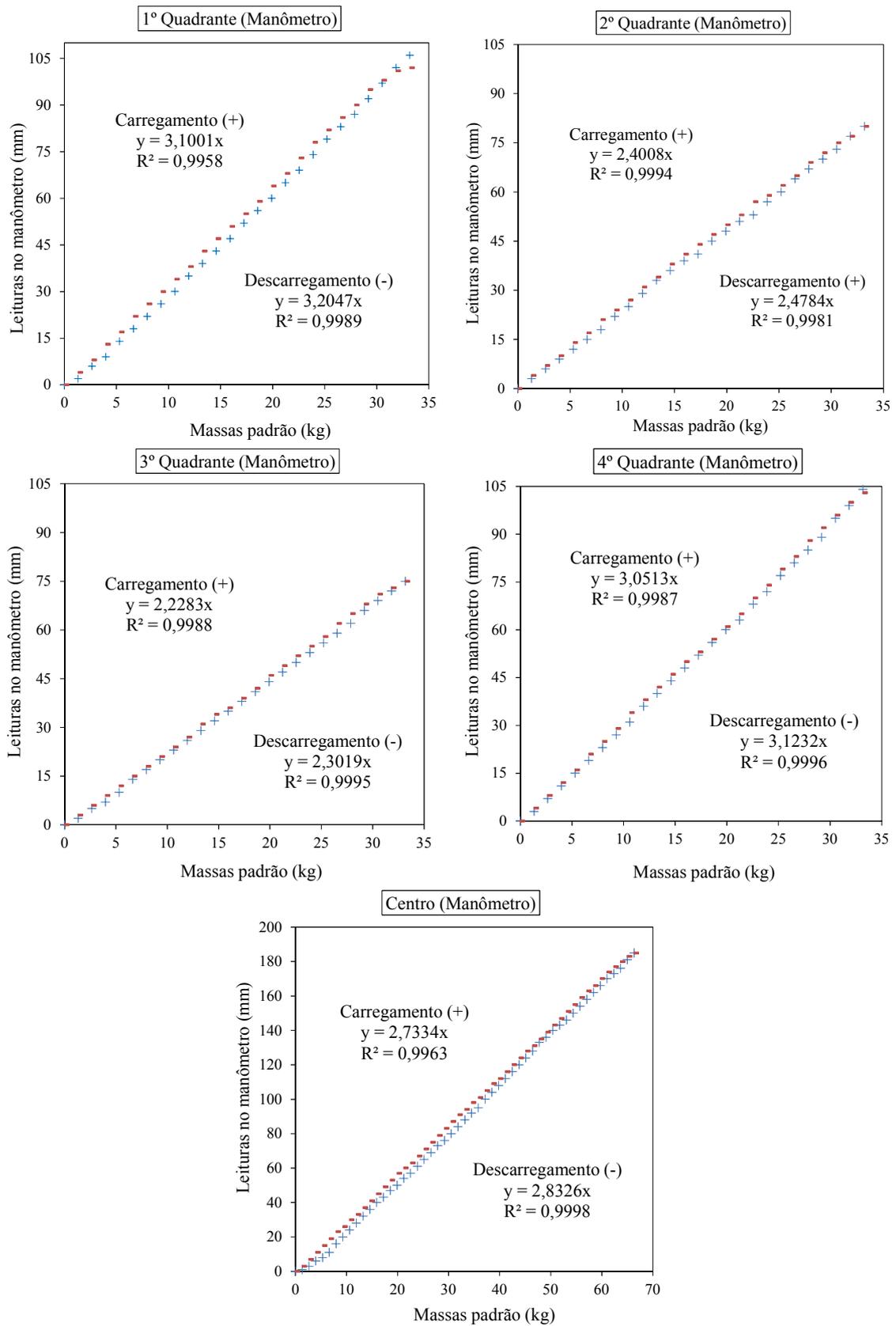


Figura 6. Variação das leituras observadas no manômetro em função da variação das massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) nos quadrantes e centro do lisímetro.

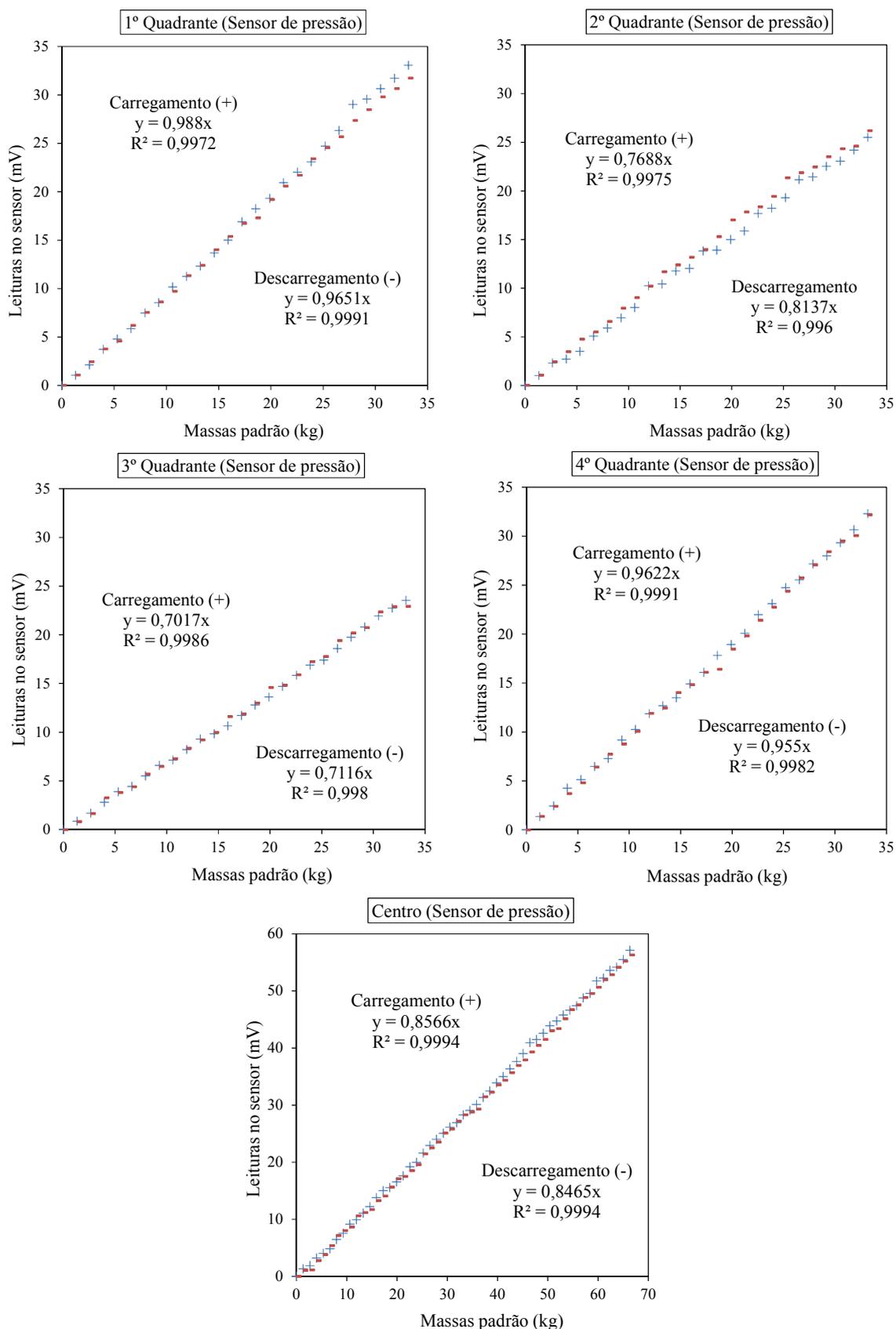


Figura 7. Variação das leituras observadas no sensor de pressão em função da variação das massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) nos quadrantes e centro do lisímetro.

Da mesma forma dos resultados das análises observadas nas Figuras 6 e 7, os coeficientes de calibração final para os quadrantes e parte central do lisímetro foram obtidos pelo método de regressão linear, e corresponderam aos coeficientes angulares das retas ajustadas, definindo-se a interseção no zero, porém com pequena diferença, ou seja, para obtenção do coeficiente angular das retas ajustadas considerou-se a variação de massa para todo o conjunto dos dados de carregamento e descarregamento.

Assim, para os coeficientes de calibração final verifica-se, na Tabela 1, uma faixa de variação de 2,265 a 3,152 mm kg⁻¹ de leitura no sistema manométrico, bem como para o sensor de pressão a faixa de variação de 0,706 a 0,976 mV kg⁻¹. Na mesma tabela, o coeficiente de calibração final do setor central do lisímetro para o sistema manométrico foi de 2,783 mm kg⁻¹ ou 0,359 kg mm⁻¹, ou ainda que a variação de 1 mm de leitura no manômetro corresponde a adição ou retirada de 0,359 litros de água. Para o sistema de leitura do sensor de pressão o coeficiente de calibração final, para o mesmo setor, foi de 0,851 mV kg⁻¹ ou 1,174 kg mV⁻¹, ou seja, a cada mV de leitura no sensor de pressão é correspondente a 1,174 litros de água.

Tabela 1. Resumo dos coeficientes de calibração (*k*) para os quadrantes e centro do lisímetro ajustados para os dois ciclos de variação de massa e o erro médio posicional.

Quadrantes do lisímetro	Coeficientes de calibração (<i>k</i>)	
	(mm kg ⁻¹)	(mV kg ⁻¹)
	Manômetro	Sensor de pressão
1	3,152	0,976
2	2,439	0,791
3	2,265	0,706
4	3,087	0,958
Média dos quadrantes	2,735	0,857
Centro do lisímetro	2,783	0,851
Erro médio posicional	1,73 %	0,70%

O erro médio posicional apresentado na Tabela 1 indica que o lisímetro alcançou uma estabilidade melhor e, conseqüentemente, leituras mais consistentes quando comparado aos lisímetros construídos por Silva (2000), Santos (2004) e Oliveira et al. (2008) com erro médio posicional de 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.

Os resultados dos ensaios de calibração também permitiram estabelecer uma relação funcional entre a variação das leituras no manômetro e no sensor de pressão, para os ciclos de carregamento e descarregamento do setor central do lisímetro, conforme a Figura 8. Na mesma figura verifica-se que houve correlação linear positiva entre os dois sistemas de leituras com elevado grau de precisão. O valor do coeficiente de determinação ($R^2 > 0,99$)

evidencia excelente linearidade para os ciclos de variação de acréscimos e decréscimos de massa.

Da mesma forma, observa-se que houve elevada correlação linear no ajuste para todo o conjunto de dados de carregamento e descarregamento, sendo o coeficiente de calibração final de $0,3057 \text{ mV mm}^{-1}$ e o coeficiente de determinação ($R^2 > 0,99$). O coeficiente de calibração final correspondeu ao coeficiente angular da reta que ajusta os dados, sendo usado como fator de transformação das unidades dos sistemas de leituras para o estudo da histerese apresentado na Figura 9. Silva (2005) também apresentou coeficientes de determinação elevados para os ciclos de carregamento e descarregamento, quando investigou relações entre voltagens de saída das células de carga eletrônicas com leituras piezométricas e transdutor de pressão.

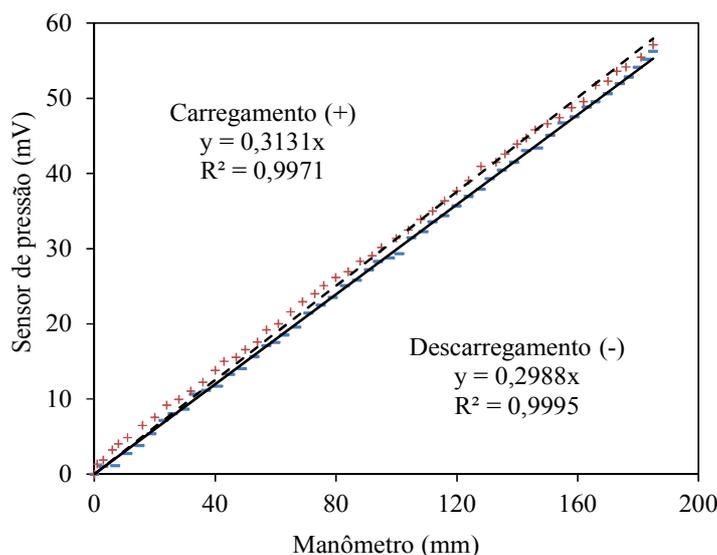


Figura 8. Relação entre as leituras do sensor de pressão e do manômetro de mercúrio para carregamento e descarregamento das massas padrão para o setor central do lisímetro.

Conforme metodologia apresentada para analisar a ocorrência de histerese, inicialmente procedeu-se a transformação das unidades de variação das massas determinadas pelos sistemas de leituras para (kg), para os ciclos de carregamento e descarregamento, com base nos coeficientes de calibração final do setor central do lisímetro de $1,174 \text{ kg mV}^{-1}$ e $0,359 \text{ kg mm}^{-1}$ para as leituras do sensor e manômetro, respectivamente. Desta forma, a histerese foi calculada pelas diferenças das massas determinadas para carregamento e descarregamento para cada sistema de leitura (equação 1). A relação entre a variação da massa medida e acumulada em (kg), em função da variação da massa-padrão (sacos de brita) acumulada em (kg) estão apresentadas na Figura 9. Na mesma figura observa-se que houve maior variação na dispersão da nuvem de pontos para os erros de histerese para as leituras do sistema manométrico, em relação ao sensor de pressão.

No entanto, para as leituras realizadas no manômetro de mercúrio, as massas determinadas no descarregamento foram, em média, 1,73 kg (1,30 mm ETo) maiores que aquelas determinadas na etapa de carregamento. Por outro lado, observa-se que as leituras no sensor de pressão apresentaram histerese, em média, 76,87% menor do que a histerese para as leituras do manômetro, sendo as massas determinadas no carregamento, em média, 0,40 kg (0,30 mm ETo) maiores que aquelas determinadas no descarregamento. Flumignan (2011)

analisando a histerese em seis lisímetros de pesagem, para dois modelos de células de carga, verificou que as massas determinadas no carregamento, em média, foram ligeiramente maiores que aquelas determinadas no descarregamento, para três lisímetros com as células de carga de melhor qualidade. Assim verifica-se que houve certa correspondência com a histerese média para o sensor de pressão hidrostático, tanto na ocorrência de pequena magnitude do desvio médio, bem como na média da variação das massas determinadas para o carregamento ser ligeiramente maior que aquela determinada no descarregamento.

De outra forma, observa-se que a variação dos erros de histerese analisados para os dois sistemas de leituras, principalmente para o manômetro, pode está associado ao intervalo de leitura de 1 minuto, entre carregamento e descarregamento das massas-padrão. Portanto, é provável que este intervalo de tempo não tenha sido suficiente para que os sistemas de leitura pudessem estabilizar totalmente e, assim, diminuir os erros de histerese. Neste caso, sugere-se que as leituras sejam em intervalos de no mínimo 2 minutos, de acordo com metodologia adotada por Campeche (2002).

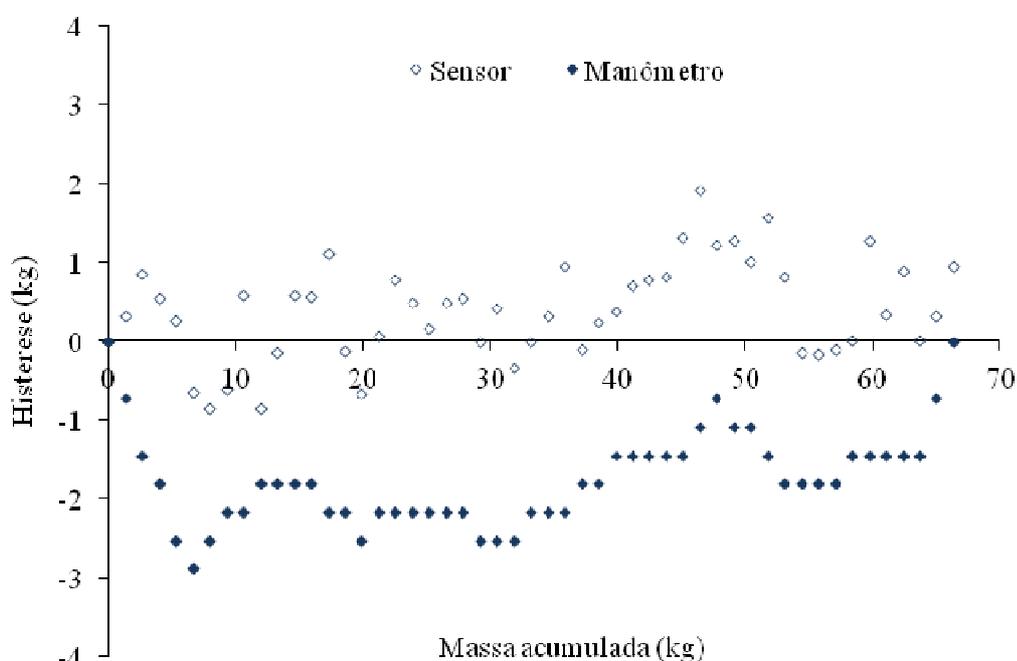


Figura 9. Histerese entre a massa determinada no carregamento e descarregamento no manômetro e sensor de pressão das massas padrão durante a calibração do setor central do lisímetro.

5.3 Análise do desempenho

Para analisar o desempenho do lisímetro, com base nos resultados da calibração para o sistema de leitura do sensor e do manômetro, procedeu-se a determinação dos índices estatísticos de comparação entre as massas observadas e as estimadas pelas equações de calibração do setor central para os ciclos de variação de massa, apresentados na (Tabela 2). Nessa tabela observa-se que todos os modelos de regressão linear ajustados na calibração do lisímetro apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,99. Isso demonstrou boa precisão da resposta do sistema de pesagem para detectar mudanças de massa de água em condições de campo.

Na mesma tabela, verifica-se que os resultados do novo índice de Willmott (d_r) sempre maiores que 0,96 indicam que houve boa concordância das estimativas de massa em relação às massas padrões, para os dois sistemas de leituras estudados. Por outro lado, ressalta-se que todos os índices que estimam a variação dos erros foram mais elevados para as leituras no sistema manométrico, excetuando-se os resultados dos índices correspondentes ao ciclo de variação de massa no sentido decrescente.

De acordo com Nascimento et al. (2011) e Flumignan (2011), a exatidão do equipamento, usualmente, é avaliada por meio do erro padrão (EP). Desta forma, neste estudo, o erro padrão para o sensor variou de 0,602 a 0,643 kg (0,453 a 0,484 mm de ETo) e para o manômetro de 0,424 a 1,050 kg (0,319 a 0,791 mm de ETo). Esses resultados indicam maior amplitude na variação da estimativa de massa para o sistema manométrico, bem como melhor acurácia para o sistema de leitura do sensor de pressão. Flumignan (2011) avaliou o desempenho de seis lisímetros de pesagem, instalados com dois modelos de células de carga, sendo o erro padrão entre (0,27 e 1,04 mm de ETo) para os lisímetros com células de carga ALFA[®], e erro padrão entre (0,03 e 0,1 mm de ETo) para os lisímetros com células de carga HBM[®], considerados de alta acurácia.

Tabela 2. Índices estatísticos de comparação entre as massas observadas e estimadas pelas equações de calibração do setor central ($y = ax$), para os ciclos de variação de massa e sistemas de leituras, e os respectivos coeficientes de determinação (R^2)

Sistema de leitura	Varição de massa	d_r	EP	MAE	RMSE	ME	a	R^2
Sensor	Crescente	0,988	0,624	0,382	0,465	1,328	1,167	0,999
	Decrescente	0,989	0,602	0,356	0,465	1,307	1,181	0,999
	CresDecres	0,987	0,643	0,409	0,518	1,610	1,174	0,999
Manômetro	Crescente	0,968	1,050	1,081	1,241	2,614	0,365	0,996
	Decrescente	0,994	0,424	0,176	0,244	1,045	0,353	0,999
	CresDecres	0,974	0,941	0,877	1,115	2,686	0,359	0,996

Nota: A conversão dos valores de massa em (kg) para lâmina (mm de ETo) pode ser obtida pela divisão dos mesmos pela área do lisímetro (1,32732 m²). (d_r) novo índice de concordância de Willmott; (EP) erro padrão; (MAE) erro absoluto médio; (RMSE) raiz do erro quadrático médio; (ME) erro máximo; (a) coeficiente angular da reta ajustada; (R^2) coeficiente de determinação.

Adicionalmente à metodologia apresentada por Flumignan (2011) que foi usada para avaliar a ocorrência da histerese em termos de valores médios, determinados para os ciclos de carregamento e descarregamento, procedeu-se a determinação dos índices estatísticos de comparação da histerese entre os dois ciclos de variação de massa, com base nos coeficientes de calibração do setor central e nas leituras do sensor e manômetro, para corroborar com as análises do desempenho do lisímetro que seguem na (Tabela 3). Desta forma, na mesma tabela, verifica-se que o novo índice de Willmott (d_r), sempre superior a 0,90, indica que houve boa concordância da variação das massas de carregamento e descarregamento para os dois sistemas de leituras. Por outro lado, os índices que estimam os erros de histerese são mais elevados para as leituras do sistema manométrico. A exatidão indicada pelo erro padrão

variou de 0,771 a 1,329 kg (0,58 a 1,00 mm de ETo) para as leituras do sensor e manômetro, respectivamente.

Tabela 3. Índices estatísticos de comparação da histerese para os dois ciclos de variação de massa, com base nos coeficientes de calibração do setor central e nas leituras do sensor e manômetro.

Histerese (kg)	d _r	EP	MAE	RMSE	ME
Sensor	0,983	0,771	0,583	0,731	1,913
Manômetro	0,950	1,329	1,731	1,834	2,872

(d_r) novo índice de concordância de Willmott; (EP) erro padrão; (MAE) erro absolutomédio; (RMSE) raiz do erro quadrático médio; (ME) erro máximo.

A resolução, ou seja, a precisão dos instrumentos de leitura em detectar a menor lâmina de água adicionada ou retirada, no caso do referido lisímetro, é o menor valor de ETo registrado. Inicialmente calculou-se o fator de conversão de mm de leitura manométrica para mm de ETo, que resultou em 3,69 (1,32732 / 0,359), isto significa que cada milímetro de ETo corresponde a uma variação de leitura no manômetro de 3,69 mm. O fator de conversão de mV de leitura do sensor de pressão para mm de ETo foi de 1,13 (1,32732 / 1,174) significando que cada mm de ETo corresponde a uma variação de leitura do sensor de 1,13 mV. Assim, a sensibilidade do lisímetro em registrar variações de massas foi de 0,135 mm de ETo no manômetro e de até 0,061 mm de ETo no sensor de pressão. Esta resolução observada no manômetro foi compatível com as precisões encontradas por Silva (2000), Santos (2004), Silva (2005) e Oliveira (2007), respectivamente de 0,13; 0,10; 0,24 e 0,15 mm. É importante salientar que o sensor de pressão alcançou uma precisão semelhante aos lisímetros de pesagem com células de carga eletrônica construídos por Campeche (2002) e por Bomfim et al. (2004) que foram de 0,04 e 0,18 mm, respectivamente.

Por outro lado, de acordo com Santos (2004), a implantação do arranjo de pistão de mercúrio, entretanto, implica na perda de sensibilidade do manômetro de leitura às variações de carga do lisímetro, devido à densidade do mercúrio, que confere um deslocamento de altura da coluna 13,6 vezes menor que a água.

6 CONCLUSÕES

As calibrações produziram respostas lineares para todos os quadrantes e centro do lisímetro, sendo encontrados coeficientes de determinação superiores a 0,99, tanto nas leituras do manômetro quanto do sensor de pressão, validando esta metodologia de calibração.

Os erros associados à histerese, estimativas de variação de massa e o erro médio posicional foram mais elevados no sistema manométrico.

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 e exatidão que o manômetro de mercúrio.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOTECA

ABOUKHALED, A.; AFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982.68 p. (Irrigation and Drainage Paper, n. 39).

ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (Irrigation and Drainage Paper, n.56).

BOMFIM, G. V. do et al. Calibração de um lisímetro de pesagem após dois anos de utilização. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 35, p. 284-290, 2004. Número Especial.

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" (Citrus Latifolia Tam.)**. 2002. 64p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade São Paulo, Piracicaba, 2002.

CAMPECHE, L.F.M.S. et al. 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, D. F. et al. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, 2007.

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**, Campina Grande, v.10, p.237-242, 2006.

FERNANDES, C. N. V. et al. Instalação e calibração de um lisímetro de precisão com uma célula de carga. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 2, p. 251 - 263, 2012.

FLUMIGNAN, D.L. **Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-manso (Jatropha curcas L.)**. 2001. 200 p. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

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

LÓPEZ-URREA, R. et al. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**, v.85, p.15-26, 2006.

MENDONÇA, J. C. et al. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, p.275-279, 2003.

NASCIMENTO, E.F. et al. Construção e calibração de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultivo em videira de vinho cv. SYRAH. **Irriga**, Botucatu, v.16, n.3, p. 271-278, 2011.

OLIVEIRA, L.M.M. **Avaliação da evapotranspiração de referência (ET_o) na bacia experimental do riacho Gameleira – PE, utilizando lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos.** 2007. 111 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife 2007.

OLIVEIRA, L.M.M. et al. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.3, n.1, p.58-67, 2008.

ROCHA, E. da J. T. et al. Estimativa da E_{to} pelo modelo Penman-Monteith FAO com dados mínimos integrada a um Sistema de Informação Geográfica. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 75-83, 2011.

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

SANTOS, F. X. et al. Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo no semi-árido nordestino. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, p.115-124, 2008.

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

SILVA, T.J.A. **Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de maracujazeiros determinados pelo método do Balanço de Radiação e lisimetria de pesagem hidráulica.**2005.98 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SILVA, T.J.A. et al. Aplicação de lisímetro de pesagem hidráulica na determinação da evapotranspiração de referência, em Petrolina - PE. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.511-20, 2003.

SILVA, V.P.R. et al. 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 E_{to} predictions. **Agricultural Water Management**, v.88, p.141-146, 2007.

WILLMOTT, C.J.; ROBESON, S.M.; MATSUURA, K. Short communication: a refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, (Wiley Online Library), 2011.