

ACURÁCIA DE UM MINI-LISÍMETRO DE PESAGEM ELETRÔNICA DE BAIXO CUSTO

**MARCIO DA SILVA VILELA¹; FERNANDO RODRIGUES CABRAL FILHO²;
MARCONI BATISTA TEIXEIRA³; ALISSON MACENDO AMARAL⁴; LUCAS
MELO VELLAME⁵ E FREDERICO ANTONIO LOUREIRO SOARES³**

¹ Engenheiro Elétrico, Prof. Doutor, Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, GO. msvilela@yahoo.com.br

² Graduando em Agronomia, Departamento de Hidráulica e Irrigação, Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, GO. fernandorcfilho@hotmail.com

³ Engenheiro Agrônomo, Prof. Doutor, Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, GO. marconibt@gmail.com, fredalsoares@hotmail.com

⁴ Tecnólogo em Irrigação e Drenagem, Prof. efetivo, IFNMG, Campus Arinos, MG. alisson.ifnmg@gmail.com

⁵ Engenheiro Agrônomo, Prof. Doutor, Núcleo de Engenharia de Água e Solo, UFRB. lucasvellame@gmail.com

1 RESUMO

Para aplicar uma lâmina de irrigação adequada faz-se necessário conhecer a demanda hídrica da cultura, estimando-se precisamente a sua evapotranspiração para o manejo eficiente da irrigação. A evapotranspiração da cultura pode ser determinada de forma precisa através da utilização de lisímetros de pesagem eletrônica ou mecânica. Objetivou-se, com este trabalho, o desenvolvimento e calibração de um mini-lisímetro de pesagem mecânica de baixo custo para a determinação da evapotranspiração de referência. O mini-lisímetro consiste de um tanque de PVC, apoiado sobre anteparos de metal fixos, com um dreno na base do tanque, as células de carga (4 células) são oriundas de uma balança de pesagem doméstica. O sistema de aquisição e armazenamento dos dados utiliza um micro-controlador. Para calibração dos lisímetros utilizou-se massas de referência constituídas de 4 unidades (10; 5; 0,5 e 0,2 kg) que foram adicionadas de forma crescente e decrescente em 5 ciclos de medição afim de se obter a curva de calibração do equipamento. Foram calculados o erro máximo absoluto, erros de repetitividade, linearidade e histerese do instrumento. Ocorreu uma tendência nos desvios em relação a massa aplicada resultante da calibração, sendo a maior na máxima carga aplicada (35,7 kg), com valor de -1,52 kg. O erro de não-linearidade foi o que mais influenciou na acurácia do mini-lisímetro, com 1,68 Kg e 7,93% de influência na medição, nos ciclos de carregamento e descarregamentos, respectivamente. A histerese apresentou interferência baixa na medição, 0,06%. O erro máximo absoluto apresentou um valor alto de 1,5 kg (0,35%), sendo necessário novos ajustes em seu hardware e células de carga.

Palavras-chave: calibração, evapotranspiração, manejo da irrigação.

**VILELA, M. da S.; CABRAL FILHO, F. R.; TEIXEIRA, M. B.; AMARAL, A. M.;
VELLAME, L. M.; SOARES, F. A. L.
ACCURACY OF A MINI-WEIGHING LYSIMETER ELECTRONIC LOW COST**

2 ABSTRACT

To apply a blade of adequate irrigation is necessary to know the crop water demand, estimating precisely its evapotranspiration for efficient irrigation management. The evapotranspiration of culture can be determined precisely by the use of electronic or mechanical weighing lysimeters. The objective of this study was to development and calibration of a mini-lysimeter mechanical weighing low cost for the determination of the reference evapotranspiration. The mini-lysimeter consists of a PVC tank, resting on fixed metal shields, with a drain at the base of the tank, the load cells (four cells) are derived from a domestic weighing balance. The system acquisition and storage of data using a micro-controller. For calibration of the lysimeters was used reference masses consisting of 4 units (10, 5, 0.5 and 0.2 kg) were added in increasing and decreasing order in 5 measuring cycles in order to obtain the calibration curve of equipment. Were calculated the maximum absolute error, repeatability errors, linearity and hysteresis of the instrument. There has been a trend in deviations from the applied resulting mass calibration, the higher the maximum applied load (35.7 kg), with a value of -1.52 kg. The non-linearity error it was what influenced more in accuracy of the mini-lysimeter with 1.68 kg and 7.93 of influence in the measurement, us cycles of loading and unloading, respectively. The Hysteresis showed low interference in the measurement, 0.06%. The maximum absolute error showed a high value of 1.5 kg (0.35%), requiring new settings on your hardware and load cells.

Keywords: calibration, evapotranspiration, irrigation management.

3 INTRODUÇÃO

As atividades que estão envolvidas no meio agrícola, demandam cada vez mais pelo consumo de água. No Brasil, segundo o balanço das águas da ANA (2014), a irrigação é responsável por 72% da vazão consumida de água, sendo responsável por 5,8 milhões de hectares cultivados com irrigação no ano de 2012. A maior preocupação se dá pela sua escassez, sendo este objeto de competição entre o consumo da população e os bens de produção.

Conforme documento da FAO (2015), cerca de 70% de toda água consumida no mundo é destinada a agricultura, ao ponto que em 2050 a escassez de água afetara dois terços da população mundial (66,67%), no ano de 2015 esse valor é de 40%. Esse aumento não é em decorrência apenas do crescimento populacional, mas da falta de investimentos em manejo da irrigação adequado e sistemas de irrigação, atualmente, que geram perdas de até 70%. Perante a este problema, tem-se empregado esforços em pesquisas que possibilitam a economia de água, principalmente nos sistemas agrícolas, onde tem-se evidenciado o maior crescimento do uso da irrigação.

O manejo é definido pela lâmina e momento adequado de irrigar (MANTOVANI et al., 2009), ou seja, se dá pela relação entre o consumo hídrico da planta e do solo, transpiração e evaporação, que por sua vez é tido como a evapotranspiração dos sistemas de cultivo (KISI, 2010). O correto conhecimento da evapotranspiração, para manejo de irrigação, assume grande importância (CARVALHO et al., 2011), ao ponto que uma das alternativas para se racionalizar o uso da água é por meio de dados oriundos de lisímetros (CAMPECHE et al., 2011), que, em geral, são utilizados em modelos de estimativa da evapotranspiração.

Há também métodos indiretos, os quais estimam a evapotranspiração de referência, por meio de dados e modelos agrometeorológicos ou tanques de evaporação, sendo que esses métodos são os muito utilizados no manejo da irrigação.

Apesar, segundo ALLEN et al. (2011), lisímetros de pesagem, são equipamentos cuja variação da massa de água em um monólito é medida de forma hidráulica ou por células de carga, são limitados pelo alto custo de mão-de-obra especializada, instalação e manutenção. Ressaltando ainda a importância da utilização de equipamentos simples e baratos, porém com acurácia satisfatória.

Neste contexto, o trabalho teve o objetivo desenvolver e avaliar o desempenho de um mini-lisímetro de pesagem de baixo custo para a estimativa da evapotranspiração de referência.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em ambiente protegido localizado no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Brasil, utilizando-se 1 mini-lisímetro de baixo custo, desenvolvido no próprio experimento.

O lisímetro de baixo custo, consisti de um tanque de PVC, com dreno também constituído de tubo PVC de 3/4” e válvula de abertura na parte inferior, apoiado sobre quatro células de carga retiradas de uma balança doméstica, ligadas a uma estrutura de sustentação com capacidade máxima de 180 kg e precisão de 0,100 kg (Figura 1). O sistema de aquisição e armazenamento dos dados das pesagens implementado utiliza-se do microcontrolador PIC 18F778. Os sinais provenientes das células de carga são previamente amplificados pelo condicionador de sinal, que ajusta seus níveis de tensão à faixa de operação do conversor A/D.

Figura 1. Sistema de aquisição de dados A) e B); Conjunto lisimétrico C); Processo de calibração D).



O condicionador de sinal também é usado para realizar o ajuste da tara. Os dados aquisitados pelo conversor de 12 bits são previamente gravados em uma memória ROM, até que sejam transferidos para um cartão SD, ao comando do operador. Um relógio em tempo real, provido de bateria própria, também é usado para evitar que a falta de energia interrompa ou perturbe o processo de aquisição, que poderá durar dias, conforme a programação estabelecida para a operação do sistema.

Para a calibração do lisímetro foi utilizada metodologia proposta por Wheeler e Ganji (1996) citados por Vellame et al. (2011) onde massas-padrões são adicionadas de forma crescente e decrescente. Essas massas padrões foram confeccionadas com sacos plásticos e brita nº 01 em um total de três unidades de 10,0 kg, 1 unidade de cinco kg, uma de 0,5 kg e uma unidade de 0,2 kg, aferidas em balança analítica de precisão. Ao todo se procedeu a 5 ciclos de carregamento e descarregamento em cada sistema de medição.

De posse dos dados foram determinados o erro máximo absoluto (EMA), erro de repetitividade, não-linearidade e histerese do instrumento (WHEELER; GANJI, 1996; VELLAME et al., 2011).

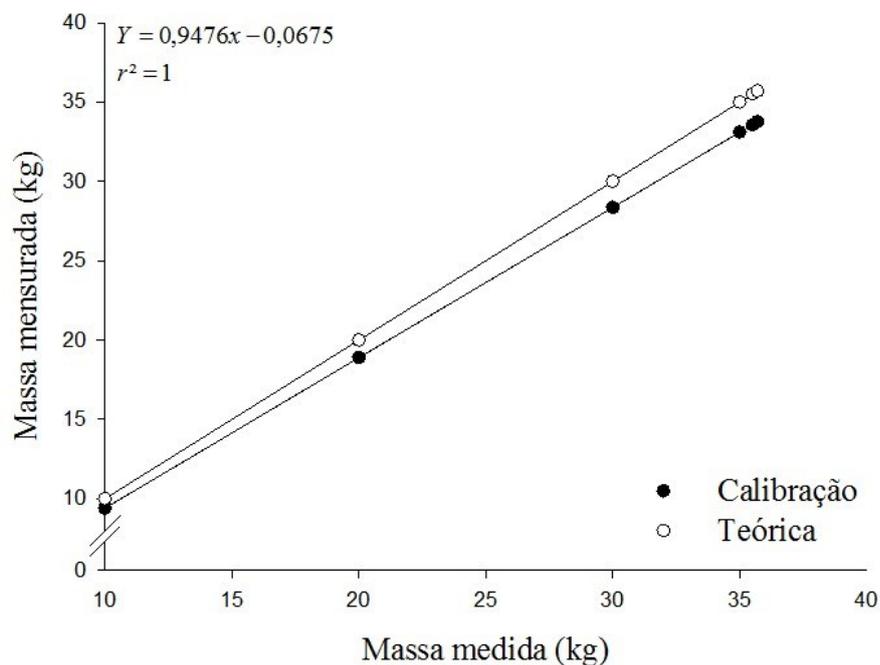
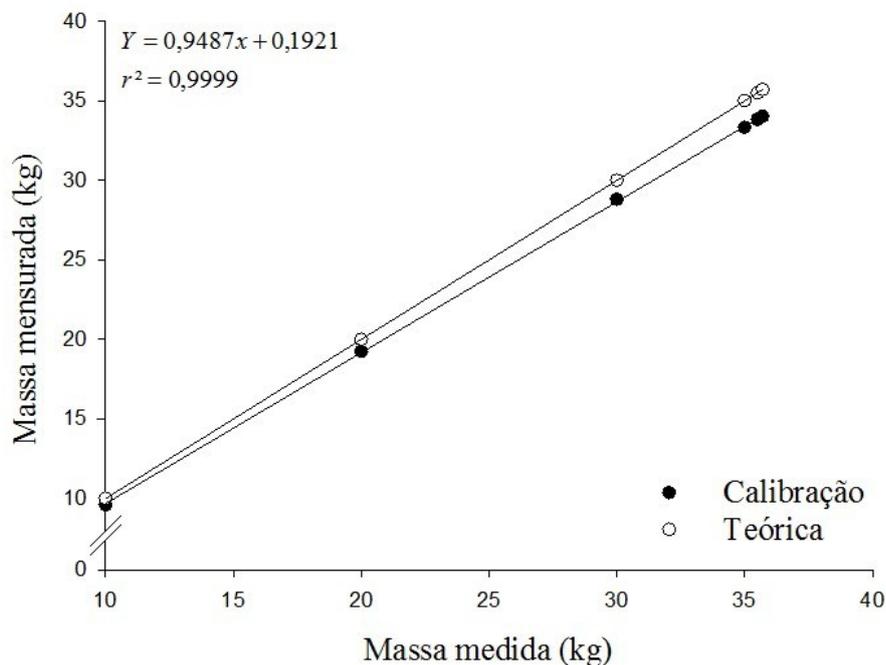
O EMA foi considerado como o maior desvio absoluto no processo de calibração, em todos os ciclos de medição. A histerese foi o maior desvio encontrado considerando os ciclos separados em carregamento e descarregamento. O erro de repetitividade, com base no desvio máximo, foi calculado pelo maior desvio encontrado, em sucessivas medições, nos ciclos de carregamento e descarregamento para a mesma massa de referência. Para análise dos erros e construção dos gráficos utilizou-se os softwares Excel 2010 e SigmaPlot.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se na Figura 2, excelentes ajustes nas equações de regressão para as curvas de resposta real, considerando a média entre os ciclos de carregamento e descarregamento, com o coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9995 para a calibração 1 (C1), e 1 para a calibração 2 (C2). Sendo C1, igual a 0 meses de utilização, e C2, a 2 meses de utilização do lisímetro sob solo sem cobertura vegetal, com acréscimos periódicos de água (evaporação).

Porém, o R^2 não expressa o desempenho do equipamento, sendo muita das vezes utilizado de forma errônea na literatura, não considerando os desvios de massa nas medições.

Conforme os dados calculados (Figura 2), nota-se que a cada acréscimo de 0,1000 kg de massa medida, a leitura foi de 0,0945 e 0,0944 kg na massa mensurada, ou 0,0055 e 0,0056 kg de incremento no desvio da massa mensurada, para C1 e C2, respectivamente. Comprovando que, mesmo com R^2 maior em C2, o desvio foi maior perante o acréscimo de massa, quando comparado a C1, sendo igual a 0,0002 kg (2,3%) superior. Em contrapartida, o erro padrão da equação linear foi de -0,0139 e -0,0138 kg, para C1 e C2, que equivale a 0,110 mm em uma superfície de 0,125664 m² (solo descoberto).

Figura 2. Curvas de resposta real das calibrações 1 e 2, respectivamente.

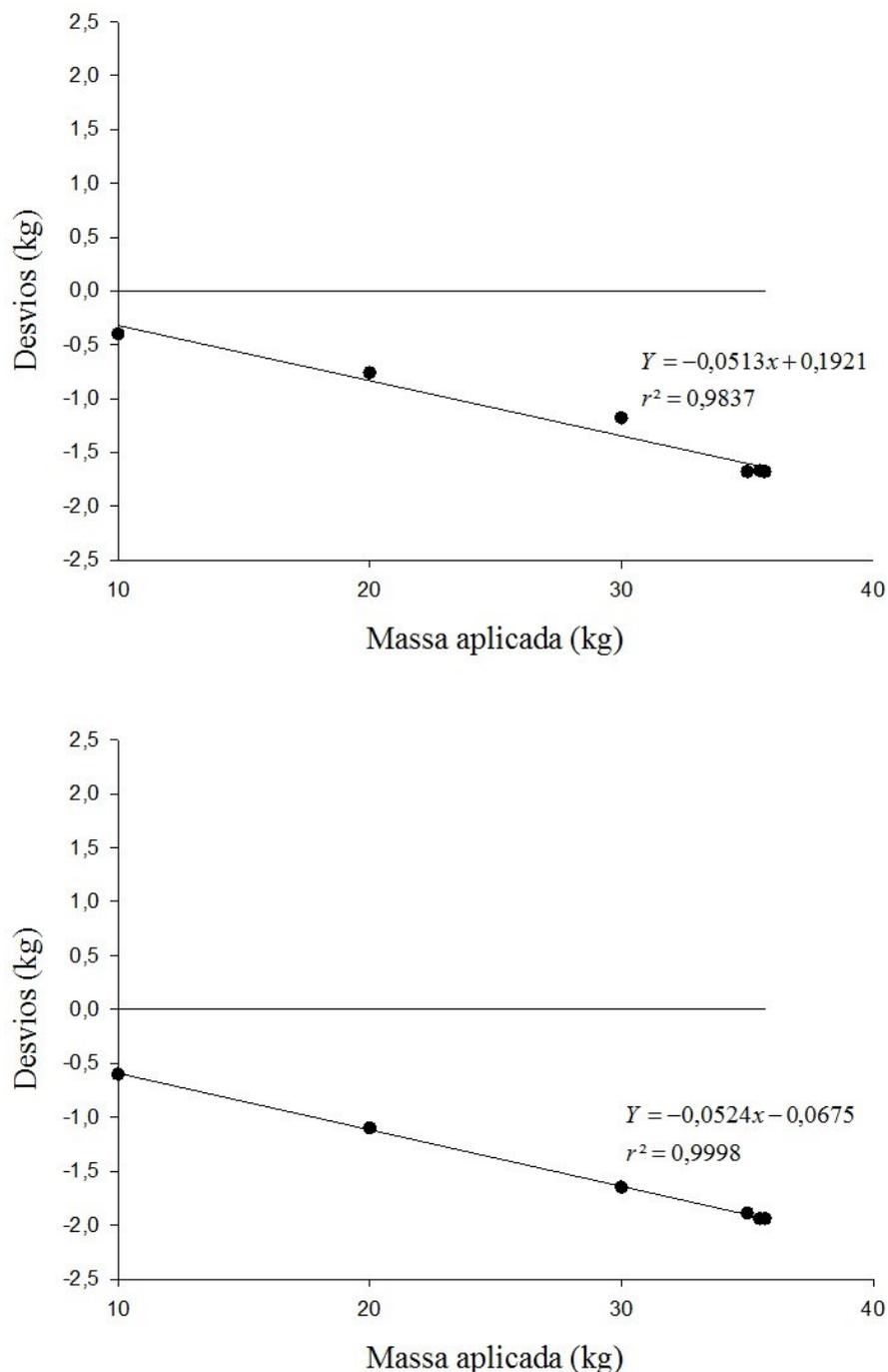
Estudo conduzido por Nascimento et al. (2011) em Petrolina-PE, com lisímetros de pesagem, foi encontrado erro padrão igual a 1,0 mm, sendo este considerado inviável para determinação do consumo hídrico, apesar de R^2 igual a 0,99. Em contrapartida, estudo realizado no município de Seropédica-RJ, com lisímetro de pesagem, por Carvalho et al. (2007), obteve um erro padrão no ciclo de descarregamento, que é caracterizado como a evapotranspiração, por haver a retirada de massa, de apenas 278 g (0,278 mm), também com um R^2 igual a 0,99.

Carvalho et al. (2013) em estudo no desenvolvimento, automação e calibração de lisímetros, obteve R^2 igual a 0,9996, porém um erro padrão de 0,66 mm, ocasionado pela agitação nos ciclos de calibração.

Na Figura 3 estão representados os desvios de massa para as calibrações 1 e 2, respectivamente. Considerando os desvios calculados (Figura 3), com base na média entre os ciclos de carregamento e descarregamento, observa-se, da mesma forma que nas equações anteriores, excelentes ajustes, onde o R^2 foi igual a 0,9837 e 0,9998, para C1 e C2, com acréscimo de -0,00511 e -0,00522 kg no desvio, para cada 0,1000 kg de massa aplicada, para ambas as calibrações. Nota-se que o R^2 foi novamente maior em C2, porém maior foram os desvios, +84,6, +34,1, +21,9, +18,7, +18,5 e +18,4% em relação as massas aplicadas, 10, 20, 30, 35, 35,5 e 35,7 kg, comparado aos valores de C1.

Nota-se na Figura 3, conforme o tempo de uso (C1 \rightarrow C2), maior foi a subestimação da massa aplicada, sendo, para C1 o menor valor do desvio na massa mensurada ocorreu a 10 kg de massa aplicada, sendo igual a -0,32 kg (3,2% em relação aos 20 kg), e para C2 a 35,7 kg, sendo igual a -1,94 kg (5,4%). Já o maior valor, ocorreu a 35,7 kg e 10 kg, sendo -1,64 e -0,59 kg (-4,6 e -5,9%), para C1 e C2, respectivamente.

Figura 3. Desvios em relação a massa aplicada, das calibrações 1 e 2, respectivamente.



O acréscimo nos desvios após um período de uso do lisímetro, conforme apresentado na Figura 4, é justificado pela fadiga ocorrida nas células de carga da balança, em C1 ocorre o esperado, onde em menor massa aplicada acumulada, maior são os desvios, devido a célula de carga ser de uso doméstico, não projetada para trabalhar com baixa “perturbação”, porém, em C2, devido ao ocorrido citado anteriormente, mesmo na maior massa acumulada aplicada (35,7 kg) se obteve desvio de -5,4%, em contrapartida, na C1 esse valor foi de -4,6%.

Nas curvas de resposta real (Figura 2), para C1 e C2, evidenciou expressivos coeficientes de determinação R^2 , porém, ocorreram diversos desvios no processo de calibração, como pode ser observado na Figura 3. Observa-se que ocorre uma tendência nos desvios ocasionados pela resposta não linear das células de carga e seus erros sistemáticos, que não compromete a acurácia das medições realizadas.

Esses desvios podem ser reduzidos, conforme apresentado por Faria et al. (2006) que utilizaram sistema de redução da carga aplicada sobre a célula de carga, onde encontraram desvios inferiores a 0,03 Kg em lisímetros de 3 m² de área. Segundo Vellame et al. (2012), os erros sistemáticos da célula de carga são de pouca importância em lisímetros de pesagem, pois as diferenças de massa são calculadas em curta faixa de medição, além da massa ser determinada pela curva de calibração do mesmo.

Os erros oriundos no processo de calibração foram dispostos na Tabela 1, estando os erros de histerese, linearidade e repetitividade combinador no erro máximo absoluto (EMA). O EMA foi considerado como principal forma de análise, pois considera os maiores desvios encontrados e que podem ser influenciados pela instabilidade durante o processo de calibração, além de fatores ambientais como o vento e temperatura.

Tabela 1. Resumo de erros no processo de calibração 2.

| Características | Erro | |
|----------------------------------|-------------------------|--------------|
| | kg | % da medição |
| Erro máximo absoluto | 2 | 0,498 |
| Histerese | 0,02 | 0,057 |
| | Erro em carregamento | |
| Repetitividade - incerteza (95%) | 0,544 | 1,814 |
| Repetitividade - desvio máximo | 1 | 3,333 |
| Não-linearidade | 2,383 | 10,771 |
| | Erro em descarregamento | |
| Repetitividade - incerteza (95%) | 0,068 | 0,227 |
| Repetitividade - desvio máximo | 0,1 | 0,341 |
| Não-linearidade | 2,383 | 11,458 |

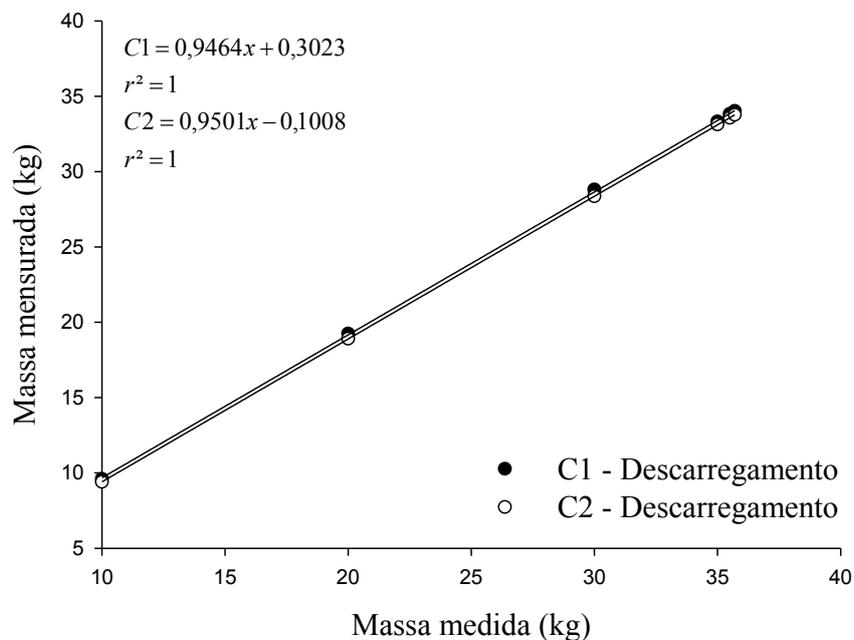
Observa-se que a não-linearidade e a repetitividade foram os erros que influenciaram de forma mais significativa a acurácia do lisímetro, na ordem de 5 e 3 kg (0,98 e 1% da medição) no processo de calibração 1, e 2,383 e 1 kg (11,5 e 3,3%) em C2. Devido aos valores dos erros, nenhum deles podem ser desconsiderados no processo de calibração, principalmente quando em relação aos desvios. Os valores dos erros foram amplamente modificados após o tempo de utilização do lisímetro. A histerese teve uma influência média de 0,09% na medição. O EMA foi o segundo parâmetro de menor influência, 0,4%, o que evidencia os erros sistêmicos, destaque para a repetitividade e não-linearidade, sofridos pelas células de carga, como já citado anteriormente, devido as “perturbações” mecânicas e ambientais.

Segundo Vellame et al. (2011) o erro de repetitividade representa o erro aleatório e interfere significativamente na acurácia, não podendo ser compensado por meio da equação de calibração. Sendo que, em lisímetros de pesagem o erro sistemático de maior importância é o de linearidade pela difícil compensação ou correção.

Na Figura 4 está presente a análise de regressão para o processo de descarregamento, em C1 e C2 com R^2 igual a 1, para ambas as calibrações. Esse processo representa a

evapotranspiração que seria determinada, pois também envolve o processo de retirada de massa. Os desvios médios foram iguais a -0,92 e -1,24 kg, representando 3,9 e 5,5% da massa aplicada, para C1 e C2, respectivamente. Da mesma forma que na Figura 2 e 3, após o tempo de utilização do lisímetro os desvios aumentaram, sendo uma média de 34,5%, representando 9,9 mm.

Figura 4. Análise de regressão da calibração, no processo de descarregamento, em C1 e C2.



6 CONCLUSÃO

Os desvios encontrados possuem uma tendência, causados pelos erros sistemáticos, podendo, portanto, serem corrigidos pela curva de calibração. Fazem-se necessárias calibrações periódicas a fim de compensar os erros sistemáticos que se acentuam ao longo do tempo de operação. Já os erros, mesmo que agravados pelo tempo de utilização do lisímetro, o EMA se manteve, perante as condições das células de carga. O lisímetro mostrou-se efetivo, necessitando de ajuste nas células de carga e Hardware, para maior acurácia por um maior período de tempo, e outras condições de utilização.

7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**. v.98, p.899 – 920, 2011.

ANA. **Balanço das águas: Incentivo aos estados para implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos**. Publicação anual, nº3, março, 2014.

CAMPECHE, L. F. M.; 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, PB, v.15, n.5, p.519 –525, 2011.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CRUZ, F. A.; SOUZA, A. P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, maio/agosto, 2007.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, Julho/Setembro, 2011.

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

FAO. **Towards a water and food secure future: Critical perspectives for Policy-makers**. 2015.

KISI, O. Evapotranspiration modeling using a wavelet regression model. **Irrigation Science**, v.29, n.3, p.241-252, 2010.

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, n. 1, p. 237-242, 2006.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa: UFV, 2009, 355p.

NASCIMENTO, E. F.; CAMPECHE, L. F. S. M.; BASSOI, L. H.; SILVA, J. A.; LIMA, A. C. M.; PEREIRA, A. C. 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. 271-287, julho-setembro, 2011.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; PAZ, V. P. S.; COELHO, E. F. Gradientes térmicos naturais na estimativa do fluxo de seiva pelo método Granier. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 1, p. 116-122, jan.-mar., 2011.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F.; FRAGA JÚNIOR, E. F. Lisímetro de pesagem e de lençol freático de nível constante para o uso em ambiente protegido. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 1, p. 153-159, janeiro/março, 2012.

WHEELER, A. J.; GANJI, A. R. **Introduction to engineering experimentation**. New Jersey: Prentice Hall. 1996. 415p.