UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE RONDONÓPOLIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

CONSTRUÇÃO, AUTOMAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM HIDRÁULICA

JEREMIAS CAETANO DA SILVA

RONDONÓPOLIS – MT
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE RONDONÓPOLIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

CONSTRUÇÃO, AUTOMAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM HIDRÁULICA

JEREMIAS CAETANO DA SILVA

Engenheiro Agrícola e Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Tonny José Araújo da Silva.

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Universitário de Rondonópolis, como parte das exigências para a obtenção do título do Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

RONDONÓPOLIS – MT
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S586c Silva, Jeremias Caetano da.
Construção, Automação e Avaliação de um lisímetro de pesagem hidráulica / Jeremias Caetano da Silva. -- 2013
61 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Tonny José Araujo da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Rondonópolis, 2013.
Inclui bibliografia.

1. calibração. 2. automação. 3. evapotranspiração. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo (a) autor (a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
Programa de Pós – Graduação em Engenharia Agrícola

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

CONSTRUÇÃO, AUTOMAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM HIDRÁULICA

Autor: JEREMIAS CAETANO DA SILVA

Aprovado em 06 de dezembro de 2013

Comissão Examinadora:

Prof°. Dr. Tonny José da Silva Araújo – UFMT
(Orientador)

Prof°. Dr.Carlos Alberto Viliotti – UFMT

Prof°. Dr. Ênio Farias França e Silva – UFRPE

À **DEUS** por tudo o que tenho e o que sou

AGRADEÇO

Aos meus pais **JOSE CAETANO DA SILVA** e **EDITE VIEIRA DA SILVA**, pois me ensinaram a importância da educação e respeito ao próximo.

DEDICO

À minha esposa **DAYANE FRANCISCA DE MIRANDA,** pelo apoio incondicional neste projeto, te amo...!

OFEREÇO
AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que é o único digno de receber toda honra e glória aquele que criou o universo e o sustém.

À Universidade Federal de Mato Grosso pela oportunidade do conhecimento.

À CAPES/FAPEMAT pelo apoio financeiro durante este trabalho para que eu realizasse este sonho. Muito Obrigado...!!!

Ao digníssimo Prof. Dr. Tonny José Araújo da Silva, minha gratidão pelos ensinamentos, por horas de dedicação à campo e em laboratório, explicito o meu respeito e admiração pelo profissional exemplar e ser humano admirável.

Aos meus pais José Caetano da Silva e Edite Vieira e meus irmãos: Gilson Caetano, Giscélia Caetano e Gislaine Caetano, pelo apoio incondicional durante toda a minha vida. A minha conquista é de vocês. Estaremos eternamente unidos!

A minha esposa Dayane F. de Miranda por ter compreendido os momentos de ausência e pelo apoio incondicional. Você foi muito importante neste processo...!!!

Aos Professores do curso de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Rondonópolis. Vocês são demais...!!!

Aos engenheiros mecânicos Renato Thillman e Márcio Vizon pelo apoio neste trabalho.

Ao graduando em Engenheira Agrícola Rogério pela contribuição e dedicação.

“Porque Deus amou o mundo de tal maneira, que deu o seu filho unigênito para que todo aquele que n’Ele crê não pereça, mas tenha a vida eterna”.

João 3:16

“Seja a Mudança que você quer ver no mundo”.

Mahatma Gandhi.

RESUMO

O presente trabalho descreve os procedimentos de construção, automação e avaliação de um lisímetro de pesagem hidráulica para obtenção de medidas de evapotranspiração de referência na região de Rondonópolis-MT, cujas coordenadas geográficas no sistema SAD 69 (South American Datum) são latitude 16°28”15’ sul e 54°38”08’ de longitude oeste com altitude de 284 m. As medidas obtidas no lisímetro com aquelas obtidas pelos seguintes métodos Jensen-Haise, Penman-Monteith e Tanque Classe A. O lisímetro com área de 1 m^2 e 0,7 m de profundidade, foi construído com chapa de ferro. O mesmo foi revestido por uma camisa de concreto e preenchido com camadas de 0,10 m de solo, sendo a primeira camada preenchida com brita, contendo em seu interior três tubos de PVC crivado, para facilitar a drenagem de água no contêiner interno e um tubo central para monitorar a umidade do solo. Após o preenchimento do lisímetro foi feito a calibração com adição e retirada de pesos de 1 kg. Também foram instalados na mesma área uma estação agrometeorológica automática, um dispositivo de aquisição de dados (datalloger) e um tanque Classe A. Os períodos de registros meteorológicos deste trabalho compreendem de 01/08/2013 a 31/10/2013. Com os resultados obtidos foi possível concluir a relação entre a diferença de pesos padrão de 1 kg e a leitura registrada no manômetro quanto no sensor, foram lineares com (R^2= 0,99) tanto na calibração central quanto com carga pontual nas células de carga ou vértices das mesmas, demonstrou alta estabilidade das leituras. O coeficiente de calibração (*k*) para o datalogger foi de 1,017 e o erro médio posicional foi de 4,24%. As medidas diárias de ETo obtidas pelo lisímetro que melhor se correlacionaram com aquelas estimadas foram pelo método de Penman-Monteith (R^2= 0,56), sendo que quando comparado com as estimativas de Jensen Haise o coeficiente de determinação foi de (R^2= 0,36) e pelo método do Tanque Classe A (R^2= 0,48).

Palavras chave: calibração, automação, evapotranspiração.

ABSTRACT

This paper describes the construction procedures, automation and evaluation of a hydraulic weighing lysimeter for obtaining measurements of evapotranspiration in the region Rondonópolis - MT, the positions in SAD 69 (South American Datum) system are latitude 16°2''15' south and 54°38''08' west longitude at an altitude of 284 m. The measurements obtained in lysimeters with those obtained by the following methods Jensen - Haise, Penman-Monteith and Tank Class A. The lysimeter with an area of 1 m^2 and 0.7 m deep, was constructed with iron plate. The same was coated by a jacket filled with concrete layer and 0.10 m of soil, the first layer being filled with gravel, containing within it three PVC pipes sieved, to facilitate drainage of water in the inner container and central tube to monitor soil moisture. After filling the lysimeter calibration was done with the addition and removal of weights 1 kg. Were also installed in the same area an automatic weather station, a device data acquisition (datalloger) and class A pan Periods of meteorological records of this work comprise of 01/08/2013 to 31/10/2013. With the results we conclude the relationship between the difference of standard weights 1 kg and the reading recorded at the gauge as the sensor were linear with (R^2 = 0.99) in both the calibration and with central point load cells or load vertices of the same showed high stability of the readings. The calibration coefficient (k) for the datalogger was 1.017 and the average positional error was 4.09%. Daily measurements obtained by lysimeter ETo that best correlated with the estimated values were the Penman-Monteith (R^2= 0.56) and compared with the estimates of Jensen Haise the coefficient of determination was (R^2= 0.36) and the Class A pan (R^2= 0.48).

Keywords: calibration, automation, evapotranspiration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática dos tipos de lisímetros: (a) Lisímetro de Drenagem ou Percolação, (b) Lisímetro de Pesagem Mecânica, (c) Lisímetro Flutuante e (d) Lisímetro Hidráulico **19**

Figura 2 – Localização geográfica do experimento..... **25**

Figura 3 – Confecção das placas e camisa **26**

Figura 4 – Tratamento contra corrosão do contêiner interno **26**

Figura 5 – Detalhe construtivo das células de carga hidráulica **27**

Figura 6 – Bases de apoio em concreto armado. **27**

Figura 7 – (A) Manômetro de mercúrio; (B) Transdutor de pressão..... . **28**

Figura 8 – (a) Tubo de acesso em PVC crivado, (b) envelope de brita, (c) manta bidim e (d) representação esquemática da báscula **29**

Figura 9 – (a) estação agrometeorológica, (b) estação climatológica do INMET e (c) Tanque Classe A **30**

Figura 10 – Processo de enchimento do contêiner com solo **30**

Figura 11 – (a) tubo de acesso para sonda de umidade; (b) tubos de drenagem; (c) células de carga; (d) camisa e (e) contêiner interno..... **31**

Figura 12 – Dispositivo de controle das células de carga hidráulica..... **32**

Figura 13 – Calibração em campo **33**

Figura 14 – Isolamento do lisímetro ao ambiente externo..... **34**

Figura 15 – Variação das diferenças de leitura no manômetro (LM) em razão das Extrações de água sucessivas (EA) de volumes constantes de 50 ml de fluído (água) em três células de carga de pesagem hidráulica **36**

Figura 16 – Análise de regressão entre leituras observadas no transdutor (Tr) e manômetro de mercúrio (man) em função da adição (+) e retirada (-) dos pesos com massa de 1 kg.....**37**

Figura 17 – Relação entre a variação de massa e a leitura visual (LV), e transdutor de pressão (LD), com carga pontual Massa (M) em cada uma das três células de carga hidráulica **39**

Figura 18 – Relação entre a variação de massa e a leitura visual (LV), e transdutor de pressão (LD), com carga pontual Massa (M) em cada uma das três vértices formada pelas células de carga hidráulica.....**40**

Figura 19 – Dados de temperatura e manômetro.....**42**

Figura 20 – Correlação entre a temperatura obtida no datalogger e a leitura corrigida.**43**

Figura 21 – Comparação de variação dos valores de leituras lisimétricas, em mm, das leituras reais e corrgidas.....**44**

Figura 22 – Correlação entre os valores diários da ETo medidos pelo lisímetro e estimados por Penman-Monteith, para o período de 01/08/2013 a 31/10/2013 em Rondonópolis – MT **45**

Figura 23 – Correlação entre os valores diários da ETo medidos pelo lisímetro e estimados pelo Tanque Classe A, para o período de 01/08/2013 a 31/10/2013 em Rondonópolis – MT **46**

Figura 24 – Correlação entre os valores diários da ETo medidos pelo lisímetro e estimados pelo método empírico de Jensen Haise, para o período de 01/08/2013 a 31/10/2013 em Rondonópolis – MT **47**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumos dos coeficientes de calibração (k) e erro médio com carga pontual nas células de carga hidráulica, nos vértices e na parte central do lisímetro **41**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

2. REVISÃO DE LITERATURA 16

2.1 Evapotranspiração 16

2.1.1 Tipos de evapotranspiração 17

2.1.2 Fatores determinantes da ET 18

2.2 Lisimetria 18

2.3 Tanque Classe A 20

2.4 Penman-Monteith 22

2.5 Datalogger 23

2.6 Sensores 24

3. MATERIAL E MÉTODOS 25

3.1 Descrição da área experimental 25

3.2 Construção do lisímetro 25

3.3 Cálculo do volume ideal nas células de cargas 31

3.4 Ensaio de Calibração 33

3.5 Efeito da temperatura no sistema de leitura manométrico 33

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 35

4.1 Avaliação construtiva do lisímetro 35

4.2 volume de fluido ideal nas células de carga 35

4.3 Coeficiente de calibração e estabilidade 36

4.4 Influencia da temperatura na leitura lisimétrica 42

4.5 Medidas de evapotranspiração 44

5. CONCLUSÃO 48

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 49

APÊNDICE 55

1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é o processo da evaporação da água do solo e da transpiração das plantas, sendo esta água cedida à atmosfera, como um dos componentes de saída no balanço hídrico.

Como a água constitui um dos principais insumos destinados à produção de alimentos, a evapotranspiração de referência assume um aspecto fundamental no planejamento agrícola, pois é amplamente utilizada na estimativa da demanda de água pelas plantas (KASHYAP e PANDA, 2001).

Existem diversos métodos usados para a mensuração da evapotranspiração de referência, dentre os mais empregados estão os indiretos, que se baseiam em dados meteorológicos, muitas vezes não disponíveis na região de interesse e que apresentam problemas de precisão, pelo fato de terem sido desenvolvidos em condições climáticas diferentes daquelas onde normalmente foram testados.

Os métodos diretos são mais precisos em relação aos métodos indiretos, dentre os métodos diretos destaca-se a lisimetria. Segundo Silva et al. (2003) os lisímetros de pesagem hidráulica são equipamentos que apresentam qualidade e precisão dos resultados, além de baixo custo e facilidade na construção e operacionalização.

Conforme Campeche (2002) os lisímetros quando bem projetados, levando-se em consideração o local a ser implantado, condições climáticas, tipo de solo, disponibilidade de materiais, custos, calibração e manejo medem precisamente a evapotranspiração das culturas.

A calibração é um dos principais procedimentos para que se tenham dados confiáveis de evapotranspiração deve ser realizada in situ, nas condições climáticas de seu funcionamento, adicionando e removendo pesos conhecidos estabelecendo relação entre a coluna manométrica e a massa do sistema.

Com o surgimento de novas tecnologias aplicadas na agricultura, a automação apresenta-se como uma ferramenta importante e confiável aplicada ao estudo lisimétrico para obtenção da evapotranspiração de referência.

Sendo que o processo de automação na agricultura tem se tornado cada dia mais frequente, facilitando a aquisição de dados e melhorando o desempenho dos sistemas agrícolas, aumentando a produtividade e a qualidade de vida do homem no campo.

Portanto, tendo em vista a importância da automação nos dias atuais e de se mensurar corretamente a ETo, este trabalho teve os seguintes objetivos: (a) Construção e calibração de um lisímetro de pesagem hidráulica para o monitoramento da evapotranspiração de referência na região Sul de Mato Grosso; (b) Automação de todo lisímetro envolvendo sistema de irrigação e drenagem, com coleta de dados a cada 10 minutos; (c) Avaliação do lisímetro através do cálculo do erro médio posicional e coeficiente de calibração (*k*) e (d) obtenção de correlações de evapotranspiração de referência pelo lisímetro, Penman-Monteith, pelo método do tanque Classe A e Jensen Haise.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração

Existe uma variedade de publicações acerca de assuntos relacionados a Evapotranspiração publicado por diversos autores: (FONTANA, 1992; MAVI e TUPPER 2004; MISRA et al, 2011) entre outros.

Segundo Viana (2000), a evapotranspiração nada mais é do que a combinação de dois processos pelos quais a água é perdida por evaporação na superfície do solo e também pela transpiração das plantas, sendo que a evaporação é um processo em que a água líquida é convertida em vapor d´água e removida da superfície, como por exemplo: lagos, rios, pavimentos, solo, vegetação molhada entre outros.

A Transpiração consiste na vaporização da água no estado líquido contido nos tecidos das plantas, através dos estômatos que são pequenas aberturas nas folhas onde gases e vapores de água passam. Portanto, evaporação e transpiração ocorrem simultaneamente não sendo fácil distinguir os dois processos (VIANA, 2000).

Segundo Bernardo et al. (2005) a evapotranspiração depende da quantidade de energia solar que chega na área considerada. No caso de solos descobertos estes estão sujeitos a maiores intensidades de ET, pois incidirá energia solar diretamente sobre a área e ainda energia de massa de ar quente e com baixa umidade relativa do ar, proveniente da área sem cobertura vegetal, sendo este fenômeno conhecido como efeito oásis.

Henrique (2006) argumenta que a importância do processo de transferência de água para a atmosfera na forma de vapor e sua complexidade, envolvendo características do solo, da vegetação e atmosfera, tem feito com que muitos pesquisadores no mundo se esforcem para a compreensão e estabelecimento de métodos de estimativa deste processo.

Uma grande dificuldade em projetos de irrigação é definir criteriosamente o valor da evapotranspiração para a cultura que se deseja trabalhar e que servirá de base para o dimensionamento do sistema de irrigação. Desta forma, na agricultura irrigada, o entendimento e mensuração da evapotranspiração, tornaram-se de fundamental importância (URCHEI e FIETZ 2001).

Para Daker (1984) o clima influi diretamente na evaporação do solo e na transpiração vegetal, (evapotranspiração), constituindo o elemento de maior importância

na determinação da quantidade de água necessária para a irrigação das culturas.

Na agricultura, informações quantitativas da evapotranspiração são de grande importância na avaliação da severidade, distribuição e frequência dos déficits hídricos, elaboração de projetos e manejo de sistemas de irrigação e drenagem (DAKER, 1984).

2.1.1 Tipos de evapotranspiração

Existem vários tipos de evapotranspiração: Evapotranspiração Potencial também definida como evapotranspiração de Referência (ETo), Evapotranspiração Real (ETR), Evapotranspiração de Oásis (ETo) e evapotranspiração da Cultura (ETc), sendo muito importante o discernimento de cada uma delas para o melhor uso da água na agricultura (PEREIRA et al. 2002).

A ETo é a quantidade de água utilizada por uma superfície vegetada com grama ou alfafa, com altura entre 8 e 15 cm, em pleno crescimento vegetativo cobrindo totalmente a superfície do solo e com disponibilidade hídrica. Portanto, a ETo é um valor indicativo de demanda evapotranspirativa da atmosfera em um dado local, em um período de tempo. (PEREIRA et al. 1997).

Para Doorenbos e Pruitt. (1977) a evapotranspiração de referência ocorre em uma extensa superfície gramada, em pleno crescimento ativo, com altura de 0,08 a 0,15 m, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água.

Evapotranspiração de cultura (ETc) é a aquela que ocorre em uma cultura, em qualquer fase de seu estádio de desenvolvimento, desde a semeadura até a maturação, sem que haja influência de fatores que possam comprometer negativamente o seu desenvolvimento. Ao contrário da ETo, a ETc representa a evapotranspiração de uma mesma cultura mas que não necessariamente esteja nas condições padrões, ou seja, sob condições de advecção de calor sensível, deficiência hídrica e/ou nutricional e com ocorrência de pragas e doenças (DOORENBOS e PUITT. 1977)

Para Mantovani et al. (2006) a ETc é determinada por meio da multiplicação da evapotranspiração de referência e de um coeficiente de cultura (Kc), que nada mais é, do que um componente representativo da cultura, variando de acordo com o estádio fenológico da planta.

Segundo Doorenbos e Pruitt. (1977) a ETc é caracterizado como sendo a evapotranspiração de um cultura agronômica, livre de doenças, desenvolvendo-se numa área cultivada de um ou mais hectares, sob condições ótimas de solo, incluindo-se água

e fertilidade.

Pereira et al. (2002) relata que a ETc é em função da área foliar que é a superfície transpirante, pois quanto maior a área foliar maior será a ETc para uma mesma demanda atmosférica, sendo que a ETc pode ser obtida a partir da relação: ETc= Kc**.** ETo, em que Kc é o coeficiente da cultura, que pode variar entre as fases fenológicas, espécies e cultivares.

2.1.2 Fatores determinantes da ET

Nota-se que em dias ensolarados, com ar seco, a velocidade de secamento é maior, sendo que atualmente tem-se melhor visão de seus principais fatores determinantes, facilitando o entendimento dos mesmos, (PEREIRA et al. 2002). Segundo o mesmo autor, os principais fatores que influenciam na evapotranspiração podem ser divididos em três principais grupos:

1. Fatores climáticos: radiação líquida, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento;
2. Fatores da cultura: Espécie, coeficiente de reflexão ou albedo, estádio de desenvolvimento, Índice de área foliar (IAF), altura da planta, profundidade do sistema radicular;
3. Fatores ambientais e de solo: Espaçamento/densidade de plantio, orientação do plantio e capacidade de armazenamento da água.

2.2 Lisimetria

De acordo com Machado (1996), o primeiro relato de utilização de lisímetros ocorreu na França, em 1688, quando De La Hire usou recipientes preenchidos com solo argilo-arenoso e observou que nos lisímetros cobertos com grama a perda de água era maior do que em outros com solo sem cobertura vegetal. Nos Estados Unidos, o primeiro a utilizar um lisímetro para mensurar a evapotranspiração em condições de campo foi Thorntwaite, (GREBET e CUENCA, 1991).

Segundo Campeche (2002), os lisímetros podem ter diferentes configurações, dependendo do clima, disponibilidade de materiais e custos envolvidos em sua construção. Estudos feitos com lisímetros instalados em campo demonstraram ser uma

ferramenta sustentável para a determinação dos componentes do balanço hídrico para o sistema solo-planta-atmosfera (SSPA), conforme mencionou LOOS et al. (2007).

Para Tucci (2007) as variáveis controladas no lisímetro como: precipitação, escoamento, infiltração, armazenamento e percolação, permitem estabelecer a evapotranspiração real ou potencial, sendo que para a ETr, mantem-se as condições do naturais de umidade do solo.

Segundo Aboukhaled et al. (1986) os lisímetros são recipientes preenchidos com solo localizados no campo para representar o meio, com superfícies vegetadas (cultura ou grama) para a determinação da evapotranspiração de referência ou de cultura, sendo classificados em duas categorias: lisímetros de pesagem e lisímetros volumétricos.

Para Machado e Matos (2001) os lisímetros são divididos em duas grandes categorias: os lisímetros de pesagem: mecânica, eletrônica, hidráulica e de flutuação. Outra categoria são os lisímetros não pesáveis também chamados de volumétricos: drenagem e lençol freático.

Para Bernardo et al. (2005) os lisímetros são classificados em quatro grupos: lisímetro de drenagem, pesagem, flutuante e Lisímetro hidráulico (figura 1).

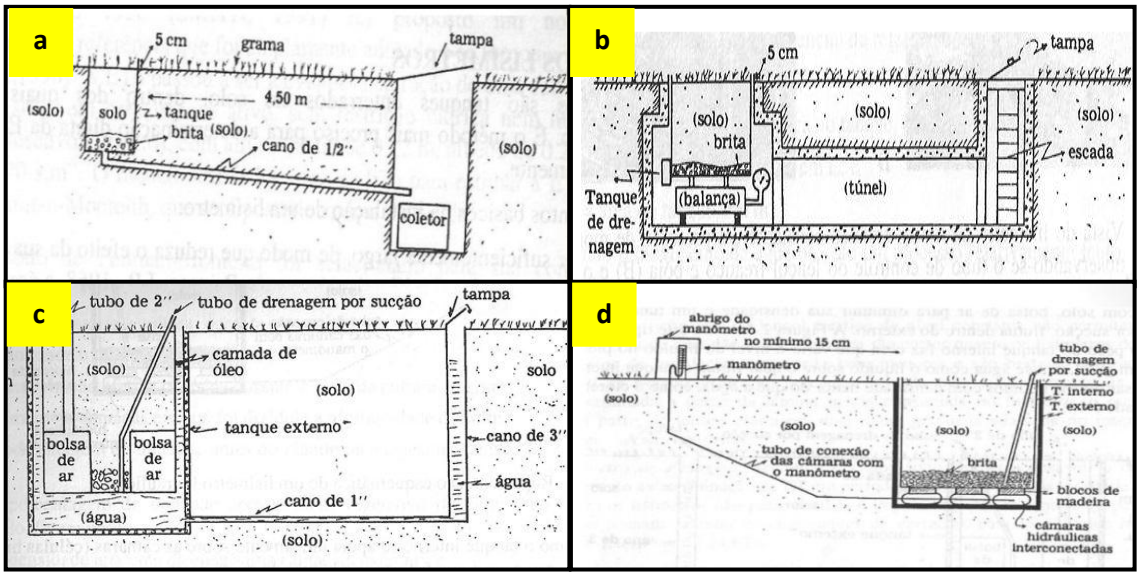

Figura 1 – Representação esquemática dos tipos de lisímetros: a) Lisímetro de Drenagem ou Percolação, b) Lisímetro de Pesagem Mecânica, c) Lisímetro Flutuante e d) Lisímetro Hidráulico. Fonte: Bernardo et al. (2005).

Lisímetros são grandes “containers”, localizado no campo e preenchidos com solo, a fim de representar o ambiente local, com superfície vegetada ou em solo nú, para determinação da evapotranspiração de uma cultura em crescimento ou de uma cobertura

vegetal de referência ou ainda da evaporação a partir de um solo não vegetado (MEDEIROS, 2002).

Para Mantovani (1993) os lisímetros são equipamentos constituídos de uma caixa impermeável sendo a mesma preenchida com a mesma sequência de horizontes do solo original.

Bernardo et al. (2005) os lisímetros devem ser profundos para que não afete o sistema radicular das plantas nele cultivadas, as condições físicas do solo dentro do lisímetro devem ser parecidas com o solo que fica externo bem como a umidade do solo, a vegetação plantada dentro do lisímetro deve ser da mesma espécie, altura e densidade da vegetação externa. segundo o mesmo autor os lisímetros devem ser instalados em área plana e homogênea.

Os lisímetros podem ter diferentes formas conforme a necessidade exigida à campo, dependendo do clima, disponibilidade de materiais na região e custo envolvidos na construção. A qualificação do pessoal de montagem, os materiais disponíveis, nível de tecnologia empregada e o seu tamanho irão influenciar no custo da construção conforme mencionaram (KIRKHAN et al. 1984) e (SCHENEIDER et al. 1998).

Segundo Silva (2000) os lisímetros quando bem instalados, possibilitam medidas precisas da evapotranspiração, principalmente quando os mesmos são preenchidos corretamente, pois desta forma, o perfil de solo no seu interior assemelha o máximo possível das camadas de solo da área externa.

Silva et al. (2003) comentam que os lisímetros de pesagem hidráulica são equipamentos que apresentam qualidade e precisão dos resultados, além de baixo custo e facilidade na construção e operacionalização.

Lisímetros de pesagem são mais precisos quando aferem valores de evapotranspiração em períodos inferiores a 24 horas, sendo que a precisão do equipamento é influenciada pelo posicionamento das células de carga, ou seja, quando as células são instaladas próximo a superfície do solo, há instabilidade no sinal elétrico devido a temperatura, afetando diretamente os valores horários de evapotranspiração (ALLEN e FISCHER, 1991).

2.3 Tanque classe A

Segundo Sentelhas (2003) para o método do Tanque Classe A (TCA), a estimativa da evapotranspiração de referência é um método irrigacionista e baseia-se no

princípio de que a água contida no tanque não oferece nenhum impedimento ao processo de evaporação.

Ainda segundo o mesmo autor o valor obtido no tanque é exagerado em relação a perda real de uma cultura qualquer, mesmo estando ela em ótimas condições de suprimento de água no solo, necessitando-se ser corrigido por um fator denominado coeficiente do tanque (Kp). Para o cálculo da evapotranspiração de referência, utiliza-se a seguinte equação:

$$ETP = ECA.Kp \quad (1)$$

Onde:

ETP – evapotranspiração de referêncioa (mm/dia);

ECA – evaporação medida no tanque (mm/dia);

Kp – coeficiente do tanque.

No uso do (Tanque Classe A) para mensurar a ETo, o valor da evaporação do tanque é corrigido por um coeficiente (kp) que é tabelado (sempre menor do que 1), que é função da umidade relativa média do local, velocidade do vento, distância e tipo da bordadura que circunda o tanque. (DOORENBOS e PRUITT, 1977).

$$Kp = 0{,}482 + 0{,}024\ln(B) - 0{,}000376(U) + 0{,}0045(UR), \quad (2)$$

Onde:

B – bordadura (m);

U – velocidade do vento (km.dia^{-1});

UR – Umidade relativa média (%).

Para Sentelhas (2003), é comum que se adote um valor fixo de Kp quando dados de umidade relativa e umidade do vento não estão disponíveis. Segundo o mesmo autor dados experimentais mostraram que o Kp= 0,72 tem sido o valor que proporciona os menores erros para condições de clima úmido.

Segundo Sentelhas (2001), o Tanque Classe A é o mais utilizado no Brasil. Apresenta área de aproximadamente 1,15 m^2 e deve ser instalado sobre uma superfície gramada em um estrado de madeira. Sua simplicidade de manuseio é contraposta a algumas desvantagens como a exposição às condições ambientais, a facilidade de acesso de animais e ao fato da evaporação ocorrer também no período noturno, fato que dificulta sua correlação com métodos tradicionais de estimativa de ETo.

Villa Nova e Sentelhas (1999) apresentaram um sistema alternativo de medida, que acoplado ao tanque Classe A, possibilita efetuar um balanço entre a água evaporada do tanque e a precipitação. Segundo os autores citados anteriormente, devido a facilidade oferecida na obtenção das leituras, não exigindo a presença de pessoal treinado, o tanque medidor também é um pluviômetro, permitindo a leitura em condições de dias com chuvas leves sem a necessidade de dados pluviométricos.

2.4 Penman-Monteith

A evapotranspiração de referência (ETo,) pela equação de Penman – Monteith, foi elaborada seguindo as recomendações da FAO, conforme (ALLEN et al. 1998), sendo descrita na equação abaixo:

$$ETo = \frac{0{,}408s(Rn - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} u(es * ea)}{s + \gamma(1 + 0{,}34u)} \quad (3)$$

Onde:

ETo – evapotranspiração de referência para gramado ($mm.dia^{-1}$);
S – relação entre a pressão de vapor e a temperatura média do ar (kPa°C);
Rn - radiação líquida ($MJ.m^2.dia^{-1}$);
γ – constante psicrométrica (kPa °C);
G – densidade do fluxo de calor no solo ($MJ.m^2.dia^{-1}$);
T – temperatura média (°C);
U - velocidade do vento a 2 metros de altura ($m.s^2$);
Es – pressão de vapor de saturação (kPa);
ea – pressão de saturação do ar (kPa).

Smith et al. (1996) revisando a metodologia de determinação das necessidades hídricas de culturas, proposta pela FAO, reconheceram a equação de Penman-Monteith como método padrão na determinação da evapotranspiração de referência e de culturas. Além disso, a mudança na definição de evapotranspiração de referência, para uma cultura hipotética com parâmetros fixos, facilita a calibração do coeficiente de cultura na utilização do manejo da irrigação.

Santos et al. (2008) compararam os valores obtidos por um lisímetro de

pesagem hidráulica de baixo custo com os métodos de Penman-Monteith, Blaney-Criddle FAO, Jensen-Haise e do Tanque Classe A FAO e encontraram medidas bem correlacionadas às do lisímetro para o período de estudo, sendo que o Tanque Classe A apresentou melhor desempenho entre os métodos avaliados.

Jensen et al. (1990) relatam que a equação de Penman-Monteith é mais precisa quando usada na base horária e fazendo-se a somatória diária dos valores para se obter estimativas diárias de ETo. Segundo Doorenbos e Kassam (1977), deve-se ter cuidado no manuseio, sendo que o uso dos dados climáticos pode conduzir a erros significativos. Esses erros é resultado de várias interações entre elementos climáticos, como radiação solar, umidade, velocidade e direção do vento, temperatura do ar, etc.

Kashyap e Panda (2001) trabalhando em uma região de clima sub-úmido, correlacionaram medidas de ETo obtidas em um lisímetro de pesagem, instalado em uma área gramada com 10 m de bordadura, com estimativas obtidas a partir de 10 métodos climatológicos. Segundo os autores citados anteriormente, todos os métodos empregados correlacionaram bem com as medidas do lisímetro, embora o método de Penman-Monteith foi o que melhor se ajustou.

Smith (1991) propôs a adoção de uma definição padronizada para a evapotranspiração de referência, utilizando o modelo de Penman com as modificações propostas por Monteith. Assim, a evapotranspiração de referência seria aquela que ocorresse em uma cultura hipotética, apresentando as seguintes características: altura de 0,12m, resistência do dossel de 69 $s.m^{-1}$ e coeficiente de reflexão de 23%, desde que bem suprida de nutrientes e de água.

2.5 Datalogger

Datalogger é um sistema de aquisição de dados utilizado para o registro de sinais gerados pelo sensor. Os sinais provenientes dos sensores são, em sua maioria, analógicos. Tais sinais, ao chegarem ao sistema de aquisição de dados, são convertidos em sinais digitais, contendo informações da amplitude ou da grandeza em questão (HELFRICK e COOPER, 1994).

Segundo Gomide, (apud Almeida, 2012, p. 21) o sistema de aquisição de dados consiste de diversos elementos que o compõem, como: condicionador de sinais circuito divisor de tensão, amplificador operacional e outros, dispositivo de indicação visual monitor de vídeo, mostrador de cristal líquido ou numérico, conversor analógico digital

e registrador memória externa, disco rígido e outros. Este sistema é vantajoso, pois torna flexível a manipulação dos dados, uma vez que, de acordo com o programa desenvolvido para coletar os dados, estes podem ser tratados conforme a natureza do dado.

2.6 Sensores

De acordo com Bastos (2002), sensores são dispositivos que variam suas propriedades sob a ação de uma grandeza física, fornecendo um sinal que indica essa grandeza. Para Moreira (2007) sensor é um tradutor de valores, geralmente não-elétrico, para um valor elétrico; este pode ser canalizado, amplificado e modificado através de dispositivos eletrônicos. O sinal de saída pode apresentar-se na forma de diferença de potencial e corrente elétrica (GÜTHS e De PAULO, 1998). Tal conjunto de características é designado pelo formato do sinal de saída. Assim, um sensor apresenta propriedades de entrada, que podem ser de qualquer tipo, e propriedades elétricas de saída (BOLTON, 1988).

Os sensores e os sistemas de aquisição de dados possuem características desejáveis, como: sensibilidade, precisão, faixa de atuação, estabilidade, tempo de resposta, histerese, linearidade e outros. Os erros ou desvios sempre representam um resultado discutível, por esse motivo, tem como verificar e classificar os tipos de erros que o sistema de captura está fornecendo na leitura e no armazenamento dos dados, como: erros grosseiros, sistemáticos, instrumentais e outros (BASTOS, 2002).

Em virtude do mau trato ou de efeitos de sobrecarga dos instrumentos, pode-se dizer, com grande convicção, que os erros de medição são originados, muito mais vezes, mais pelo operador do que pelo próprio instrumento (HELFRICK e COOPER, 1994).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área experimental

O trabalho foi conduzido na estação meteorológica da Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, Campus Rondonópolis, cujas coordenadas geográficas no sistema SAD 69 (South American Datum) são latitude 16°28”15’ sul e 54°38”08’ de longitude oeste e altitude de 284 m (figura 2).

A cidade de Rondonópolis está inserida numa área de clima tropical continental quente (megatérmico), sendo alternado entre o úmido e seco em função do ritmo de atuação dos sistemas tropicais, equatoriais e extratropicais (SETTE, 1996).

Figura 2 – Localização geográfica do experimento

3.2 Construção do lisímetro

O lisímetro de pesagem hidráulica foi composto pela associação de dois tanques, sendo o contêiner externo feito de placas pré-moldadas de concreto. Na sua construção optou-se pela técnica construtiva de cisternas, conforme Bernart et al. (1993) por ser de baixo custo e de fácil manuseio. As dimensões do molde de utilizado na confecção das placas foram as seguintes: 0,48 x 0,5 x 0,03 m (largura, comprimento e espessura) respectivamente, totalizando 16 placas pré-moldadas montadas em duas fileiras de oito placas (figura 3).

Figura 3 – Confecção das placas e camisa.

O contêiner interno foi confeccionado com chapa de ferro com 4 mm de espessura por apresentar boa resistência mecânica, com diâmetro de 1,13 m e 0,70 m profundidade recebendo tratamento contra intemperismo químico, primeiramente com fundo epóxi e depois aplicação de tinta epóxi, conforme (figura 4).

Figura 4 – Tratamento contra corrosão do contêiner interno.

Para o sistema de pesagem hidráulica confeccionou-se três células de carga hidráulicas, com mangueiras do tipo auto extinguível fabricadas com butil-propileno, reforçado com nylon com as seguintes dimensões: 850 mm de comprimento e 101,60 mm de diâmetro interno.

As mangueiras tiveram as suas extremidades fechadas por pressão, utilizando-se dois pares de tubos galvanizados com 0,2 m de comprimento, usando-se um par por

extremidade. Os tubos foram perfurados transversalmente para colocação de parafusos sextavados com 6,35 x 63,5 mm. Não houve a necessidade de adicionar cola nas extremidades da mangueira, porque a vedação foi realizada apenas com a pressão exercida pelos tubos com parafusos. Utilizou-se um conector de metal para acoplamento do tubo flexível de polietileno na parte central das células hidráulicas (figura 5).

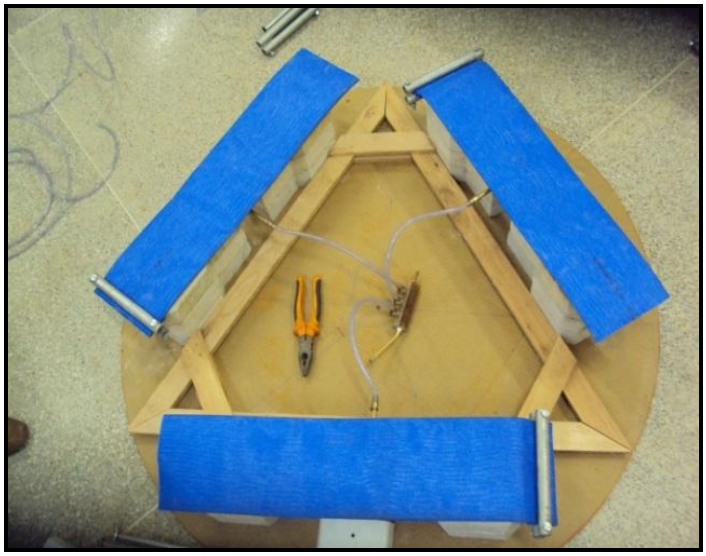

Figura 5 – Detalhe construtivo das células de carga hidráulica.

Também foram construídas três bases para apoio das células hidráulicas feitas de concreto armado no traço 3:1:1 com as seguintes dimensões: 0,60 x 0,15 x 0,20 m, sendo que o topo da base foi cuidadosamente nivelado. Após a construção das bases esperou-se 28 dias para o procedimento de montagem do sistema de pesagem (figura 6).

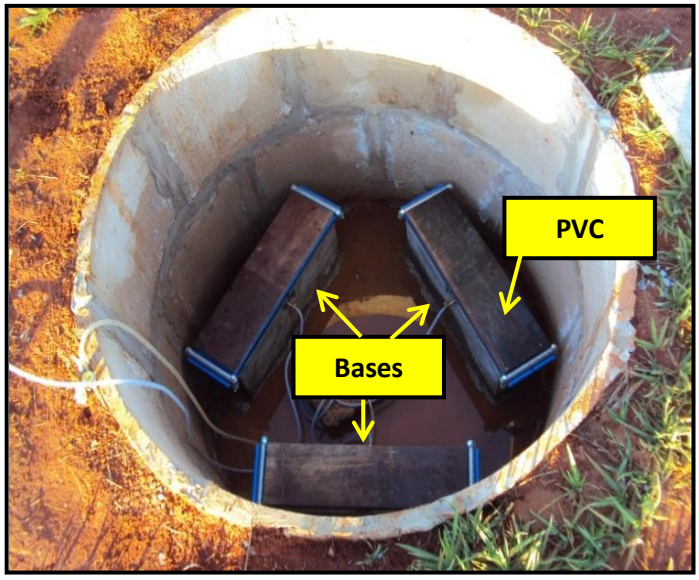

Figura 6 – Bases de apoio em concreto armado.

Para a leitura visual foi construído um manômetro de mercúrio com dois recipientes cilíndricos de vidro com as seguintes dimensões: 12 cm de comprimento e 3 cm de diâmetro interno, onde suas extremidades foram lacradas com chapas de PVC rígido de 20 mm de espessura. Na vedação utilizou-se dois anéis de borracha do tipo oring e 4 hastes rosqueáveis de 3,5 mm de espessura e porcas. O fundo dos recipientes foi interligado por intermédio de um tubo de polietileno transparente.

Um sensor de pressão para água modelo PX26 – 001DV com range de (-0,07 à +0,07 mV) foi acoplado após a coluna de mercúrio do manômetro, com a finalidade de automatizar as leituras de pressão (figura 7).

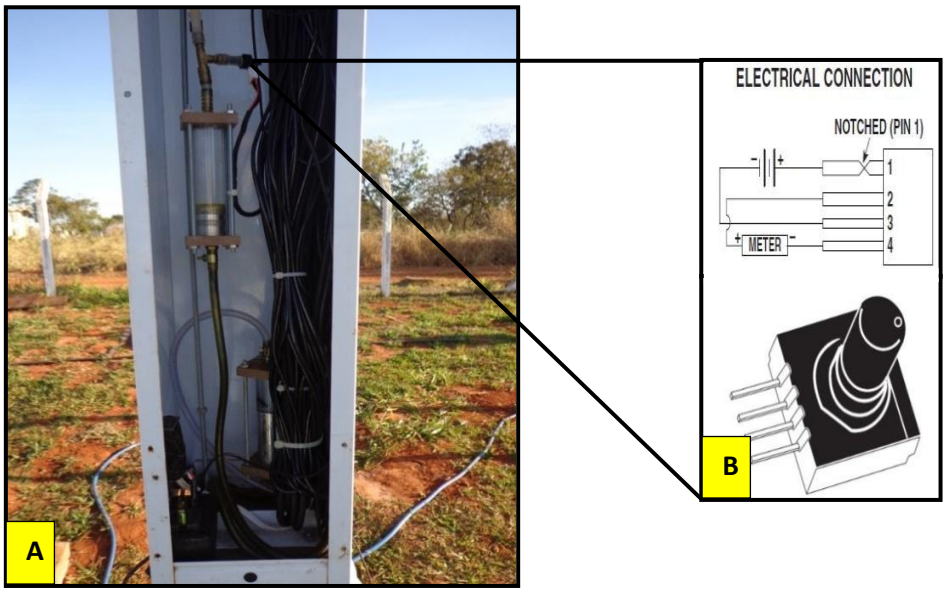

Figura 7 – (A) Manômetro de mercúrio; (B) Transdutor de pressão. Fonte: http://www. omega.com. (2013).

Para quantificar as perdas de água por drenagem durante a irrigação do lisímetro e principalmente durante o período de chuvas, foi construído um sistema de drenagem por gravidade.

Um tubo de PVC com 0,2 m de diâmetro e 2 m de comprimento foi instalado ao lado do contêiner externo para a captação da água drenada, utilizou-se 3 tubos de PVC crivados com 75 mm de diâmetro os quais foram inseridos dentro do contêiner interno sendo que para cada tubo de PVC foi inserido 1 cápsula de argila porosa.

Com o auxílio de tubos de polietileno transparente conectado a cápsula de argila porosa, foi feito a ligação hidráulica ao tubo de recebimento da água drenada, sendo que a captação de água foi mensurada através de uma báscula. Finalizou-se o

sistema de drenagem envelopando o fundo do contêiner interno com 10 cm de brita n° 1 e em seguida duas camadas de manta bidim (figura 8).

Figura 8 – (a) Tubo de acesso em PVC crivado, (b) envelope de brita, (c) manta bidim e (d) representação esquemática da báscula.

Para a calibração e mensuração da capacidade de drenagem diária, realizou-se um ensaio no laboratório de hidráulica na Universidade Federal de Mato Grosso. Utilizando-se uma báscula, 3000 ml de água e três cápsula porosas sendo cronometrado o tempo total de drenagem. Através da (equação 4) calculou-se a capacidade do sistema de drenagem diária, sendo que o tempo necessário para que drenasse 3000 ml foi de 30 minutos, num total de 467 basculadas.

$$CB = \frac{V}{NB} \tag{4}$$

Onde:

CB – capacidade bascular;

NB – número de basculhadas;

V – volume de água usado no ensaio.

O sistema de irrigação escolhido para ser usado no experimento foi por aspersão com uma linha principal em PVC e quatro linhas secundárias em mangueiras modelo santeno irrigando toda a área do lisímetro.

O sistema de automação e controle foi produzido com um Datalogger modelo CR–1000 com 16 entradas e uma válvula solenoide para que a irrigação acontecesse somente no horário previamente determinado.

Foi instalada uma estação agrometeorológica na estação Meteorológica da Universidade Federal de Mato Grosso com os seguintes sensores: sensor de velocidade e direção do vento, modelo 03001; sensor de temperatura, modelo 108; sensor de radiação solar, modelo LP02 (Piranômetro); sensor de saldo de radiação, modelo NR Lite; sensor de Umidade e Temperatura do ar, modelo CS 215; sensor de Fluxo de calor no solo; sensor de umidade do solo, modelo Diviner 2000 e pluviômetro digital, modelo: TR – 525M, (figura 9).

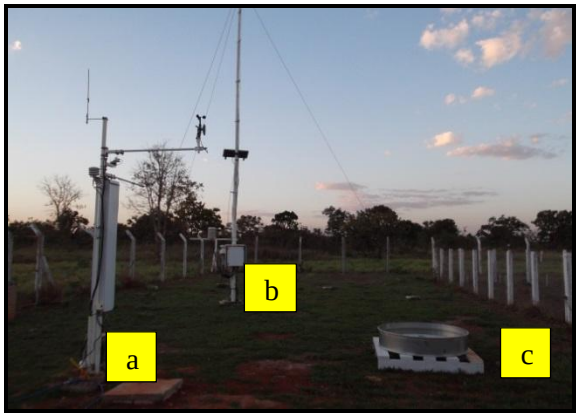

Figura 9 – (a) estação agrometeorológica, (b) estação do INMET e (c) Tanque Classe A.

O preenchimento do contêiner interno com solo foi realizado separando em camadas de 0,1 m. Sendo a primeira camada com brita e as outras camadas de solo, respeitando as camadas originais durante a sua retirada. Para cada camada completada, o solo recebeu água para aproximar-se da sua densidade natural, sendo que este procedimento foi repetido até que o lisímetro estivesse completamente preenchido com solo (figura 10).

Figura 10 – Processo de enchimento do contêiner com solo.

O processo de implantação do lisímetro foi finalizado acoplando um tubo de acesso no centro do lisímetro para fazer a leitura da umidade do solo por meio da sonda de umidade, modelo Divener 2000. Na figura 11 verifica-se de forma representativa como ficou a parte construtiva do lisímetro de pesagem hidráulica, com alguns de seus principais componentes.

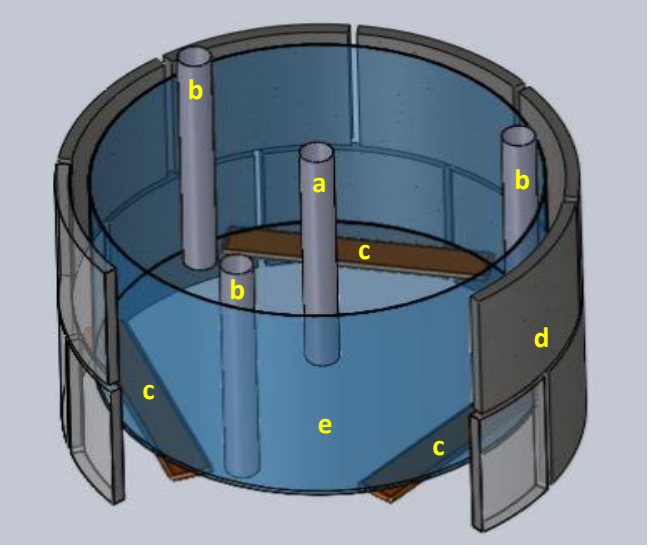

Figura 11 – (a) tubo de acesso para sonda de umidade; (b) tubos de drenagem; (c) células de carga; (d) camisa e (e) contêiner interno.

3.3 Cálculo do volume ideal nas células de carga

Na determinação do volume ideal de água para as células de carga hidráulica, seguiu-se a recomendação de Silva et al. (2003), sendo este procedimento fundamental na construção dos lisímetros de pesagem hidráulica.

O enchimento das células de carga hidráulica foi realizado com 13 litros de água destilada em repouso, depois de cheios e fechados, procedeu-se a determinação do volume ideal, pois a superfície de contato entre os travesseiros e as bases tem que permanecer o mais constante possível, evitando-se erros na resposta da pressão transmitida ao sistema de leitura (SILVA, 2000).

Foi utilizada água destilada no enchimento das células de carga, pois se houver presença do ar dentro das células ou dos tubos de transmissão de pressão, podem ocorrer erros de medições prejudicando todo o sistema hidráulico de pesagem (SILVA, 2005).

Por intermédio da saída do registro de saída, foram liberados volumes iguais de 50 ml, sendo que a diferença de cada leitura, feita no manômetro de mercúrio e também no datalogger por meio de um transdutor de pressão, até que os volumes retirados resultassem em registro de leituras proporcionais e estáveis (SILVA, 2000), sendo os valores devidamente anotados para serem posteriormente correlacionadas com os valores acumulados de volume retirado (figura 12).

Figura 12 – Dispositivo de controle das células de carga hidráulica.

O volume ideal de água para as células de carga é aquele correspondente ao ponto mínimo da (equação 5) encontrado na curva de regressão.

$$\Delta L = 0{,}0000003Va^2 - 0{,}0038Va + 12{,}33 \qquad (5)$$

ΔL – variação das leituras (mm);

Va – volume de água acumulado (ml)..

Este volume foi obtido através da derivada primeira $\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)$ da função, que corresponde a:

$$\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) = 0{,}0000006Va - 0{,}0038 \qquad (6)$$

Resolvendo a equação 2, após a definição da tangente igual a zero (ponto de mínimo), encontra-se um volume ideal de 6333 ml, como segue:

$$\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) = 0{,}0000006Va - 0{,}0038 = 0 \qquad (7)$$

$$Va = 6333\ mL$$

3.4 Ensaio de calibração

A calibração foi dividida em duas etapas. A primeira etapa ocorreu no dia 16 de julho de 2013, sendo feito a calibração central do lisímetro, onde foram adicionados e posteriormente retirados 100 sacos de areia hermeticamente fechados de 1 kg, representando 1,0 mm de lâmina evapotranspirada, totalizando um incremento de 100 kg ou 100 mm de lâmina, sendo que a cada adição e retirada de pesos, esperou-se 1 minuto para a devida estabilização do sistema de leitura (figura 13).

Na segunda etapa foi feito o mesmo procedimento aplicando-se carga pontual em cada célula de carga individualmente e nos vértices do triângulo equilátero formado pelas células de carga, adicionando-se 36 pesos de 1 kg, totalizando um acréscimo de 36 kg ou 36 mm de lâmina. O objetivo desta última etapa foi verificar a estabilidade do lisímetro, desta forma, foram obtidos 100 pares de pontos no setor central (adição e subtração dos pesos), 36 pares de pontos em cada vértice e em cada uma das células de carga hidráulica para a construção da curva de calibração através de regressão linear.

Figura 13 – Calibração em campo

3.5 Efeito da temperatura no sistema de leitura manométrico

Para a correção de possíveis efeitos da temperatura no sistema de leitura manométrica utilizou-se valores de temperatura e leituras manométricas registradas no datalogger para intervalos de 10 minutos, realizando-se correlações para estabelecimento do fator de correção de temperatura.

O ensaio para verificar a influência da temperatura foi realizado durante quatro dias (26/09/2013 a 29/09/2013), onde o lisímetro foi vedado com o auxílio de lona plástica transparente, evitando-se a perda de água por evapotranspiração, sendo a variação registrada em função da temperatura.

No período do ensaio o volume drenado foi nulo (figura 14). Para correção das leituras registradas pelo sensor de pressão acoplado ao sistema manométrico, foi calculado um fator de correção para atenuar o efeito da temperatura.

Figura 14 – Isolamento do lisímetro ao ambiente externo.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação construtiva do lisímetro

A área evapotranpirométrica do lisímetro sendo de 1,0 m^2 a própria variação de massa do conjunto, convertida para volume em litros, representou a evapotranspiração, em milímetros. No entanto, esta área é inferior a recomendação de Aboukhaled et al. (1982) que preconiza que a área seja de no mínimo 2 m^2. Conforme Lima (2012), Oliveira (2007) e Silva (2005) com áreas respectivas de 1,32; 1,52 e 1,038 apresentaram resultaram de medidas de evapotranspiração confiáveis, com a vantagem de ser mais acessíveis e de fácil construção e operação em relação à lisímetros maiores.

A espessura da placa que compõe o contêiner externo, de 0,03 m, forneceu uma área de bordadura de 0,11 m^2, sendo considerada pequena suficiente para não ter problema de emissão de radiação de ondas longas, ao contrário de materiais com grande área de bordadura (maior espessura) que causaria erros de sobrestimavas de evapotranspiração, (ABOUKHALED et al. 1982). Resultado semelhante para espessura da parede do contêiner externo foi apresentado Silva (2005), não influenciando nos valores de evapotranspiração obtidos.

O sistema de irrigação, drenagem e automação funcionaram satisfatoriamente, ressaltando-se apenas que o sistema de drenagem necessitava de manutenções quinzenais para limpeza.

A disposição das células de carga hidráulica em formato de triângulo equilátero garantiu o equilíbrio e estabilidade do equipamento. Lima, (2012) e Oliveira, (2006) desenvolveram sistemas iguais ao desse trabalho e apresentaram boa estabilidade e equilíbrio do sistema de pesagem hidráulica.

4.2 Volume de fluido ideal nas células de carga

A variação de pressão registrada no manômetro apresentou tendências a leituras constantes, com a retirada de fluido (água) em volumes iguais de 50 ml. A partir do volume acumulado de 6333 ml (figura 15) observa-se inicialmente que as diferenças medidas no manômetro para extrações de 50 ml de água foram maiores, diminuindo gradativamente na medida em que a área de contato entre a mangueira auto extinguível (célula de pesagem) e a base, foi se tornando praticamente invariável com as extrações

subsequentes. Resultado semelhante foi observado por Silva (2005) trabalhando com lisímetros de pesagem hidráulica para determinação de evapotranspiração e coeficientes de cultivo da cultura do maracujá, onde reduziu a pressão nas células de carga hidráulica com decréscimos sucessivos de 50 ml de água.

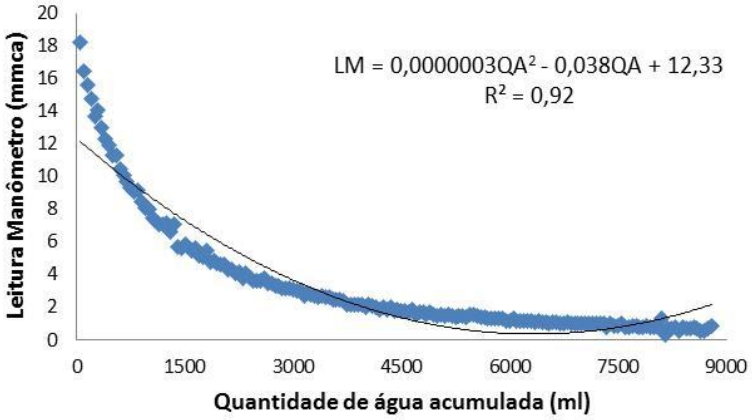

Figura 15 – Variação das diferenças de Leituras no Manômetro (LM) em razão das Extrações de água sucessivas (EA) de volumes constantes de 50 ml de fluído (água) em três células de carga de pesagem hidráulica.
** Significativo a 1% de probabilidade

Segundo Silva (2000) volumes de fluído inadequado no interior das células de carga, não permite uma área de contato constante, interferindo nas respostas de pressão que são transmitidas ao sistema de leitura.

Segundo Silva et al. (2003), verificaram que em um lisímetro de pesagem hidráulica de 4,8 toneladas, as diferenças de leitura permaneciam constantes quando a variação entre a área de contato das células e as bases era mínima, sendo esta situação considerada ideal para o correto funcionamento.

4.3 Coeficiente de calibração e estabilidade

Na figura 16 verifica-se alto coeficiente de determinação (R^2= 0,99) para a relação entre o acréscimo e retirada de massa, leitura visual do manômetro de mercúrio e transdutor de pressão.

As calibrações produziram respostas lineares para calibração central, nos vértices das células de carga e também no centro das mesmas, sendo encontrados coeficientes de determinação acima de 0,99 tanto nas leituras manométricas (cm.c.a.) quanto nas leituras do datalogger (kg), demonstrando pouco efeito de histerese.

Resultados semelhantes foram encontrados por Silva (2005) ao calibrar células de carga hidráulica em lisímetros, e Cruz (2005), com coeficientes de determinação acima de 0,99, respectivamente.

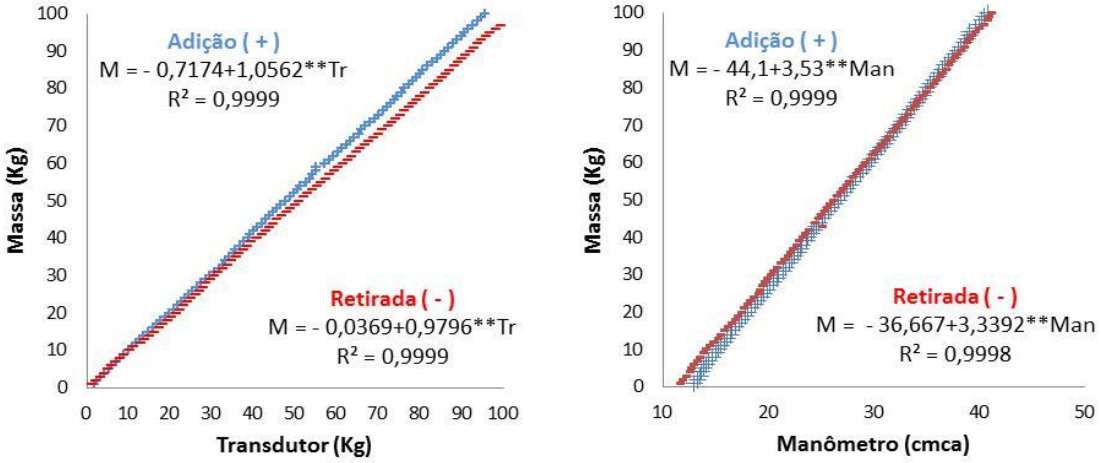

Figura 16 – Análise de regressão entre leituras observadas no transdutor (Tr) e manômetro de mercúrio (Man) em função da adição (+) e retirada (-) dos pesos com massa de 1 kg (M).
** Significativo a 1% de probabilidade

Para Campeche (2002), a calibração de lisímetros é uma das etapas mais importantes durante a implantação do equipamento, pois procedimentos incorretos de calibração levam a interpretações inconsistentes dos valores de evapotranspiração, principalmente quando se trabalha em curtos períodos de tempo.

Ao analisarmos as calibrações realizadas com cargas pontuais em cada uma das três células de carga hidráulica e em seus vértices, (figuras 17 e 18) o lisímetro apresentou boa estabilidade, sendo que a relação entre o acréscimo de massa, leitura do manômetro de mercúrio e o transdutor de pressão, apresentaram coeficientes de determinação satisfatórios.

Quaglia (2005) ao trabalhar com lisímetro de pesagem utilizando célula de carga eletrônica, observou que dependendo da posição no lisímetro em que se colocava a carga pontual de 20 kg, esta apresentava variações no resultado. Apesar de comparação com as células eletrônicas, vale ressaltar que as células de carga hidráulica avaliadas nesse estudo apresentaram boa eficiência de calibração, independente do local onde foi colocada a carga pontual de 36 kg, mostrando bom equilíbrio e diferindo-se do resultado apresentado por Quaglia (2005).

É importante salientar que o equilíbrio do equipamento deve-se ao fato de que as três células de carga hidráulica foram dispostas formando um triângulo equilátero.

Outro fato importante é a quantidade de água usada nas células de carga hidráulica para que a área de contato entre a base do contêiner interno e as células não estavam causando estimadas inconsistentes, conforme foi mencionado por Silva (2005), ao trabalhar na construção de um lisímetro de pesagem hidráulica.

Campeche (2002), utilizando células de carga eletrônica na construção e calibração de um lisímetro para a determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida “Tahiti”, encontrou resultados com coeficientes de determinação acima de 99% mostrando consonância aos resultados encontrados neste trabalho.

Lima (2012), ao trabalhar com células de carga hidráulica em estudos com lisímetro de pesagem hidráulica na região litorânea de Pernambuco encontrou alto coeficiente de determinação, próximos aos encontrados neste trabalho, tanto para calibração central do lisímetro quanto em qualquer um dos quatro quadrantes avaliados.

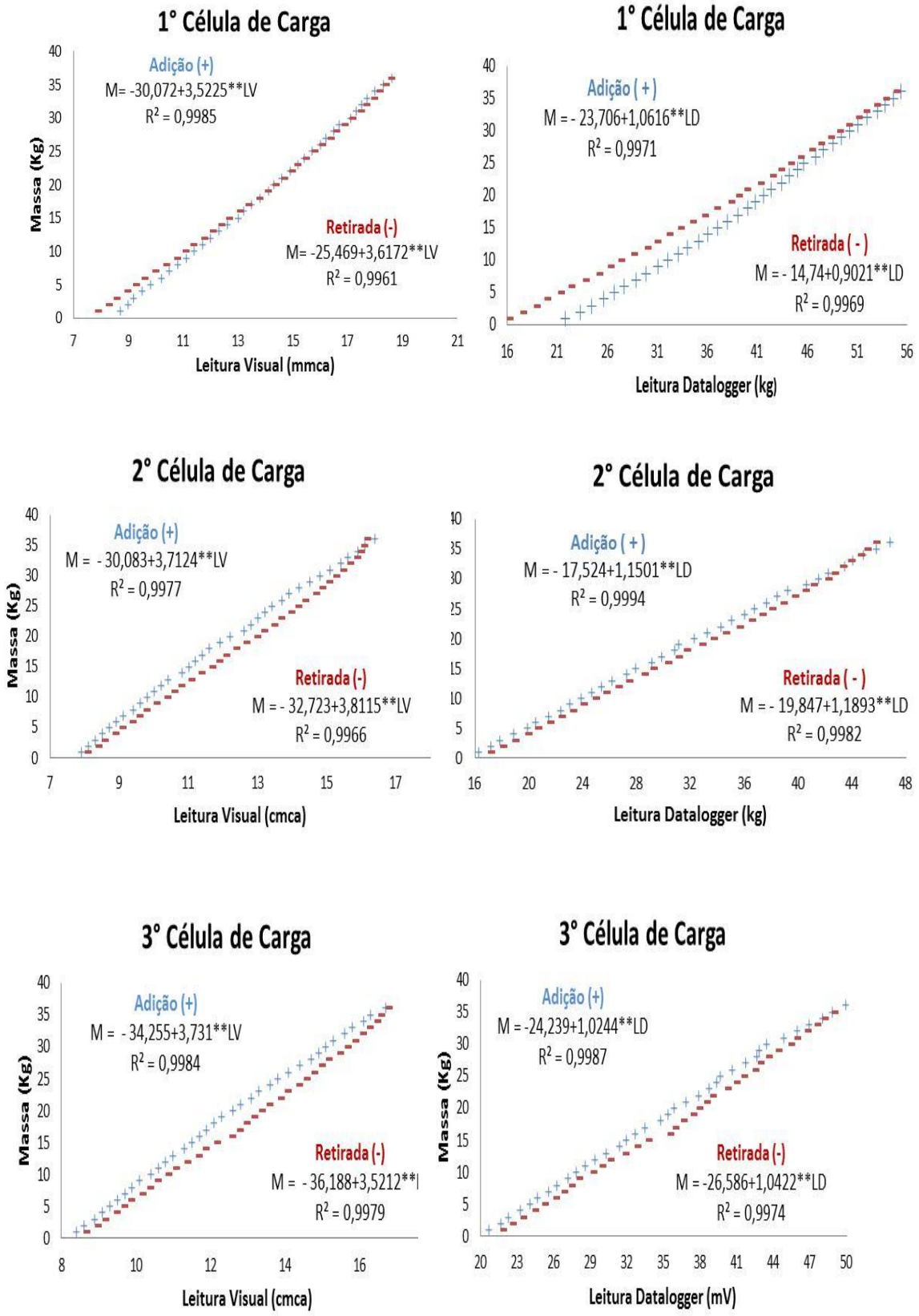

Figura 17 – Relação entre a variação de massa e a leitura visual (LV), e transdutor de pressão (LD), com carga pontual Massa (M) em cada uma das três células de carga hidráulica.
**,* Significativo a 1 e 5% de probabilidade

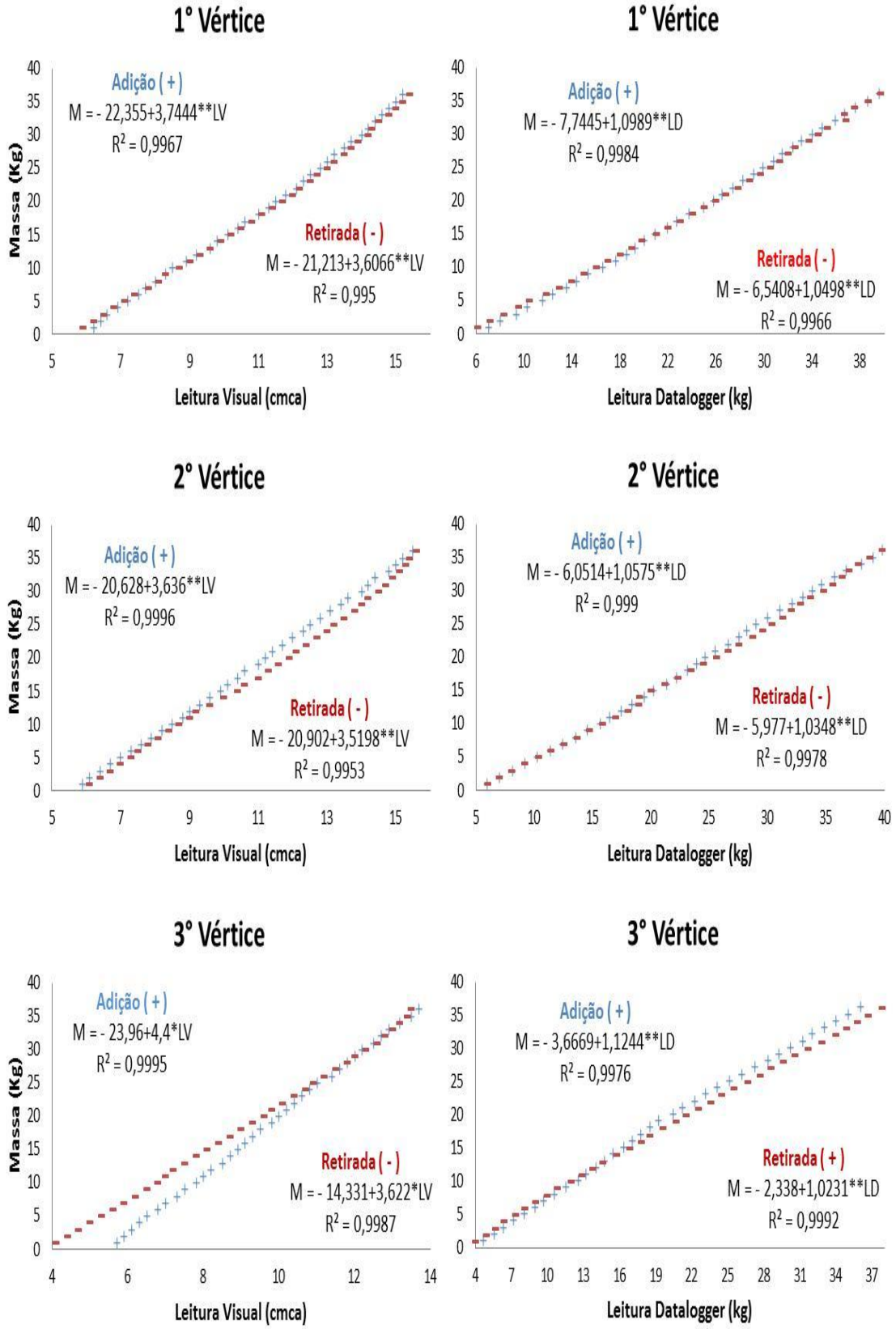

Figura 18 – Relação entre a variação de massa e a leitura visual (LV), e transdutor de pressão (LD), com carga pontual Massa (M) em cada uma das três vértices formada pelas células de carga hidráulica. **,* Significativo a 1 e 5% de probabilidade

Os coeficientes de calibração (*k*) obtidos pela leitura visual no manômetro variaram de 3,577 a 4,011 mm com adição e retirada de pesos com 1 kg. No datalogger este coeficiente variou de 0,982 a 1,169 kg para pesos de 1 kg adicionados ou retirados. De acordo com os resultados apresentados na (tabela 1), o coeficiente de calibração (*k*) central, padrão para utilização em lisímetros, obtido pelas leituras visuais foi de 3,434 mm kg^{-1}. Para os valores registrados no datalogger o coeficiente de calibração central foi de 1,017 kg, ou seja, a cada 1 kg de peso adicionado ou retirado no lisímetro, corresponde a 1,017 mm de lâmina evapotranspirada.

Tabela 1 - Coeficientes de calibração (k) e erro médio com carga pontual nos centros e vértices das células hidráulicas e no centro do lisímetro, em mm kg^{-1}.

Posição	**Coeficiente de calibração (*k*) Manômetro**	**Coeficiente de calibração (*k*) Datalogger**
célula 1	3,569	0,982
célula 2	3,761	1,169
célula 3	3,626	1,033
vértice 1	3,675	1,074
vértice 2	3,577	1,046
vértice 3	4,011	1,073
Média	**3,703**	**1,062**
Centro lisímetro	**3,434**	**1,017**
Erro médio posicional	**7,26 %**	**4,24 %**

A estabilidade do lisímetro foi determinada pela média dos coeficientes de calibração das três células de carga hidráulica e dos três vértices das mesmas, comparadas com o coeficiente de calibração central do lisímetro, verificando-se um erro médio posicional no manômetro e no datalogger de 7,26% e 4,24%, respectivamente (Tabela 1). Este resultado mostrou que o lisímetro apresentou boa estabilidade quando considerado as leituras registradas no datalogger, possibilitando desta maneira leituras consistentes, os lisímetros de pesagem hidráulica construídos por Freitas (1994), Oliveira (2007) e Lima (2012), apresentaram erro médio de 4 %; 2,31% e 1,34%, respectivamente.

Black et al. (1968) apud Silva et al. (2003) comentam que o limite tolerável é de até 10% de erro, pois a inclinação do tanque influencia na desuniformidade do fluido nas câmaras hidráulicas, ocasionando desta maneira erros de leituras no lisímetro. O erro médio posicional de 7,26% obtido pela leitura do manômetro nesse estudo foi inferior a 10%. Vale ressaltar que esse dado depende da leitura visual do observador.

4.4 Influencia da temperatura na leitura lisimétrica

O sistema manométrico de leitura e o datalogger foram acondicionados em um mesmo gabinete metálico com baixo isolamento térmico. A temperatura interna do mesmo foi monitorada pelo sensor termistor PT100, acoplado internamente ao datalogger. Segundo Marques (2009) os líquidos não possuem forma própria, significando para eles a dilatação volumétrica, o mercúrio e outros líquidos se dilatam e tal dilatação ocorre no interior do recipiente de vidro.

Através da figura 19 é possível verificar a correlação entre a leitura real (leitura do transdutor) registrada pelo datalloger, em mm, e a temperatura no interior do gabinete. A leitura real (*Lr*) refere-se à leitura de evapotranspiração sem correção de temperatura, obtidas no ensaio de avaliação do efeito da temperatura sobre o sistema manométrico de leitura, entre os dias 26/09/2013 a 29/09/2013.

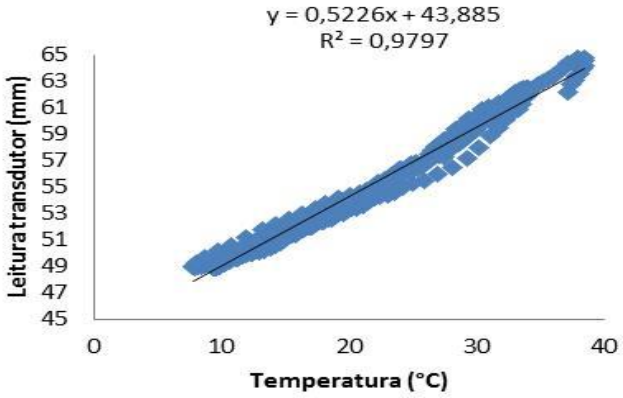

Figura 19 – Dados de temperatura e manômetro. Lt-Leitura do transdutor; T-temperatura

Na determinação do fator de correção (*fc*), utilizou-se a equação de regressão linear, obtido na relação apresentada na (figura 19), substituindo o valor de "x" por 20 °C na referida equação, conforme equação 8. Este valor de 20°C foi estabelecido de acordo com recomendação do INMETRO (2011), Instituto Nacional de Metrologia, onde calibrações de equipamentos como vidrarias e instrumentos são realizadas nesta temperatura para padronizar as variações de volume de recipientes e densidade de fluidos.

$$Lt = 0{,}5226T + 43{,}885 \quad (8)$$

Substituindo o T por 20 °C na Equação 8, temos Lt=53,337 mm.

A diferença entre as leituras reais e a leitura à 20 °C (ΔL) foi obtida para todos os valores registrados no período da avaliação:

$$\Delta L = Lt - Lr \quad (9)$$

Onde:

fc - diferença de leituras (mm);

Lt – leitura estimada do transdutor (constante = 20°C)

Lr – Leitura real (mm).

Após realizar estes procedimentos, utilizando a equação 9 para se obter as diferenças de leituras em função do efeito da temperatura no sistema de leitura lisimétrica, correlacionam-se os valores de ΔL com a temperatura. Através da figura 20 percebe-se que o valor de coeficiente de determinação (R^2 de 0,9934).

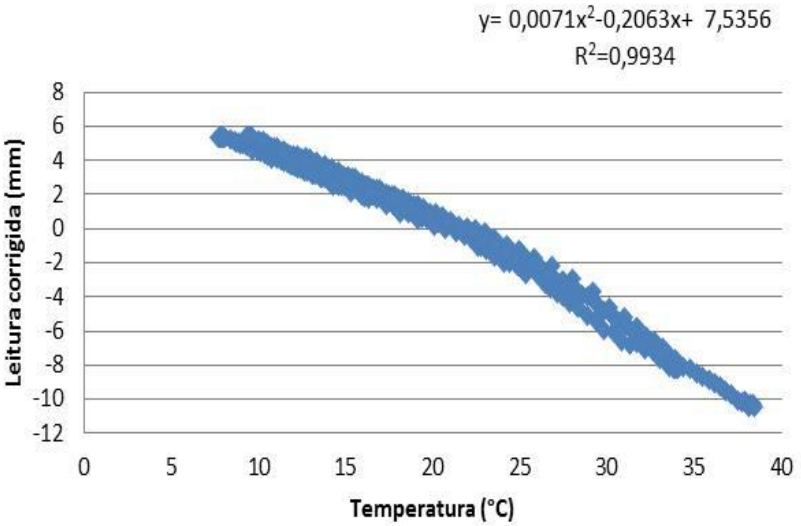

Figura 20 – Correlação entre a temperatura obtida no datalogger e a leitura corrigida.

$$y = 0{,}0071x^2 - 0{,}2063x + 7{,}5356 \quad (10)$$

A Equação 10 obtida na relação entre as temperaturas e as diferenças de leituras, verificada na (figura 19), descreve o efeito da temperatura sobre o sistema manométrico de leitura lisimétrica. Após substituição na Equação 10 dos valores de temperatura registrados, para cada dado de leitura real, foi possível estimar os valores de leitura lisimétrica corrigidos (figura 20), ou seja, a linearização paralela ao eixo das abcissas. Essa linearização descreve a variação de massa do lisímetro ao longo do tempo. Para as condições do teste (lisímetro vedado), não ocorreria variação de massa o

que foi possível verificar após a comparação das leituras reais com as leituras corrigidas (Figura 21).

De acordo com a figura 21 é possível verificar que o fator de correção estimou um valor médio de 54,344. Esse valor expressa a tendência de leitura constante, sem variação de massa.

O fator de correção obtido pela metodologia apresentada foi eficiente na linearização das leituras lisimétricas sob efeito de temperatura. O fator de correção atenuou os efeitos da variação de temperatura ao longo do dia na variação da coluna d´água no sistema manométrico, minimizando os erros de leituras obtidos pelo transdutor de pressão.

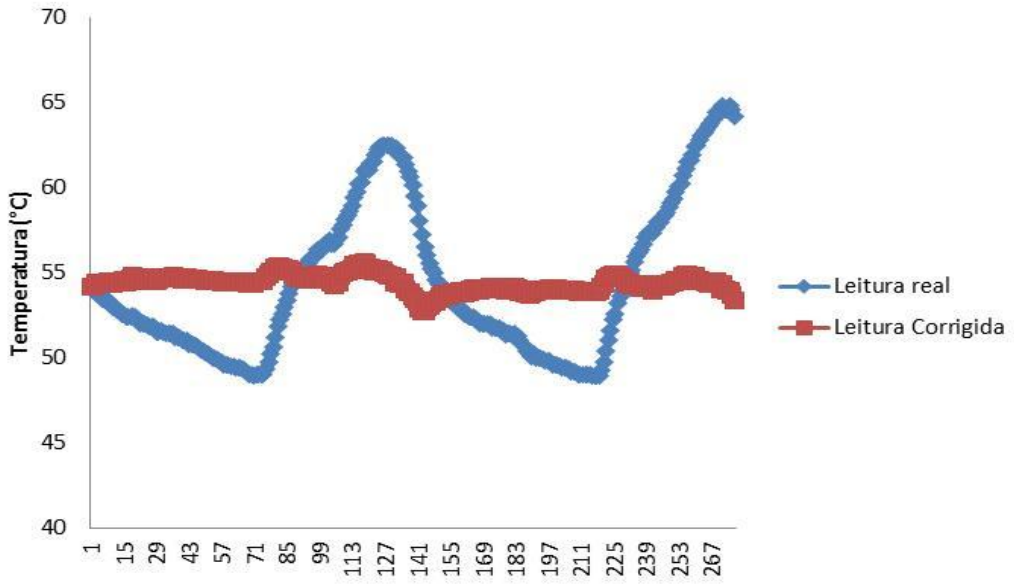

Figura 21 – Comparação de variação dos valores de leituras lisimétricas, em mm, das leituras reais e corrigidas.

4.5 Medidas de Evapotranspiração.

Comparando dados de evapotranspiração do lisímetro e dados calculados pelos modelos de Penman-Monteith, tanque Classe A e Jensen-Haise obteve-se correlações entre os valores medidos do lisímetros e os estimados por esses modelos, a partir de dados de elementos meteorológicos. As correlações obtidas pelos modelos apresentaram coeficiente de determinação de 0,56, 0,48 e 0,36, respectivamente.

Os valores de R^2 foram inferiores a 0,60 apresentando uma correlação média. Esse valor provavelmente aumentaria se o período de avaliação for maior. Silva (2000) comparando diferentes modelos de estimativa de evapotranspiração aos valores medidos

em lisímetro de pesagem hidráulica verificou a diminuição do coeficiente de determinação a medida que reduzia número de amostragem em função dos períodos avaliados: decendiais, quinzenais e mensais.

Vários trabalhos mostraram boa correlação entre os dados do lisímetro e os dados estimados pela equação de Penman-Monteith dos quais podemos citar Camargo e Sentelhas (1997); Magiotto (1996) e Pereira (1998) entre outros, sendo considerado normal a ocorrência de dispersões, em razão de problemas relacionado ao período de amostragem e a montagem, operação, manutenção dos lisímetros.

Outra causa provável dessa dispersão pode ser associada ao efeito da temperatura no sistema manométrico de leituras, efeito da pressão do vento sobre a superfície do lisímetro, alterações nas condições do solo em relação a área externa e altura da grama (GREBERT & CUENCA, 1991).

Através da figura 22 verificam-se os dados de evapotranspiração pelo lisímetro relacionado com o método de Penman-Monteith, estes dados referem-se a três meses de observação, com valores diários.

Nota-se que a correlação obtida entre os dois métodos foi adequada quando comparadas com aquelas comumente obtidas por períodos diários. Medeiros (2002) encontrou coeficiente de determinação de 0,56, resultado semelhante ao encontrado neste trabalho. Já Mendonça et al. (2003) e Cruz (2005) apresentaram os seguintes coeficientes de determinação: 0,58 e 0,59 respectivamente.

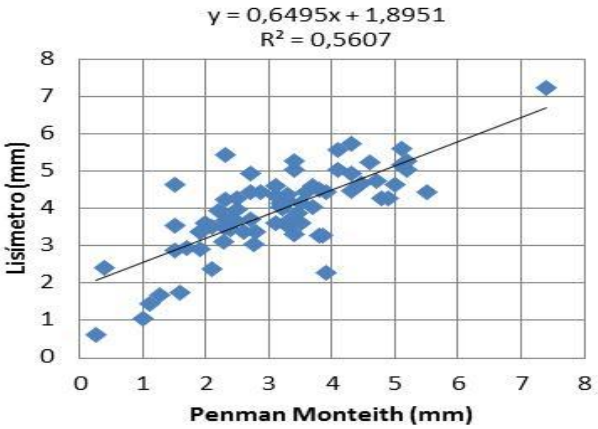

Figura 22 – Correlação entre os valores diários da ETo medidos pelo lisímetro e estimados por Penman-Monteith, para o período de 01/08/2013 a 31/10/2013 em Rondonópolis – MT.

De acordo com Jensen et al. (1990), o método do Tanque Classe A, foi desenvolvido para um melhor ajuste com dados médios de 5 dias, sendo que a sua

aplicação para intervalos de tempo diferentes pode reduzir a sua precisão. O que ficou comprovado neste experimento, pois na escala de tempo (diário) nos três meses avaliados, a tendência de superestimavas prevaleceu, (figura 23).

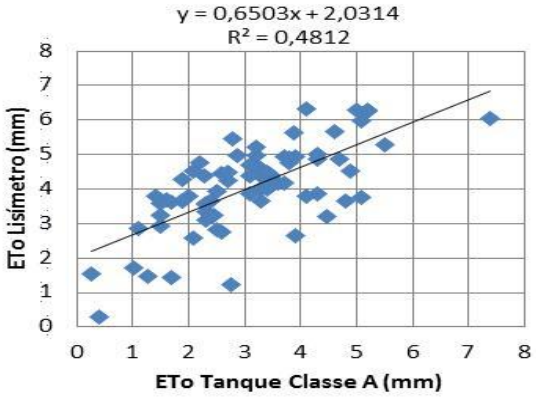

Figura 23 – Correlação entre os valores diários da ETo medidos pelo lisímetro e estimados pelo Tanque Classe A, para o período de 01/08/2013 a 31/10/2013 em Rondonópolis – MT.

Na figura 23 verifica-se os dados de evapotranspiração de referência obtida pelo lisímetro de pesagem hidráulica, bem como os valores através do método do Tanque Classe A. O coeficiente de determinação encontrado neste trabalho foi de 0,48, resultado inferior ao obtido por Cruz (2005) ao trabalhar com evapotranspiração de referência na região de Seropédica – RJ e Sentelhas e Folegatti (2003) com coeficientes de 0,79 e 0,73 respectivamente.

Mendonça et al. (2003) trabalhando correlação entre os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região Norte fluminense no Rio de Janeiro apresentou coeficiente de determinação de 0,43, coeficiente inferior ao apresentado neste trabalho

Vários são os fatores que podem ter influenciado nesta discrepância, como leituras incorretas do observador, ocorrências de chuvas com elevada intensidade de precipitação, consumo da água do tanque devido ao acesso de animais na área experimental (aves e pequenos mamíferos).

Na figura 24 verifica-se o método de Jensen-Haise, quando comparado aos dados do lisímetro, apresentou coeficiente de determinação de 0,36, diferente dos resultados de Silva (2000), pois o mesmo apresentou resultado de desempenho “Ótimo”. Jensen et al. (1990) ressaltaram que, apesar dos autores classificarem em 12º o método de Jensen-Haise entre 20 métodos avaliados em diferentes regiões, trata-se de um

método simples que utiliza apenas como variáveis independentes a temperatura média diária e o saldo de radiação solar (Rn), porém poucos estudos foram realizados com este método, principalmente no Brasil.

Mendonça et al. (2003) utilizando o método de Jensen Haise correlacionando com dados lisimétrico encontrou coeficientes de determinação de 0,57 diferente dos valores encontrados neste trabalho que foi de 0,36.

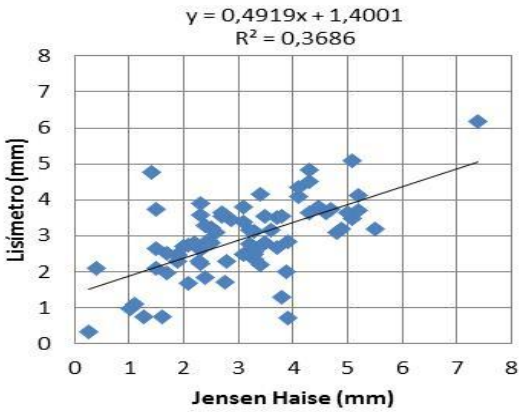

Figura 24 – Correlação entre os valores diários da ETo medidos pelo lisímetro e estimados pelo método empírico de Jensen Haise, para o período de 01/08/2013 a 31/10/2013 em Rondonópolis – MT.

5 CONCLUSÃO

A disposição dos travesseiros hidráulicos em forma de triângulo equilátero resultou em uma elevada estabilidade sob as condições de carregamento e descarregamento em que foi submetido.

A determinação exata do volume ideal do fluido nas células de carga hidráulica permite leituras confiáveis das variações de pesos padrão em lisímetros de pesagem hidráulica.

A metodologia para correção da leitura lisimétrica é eficiente na linearização das leituras manométricas sob efeito de temperatura. O fator de correção atenua os efeitos da temperatura na variação da coluna d´água do sistema manométrico, minimizando os erros de leituras obtidos pelo transdutor de pressão.

A diferença de pesos padrão de 1 kg e a leitura registrada no manômetro quanto no sensor, foram altamente lineares acima de (R^2= 0,99) tanto na calibração central quanto na calibração com carga pontual nas células de carga ou vértices das mesmas, resultando em alta estabilidade das leituras.

O erro médio posicional no manômetro e no sensor de pressão foi de 7,26 e 4,24 %, respectivamente, demonstrando uma baixa tendência ao desequilíbrio das leituras por inclinação lateral do contêiner interno.

As medidas diárias de ETo obtidas pelo lisímetro que melhor se correlacionaram com aquelas estimadas foram pelo método de Penman-Monteith (R^2= 0,56), sendo que quando comparado com as estimativas de Jensen Haise o coeficiente de determinação foi de (R^2= 0,36) e pelo método do Tanque Classe A (R^2= 0,48).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ABOUKHALED, A.; ALFARO, J. F.; SMITH, M. Los Lisímetros. **Estudos da FAO**, (Riego e Dranaje) paper 39. 1986. 60p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. et al. **Crop evaporation:** Guindelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (Irrigations and Drainage Paper, 56) 300p.

ALLEN, R. G. FISCHER, D. K. **Direct load cell-based weighing lysimeter system.** In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al.. Ed. **Lysimeter for evapotranspiration and evironmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. 124p

ALMEIDA, S. S. **Sistema de aquisição de dados para leitura analógica de tensão utilizando um microcontrolador PIC (Interface Controladora de Objetos)**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural do Semi-Árido– UFERSA, 2012.

BASTOS, A. **Instrumentação, Eletrônica Analógica e Digital.** Rio de Janeiro RJ, 2002, 360p

BERNARDO, S. Manual de Irrigação. 7.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 2005, 611p

BERNART, C. OUCIER, R.; SABOURIN, E. A **Cisterna de placas: técnica de construção.** 2.ed. Recife: SUDENE/DPP, Ed. Massangana, 1993. 74p.

BLACK, T.A. THURTELL, G.W. TANNER, C.B. (1968). **Hidraulic load-cell lysimeters, construction, calibration and test.** Soil Science Society American Procedings, v. 32. P.623-629.

BOLTON, W. **Instrumentação e controle.** São Paulo: Hemus, 1988. cap.2, p. 25- 149

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P.C. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo.** Revista Brasileira de Agrometeorologia , v.5, n.1, p. 89-97 – 1997.

CAMPECHE, L. F. S. M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida "Tahiti"** ***(Citrus Latifólia Tan)***. Piracicaba – SP, 2002, 67p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Piracicaba – SP.

CRUZ, F.A. **Instalação e Calibração de um Lisímetro de Pesagem e Determinação da Evapotranspiração de Referência para a Região de Seropédica – RJ.** 2005. 56p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – RJ.

DAKER, A.**; Irrigação e Drenagem a água na agricultura.** 6ª edição, 3° vol. Revisa e ampliada, 1984. Rio de Janeiro – RJ. 543p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Guidlines for predicting crop water requeriments.** Rome: FAO, 179p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24). 1977

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yeld response to water. Roma, FAO. 156p. (FAO Irrigation and Drainage, 24).1977

FONTANA, D.C. **Determinação da Evapotranspiração.** In: BERGAMASCHI, H. (Coord.), **Agrometeorologia aplicada à irrigação.** Porto Alegre: Ed. da UFRGS, p. 48-61. 1992

FREITAS, J.A.G. **Evapotranspirômetro de pesagem por sensor de carga hidráulica: construção, calibração e testes.** Dissertação (Mestrado) em Agronomia. Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife – Pernambuco, 122 p. 1994

GOMIDE, R. **Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos.** Manejo de irrigação. Poços de Caldas: BEA/UFLA/DEG, 1998. p.133-238.

GREBET, P. CUENCA, R. **History of lysimeter desing of environmental disturbances.** In: ALLEN, R. G. HOWELL, T. A. PRUITT, W. O. et al. **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements.** New York: American Society of Civil Engineers, 18p. 1991.

GÜTHS, S. De PAULO, V. **Instrumentação em Ciências Técnicas.** Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, 1998. 36p.

HELFRICK, A. D.; COOPER, W. D. **Instrumentação, Eletrônica Moderna e Técnicas de Medição.** Rio de Janeiro RJ, 324p. 1994.

HENRIQUE, F.A.N. **Estimativa da Evapotranspiração de referência e Campina Grande – PB. Campina Grande – PB**, 102p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande-UFCG-PB. 2006.

INMETRO. (Instituto Nacional de Metrologia). **Orientação para a acreditação de laboratórios na área de volume,** (Documento de caráter informativo), DOQ-CGCRE-027 – 2011.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and Irrigation water Requeriments.** New York: ASCE, 332p 1990.

KASHYAP, P.S. e PANDA, R.K. **Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato cropina a sub-humid region.** Agricultural Water Management . n.50. p.9-25. 2001.

KIRKHAN, R.R.; GEE, G.W.; JONES, T.L. **Weighing lysimeters for long-term water balance investigations at remote sites.** Soil Science Society of America Journal, v.48, p.1203-1205, 1984

LIMA, N. S. **Construção, instalação e calibração de lisímetros para a determinação da evapotranspiração de referência na região do litoral de Pernambuco.** 43p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal Rural de Pernambuco. UFRP – PE. 2012.

LOOS, C. GAYLER, S. PRIESACK, E. **Assessment of water balance simulations for large-scale weighing lysimeters,** Journal of hidrology, v. 335, 270p, 2007.

MACHADO, R. E. **Desenvolvimento e utilização de um lisímetro para a determinação da evapotranspiração de referência,** 93p. Dissertação (mestrado). Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – SP, 1996.

MACHADO, R.E. & MATTOS, A. **Construção e instalação de um lisímetro com sistema de drenagem**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, RS, v.9, n.1, 147-151p. 2001.

MAGIOTTO, S. R. **estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho.** Piracicaba, 1996. 71p. Dissertação de (mestrado). Escola superior de Agricultura Luiz de Queiroz – SP.

MANTOVANI, E. C. **Desarollo y evaluación de modelos para el manejo del Riego: estimación de la evapotranspiración y efectos de la uniformidade de aplicación del Riego sobre la produción de los cultivos.** Córdoba, 1993. 184p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Ingenieros agrônomos.

MANTOVANI, E. C. **Irrigação princípios e métodos**. Viçosa – MG, ed. UFV, 318p. 2006.

MARQUES, N.R.L; ARAUJO, I.S. **Texto de apoio aos professores de física.** Programa de Pós Graduação em Ensino em Física. V.20. n°5. 2009.

MAVI, H. S; TUPPER, G. J. **Agrometeorology-Principles and applications of Climate Studies in Agriculture.** Foods Products Press, New York, 364p. 2004

MEDEIROS, A.T. **Estimativa da evapotranspiração de referência partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas em Paraibapa, CE.** Piracicaba, SP, 2002. 103p. Tese (Doutorado) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

MENDONÇA, J.C.; SOUZA, E.F.; BERNARDO, S.;DIAS, G.P.GRIPPA, S. **Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), na região norte fluminense, RJ.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, CAMPINA GRANDE, PB, V.7, N.2, P.275-279, 2003.

MISRA, R. K. PADHI, J. PAYERO, J. O. **A calibration procedure for load cells to improve accuracy of mini-lysimeters in monitoring evapotranspirations.** Journal of Hydrology. 2011.

MOREIRA, M. A.; **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação.** 3. Ed. Viçosas: UFV. 2007, 307p

OLIVEIRA, N. T. **Influência da palha no balanço hídrico em lisímetros**. Porto Alegre – RS, 88p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2006.

OLIVEIRA, L.M.M. **Avaliação da evapotranspiração de referência (ETo) na bacia experimental do riacho Gameleira – PE, utilizando lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos.** Recife – PE, 111p. Dissertação de (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

PEREIRA, A, R; ANGELOCCI, L. R. SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia Fundamentos e Aplicações Práticas.** Guaíba-RS**;** Ed. Agropecuária, 478p. 2002.

PEREIRA, A. R. VILLA NOVA, N.A.; SEDYIAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba, SP: FEALQ (Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz). 183p. 1997.

QUAGLIA, L. **Calibração de um Lisímetro de Pesagem para o Monitoramento de Evaporação do Solo sem Cobertura Vegetal. .** Piracicaba, SP, 2005. 104p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

SANTOS, F. X.; RODRIGUES, J. J. V.; MONTENEGRO A. A.; MOURA, R. F. **Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo no semiárido nordestino.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.28, n1, 121 – 124p, março 2008.

SANTOS, F. X. **Lisímetro de pesagem hidráulica e evapotranspiração de referência por diversos métodos no agreste pernambucano.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco – UFRPE, Recife – PE, 74p. 2004.

SCHENEIDER, A. D.; HOWELL, T. A.; MOUSTAFA, A. T. et al.. **A Simplifield weighing lysimeter for monolithic soil or reconstructed soils. Transactions of the ASAE**, V – 14, n.3, 273p, 1998.

SENTELHAS, P.C. **Class A pan coefficients (Kp) to etimate daily reference evapotranspiration (ETo).** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental , Campina Grande, PB, v.7, n.1, p.111-115, 2003.

SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. In: MIRANDA, J.H. & PIRES, R.C.M. Irrigação – Série Engenharia Agrícola. Piracicaba, SP: FUNEP, 2001. 410 p.

SETTE, D. M. **O clima urbano de Rondonópolis – MT**. 1996. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

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.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal rural de Pernambuco – 2000.

SILVA, T. J. A.; MONTENEGRO, A.A.; RODRIGUES, J.J.V.; BONFIM, E.M.S. **Aplicação de lisímetro de pesagem hidráulica na determinação na determinação da evapotranspiração de referência em Petrolina – PE.** Engenharia Agrícola, v.23, n.3, 511 – 520p. 2003.

SILVA, T. J. A.; **Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de maracujazeiros determinados pelo método de balanço de radiação e lisimetria de pesagem hidráulica.** São Paulo, SP, 2005. 99p. Tese (Doutorado) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

SMITH, M.; ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. **Revised FAO methodology for crop water requirements. In: Evapotranspiration and irrigation scheduling, Proceedings of the Internacional Conference, American Society of Agricultural Engineers the Irrigation Association,** november,San Antonio, Texas, 123p, 1996.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procdures for revision of FAO guidelines for predictions of crop water requeriments**. Rome. FAO, 1991. 45p.

SOUZA, F, N. **Guia Prático de Irrigação por aspersão**, 2ª edição, editora Ícone, 1991, 69p. São Paulo – SP.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e aplicação.** 4° ed. Porto Alegre – RS. Editora da UFRGS, 2007. 943p.

URCHEI, M, A, & FIETZ C. R,; **Princípios de agricultura irrigada: Caracterização e potencialidades em Mato Grosso do Sul.** (Embrapa Agropecuária Oeste. Documento, 37). 150p. Dourados – MS. 2001.

VIANA, T.V.A. **Evapotranspiração obtida com o sistema razão de Bowen e um lisímetro de pesagem em ambiente protegido.** Piracicaba, SP, 138p. Tese (Doutorado) – Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 2000.

VILLA NOVA, N.A. & SENTELHAS, P.C. **Evapopluviômetro: novo sistema de medida da evaporação do tanque Classe A.** In: XI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia e II Reunião Latino Americana de Agrometeorologia, Florianópolis. 1999. v.1. p.2496 – 2502.

APÊNDICE

ALGORITMO

```
'CR1000
'Created by Short Cut (2.5)

'Declare Variables and Units
Dim WindCo_19
Public Batt_Volt
Public Temp_Logg
Public T_Solo5cm
Public TSolo10cm
Public TSolo20cm
Public Chuva_mm
Public Vv_ms
Public DIR_Vento
Public G_Wm2
Public Qg
Public Qg_dia
Public Rn_Wm2
Public RnCor_Wm2
Public TRHData(2)
Public Manomet
Public d
Public Flag(8)

Alias TRHData(1)=T_Ar
```

```
Alias TRHData(2)=UR

Units Batt_Volt=Volts
Units Temp_Logg=Deg C
Units T_Solo5cm=Deg C
Units TSolo10cm=Deg C
Units TSolo20cm=Deg C
Units Chuva_mm=mm
Units Vv_ms=meters/second
Units DIR_Vento=Degrees
Units G_Wm2=mV
Units Qg=W/m²
Units Qg_dia=MJ/m²
Units Rn_Wm2=W/m²
Units RnCor_Wm2=Watts/meter²
Units Manomet=mV
Units T_Ar=Deg C
Units UR=%

'Define Data Tables
DataTable(Table1,True,-1)
DataInterval(0,10,Min,10)
Average(1,Batt_Volt,FP2,False)
Average(1,Temp_Logg,FP2,False)
Average(1,T_Solo5cm,FP2,False)
Average(1,TSolo10cm,FP2,False)
```

```
Average(1,TSolo20cm,FP2,False)
Totalize(1,Chuva_mm,FP2,False)
Average(1,Vv_ms,FP2,False)
Maximum(1,Vv_ms,FP2,False,True)
Sample(1,DIR_Vento,FP2)
WindVector (1,Vv_ms,DIR_Vento,FP2,False,5,0,0)
FieldNames("Vv_ms_S_WVT,DIR_Vento_D1_WVT,DIR_Vento_SD1_WVT")
Average(1,G_Wm2,FP2,False)
Average(1,Qg,FP2,False)
Totalize(1,Qg_dia,IEEE4,False)
Average(1,Rn_Wm2,FP2,False)
Average(1,RnCor_Wm2,FP2,False)
Average(1,T_Ar,FP2,False)
Maximum(1,T_Ar,FP2,False,True)
Minimum(1,T_Ar,FP2,False,True)
Maximum(1,UR,FP2,False,True)
Minimum(1,UR,FP2,False,True)
ETsz(T_Ar,UR,Vv_ms,RnCor_Wm2,306.0,16,200,2.0,0,FP2,False)
FieldNames("ETos,Rso")
Sample(1,Manomet,FP2)
Maximum(1,Manomet,FP2,False,True)
Minimum(1,Manomet,FP2,False,True)
EndTable

DataTable(Table2,True,-1)
DataInterval(0,1440,Min,10)
```

```
Minimum(1,Batt_Volt,FP2,False,False)
Totalize(1,Chuva_mm,FP2,False)
Maximum(1,T_Ar,FP2,False,False)
Minimum(1,T_Ar,FP2,False,False)
Maximum(1,UR,FP2,False,False)
Minimum(1,UR,FP2,False,False)
Sample(1,Manomet,FP2)
EndTable

'Main Program
BeginProg
Scan(10,Sec,1,0)
'Default Datalogger Battery Voltage measurement Batt_Volt:
Battery(Batt_Volt)
'Wiring Panel Temperature measurement Temp_Logg:
PanelTemp(Temp_Logg,_60Hz)
'108 Temperature Probe measurement T_Solo5cm:
Therm108(T_Solo5cm,1,1,1,0,_60Hz,1.0,0.0)
'108 Temperature Probe measurement TSolo10cm:
Therm108(TSolo10cm,1,2,1,0,_60Hz,1.0,0.0)
'108 Temperature Probe measurement TSolo20cm:
Therm108(TSolo20cm,1,3,1,0,_60Hz,1.0,0.0)
'TE525MM/TE525M Rain Gauge measurement Chuva_mm:
PulseCount(Chuva_mm,1,1,2,0,0.1,0)
'03001 Wind Speed & Direction Sensor measurements Vv_ms and DIR_Vento:
PulseCount(Vv_ms,1,2,1,1,0.75,0.2)
```

```
If Vv_ms<0.21 Then Vv_ms=0
BrHalf(DIR_Vento,1,mV2500,6,2,1,2500,True,0,_60Hz,355,0)
If DIR_Vento>=360 Then DIR_Vento=0
'Generic Differential Voltage measurements G_Wm2:
VoltDiff(G_Wm2,1,mV5000,6,True,0,_60Hz,37.4,0.0)
'LP02 Pyranometer measurements Qg_dia and Qg:
VoltDiff(Qg,1,mV25,7,True,0,_60Hz,1,0)
If Qg<0 Then Qg=0
Qg_dia=Qg*0.00066
Qg=Qg*66.6666
'NR-LITE Net Radiometer (dynamic wind speed correction) measurement Rn_Wm2
and RnCor_Wm2:
VoltDiff(Rn_Wm2,1,mv25,8,True,0,_60Hz,67.5675,0)
If Vv_ms>=5 Then
RnCor_Wm2=Rn_Wm2*(1+0.021286*(Vv_ms-5))
Else
RnCor_Wm2=Rn_Wm2
EndIf
'CS215 Temperature & Relative Humidity Sensor (CSL) measurements T_Ar and UR:
SDI12Recorder(T_Ar,7,"0","M!",1,0)
'Generic Differential Voltage measurements Manomet:
VoltDiff(Manomet,1,mV7_5,4,True,0,_60Hz,29.858,-9.12)
SW12 (1 )

'Simple Control w/ Deadband:
If Flag(1)=0 Then
```

```
If Manomet>450 Then
PortSet(1,1)
Else
If Manomet<400 Then
PortSet(1,0)
EndIf
EndIf
Else
PortSet(1,0)
EndIf
'Call Data Tables and Store Data
CallTable(Table1)
CallTable(Table2)
NextScan
EndProg
```