

CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE LISÍMETROS DE PESAGEM PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTIVO EM VIDEIRA DE VINHO cv. SYRAH¹

Eliel Ferreira do Nascimento², Luis Fernando de Souza Magno Campeche³, Luis Henrique Bassoi⁴, Juliano Athayde Silva⁴, Araci Conceição Medrado Lima⁴, Francisco Adriano de Carvalho Pereira²

¹ Parte da Dissertação de Mestrado apresentada pelo primeiro autor à UFRB

² Núcleo de Engenharia de Água e Solo, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, elielpet@gmail.com

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sertão Pernambucano, Petrolina, PE.

⁴ Embrapa Semiárido, Petrolina, PE.

1 RESUMO

O método direto mais comum utilizado na estimativa da evapotranspiração de uma cultura é o método lisimétrico. Assim, o objetivo deste trabalho foi construir, instalar e analisar o desempenho de três lisímetros de pesagem para estudo da demanda hídrica da cultura da videira Syrah (*Vitis vinífera L.*). Os lisímetros, com dimensões 1,2m x 2,0m de base e 1,0m de altura, foram instalados no Campo Experimental de Bebedouro da Embrapa Semiárido, em Petrolina-PE (09° 09' latitude sul, 40° 29' longitude oeste), e foram construídos com chapas de aço galvanizado e instalados sobre uma estrutura metálica montada sobre barras transversais, a fim de concentrar a massa do conjunto sobre uma célula de carga localizada no centro do sistema. Após a escavação de trincheiras no solo e colocação dos lisímetros, procedeu-se ao preenchimento com uma camada de brita, manta poliéster e nove camadas de solo de 0,1m, mantendo a disposição original das mesmas no perfil. Foram utilizados sacos com brita com massa conhecida, para estabelecer a relação entre a saída de sinal das células de carga e a massa dos equipamentos. A equação de calibração apresentou um alto coeficiente de determinação. Os lisímetros apresentaram excelente sensibilidade e resolução, detectando variações de massa devido à chuva, irrigações e evapotranspiração, mostrando-se adequados para o estudo da demanda hídrica da cultura.

Palavras-chave: calibração, necessidade hídrica, semiárido

NASCIMENTO, E. F. do; CAMPECHE, L. F. S. M.; BASSOI, L. H.; SILVA, J. A.; LIMA, A. C. M.; PEREIRA, F. A. C.
CONSTRUCTION AND CALIBRATION OF WEIGHING LYSIMETERS TO ESTIMATION OF CROP EVAPOTRANSPIRATION AND CROP COEFFICIENT OF WINE GRAPES cv. SYRAH

2 ABSTRACT

The most common direct method used to estimate crop evapotranspiration is the lysimetric method. Hence, the objective of this work was to construct, install and evaluate the performance of three weighing lysimeters to estimate the water demand of wine grapes (*Vitis vinifera L.*) cv. Syrah. The lysimeters, 1.2 m width, 2.0 m long, and 1.0 depth, were

set up at Embrapa Tropical Semi-Arid, Petrolina - PE, Brazil (9° 9' S, 40° 29' W), and were constructed with galvanized steel sheets and set up on a metallic infrastructure, with the purpose to link the lysimeter weight with the load cell located in the central portion of the infrastructure. After the excavation, brick and cement walls were constructed and then lysimeters were set up. The lysimeter was initially filled with a 0.1 m depth layer of grit, a thin polyester envelope and then with nine 0.1 m soil depth layers, maintaining the previous position of these layers in the soil profile. The calibration was performed with grit bags with known weights to establish the relationship between the electrical signal from load cell and lysimeter weight. The linearship was observed, with high determination coefficient. Lysimeters presented excellent sensitivity and resolution and detected weight variations caused by rain, irrigation and evapotranspiration, being suitable to estimate crop water demand.

KEYWORDS: calibration, water demand, semi-arid

3 INTRODUÇÃO

A quantificação do fluxo de vapor de água para a atmosfera proveniente de superfícies úmidas em combinação com a transpiração das plantas (evapotranspiração) em áreas cultivadas é de grande interesse para determinação das necessidades hídricas de cultivos e disponibilidade hídrica do solo.

Dentre os vários métodos disponíveis, o método direto mais comum utilizado na determinação da evapotranspiração da cultura é o método lisimétrico, que utiliza evapotranspirômetros ou lisímetros, os quais consistem de um tanque enterrado no solo (Reichadt & Timm, 2004), e por meio de variação balanço de massa ou volume de água, determinam a evaporação ou evapotranspiração.

Quanto ao tipo, Silva (1996) cita que os lisímetros usualmente são agrupados em pesáveis (lisímetros de pesagem de forma continuada ou intermitente, onde a variação de massa é determinada por um mecanismo de pesagem) e não pesáveis (lisímetro de drenagem e de lençol freático em nível constante).

Os lisímetros de pesagem podem determinar a evapotranspiração pelo balanço de massa em intervalos de cerca de 1h e, em função da sua precisão, são considerados equipamentos padrões para aferição dos demais métodos (Faria et al., 2006). Pruitt & Lourence (1985) mostraram a necessidade de avaliação minuciosa das culturas para representar alta qualidade dos dados de evapotranspiração, sendo que os erros deveriam ser conhecidos e quantificados, mesmo em lisímetros com grande precisão. Wheeler & Ganji (1996) relatam que é muito importante conhecer os erros associados ao sistema de medição, os quais devem ser o quanto menor possível, possibilitando o uso dos dados com confiabilidade para os fins propostos.

Payero & Irmak (2008) afirmam que o tamanho dos lisímetros de pesagem varia significativamente, sendo o mesmo uma função da intenção de uso e da resolução requerida ou desejada. Segundo Campeche (2002) equipamentos com área menor que 2m² vem sendo muito utilizados atualmente em pesquisas de evapotranspiração, pois além de serem mais facilmente construídos, os custos também são menores.

Um dos passos importantes antes do funcionamento de lisímetros de pesagem em campo é a calibração, que tem por finalidade estabelecer uma relação entre o sinal de saída da célula de carga e a massa do sistema, visando verificar a linearidade e histerese das células de carga, devendo ser preferencialmente calibrados *in situ*, nas mesmas condições climáticas do

seu funcionamento, por adição e retirada de pesos previamente conhecidos (Campeche, 2002). Deve-se utilizar equações próprias para cada lisímetro instalado, pois ocorrem variações decorrentes das características específicas do extensômetro elétrico de cada célula de carga e do peso morto do lisímetro em estudo (Faria et al., 2006).

O método lisimétrico é bastante preciso na determinação da evapotranspiração, desde que os equipamentos sejam instalados de maneira correta (Bernardo, 1989), sendo fundamental que as condições internas do equipamento se assemelhem ao máximo das condições externas do ambiente, tanto no que se refere ao tipo de solo e de planta, como nas condições de umidade desse solo (Pereira et al., 1997).

O objetivo do presente trabalho foi a instalação, calibração e avaliação de desempenho de três lisímetros de pesagem baseados em célula de carga, para o estudo da demanda hídrica da cultura da videira de vinho (*Vitis vinífera* L.), cv. Syrah, cultivada em Petrolina – PE.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área experimental

O experimento foi instalado no Campo Experimental de Bebedouro, pertencente à Embrapa Semiárido, em Petrolina - PE, na região do Submédio do Vale do São Francisco, com as seguintes coordenadas geográficas: 9° 9' de latitude sul, 40° 22' de longitude oeste, com uma altitude de aproximadamente 365,6 metros. O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo (Embrapa, 2006) textura média, apresentando relevo plano.

A região, de acordo com a classificação climática de Köppen, apresenta clima do tipo BSw^h (Reddy & Amorim Neto, 1993). Nessa região, geralmente, a estação chuvosa compreende os meses de novembro a abril, com precipitação média anual em torno de 530 mm, irregularmente distribuída. A umidade relativa média anual é de 66% e a temperatura do ar média anual é de 26,5°C, apresentando os maiores picos entre outubro e dezembro, enquanto julho é o mês mais frio.

4.2 Escavação para instalação dos lisímetros

Para instalação dos três lisímetros de pesagem realizou-se a escavação manualmente de uma área de 2,50 m por 2,10 m com profundidade de 1,85 m (Figura 1a). Foram separadas somente as 9 primeiras camadas de solo com 0,10 m cada, para posteriormente recompor o perfil do solo no lisímetro nas respectivas profundidades. As camadas de solo foram acondicionadas em lonas plásticas, identificadas e armazenadas no próprio local (Figura 1b).

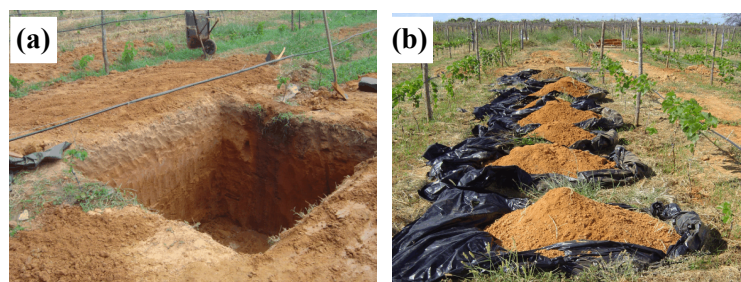


Figura 1. Cavidade no terreno para receber o sistema lisimétrico (a) e solo separado por camadas (b)

4.3 Estrutura das paredes externas dos lisímetros

As paredes dos lisímetros foram construídas com blocos de cerâmica interligados por massa de cimento, com 0,1 m de espessura e 2,48 m de comprimento, por 2,1 m de largura e 1,85 m de profundidade (Figura 2). Cada fosso comportou 4 colunas de concreto, sendo uma em cada parede, importantes por imprimir as paredes uma maior firmeza. Esse procedimento foi necessário para que fosse evitado qualquer tipo de desmoronamento futuro das paredes do fosso e também uma possível passagem de água por drenagem lateral para dentro do fosso.



Figura 2. Parede de alvenaria com colunas de concretos para receber o sistema lisimétrico.

4.4 Construção das sapatas

Foram projetadas quatro sapatas para sustentação das células de carga e do sistema de alavancas e contrapesos, conforme metodologia aplicada por Faria et al. (2006). As sapatas foram construídas à base de concreto e malhas de ferro (Figura 3a). Essa estrutura de sustentação teve como objetivo evitar o deslocamento vertical do sistema de pesagem devido às deformações do solo. É importante frisar que as sapatas foram construídas em nível com as demais, para que o sistema lisimétrico não sofresse nenhuma modificação no seu funcionamento. Na parte inferior do fosso colocou-se uma camada de brita de 0,1m de espessura, para evitar o empoçamento de água e facilitar a drenagem da água de chuva (Figura 3b).

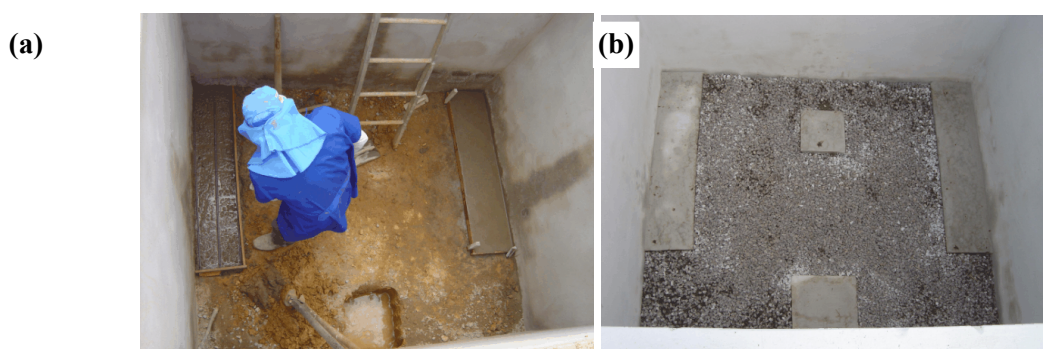


Figura 3. Vista superior das sapatas em construção (a) e prontas para receber o sistema lisimétrico (b)

4.5 Sistema de contrapesos e alavancas

Cada caixa lisimétrica foi sustentada por um sistema de balança de fabricação comercial (Figura 4a) constituída na parte superior por um quadro metálico em viga L laminada de 0,1

m (Figura 4b), do mesmo comprimento e largura do tanque e, na parte inferior, por um conjunto de transmissão de forças composto de quatro conjuntos oscilantes, ligados a um mecanismo de três alavancas metálicas de redução de massa, apoiadas em cinco suportes, colocados sobre as sapatas de concreto. No sistema de transmissão de forças, o atrito devido à mobilidade das estruturas é minimizado pelo conjunto de “navalha” e coxim em cada ponto de articulação. O sistema de redução de pesos proporciona redução aproximada de 45 vezes a massa total que é registrada por célula de carga de capacidade de 100 kg.

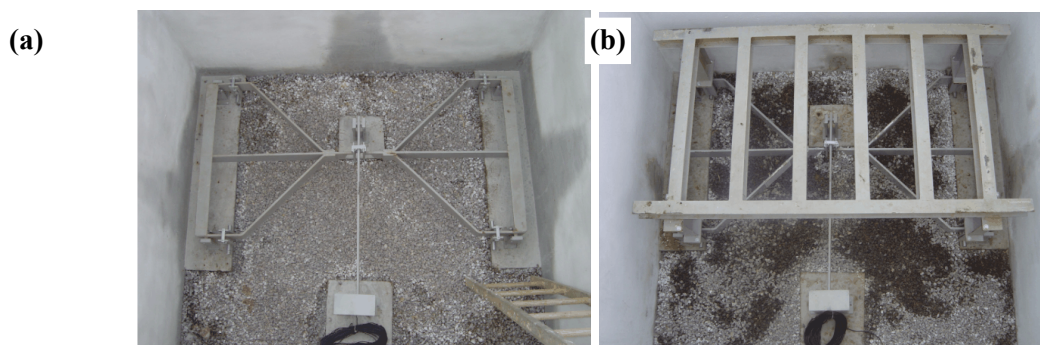


Figura 4. Sistema de balança (a) constituída na parte superior, por um quadro metálico para sustentação da caixa lisimétrica (b).

4.6 Construção das caixas lisimétricas

Foram confeccionadas três caixas lisimétricas em material de aço galvanizado, chapa nº 20, revestida com tinta epóxi, visando aumentar a sua durabilidade. A caixa lisimétrica possuía dimensões de 2,0 m por 1,2 m e profundidade de 1,0 m, totalizando uma área de 2,4 m² de superfície e volume total de 2,4 m³. Para reforço da caixa lisimétrica foi utilizado externamente uma tubulação de aço galvanizado de 1 polegada, fixado através de soldagem por fusão na lateral e fundo do tanque, garantindo uma maior sustentação ao sistema lisimétrico (Figura 5).



Figura 5. Momento da instalação da caixa lisimétrica em campo.

4.7 Preenchimento do lisímetro com solo e sistema de drenagem

Após a construção dos lisímetros realizou-se o seu preenchimento com solo previamente separadas por camadas. No fundo de cada lisímetro foi adicionada uma camada de 0,1 m de brita nº 1. Acima da camada de brita foi colocada uma manta geotextil de Bidin, para não permitir que o solo se misturasse com a brita, promovendo assim a drenagem de

água dentro do sistema, através de uma torneira que foi instalada na parte inferior da lateral do lisímetro (Figura 6).



Figura 6. Torneira instalada na lateral inferior do lisímetro para drenagem da água percolada.

Posteriormente, foram adicionadas as nove camadas de solos, cada uma com espessura de 0,1 m, na ordem inversa da sua retirada (Figura 7a), obedecendo a sequência das mesmas no perfil de solo original. Para cada camada completada, o solo recebeu uma leve compactação para que promovesse uma maior acomodação deste solo dentro da caixa lisimétrica, conforme metodologia aplicada por Cruz (2005) (Figura 7b). Esse procedimento foi semelhante em todos os lisímetros, sendo realizado com o solo seco, de modo que se evitasse a compactação excessiva.

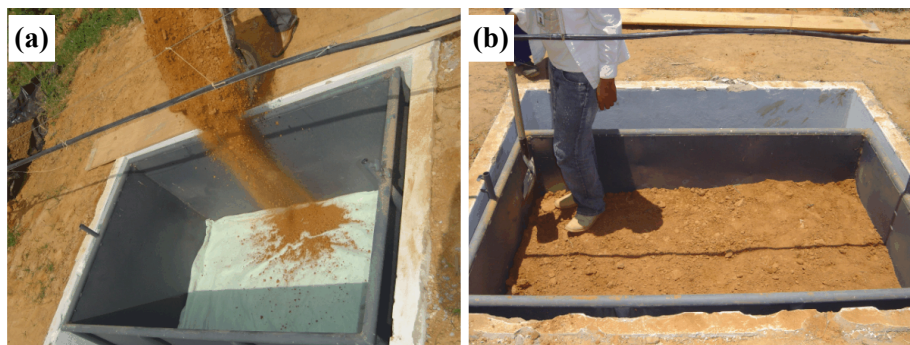


Figura 7. Preenchimento da caixa lisimétrica (a) com leve compactação para melhor acomodação do solo (b).

4.8 Instrumentação e coleta de dados

O elemento sensível de cada lisímetro de pesagem constituiu-se de uma célula de carga, modelo SV100 (Alfa Instrumentos Eletrônicos Ltda.)¹, com capacidade de 100 kg, calibrada previamente na fábrica e posteriormente no conjunto lisimétrico. As células de cargas são

¹ O uso da marca não teve como finalidade a propaganda do equipamento pelo autor.

seladas contra umidade e com dispositivo para compensação contra variações de temperatura na faixa de 0 a 50°C.

Os sinais elétricos gerados pela célula de carga foram coletados por meio de um sistema automático de coleta, Datalogger CR10X (Campbell Scientific, USA)¹ programado para efetuar aquisições a cada segundo e armazenamento das médias a cada trinta minutos, sendo posteriormente coletados com módulo de armazenamento e transferidos para microcomputador usando como interface um software para a conversão dos valores de entrada e saída de massa. A potencia elétrica para o sistema foi fornecida por placa solar, com bateria de 12 V. Utilizou-se 1000 mV de excitação para que a faixa de leitura do sinal fosse em torno de 7,5 mV apresentando uma melhor performance, com maior sensibilidade.

4.9 Calibração dos lisímetros

A calibração dos três lisímetros de pesagem foi realizada conforme metodologia apresentada por Campeche (2002). Para evitar a mudança de massa do sistema devido à evaporação da água do solo, os lisímetros foram cobertos com uma lona plástica. A massa do lisímetro no início foi a mesma no final do teste (Figura 8).



Figura 8. Calibração do lisímetro de pesagem em campo.

Iniciou-se o ensaio com a obtenção da leitura de voltagem em cada lisímetro descarregado (somente com o solo de preenchimento); a seguir, a variação de massa foi obtida com a adição e retirada de sacos plásticos com brita seca ao ar, hermeticamente fechados, de diferentes massas e pesados em balança de acuracidade de 0,01 g. Os acréscimos ou retiradas de massa foram realizados a cada 2 minutos, descartando-se da análise as leituras registradas durante o primeiro minuto, já que incluíam as oscilações provocadas pela variação de massa. Desenvolveu-se um algoritmo computacional para automatizar as leituras e armazenar os resultados no datalogger. As leituras foram realizadas a cada segundo, com média a cada minuto e com opção para alta resolução para saída de dados.

Os pesos foram acrescentados aos lisímetros em seqüência de carga de massa equivalente a 7 mm de água sobre a superfície do lisímetro (2,4 m²), obtida pela adição de quatro sacos de brita de 4,2 kg, até alcançar 70 mm, seguidos de acréscimos de 1 mm, produzidos pela adição de um saco de brita de 2,4 kg, até atingir a massa equivalente a 80 mm. A partir de 80 mm, os acréscimos voltaram a ser de 7 mm, até atingir 150 mm; em seguida, os sacos com brita foram retirados em intervalos também de 2 minutos, na mesma seqüência da adição, até a descarga completa e, assim, foram obtidos 60 pares de pontos para confecção da curva de calibração (mV x mm). O tempo total da operação de calibração transcorreu em duas horas.

4.10 Análise do desempenho

A exatidão dos equipamentos foi determinada por meio do erro padrão, que caracteriza a dispersão dos valores de massa mensurados pelos lisímetros em relação aos valores das massas padrões (sacos de brita). Os dados referentes às massas-padrão aplicadas e as respectivas leituras da balança do lisímetro foram submetidos à análise estatística de regressão. A precisão foi determinada por meio do coeficiente de determinação (r^2) obtida pela regressão linear de cada equipamento.

A resolução é inerente ao conjunto célula de carga-datalogger, sendo a menor escala da divisão ou o último dígito que pode ser lido pelo equipamento de medição. A resolução foi obtida por meio de dados coletados em um dia normal, sendo calculada e verificada a menor leitura que o equipamento pode realizar na diferença do menor valor de tempo (30 minutos).

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

4.11 Sistema de condução da videira

O sistema de condução da videira na área foi em espaldeira (sistema de condução no qual os ramos e as folhas da videira ficam expostas de forma vertical), com espaçamento entre linhas de 3 m e entre plantas de 1 m, na direção norte-sul. Porém, em cada lisímetro construiu-se uma estrutura de suporte específica para as plantas, independente daquela empregada no sistema de condução das plantas vizinhas (Figura 9). Os suportes foram construídos com 1,8 m de altura, feitos com tubos de aço galvanizado de 25 mm de diâmetro e adaptados a caçamba metálica com três fios de arame como suporte ao desenvolvimento vegetativo da cultura, somando-se a massa total do lisímetro. Desta maneira, a variação de leitura dava-se em função da variação de massa de água perdida por evapotranspiração, evitando a interferência das demais plantas sobre o lisímetro.



Figura 9. Lisímetro de pesagem após montagem do sistema de condução.

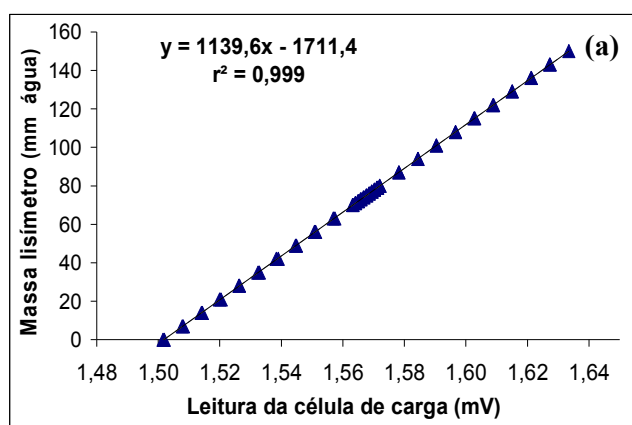
4.12 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação utilizado no parreiral foi do tipo gotejamento em linha, com emissores espaçados de 0,5 m, vazão de 2,5 l/h e uma linha lateral por fileira de planta, com frequência de irrigação diária. Nos lisímetros a irrigação foi realizada manualmente com um regador de 8 litros. Esse procedimento foi necessário porque o tempo de irrigação com regador é muito inferior (0,5 hora) ao realizado com o sistema de irrigação da área experimental, que dura em média 2,5 horas. Como o sistema automático de coleta de dados foi programado para aquisições a cada segundo e armazenamento das médias a cada trinta minutos, esse procedimento evitou que 5 pontos da curva de evapotranspiração da cultura plotados no gráfico no momento da avaliação fossem descartados, já que no momento da irrigação não houve como separar o volume de água que foi aplicado e evapotranspirado concomitantemente. Esse procedimento visou garantir uma melhor qualidade nos dados coletados e reduzir os descartes de dados nos dias de irrigação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Calibração dos lisímetros

Conforme metodologia apresentada procedeu-se a calibração dos três lisímetros em campo, sendo obtida alta correlação entre leituras da célula de carga (mV) e a massa do conjunto (mm). Verificou-se que o modelo linear descreveu adequadamente a relação entre a saída da célula de carga, em milivoltagem (mV) e o equivalente em milímetros de água para os três lisímetros de pesagem, tendo em vista o elevado coeficiente de determinação (r^2), conforme Figura 10. Constatou-se excelente linearidade com as massas adicionadas em cada lisímetro e o sinal obtido da célula de carga com histerese mínima. Allen & Fisher (1991) e Howell et al. (1995) utilizando lisímetros de pesagem com características de montagem semelhantes ao utilizado neste trabalho encontraram resultados também satisfatórios para a série de variação de acréscimo e decréscimo de pesos, não observando efeito significativo de histerese. Houve também elevada semelhança de resultados entre os três aparelhos. Resultados semelhantes foram encontrados por Rocha (2008), Cruz (2005) e Campeche (2002), utilizando metodologia semelhante na calibração.



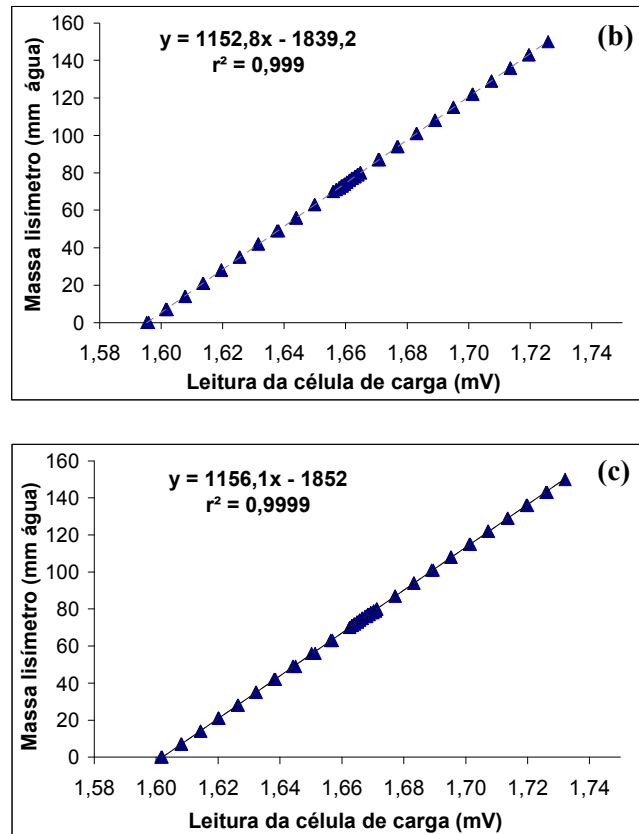


Figura 10. Variação de massa (em equivalente de mm de água) em função da variação da voltagem (mV) medida na célula de carga para os ciclos de carga e descarga, para a calibração dos lisímetros 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

Os valores do coeficiente angular da equação de regressão entre massa e voltagem para os lisímetros 1, 2 e 3 foram de 1139,6, 1152,8 e 1156,1 mm mV⁻¹ (Figura 10), respectivamente. Essas diferenças são devidas principalmente às características específicas do extensômetro elétrico de cada célula de carga e das dimensões das alavancas de redução de peso e das massas do conjunto contidas originalmente no momento inicial da calibração. Os valores dos coeficientes lineares, obtidos na regressão, foram 1711,4, 1839,2 e 1852 para os lisímetros 1, 2 e 3 respectivamente, sendo as diferenças devidas à massa estática (peso morto) de cada conjunto.

Na figura 11 apresentam-se os erros entre os pesos medidos pelos lisímetros e os pesos padrões adicionados e retirados durante a calibração. Os dados referentes às massas-padrão aplicadas e as respectivas leituras da balança do lisímetro foram submetidos à análise estatística de regressão, obtendo para os lisímetros 1, 2 e 3 o erro padrão de estimativa da regressão linear de 0,4, 0,6 e 1 mm, o que equivale a uma massa de 0,94, 1,44 e 2,4 kg, respectivamente. Os valores para os erros padrões dos lisímetros 1 e 2 estão na mesma faixa de calibração encontrada por Miranda et al. (1999). O lisímetro 3 apresentou um erro padrão maior.

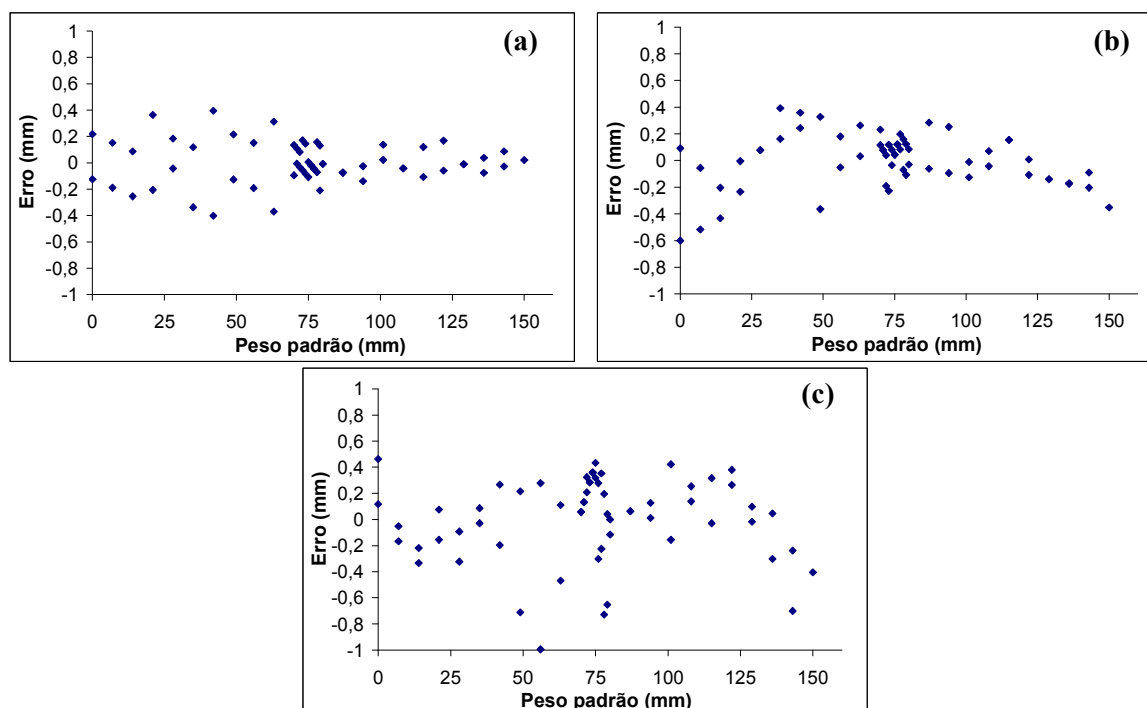


Figura 11. Erro entre o peso medido pelos lisímetros 1 (a), 2 (b) e 3 (c) e o peso padrão durante a calibração.

A sensibilidade é a menor variação de grandeza (massa ou sinal elétrico) detectada que provoca uma mudança de leitura do sistema, sendo que as três células de carga utilizadas nos três lisímetros de pesagem apresentaram sensibilidade suficiente para detectar variações de 0,0001 mV, que representam uma variação de 0,00001 mm de lâmina líquida. Resultado semelhante foi encontrado por Carvalho et al. (2007), que na calibração de um lisímetro de pesagem utilizando metodologia semelhante, constatou que a cada massa adicionada ao lisímetro, a célula de carga apresentava variação média de sinal da ordem de 0,000105 a 0,000549 mV.

A resolução é a menor escala da divisão ou o último dígito que pode ser lido pelo equipamento de medição, sendo encontrada para os três equipamentos uma resolução de 0,11 mm em intervalos de 30 minutos. Isso significa que a menor variação de massa detectada pelos lisímetros foi de 0,244 kg. Essa resolução pode ser considerada relativamente alta quando comparada à resolução de 0,45 mm obtida por Santos et al. (2007) na construção de um lisímetro móvel de pesagem com célula de carga hidráulica.

5.2 Análise de funcionamento em diferentes situações

Na Figura 12 são apresentados os decréscimos da variação da massa do lisímetro 2 ao longo de um dia e a velocidade do vento coletados em intervalos de 30 minutos. Pode-se observar que em 3 de dezembro de 2009 não houve ocorrência de precipitações ou irrigações. A velocidade média do vento neste dia foi de $0,80 \text{ m s}^{-1}$, com um pico de $3,8 \text{ m s}^{-1}$ às 16:00 h. O decréscimo de massa do lisímetro ocorreu gradativamente nas horas de maior demanda evapotranspirométrica. Percebeu-se que a turbulência causada pelo vento foi mínima, não afetando os dados de evapotranspiração.

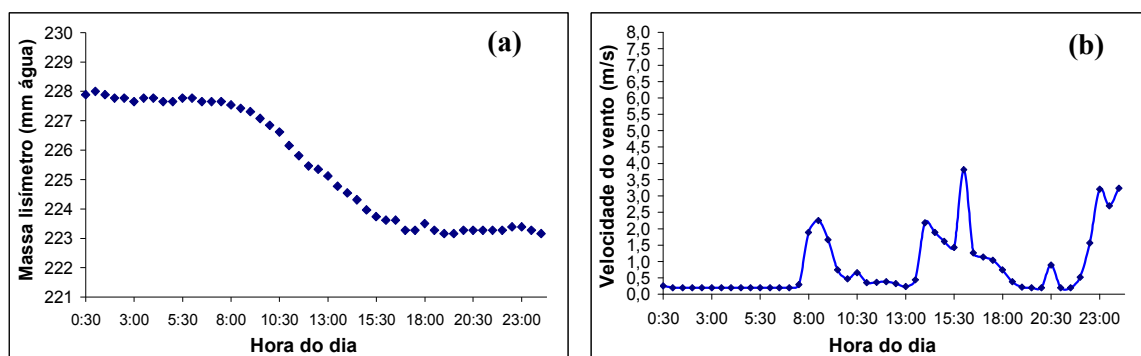


Figura 12. Variação de massa (em equivalente de mm de água) do lisímetro 2 (a) e velocidade do vento (b) em 3 de dezembro de 2009.

No dia 17 de dezembro de 2009 (Figura 13), verificou-se uma velocidade média do vento de $3,04 \text{ m s}^{-1}$, com um pico médio de $4,58 \text{ m s}^{-1}$ às 11:30 h. Percebeu-se que o decréscimo da massa ocorreu de forma irregular, ou seja, ocorreram oscilações nas horas de maior demanda evapotranspirométrica mesmo com ausência de precipitação ou irrigação. Isso significa que a maior sensibilidade dos sensores e resolução do “datalogger” não implica necessariamente em melhor qualidade dos resultados, pois fatores incontroláveis, como ventos fortes, afetam significativamente a exatidão das medidas. Na Figura 13b, mostra um dia de ventos fortes, onde resultou em variações intermitentes na massa do lisímetro gerando acréscimos e decréscimos alternados em curto intervalo de tempo, sem que tenha realmente ocorrido saída ou entrada de água (Figura 13a).

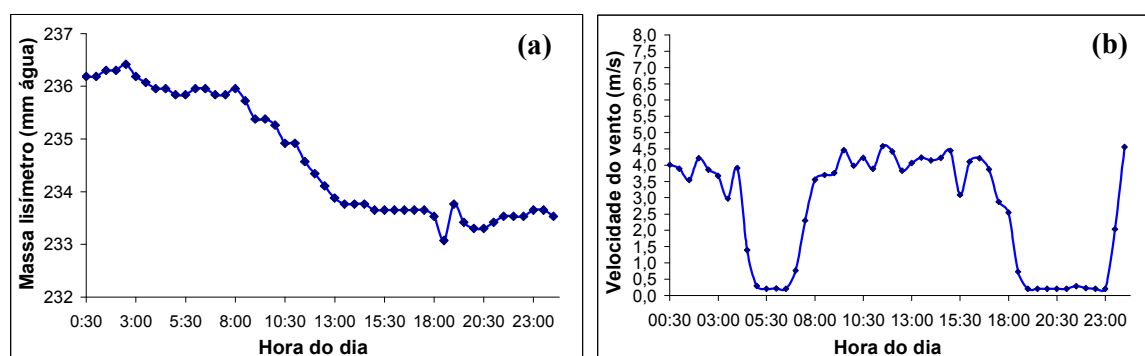


Figura 13. Variação de massa (em equivalente de mm de água) no lisímetro 2 (a) e velocidade do vento (b) em 17 de dezembro de 2009.

Segundo Howell et al. (1995), a recomendação para diminuir o efeito causado pela ação do vento nos valores de evapotranspiração seria o uso de um período maior de integração das médias. Essa medida causaria uma menor oscilação dos valores médios de massa, resultando em sensível melhora dos dados. Pruitt & Angus (1960), Van Bavel & Myers (1962), Rosenberg (1969), Bergamaschi et al. (1997) e Campeche (2002) relataram problemas causados por ventos que provocaram oscilações nas medidas do lisímetro.

A Figura 14 apresentou variação decrescente contínua de massa ocorrida nos lisímetros 1 (a), 2 (b) e 3 (c) entre os dias 3 e 5 de dezembro de 2009. Verificou-se decréscimo gradual da massa dos lisímetros durante o período diurno refletindo a evapotranspiração ocorrida. Esta variação em lisímetros de pesagem é típica em dias em que ocorre maior demanda evapotranspirométrica e ausência de chuvas ou irrigação. Pereira (1998), trabalhando com lisímetro de pesagem para determinação da evapotranspiração de referência, constatou que em

torno de 85% da evapotranspiração diária ocorre durante o período diurno. Observou-se por meio dos gráficos que durante o período noturno a massa do sistema foi quase constante, pois a radiação líquida, principal variável meteorológica envolvida no processo evapotranspirométrico, é negativa ou insuficiente para promover energia necessária para tal processo, ficando o processo de evapotranspiração dependente das condições aerodinâmicas do ar e da energia acumulada pelo sistema. Em média 15% da evapotranspiração diária ocorre durante o período noturno.

A redução da massa registrada no período de 72 horas na Figura 14 foi de 27,36, 27,38 e 34,68 Kg, correspondendo a evapotranspiração de uma lâmina de água de 11,40, 11,41 e 14,45 mm, nos lisímetros 1, 2 e 3, respectivamente. Torna-se evidente que o lisímetro 3 superestimou os dados de evapotranspiração. Esse comportamento já era esperado, pelo fato do equipamento ter apresentado um erro padrão de 1 mm de lâmina de água. Camargo (1962) e van Bavel & Myers (1962) sugerem que para determinação da evapotranspiração sejam utilizados três lisímetros para que se tenha uma estimativa do erro de medida, embora isso nem sempre seja viável na prática.

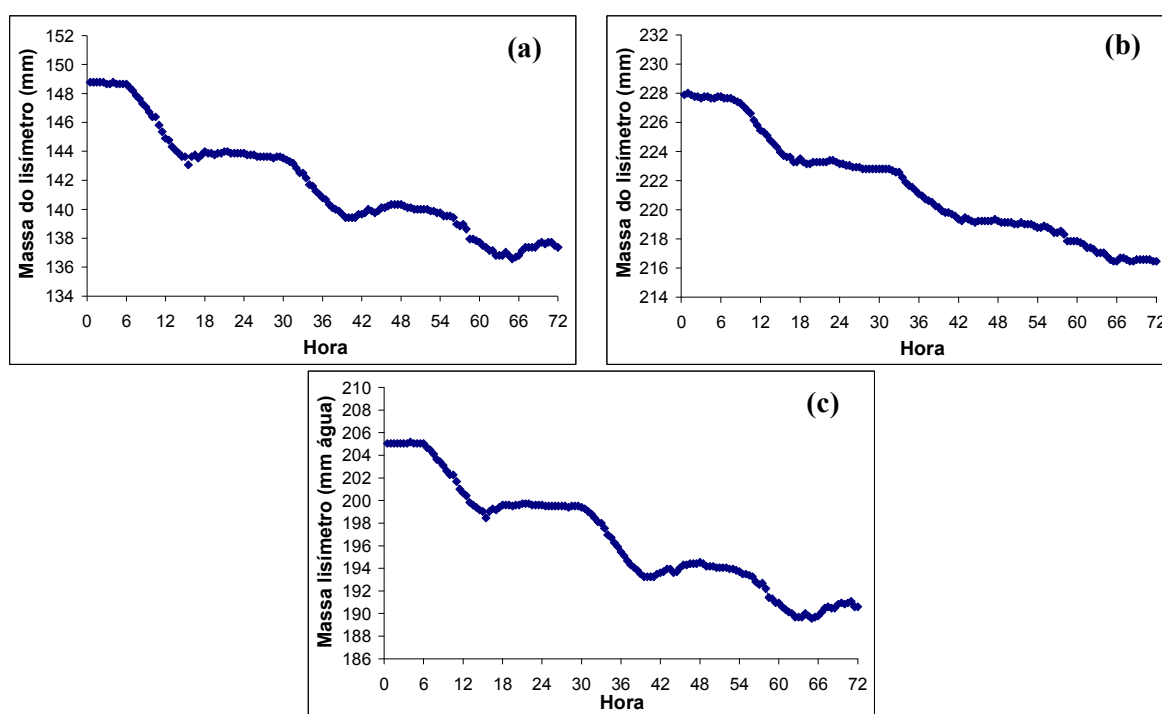


Figura 14. Variação de massa (em equivalente de mm de água) decrescente continua dos lisímetros 1 (a), 2 (b) e 3 (c) entre 3 e 5 de dezembro de 2009 em condições típicas de funcionamento.

Na Figura 15 observou-se a presença de um ponto discrepante nos valores de evapotranspiração logo antes da irrigação. Constatou-se que esse ponto foi devido à turbulência causada pela pressão por um pequeno animal sobre o lisímetro. Campeche (2002), afirma que mesmo com coletas automatizadas de dados, é indispensável uma avaliação manual e visual dos dados para evitar erros grosseiros na determinação diária da evapotranspiração.

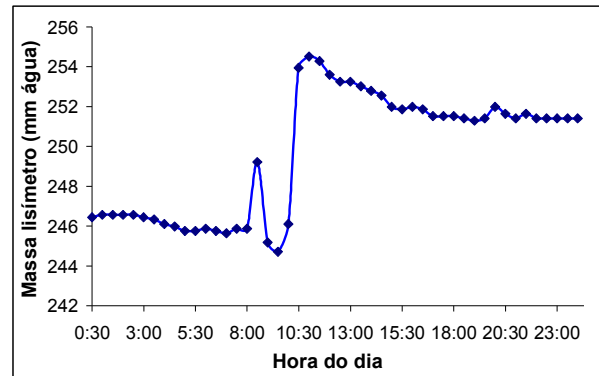


Figura 15. Desempenho do lisímetro 2 em dia com ocorrência de anomalia e irrigação em 7 de janeiro de 2010.

A Figura 16 mostra o funcionamento do lisímetro 2 em dias de ocorrência de irrigação e evapotranspiração, bem como o comportamento da variável climática radiação solar global nos dias 17 e 18 de novembro de 2009. Na Figura 16a, observou-se que no período de tempo entre as 13:30 h até as 15:00 h ocorreu aumento na lâmina armazenada, de aproximadamente 7 mm, devido a irrigação. A partir das 15:00 h e ao longo do dia, a lâmina de água decresce devido às perdas por evapotranspiração, que nestes dois dias alcançaram 10,01 mm. As taxas de variação da evapotranspiração apresentaram valores mais elevados durante o período entre 10 e 15 h, em decorrência da maior radiação neste horário, conforme registros da Estação Meteorológica Automática de Bebedouro (Figura 16b), localizada numa área próxima aos lisímetros.

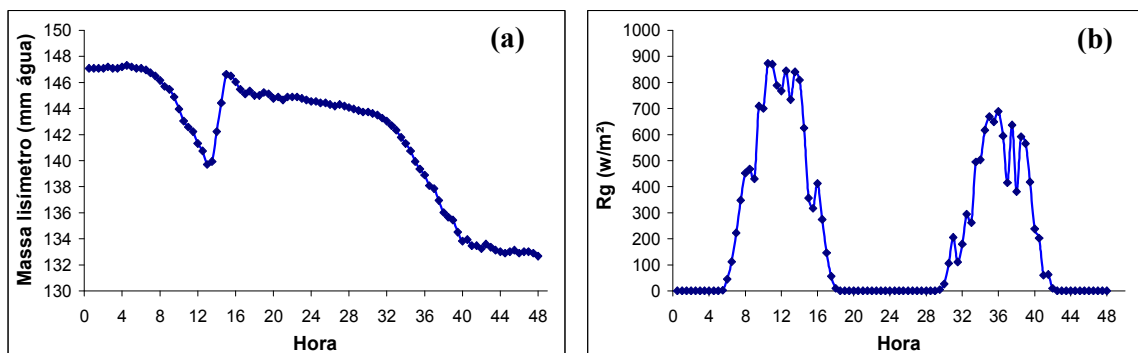


Figura 16. Desempenho do lisímetro 2 em dias com ocorrência de irrigação e evapotranspiração (a) e comportamento da radiação global (b) em 17 e 18 de novembro de 2009.

As Figuras 17 (a, b, c e d) apresentam um período em que ocorreu chuva e evapotranspiração em 2 de dezembro de 2009. Nota-se que no período de tempo entre as 3:30 h até as 11:00 h houve aumento na lâmina armazenada, de aproximadamente 16 mm; de fato, neste período foi registrada, pelo pluviógrafo da estação automática de Bebedouro, uma precipitação de 15 mm. A partir das 11:00 h e ao longo do dia, a lâmina de água decresce suavemente devido às perdas por evapotranspiração, que neste dia alcançaram 1,8 mm.

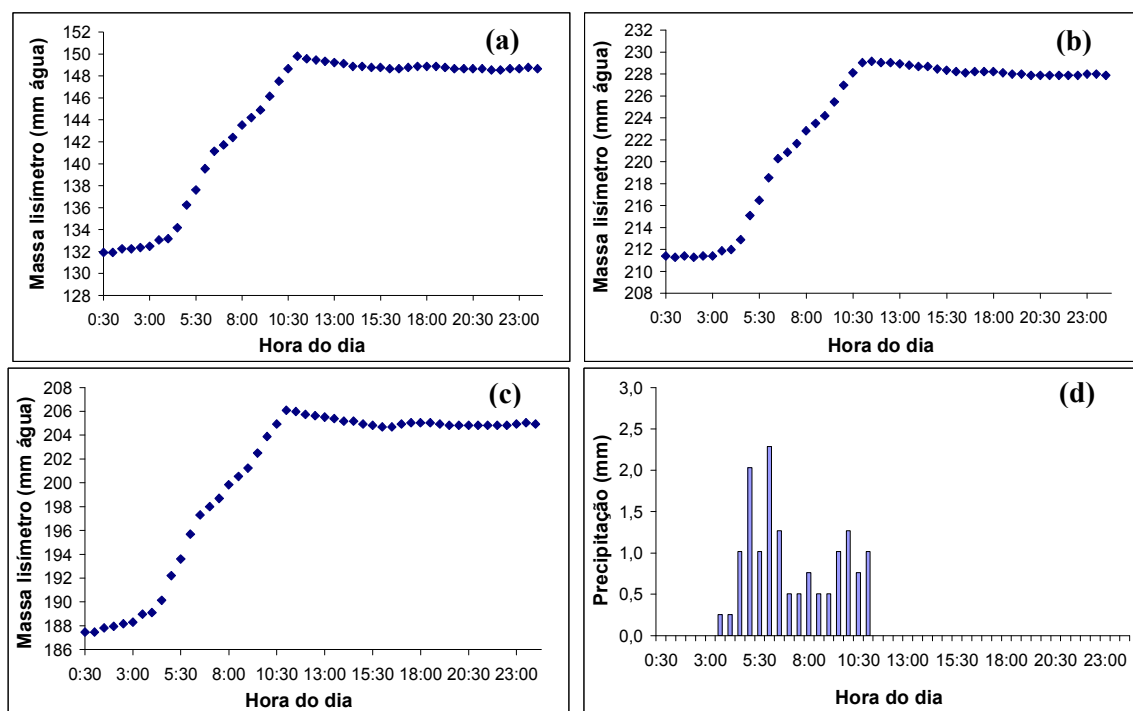


Figura 17. Variação da lâmina de água armazenada nos lisímetros 1 (a), 2 (b) e 3 (c) em 2 de dezembro de 2009 e registro de precipitação (d).

6 CONCLUSÕES

Os três lisímetros de pesagem instalados e calibrados, obtiveram alto coeficiente de determinação na equação de calibração, excelente sensibilidade e resolução, detectando variações de massa devido a chuva, irrigações, evapotranspiração e vento, durante períodos inferiores a 1 hora.

Os lisímetros 1 e 2 obtiveram maior exatidão que o lisímetro 3 no estudo da demanda hídrica da cultura da videira na região do Submédio do Vale do São Francisco.

7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; FISHER, D. K. Direct load cell-based weighing lysimeter system. In: ALLEN, R. G. et al. (Ed.). **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 114-124.

BERGAMASCHI, H. et al. Automação de um lisímetro de pesagem através de estação meteorológica, a campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10, 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBA, 1997. p. 222-224.

BERNARDO, S. O. **Manual de irrigação**. 5. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1989. 596 p.

CAMARGO, A. P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, p. 163-213, 1962.

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 latifolia* Tan.)**. 2002. 67 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CARVALHO, D. F. et al. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, maio/ago. 2007.

CRUZ, F. A. **Instalação e calibração de lisímetro de pesagem e determinação da evapotranspiração de referência para a região de Seropédica - RJ**. 2005. 79 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)-Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2005.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, RJ.: Embrapa Solos, 2006. 2a ed. 306p.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, L. 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.

HOWELL, T. A. et al. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 38, n. 4, p. 1019-1024, 1995.

MIRANDA, F. R.; YODER, R. E.; SOUZA, F. Instalação e calibração de um lisímetro de pesagem no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 107-110, 1999.

PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 26, n. 2, p. 191-202, 2008.

PEREIRA, F. A. C. **Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em relação a um lisímetro de pesagem**. 1998. 87 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PRUITT, W. O.; ANGUS, D. E. Large weighing lysimeter for measuring evapotranspiration. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 3, n. 2, p. 13-18, 1960.

PRUITT, W. O.; LOURENCE, F. G. Experiences in lysimeter for ET and surface drag measurements. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, 14, 1985, Chicago. **Advances in evapotranspiration: proceedings...** St Joseph: ASAE, 1985. p. 51-69. (ASAE. Publication, 14-85).

- REEDY, S. J.; AMORIM NETO, M. S. **Dados de precipitação, evapotranspiração potencial, radiação solar global de alguns locais e classificação climática do Nordeste do Brasil**. Petrolina: EMBRAPA, CPATSA, 1993. 280 p.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.
- ROCHA, F. J. **Resposta da lima ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan.) a diferentes porcentagens de área molhada**. 2008. 56 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- ROSENBERG, N. J. Evaporation and condensation on bare soil under irrigation in the East Central Great Plains. **Agronomy Journal**, Madison, v. 61, p. 557-561, 1969.
- SANTOS, R. A. et al. Projeto, construção e calibração de um lisímetro móvel de pesagem, com célula de carga hidráulica, para determinação de demanda hídrica de mudas cítricas em casa de vegetação. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 2, p. 202-215, 2007.
- SILVA, F. C. **Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência**. 1996. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.
- VAN BAVEL, C. H. M.; MYERS, L. E. An automatic weighing lysimeter. **Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v. 43, p. 580-588, 1962.
- WHEELER, A. J.; GANJI, A. R. **Introduction to engineering experimentation**. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 415 p.