

# DESENVOLVIMENTO DE LISÍMETROS DE PESAGEM NA CULTURA DO CAFÉ

## *DEVELOPMENT WEIGHING LYSIMETERS FOR COFFEE CULTURE*

**Hudson de Paula CARVALHO<sup>1</sup>; Benjamim de MELO<sup>2</sup>; Roberto Terumi ATARASSI<sup>1</sup>; Reginaldo de CAMARGO<sup>1</sup>; Cláudio Ricardo da SILVA<sup>1</sup>; Márcia Regina Batistela MORAES<sup>3</sup>**

1. Professor Adjunto, Doutor, Instituto de Ciências Agrárias - ICIAG, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia, MG, Brasil. hudsonpc@iciag.ufu.br; 2. Professor Associado, Doutor, Instituto de Ciências Agrárias, ICIAG - UFU. Uberlândia, MG, Brasil; 3. Engenheira Agrônoma - ICIAG - UFU. Uberlândia, MG, Brasil.

**RESUMO:** O conhecimento das necessidades hídricas do cafeeiro é fator preponderante para o uso racional da irrigação. Diante disso, objetivou-se com esse trabalho desenvolver lisímetros de pesagem para a cultura do café por meio de sua construção, montagem, automação e calibração. Para isso, foram construídos três lisímetros com formatos e dimensões diferentes, com capacidades volumétricas de 0,941; 2,565 e 6,444 m<sup>3</sup>. Para obtenção das massas dos lisímetros foram utilizadas quatro células de carga, por cada equipamento. A drenagem dos lisímetros foi mensurada por um pluviômetro de balsa instalado na parte inferior dos mesmos. As informações das células de carga e dos pluviômetros foram armazenadas automaticamente por um datalogger instalado a 3 m dos lisímetros. As paredes externas e os poços de visita foram construídos em concreto armado. As mudas de café plantadas em cada equipamento, bem como as demais da área foram irrigadas e fertirrigadas por gotejamento. A metodologia empregada na construção, montagem, automação e calibração dos lisímetros de pesagem é tecnicamente adequada, obtendo-se coeficiente de determinação superior a 99,96% na equação de calibração e erro padrão inferior a 0,66 mm. O uso de pluviômetros de balsa em substituição dos tradicionais recipientes para armazenamento da água drenada pelos lisímetros foi adequado e confiável. O uso da fibra de vidro na construção das caixas dos lisímetros em substituição da chapa de aço-carbono é viável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Evapotranspiração. Célula de carga. Pluviômetro. Lisimetria. Irrigação.

## INTRODUÇÃO

O conhecimento da evapotranspiração é de grande importância para o dimensionamento de projetos de irrigação, bem como para manejar eficientemente esses equipamentos. Segundo Pereira et al. (2002) a evapotranspiração é a somatória da transpiração e evaporação. A transpiração é definida como a água que penetra pelas raízes das plantas, é utilizada na construção dos tecidos ou emitida pelas folhas, e posteriormente é reintegrada à atmosfera. Já a evaporação, é definida por esses autores como a água evaporada pelo terreno adjacente às plantas, por uma superfície de água ou pela superfície das folhas quando molhadas por chuva ou irrigação, sem ser usada pela planta.

Diversos equipamentos e métodos podem ser usados para a determinação da evapotranspiração e da evaporação. Dentre esses, os lisímetros têm sido empregados para a obtenção direta dessa variável com extrema confiabilidade. Segundo Howell et al. (1991) a evapotranspiração pode ser determinada pelo balanço entre a entrada de água no lisímetro, seja por precipitação ou irrigação e a água que sai, ocasionada pela transpiração e evaporação, bem como pela drenagem. Ainda segundo os autores, os lisímetros de pesagem determinam a evapotranspiração

baseado na pesagem da água, enquanto que os outros métodos se utilizam de um método indireto, ou seja, pelo volume.

Aboukhaled et al. (1982) consideram o lisímetro de pesagem como o melhor equipamento para a medida acurada da evapotranspiração, seja de referência ou de cultura, e serve como metodologia padrão para a calibração de equações para estimativa dessas variáveis. Segundo Howell et al. (1995) os lisímetros de pesagem são os mais precisos para a estimativa da evapotranspiração em períodos inferiores a um dia.

Apesar de ser uma ferramenta padrão em estudos envolvendo evapotranspiração, em geral os lisímetros apresentam alguns inconvenientes. Sedyama (1996) afirma que é muito difícil manter as condições internas dos lisímetros iguais ou semelhantes às condições externas e vice-versa. Em função disso, diferenças podem ser notadas entre as plantas do lisímetro e aquelas externas, o que influenciará os valores do coeficiente de cultura.

De acordo com Howell et al. (1995), a massa do lisímetro pode ser afetada por qualquer fator que incide sobre o equipamento, até mesmo o vento. Os autores verificaram que velocidades acima de 5 m s<sup>-1</sup> aumentam consideravelmente o desvio padrão das medidas. Os lisímetros são instrumentos que medem a evapotranspiração de

maneira pontual, o que justifica o cuidado com extrapolações dos resultados obtidos. Segundo Allen et al. (1991), a finalidade do lisímetro é a de medir as trocas de energia de uma vegetação padrão ou de uma cultura qualquer, somente na dimensão vertical. Nesse sentido, a vegetação circundante do equipamento deve ser representativa, o que minimiza o efeito “oásis” sobre as plantas. Segundo os autores, além dessa condição, outras variáveis como o espaçamento das paredes externa e interna, a área que a vegetação ocupa dentro do lisímetro, a radiação e a advecção térmica oriundas das paredes e a altura dos anéis (borda do lisímetro), sem dúvida são as maiores fontes de erros de interpretações de medidas lisimétricas.

Existem muitos trabalhos citados na literatura envolvendo a construção desse equipamento, com diferentes características e peculiaridades. Schneider et al. (1998) montaram e calibraram um lisímetro de grande porte (acima de 45 Mg) e encontram um alto coeficiente de determinação. Esses autores utilizaram um sistema de alavancas e contrapesos que aumentaram sobremaneira a precisão do equipamento.

Miranda et al. (1999) descreveram os procedimentos da construção, instalação e calibração de um lisímetro de pesagem do tipo caixa metálica sobre balança eletrônica de precisão. O equipamento possuía área superficial de 2,2 m<sup>2</sup>, profundidade de 1,0 m e foi instalado no centro de uma área gramada de 10.000 m<sup>2</sup>, com a finalidade de determinar a evapotranspiração potencial de referência e ajustar modelos de estimativa da evapotranspiração. Os resultados de sua calibração mostraram que o erro foi inferior a 1% em 176 kg, correspondendo a evapotranspiração de 80 mm. Campeche (2002) relatou o sucesso na construção, calibração e análise de funcionamento de um lisímetro de pesagem, com o objetivo de mensurar a evapotranspiração de plantas de lima ácida ‘Tahiti’. Objetivando obter essa variável em todos os estágios de desenvolvimento da cultura, o autor construiu quatro lisímetros de tamanhos diferentes, o que permitiu avaliar com maior sensibilidade as variações da evapotranspiração.

Faria et al. (2006) apresentaram detalhes da construção de uma bateria de dez lisímetros de pesagem. Cada equipamento apresentou dimensões de 1,4 m de largura; 1,9 m de comprimento e 1,3 m de profundidade e foi colocado sobre uma balança com alavancas de redução de peso e uma célula carga. Os resultados mostraram excelente linearidade entre as variações de massa e voltagem, para todos os lisímetros testados e não se constatou histerese. As medidas de evapotranspiração

mostraram precisão para detecção de mudanças de massa de pelo menos 0,1 mm, em intervalos iguais ou maiores que uma hora, adequado para a maioria das aplicações de campo.

Carvalho et al. (2007) construíram, calibraram e avaliaram a sensibilidade de um lisímetro de pesagem com célula de carga, instalado em Seropédica-RJ. O lisímetro, com dimensões de 1,0 m x 1,0 m e 0,7 m de profundidade, foi construído com chapas de aço galvanizado e instalado sobre estrutura metálica montada sobre barras transversais, a fim de concentrar toda a massa do conjunto sobre uma célula de carga localizada no centro do sistema. Os autores verificaram que o equipamento mostrou-se adequado para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), apresentando erro padrão de estimativa da regressão de 0,278 kg ou 0,278 mm, além de responder às variações dos principais elementos meteorológicos que influenciam na ET<sub>o</sub>.

Santos et al. (2008) avaliaram o desempenho de um lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo, visando à determinação direta da ET<sub>o</sub> no Semi-Árido nordestino. O lisímetro apresentou concepção simplificada, com travesseiros hidráulicos confeccionados com mangueira flexível de butil e revestida em náilon, interligados a um sistema manométrico com mercúrio e água. Os autores verificaram que o equilíbrio do lisímetro foi estável, sendo o maior erro médio posicional de 3,93%. As calibrações geraram coeficientes de correlação superiores a 0,9993 e resoluções de leituras entre 0,095 e 0,134 mm.

Campeche et al. (2011) propuseram a instalação e calibração de um lisímetro de pesagem de grande porte, composto por çaçamba metálica em aço carbono, área de 5,72 m<sup>2</sup> e massa total de 10,5 Mg. Na automação do processo foi utilizado o mecanismo de alívio de carga baseado em sistemas de alavancas e contrapesos, apoiado em uma célula de carga com capacidade de 200 kg e precisão de 0,02% de sua capacidade. Os autores verificaram que a metodologia empregada na instalação e na calibração do lisímetro foi adequada, obtendo-se um coeficiente de determinação de 99% na equação de calibração.

A lisimetria de pesagem vem sendo utilizada como técnica padrão na determinação da evapotranspiração de cultura e de referência em vários trabalhos encontrados na literatura (CAVALCANTE Jr. et al., 2013; SOUSA et al., 2011). Entretanto, a literatura referente ao uso de lisímetros de pesagem na cultura de café ainda é escassa no Brasil. Diante disso, ressalta-se a

importante contribuição de Flumignan e Faria (2009) e Flumignan et al. (2011). Os autores utilizaram com sucesso, em Londrina-PR, lisímetros de pesagem para determinar a evapotranspiração (ET) de cafeeiros da cultivar IAPAR 59, não irrigado e irrigado por aspersão e gotejamento, durante os dois primeiros e do terceiro ao quarto ano após a implantação da lavoura, respectivamente.

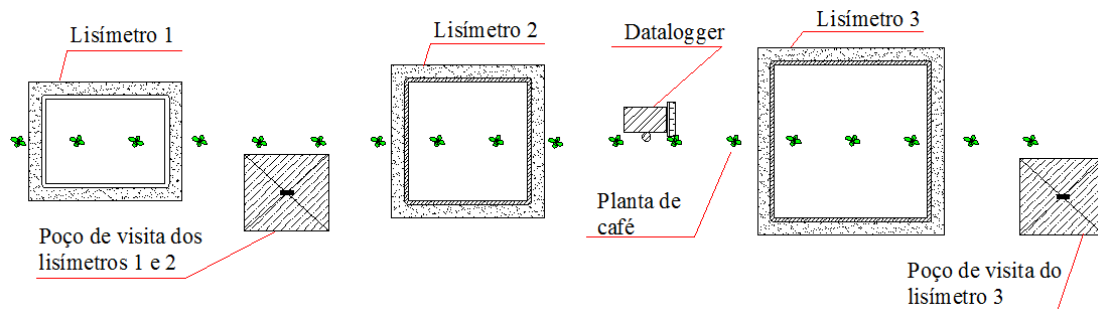
Diante da necessidade de se quantificar com maior precisão a evapotranspiração da cultura do café, principalmente em áreas de cerrado, este trabalho teve como objetivo a construção, montagem, automação e calibração de lisímetros de pesagem.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os lisímetros foram montados no Setor de Cafeicultura, localizado na Fazenda Experimental do Glória, da Universidade Federal de Uberlândia, com as seguintes coordenadas geográficas: 18° 58' 52'' latitude Sul, 48° 12' 24'' longitude Oeste e 912 m de altitude. O solo é classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico,

horizonte A moderado, textura argilosa, fase cerrado (EMBRAPA, 2013), com declividade inferior a 2%. No local existem cafeeiros da cultivar Topázio, implantados em janeiro de 2008, no espaçamento de 3,5 m entre linhas e 0,7 m entre plantas na linha, irrigados e fertirrigados por gotejamento. Os lisímetros foram instalados no centro de uma área de 16 ha, com bordadura de 200 m, eliminando o efeito "oásis" no processo de evapotranspiração das plantas.

No intuito de mensurar com maior precisão a evapotranspiração das plantas nas fases juvenil (plantio até o 2º ano de desenvolvimento), intermediária (2º até o 4º ano) e adulta (após o 4º ano), foram instalados três lisímetros (Figura 1), com tamanhos diferentes. A caixa dos três lisímetros foi fabricada em fibra de vidro, com 3 mm de espessura da parede, no formato retangular/quadrado, sendo suas medidas: 0,990 m de largura, 1,358 m de comprimento e 0,7 m de profundidade (lisímetro 1); 1,355 m de largura, 1,355 m de comprimento e 1,4 m de profundidade (lisímetro 2) e; 1,795 m de largura, 1,795 m de comprimento e 2,0 m de profundidade (lisímetro 3).



**Figura 1.** Ilustração do arranjo de montagem dos lisímetros no campo.

As áreas dos lisímetros correspondem a 1,344, 1,836 e 3,222 m<sup>2</sup> para os equipamentos 1, 2 e 3, respectivamente. No fundo da caixa de cada lisímetro foi feito um orifício de 0,05 m de diâmetro, e neste acoplada um flange de PVC, com o objetivo de coletar a água drenada. Foram utilizadas quatro células de carga modelo LC501-2K, LC501-3K e LC501-5K (OMEGA Engineering®) nos lisímetros 1, 2 e 3, respectivamente.

As células de carga, construídas em aço inoxidável (17-4 PH), apresentam linearidade, histerese e repetibilidade de  $\pm 0,03\%$ ,  $0,02\%$  e  $0,02\%$  do fundo de escala, respectivamente. A temperatura afeta as células em 0,0018% do fundo de escala por cada °C. A sobrecarga de segurança das mesmas é de 150% da capacidade máxima. Todas as células foram montadas em uma base auto-ajustável modelo

TWA5 (OMEGA Engineering®), construído em aço carbono niquelado.

A capacidade de carga individual de cada modelo é de 909, 1.361 e 2.269 kg, respectivamente, para os modelos 2K, 3K e 5K. Portanto, as quatro células de carga apresentam capacidade de mensuração em conjunto com até 3.636, 5.444 kg e 9.076 kg, nos lisímetros 1, 2 e 3, respectivamente. As quatro células de carga de cada lisímetro foram conectadas em uma caixa de junção modelo JBOX4-ST (OMEGA Engineering®). Este instrumento aceita entradas de múltiplas células de carga e combina suas saídas em uma saída única que representa a carga total do sistema. Cada célula de carga foi instalada em cima de uma estaca de concreto armado, de base quadrada, nas dimensões de 0,3 m x 0,3 m e altura de 0,6 m, para os lisímetros 1 e 2 e 0,4 m x 0,4 m e altura de 0,65 m

para o lisímetro 3. Objetivando aumentar a área de apoio da caixa de fibra de vidro, foi instalada acima das células de carga uma chapa de aço carbono com as mesmas medidas da área das caixas, e espessura de 0,005 m. As paredes externas dos lisímetros foram construídas em concreto armado, no formato dos respectivos lisímetros, com espessura de 0,15 m.

Foi prevista uma distância de aproximadamente 0,05 m entre as paredes da caixa de fibra e a externa. Em cada poço de instalação dos lisímetros foi construído, na mesma estrutura da parede externa, um poço de visita para possíveis manutenções no lisímetro (Figuras 2 e 3).

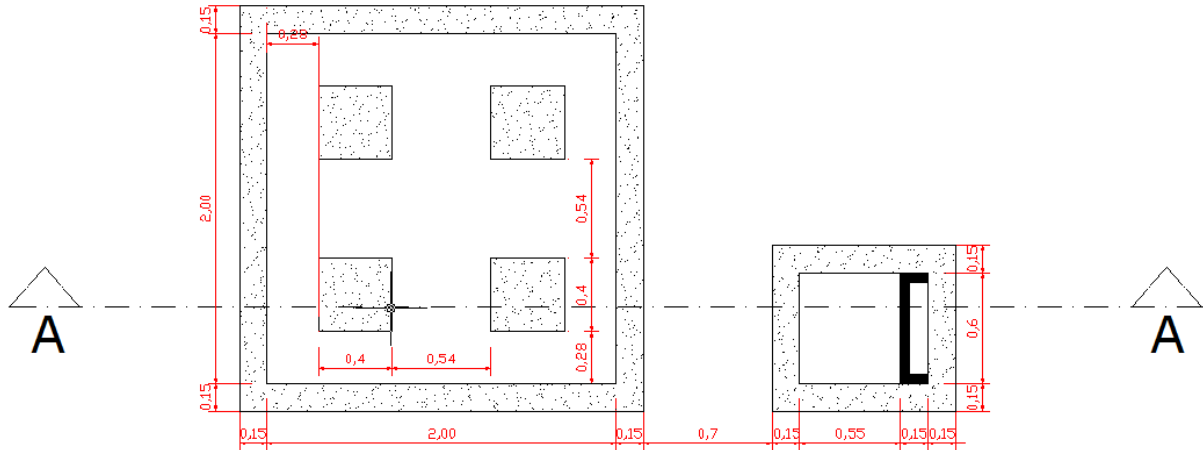


Figura 2. Planta baixa detalhando a estrutura de concreto do lisímetro 3.

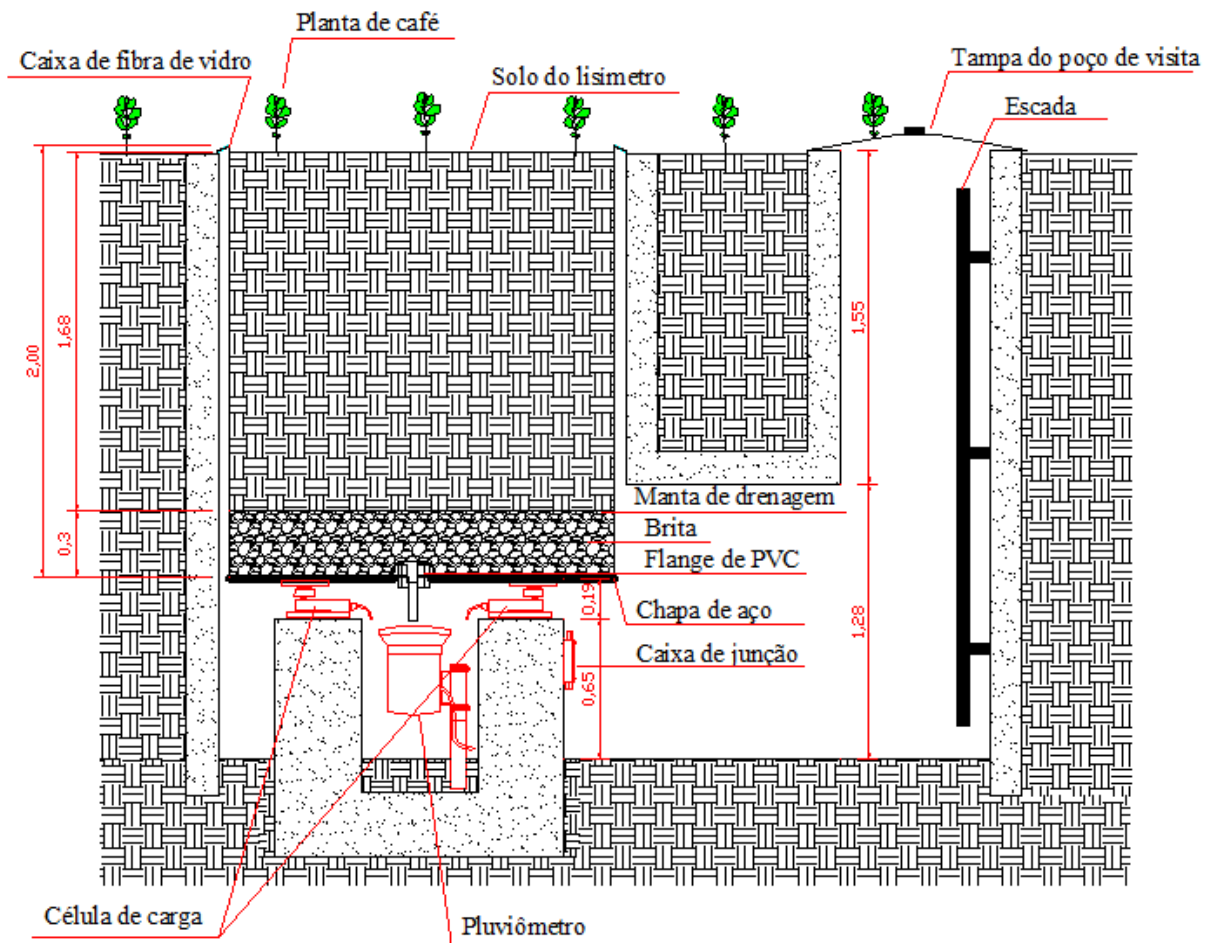


Figura 3. Corte AA detalhando a estrutura e a instrumentação utilizada no lisímetro 3.

Foi projetada uma distância de aproximadamente 0,05 m entre o nível do solo da

área experimental e a borda da parede externa e, 0,02 m entre esta e a borda da caçamba, impedindo

assim a entrada de água por escoamento superficial no poço de instalação. O nível do solo dentro da caixa de fibra está situado a 0,02 m abaixo da borda da mesma. Para minimizar o efeito da expansão das paredes internas dos lisímetros ocasionada pela pressão do solo no momento do enchimento, foram instaladas barras roscadas de ¼ de polegadas

travando as paredes. Nos lisímetros 1 e 2, foram instaladas somente uma barra no meio de cada lateral. No lisímetro 3, em função de sua maior largura, foram instaladas doze barras em cada lateral, espaçadas 0,6 m cada (Figura 4). As barras foram pintadas com tinta asfáltica no intuito de minimizar o efeito corrosivo.



**Figura 4.** Detalhe da instalação das barras roscadas de ¼ de polegadas nas paredes do lisímetro 3. Uberlândia, 25 de abril de 2013.

A escavação para instalação dos lisímetros foi feita manualmente, tendo-se o cuidado de separar as camadas de solo a cada 0,3 m até a profundidade explorável pelo sistema radicular das plantas contidas dentro dos lisímetros (0,6 m, 1,2 m e 1,7 m, respectivamente para o primeiro, segundo e terceiro equipamento). O solo retirado foi separado de acordo com a camada e coberto com lona plástica, afim de que no preenchimento do lisímetro tivesse uma maior proximidade com as condições naturais.

Para o sistema de drenagem nos lisímetros foi colocada uma camada de brita nº 1 de 0,1 m no fundo da caixa do lisímetro 1, 0,2 m no lisímetros 2 e 0,3 m do lisímetro 3. Acima da camada de brita foi colocada uma manta de drenagem de poliéster tipo “bidim”, para que evitasse a mistura entre solo e brita. A mesma manta foi instalada na borda do orifício de drenagem para evitar a saída da brita.

Para quantificar a água drenada pelo lisímetro foi usado um pluviômetro de báscula modelo TE525MM-L (Texas Electronics®), instalado abaixo de cada caixa de fibra de vidro. Este modelo possui uma chave magnética que é acionada quando a intensidade de precipitação atinge um determinado nível, provocando um fechamento temporário do orifício de entrada de água. Essa tecnologia diminui o erro nas leituras em altas intensidades de precipitação pluviométrica. Um tubo de PVC conduz a água drenada até o pluviômetro. O modelo utilizado possui precisão de

$\pm 1\%$  (até 10 mm h<sup>-1</sup>), de  $\pm 3\%$  (de 10 a 20 mm h<sup>-1</sup>) e de  $\pm 5\%$  (de 20 a 30 mm h<sup>-1</sup>). Como a relação entre as áreas dos lisímetros 1, 2 e 3 e do pluviômetro são de 1:29,7, 1:41,6 e 1:68,7, respectivamente, a relação entre as lâminas de água também será a mesma, ou seja, para cada 29,7 mm de água quantificada no pluviômetro, equivale afirmar que foi drenado 1 mm no lisímetro 1, e assim sucessivamente.

O preenchimento do lisímetro foi feito com o solo retirado na escavação. Após colocar a camada de brita e a manta de poliéster, foram colocadas as diversas camadas originais de solo, porém, em ordem inversa da retirada. Após colocar uma determinada camada, o solo recebeu uma leve compactação, objetivando aproximar a massa específica original do solo.

Os dados de massa dos lisímetros e da água drenada através dos mesmos foram armazenados em um datalogger modelo CR 1000 (Campbell Scientific®). A conexão entre o datalogger, as caixas de junção e os pluviômetros foi feita por cabos elétricos.

A calibração foi realizada no dia 21/03/2013, quando os lisímetros estavam preenchidos com solo, porém, sem as plantas de café. Inicialmente, foram elaboradas as massas padrão, ou seja, sacos de brita nº 1 com massa conhecida de 0,672, 1,344, 2,689, 6,722 e 13,44 kg para o lisímetro 1; 0,672, 1,344, 2,689, 9,180, 13,44 e 18,36 kg para o lisímetro 2 e 1,611, 3,222, 6,444,

16,11 e 32,22 kg para o lisímetro 3, correspondendo, respectivamente, a 0,5, 1, 2, 5 e 10 mm de equivalente de água para os lisímetros 1 e 3. Para o segundo equipamento equivale a 0,37, 0,73, 1,46, 5, 7,32 e 10 mm. Para os lisímetros 1, 2 e 3 implementou-se uma carga de 68,5 mm, 67,2 mm e 98,5 mm, respectivamente. As massas padrão foram pesadas em balança eletrônica digital com capacidade máxima de 30 kg, modelo ELPN 6/15/30 (Balmak®).

Nos lisímetros 1 e 3, a calibração consistiu da adição consecutiva das massas de 0,5, 1 e 2 mm. Após isso, adicionou-se, uma de cada vez, três cargas equivalentes a 5 mm de água cada uma e, em seguida, o restante das cargas equivalentes a 10 mm até atingir o total previsto para cada lisímetro. O lisímetro 2 difere dos demais porque foram adicionadas duas cargas individuais de 7,32 mm após as cargas de 5 mm. Em seguida, os sacos com brita foram retirados na mesma sequência da adição, até a descarga completa. Foram realizados três ciclos de carregamento e descarregamento em cada lisímetro. Assim, foram obtidos 66, 72 e 90 pares de pontos para confecção da curva de calibração (mV/V x mm), para os lisímetros 1, 2 e 3, respectivamente.

O datalogger foi ajustado para realizar a leitura das células de carga a cada segundo, e calcular a média durante quinze segundos. Este tempo é muito menor do que aquele adotado por Campeche (2002), contudo, em um pré-teste realizado com as células de carga, verificou-se que as mesmas apresentavam estabilidade na leitura cerca de dois segundos após a adição da massa. O lisímetro em processo de calibração teve sua superfície coberta com lona para evitar a evaporação da água do solo.

O desempenho dos lisímetros foi avaliado por meio do erro padrão, que é a dispersão dos valores de massa mensurados por cada equipamento, no carregamento e descarregamento, em relação aos valores de tensão emitidos pelas células de carga. Os coeficientes da equação de regressão linear geradas para cada lisímetro foram submetidas ao teste t de Student ao nível de 1% probabilidade. A precisão foi mensurada por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtida pela regressão linear em cada lisímetro.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

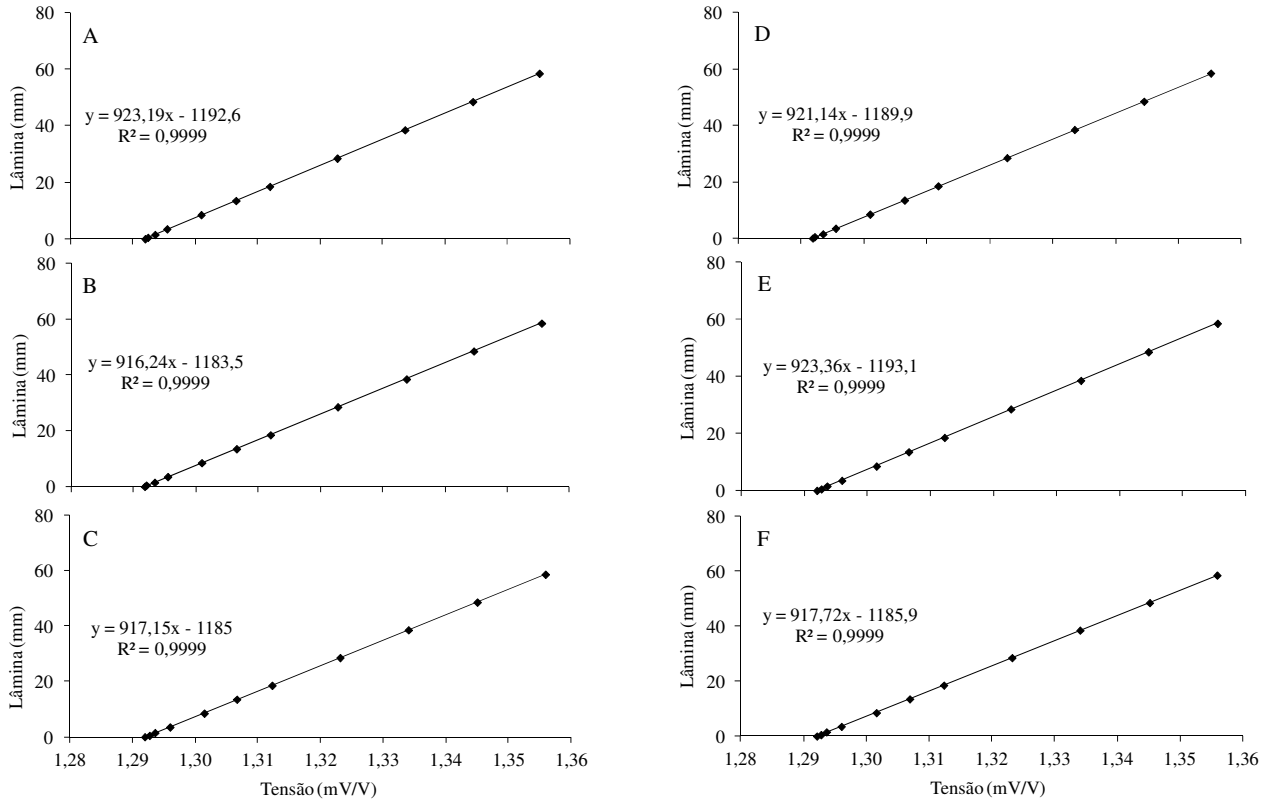
Os valores de saída (mV/V) emitidos pelas células de carga e o equivalente em água (mm)

adicionados ou retirados durante o processo de calibração dos lisímetros 1, 2 e 3, são exibidos nas Figuras 5, 6 e 7, respectivamente. O modelo linear descreveu adequadamente a relação, tendo em vista o alto coeficiente de determinação de 99,99%. Verificou-se, ainda, baixa dispersão entre os valores de potencial elétrico registrados pelo datalogger e as cargas aplicadas no lisímetro, com pequenos desvios e baixa histerese. Resultados semelhantes foram encontrados por Miranda et al. (1999), Campeche (2002) e Faria et al. (2006).

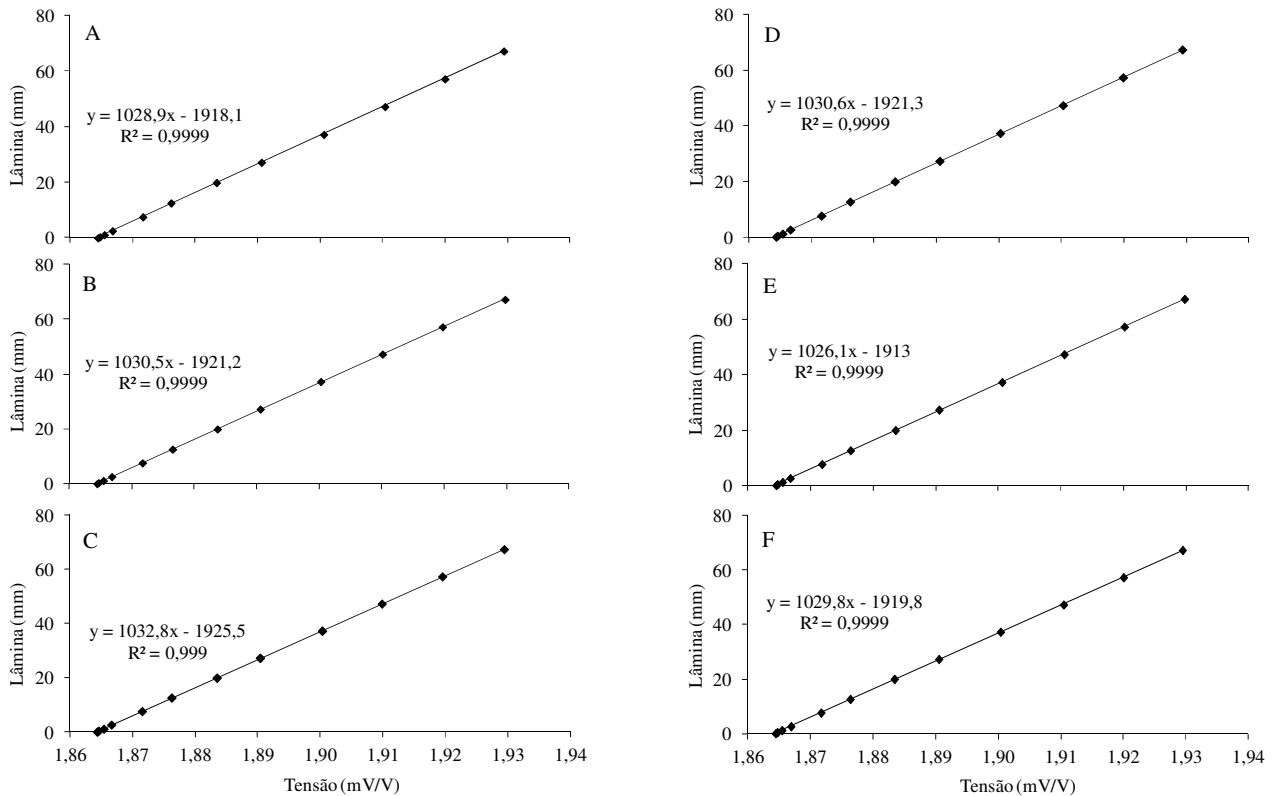
Após obter as equações de regressão para o processo de carregamento e descarregamento dos lisímetros, essas foram utilizadas, a partir dos dados de tensão de excitação das células de carga, para estimar os respectivos pares de lâmina de água. A partir disso, foi possível construir os modelos dispostos na Figura 8.

Na Figura 8A, que se refere ao lisímetro 1, verifica-se que a equação linear é adequada para estimar os valores de lâmina de água a partir dos dados de tensão fornecidos pelas células de carga, uma vez que o erro padrão da estimativa (0,2 mm) e o coeficiente de determinação (0,9999) atestam a eficiência dos estimadores da equação. Além disso, constatou-se também, significância estatística dos coeficientes da equação de regressão, ao nível de 1% de probabilidade.

Na Figura 8B é apresentada a equação de regressão e os parâmetros estatísticos da mesma, obtidos para o lisímetro 2. Analisando-a, nota-se que a precisão do modelo foi maior do que aquele obtido no lisímetro 1, uma vez que o erro padrão da estimativa (0,08 mm) foi menor. Por outro lado, no que se refere ao lisímetro 3 (Figura 8C), verificou-se uma menor precisão dentre os conjuntos avaliados. Apesar de apresentar um coeficiente de determinação alto (99,96%) e significância estatística dos coeficientes da equação de regressão, verificou-se um maior erro padrão da estimativa (0,66 mm) quando comparado com os demais lisímetros. Este erro pode estar associado ao pouco tempo disponibilizado para o intervalo entre os carregamentos e descarregamentos, o qual foi de quinze segundos. Alguns conjuntos podem apresentar maior dificuldade em estabilizar a leitura, devido à agitação provocada pela adição ou retirada das massas padrão, em um tempo muito curto. Faria et al. (2006) avaliando a calibração de um conjunto de dez lisímetros de pesagem com volume de 3,458 m<sup>3</sup> cada, verificaram erros absolutos variando de 0,0744 a 0,4229 mm.

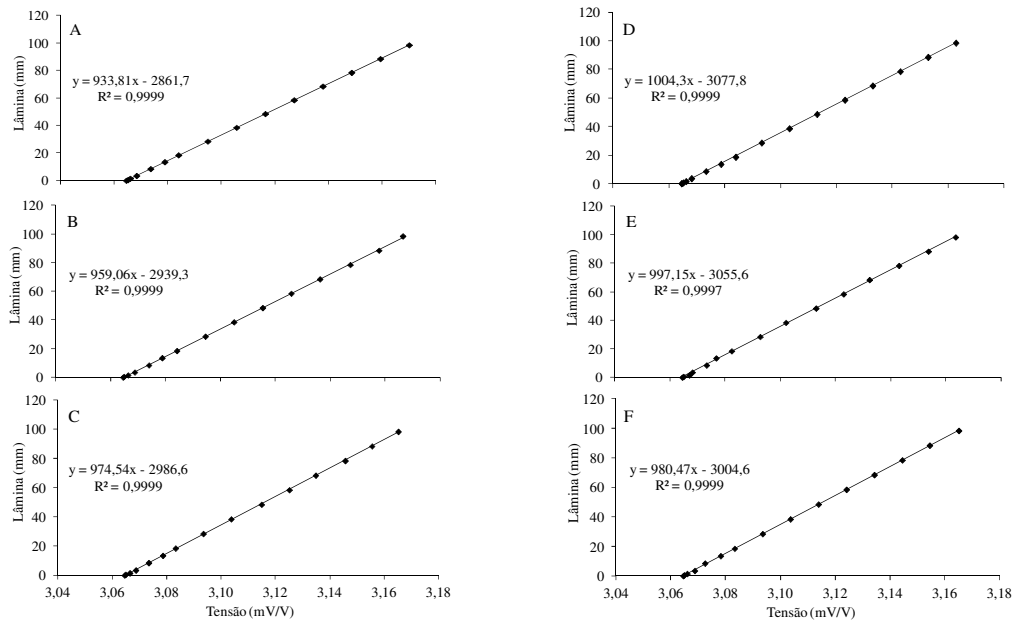


**Figura 5.** Relação entre a variação das lâminas de água (mm) e as leituras de tensão (mV/V) emitidas pelas células de carga durante a calibração do lisímetro 1. As letras A, B e C referem-se aos resultados do carregamento e D, E e F aos de descarregamento do lisímetro. Uberlândia, 18 de março de 2013.

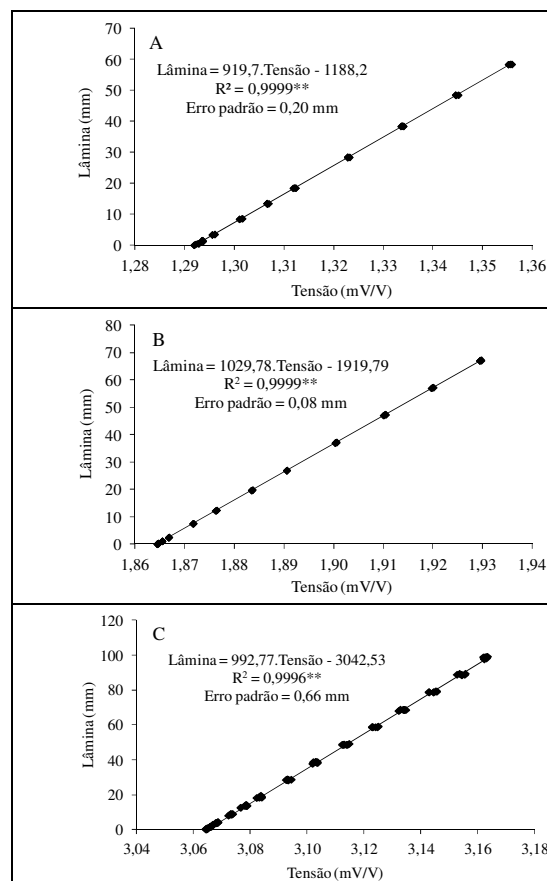


**Figura 6.** Relação entre a variação das lâminas de água (mm) e as leituras de tensão (mV/V) emitidas pelas células de carga durante a calibração do lisímetro 2. As letras A, B e C referem-se aos resultados do carregamento e D, E e F aos de descarregamento do lisímetro. Uberlândia, 18 de março de 2013.





**Figura 7.** Relação entre a variação das lâminas de água (mm) e as leituras de tensão (mV/V) emitidas pelas células de carga durante a calibração do lisímetro 3. As letras A, B e C referem-se aos resultados do carregamento e D, E e F aos de descarregamento do lisímetro. Uberlândia, 18 de março de 2013.

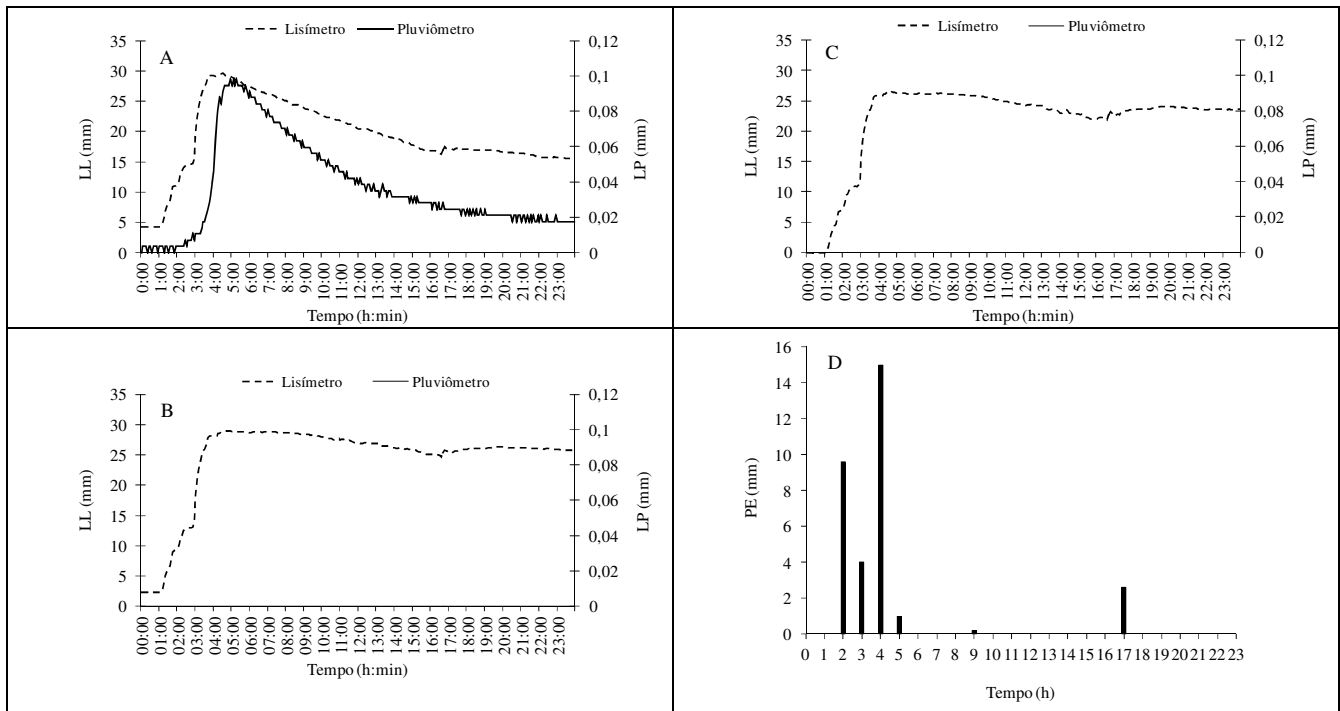


**Figura 8.** Equações de regressão linear e respectivos dados estatísticos. As letras A, B e C referem-se aos lisímetros 1, 2 e 3, respectivamente. Uberlândia, 18 de março de 2013.



Com o objetivo de avaliar o funcionamento dos lisímetros e, principalmente, do sistema de drenagem proposto neste trabalho, foram coletados no dia 23 de março de 2013 os dados mensurados

nos três equipamentos, bem como os dados de chuva medidos em uma estação meteorológica localizada nas proximidades dos mesmos (Figura 9).



**Figura 9.** Dados de lâmina de água mensurada nos lisímetros (LL) de drenagem quantificada no pluviômetro (LP) instalado em baixo do lisímetro e de chuva medida no pluviômetro da estação meteorológica (PE). Uberlândia, 23 de março de 2013.

Analisando as Figuras 9A, 9B e 9C, nota-se que todos os lisímetros apresentaram boa sensibilidade às variações de massa, o que pode ser provado pela mudança no sentido das curvas quando da ocorrência da precipitação (Figura 9D). Além disso, a partir dos dados coletados, verificou-se também, que a mudança de massa ocorre em intervalos de até 5 minutos, o que habilita o uso desses lisímetros para a maioria das aplicações de campo, conforme verificaram Campeche et al. (2011). Por outro lado, a alta sensibilidade do sistema pode prejudicar as leituras quando da ocorrência de vento, principalmente em intervalos menores do que 10 minutos, conforme citado por Howell et al. (1995), Pereira et al. (2002) e Faria et al. (1996).

No que diz respeito ao sistema de drenagem, verifica-se (Figura 9A) que o pluviômetro começa a registrar a drenagem do lisímetro 1 cerca de uma hora após a variação da massa do mesmo. Isso permite afirmar que o solo já se encontrava próximo da capacidade de campo, devido às chuvas do dia anterior. Além disso, nota-se também, que a lâmina coletada no pluviômetro começa a diminuir pouco

tempo depois do início do declínio da lâmina do lisímetro, mostrando que o aporte de água no solo terminou e, portanto, a drenagem tende a diminuir até que o solo atinja a capacidade de campo. Nesse sentido, pode-se verificar que o uso de pluviômetros no lugar dos tradicionais recipientes de armazenamento de água, se mostrou adequado, permitindo assim, uma maior automação do processo. No que diz respeito aos lisímetros 2 e 3 (Figura 9B e 9C), o pluviômetro instalado não quantificou a ocorrência de drenagem. Isso se deve porque o volume precipitado desde a data da calibração (21/03/2013), quando o solo estava com baixo teor de umidade, não foi suficiente para elevar o nível de água além do limite da capacidade de campo.

Diante do exposto, pode-se afirmar que a metodologia de construção, automação e montagem dos lisímetros de pesagem apresentadas neste estudo, podem ser empregadas com precisão para determinação da evapotranspiração da cultura de café, em todas as fases de seu desenvolvimento.

## CONCLUSÕES

A metodologia empregada na construção, montagem, automação e calibração dos lisímetros de pesagem apresentadas neste estudo, é tecnicamente adequada, obtendo-se coeficiente de determinação superior a 0,9996 na equação de calibração e erro padrão inferior a 0,66 mm.

A mudança de massa nos lisímetros pode ocorrer em intervalos de até 5 minutos, o que habilita o uso desses instrumentos para a maioria das aplicações de campo, envolvendo perdas de água do solo da planta.

O uso de pluviômetros de balsa no lugar dos tradicionais recipientes para armazenamento da

água drenada pelos lisímetros se mostrou adequado e confiável.

A metodologia de construção, automação e montagem dos lisímetros de pesagem apresentadas neste estudo, podem ser empregadas com precisão para determinação da evapotranspiração da cultura de café, em todas as fases de seu desenvolvimento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo apoio financeiro a esta pesquisa (Processo CAG - APQ-01484-09).

---

**ABSTRACT:** Knowledge of water demand in coffee is a key factor for the rational use of irrigation. Therefore, this study evaluated the construction, assembly, automation and calibration of weighing lysimeters to determine the water demand of coffee plantations. Three lysimeters were built with different formats and dimensions, with volume capacities of 0.941, 2.565 and 6.444 m<sup>3</sup>. The masses of the lysimeters were measured with four load cells per equipment. Drainage of the lysimeters was measured by tipping bucket rain gauges installed under each lysimeter. Readings of the load cells and of the tipping bucket gauges were automatically stored in a datalogger installed to 3 m the lysimeters. The external walls and the checking wells were made of concrete. The coffee seedlings planted in each equipment, as well as all others of plantations, were drip irrigated and ferti-irrigated. It can be concluded that the methodology used for construction, automation and calibration of the weighing lysimeters was technically adequate, with determination coefficient above 99.96% for the calibration equation and standard error below 0.66 mm. The use of tipping bucket gauges instead of the usual recipients for storage of drainage of water drained by the lysimeters was adequate and reliable. The use of glass fiber for the inner walls of the lysimeters instead of the steel sheets was a viable option.

**KEYWORDS:** Evapotranspiration. Load cell. Rain gauges. Lysimeter. Irrigation.

---

## REFERÊNCIAS

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

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O.; JENSEN, M. E. Environmental requirements of lysimeters. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 171-181.

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.). Piracicaba, 2002. 67p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

CAMPECHE, L. F. M. de S.; AGUIAR NETTO, A. O.; SOUZA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. de P. R. da.; AZEVEDO, P. V. de. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n. 5, p. 519-525, 2011.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. rev. amp. Brasília, DF. 2013. 353p.

FARIA, R. T. de; CAMPECHE, F. de S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 1, p. 237-242, 2006.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. de. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de cafeeiros em fase de formação. *Bragantia*, v. 68, n. 1, p. 269-278, 2009.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. de; PRETE, C. E. C. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production. *Agricultural Water Management*. v. 98, n. 5, p. 791-800, 2011.

HOWELL, A. T., SCHNEIDER, D. A., JENSEN, E. M. History of lysimeter design and use of evapotranspiration measurements. ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) *Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements*. New York: American Society of Civil Engineers, 1991, p. 1-9.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; DUSEK, D. A. et al. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeter. *Transaction of the ASAE*, v. 38, n. 4, p. 1019-1024, 1995.

CAVALCANTE Jr., E. G. C.; MEDEIROS, J. F. de; MELO, T. K. de; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; BRISTOT, G.; ALMEIDA, B. M. de. Necessidade hídrica da cultura do girassol irrigado na chapada do Apodi. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.3, p.261-267, 2013.

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

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

SCHNEIDER, A. D.; HOWELL, T. A.; MOUSTAFA, A. T. et al. A simplified weighing lysimeter for monolithic soil or reconstructed soils. *Transaction of the ASAE*, v. 14, n. 3, p. 267-273. 1998.

SANTOS, F. X. dos.; RODRIGUES, J. J. V.; MONTENEGRO, A. A. de A.; MOURA, R. F. de. Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo no Semi-Árido nordestino. *Engenharia Agrícola*, v. 28, n. 1, p. 115-124, 2008.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 4, n. 1, p. 1-12. 1996.

SOUZA, I. F.; NETTO, A. O. A.; CAMPECHE, L. F. M. de S.; BARROS, A. C.; SILVA, V. de P. R. da.; AZEVEDO, P. V. de. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte II: Consumo hídrico do coqueiro anão verde irrigado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 5, p. 526-532, 2011.