



REVISTA ELETRÔNICA
CIENTÍFICA DA UERGS

Avaliação de medidas coletadas de forma automatizada em um lisímetro de lençol freático constante

José Rafael Franco

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP).

E-mail: jose_rafael.franco@hotmail.com, <http://lattes.cnpq.br/2114436190981465>

Marcus Vinícius Contes Calça

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP).

E-mail: mcontes@outlook.com, <http://lattes.cnpq.br/8730342613991253>

Caroline Pires Cremasco

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP).

E-mail: caroline.cremasco@unesp.br, <http://lattes.cnpq.br/5339144730881561>

Matheus Rodrigues Raniero

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP).

E-mail: matheus.raniero@hotmail.com, <http://lattes.cnpq.br/1832241734518548>

Victor Crespo de Oliveira

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP).

E-mail: victor.crespo@unesp.br, <http://lattes.cnpq.br/7536594535140144>

Sérgio Augusto Rodrigues

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP).

E-mail: sergio.rodrigues@unesp.br, <http://lattes.cnpq.br/6872765214523974>

Giovana Stucchi

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP).

E-mail: giovana.stucchi@unesp.br, <http://lattes.cnpq.br/1932842964498595>

Alexandre Dal Pai

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP).

E-mail: dal.pai@unesp.br, <http://lattes.cnpq.br/9708248454957558>

ISSN 2448-0479. Submetido em: 08 abr. 2024. Aceito: 13 nov. 2024.

DOI: <http://dx.doi.org/10.21674/2448-0479.101.44-56>

Resumo

O lisímetro de lençol freático constante é um dos métodos de instrumentação agrometeorológica capaz de obter a evapotranspiração de uma determinada localidade. O objetivo deste estudo foi realizar a avaliação das medidas de evapotranspiração registradas em um lisímetro de lençol freático constante automatizado por Pellison et al (2023), em relação às medidas de um lisímetro de pesagem construído por Gomes Junior, Dal Pai e Dal Pai (2019) na mesma área experimental, e de valores de evapotranspiração estimados pelo modelo de Penman-Monteith (PM-FAO56). O experimento foi realizado na Estação de Lisimetria do Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) - Botucatu (SP) - Brasil. Foram utilizados dados diários de evapotranspiração medidos pelos lisímetros de lençol freático constante e de pesagem e estimados pelo modelo de Penman-Monteith a partir de medidas meteorológicas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e vento), no período 21/06/2015 a 22/09/2015. Para realizar a avaliação e análise estatística foram calculados o coeficiente de correlação linear de Pearson (r), índice de concordância de Wilmott (d), erro quadrático médio (MSE) e raiz do erro quadrático médio



(RMSE). Foi aplicado, também, o teste de Kruskal-Wallis complementado pelo teste de Dunn. O método automatizado para coleta de medidas de evapotranspiração criado por Pelisson (2023) não apresentou diferença significativa comparado ao lisímetro de pesagem, o que o valida como um método de obtenção de medidas de evapotranspiração de baixo custo, porém apresentou diferença ao ser comparado aos valores obtidos pelo método de PM-FAO56.

Palavras-chave: Comparação de medidas; lisimetria; microcontrolador Arduino.

Abstract

Evaluation of measurements collected automatized in a constant water table lysimeter

The constant water table lysimeter is one of the agrometeorological instrumentation methods capable of obtaining the evapotranspiration of a given location. The aim of this study was to evaluate the evapotranspiration measurements recorded in a constant water table lysimeter automated by Pellison (2023), in relation to the measurements of a weighing lysimeter built by Gomes Junior, Dal Pai, Dal Pai (2019) in the same experimental area and evapotranspiration values estimated by the Penman-Monteith model (PM-FAO56). The experiment was carried out at the Lysimetry Station of the Bioprocesses and Biotechnology Department of the Faculty of Agronomic Sciences (UNESP) - Botucatu (SP) - Brazil. Daily evapotranspiration data measured by constant water table and weighing lysimeters and estimated by the Penman-Monteith model based on meteorological measurements (air temperature, relative humidity, solar radiation and wind) were used from June 21 to September 22, 2015. Pearson's linear correlation coefficient (r), Wilmott's concordance index (d), mean square error (MSE) and root mean square error (RMSE) were calculated for statistical evaluation and analysis. The Kruskal-Wallis test was also applied, complemented by the Dunn test. The automated method for collecting evapotranspiration measurements created by Pelisson (2023) showed no significant difference compared to the weighing lysimeter, which validates it as a low-cost method of obtaining evapotranspiration measurements, but it did show a difference when compared to the values obtained by the PM-FAO56 method.

Keywords: Comparison of measurements; lysimetry; Arduino microcontroller.

Resumen

Evaluación de mediciones recolectadas de forma automatizada en un lisímetro de nivel freático constante

El lisímetro de nivel freático constante es uno de los métodos de instrumentación agrometeorológica capaz de obtener la evapotranspiración de una determinada localidad. El objetivo de este estudio fue evaluar las mediciones de evapotranspiración registradas en un lisímetro de nivel freático constante automatizado por Pellison (2023), en comparación con las mediciones de un lisímetro de pesaje construido por Gomes Junior, Dal Pai y Dal Pai (2019) en la misma área experimental, y con los valores de evapotranspiración estimados por el modelo Penman-Monteith (PM-FAO56). El experimento se realizó en la Estación de Lisimetría del Departamento de Bioprosesos y Biotecnología de la Facultad de Ciencias Agronómicas (UNESP) - Botucatu (SP) - Brasil. Se utilizaron datos diarios de evapotranspiración medidos por lisímetros de nivel freático constante y de pesaje, y estimados por el modelo Penman-Monteith a partir de mediciones meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y viento) desde el 21/06/2015 hasta el 22/09/2015. Para la evaluación y el análisis estadístico, se calcularon el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r), el índice de concordancia de Wilmott (d), el error cuadrático medio (MSE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). También se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, complementada por la prueba de Dunn. El método automatizado de recolección de mediciones de evapotranspiración creado por Pelisson (2023) no mostró diferencias significativas en comparación con el lisímetro de pesaje, lo que lo valida como método de bajo coste para la obtención de medidas de evapotranspiración, aunque mostró diferencias en comparación con los valores obtenidos por el método PM-FAO56.

Palabras clave: Comparación de mediciones; lisimetría; microcontrolador Arduino.



Introdução

A evapotranspiração desempenha um papel crucial no ciclo hidrológico, sendo influenciada pelos diversos elementos do clima (TR; REDDY; ACHARYA, 2023). Sua significativa contribuição na regulação do clima local e global resulta na presença de água na atmosfera (ZHAO *et al.*, 2022). Torna-se importante destacar também que, a evapotranspiração é um parâmetro de extrema relevância na gestão hídrica e de cultivos agrícolas, especialmente em regiões sujeitas a escassez de água, de modo que, compreender a dinâmica dos ecossistemas terrestres é essencial para um controle sustentável dos recursos hídricos e o manejo adequado da irrigação (ALLEN *et al.*, 1998, RONG, *et al.*, 2023). Neste contexto, a lisimetria é considerada o método mais preciso para a medição da evapotranspiração (SANTOS *et al.*, 2016; NOLZ; CEPUDER, P; EITZINGER, 2016).

A lisimetria é uma metodologia de relevância na análise da dinâmica do solo e da água em ecossistemas terrestres, assumindo um papel significativo na medição da evapotranspiração e lixiviação de nutrientes no solo. Por meio dessa técnica, é possível estudar processos hidrológicos e biogeoquímicos em escala de campo (MEISSNER; RUPP; SEYFARTH, 2014), sendo o lisímetro de lençol freático constante um dos métodos mais amplamente empregados. A implementação de um projeto de lisimetria requer a instalação de recipientes ou tanques no solo, possibilitando a coleta da água lixiviada ou evaporada e a medição da quantidade de água e nutrientes perdidos pelo sistema solo-água-plantas-atmosfera (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006; NOLZ *et al.*, 2016).

O lisímetro de lençol freático constante é um instrumento utilizado para medir a evapotranspiração e o fluxo de água subterrânea em solos saturados. Sua montagem envolve a construção de uma caixa d'água enterrada no solo, na qual as camadas originais do solo do local são reconstruídas. Essa caixa d'água deve possuir uma camada impermeável no fundo, permitindo a medição do fluxo de água subterrânea e da evapotranspiração da vegetação presente acima do solo. Por meio dessa técnica, é possível quantificar tanto a evapotranspiração como o fluxo de água subterrânea em áreas úmidas e pantanosas (MATERÁN *et al.*, 2009; DHUNGEL *et al.*, 2023).

Uma das dificuldades associadas a operação do lisímetro de lençol freático constante é a sua alta demanda por mão de obra especializada, principalmente durante a fase de calibração do instrumento, durante a sua construção, além de exigir um monitoramento diário das medições. Diante disso, o modelo de estimativa da evapotranspiração, proposto por Penman-Monteith (GOMES JUNIOR; DAL PAI; DAL PAI, 2019) parametrizado para uma cultura hipotética (PM-FAO56), recomendado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, é amplamente utilizado para a obtenção da evapotranspiração com base em dados meteorológicos (ALLEN *et al.*, 1998), mais fáceis de serem obtidos.

No estudo conduzido por Pellison *et al.* (2023) foi criado um sistema para automatizar o processo de coleta de medidas de evapotranspiração de forma automática a partir de eletrônica embarcada. O estudo foi realizado na estação de lisimetria (786 m, 22°51'S e 48°26'W), localizada no Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) - Botucatu (SP) - Brasil, no ano de 2015. Durante o período de execução do experimento, foram coletados dados de evapotranspiração a partir do lisímetro de lençol freático constante, de um lisímetro de pesagem valores estimados por PM-FAO56, simultaneamente no mesmo período e local.

Devido a existência de vários métodos para obter a evapotranspiração podendo ser realizada por instrumentação (lisímetro) ou pela estimativa utilizando variáveis agrometeorológicas. Muitos autores realizaram a comparação entre os métodos de obtenção da evapotranspiração com objetivo de identificar qual o método que melhor se adapta a uma determinada região (LEE; NAJIM; AMINUL, 2004; FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006; MATERÁN *et al.* 2009; VELLAME *et al.* 2012; SCHMIDT *et al.* 2013; CARVALHO *et al.* 2013; MEISSNER; RUPP; SEYFARTH, 2014; NOLZ; CEPUDER; EITZINGER, 2016; SOUZA; EICHENBERGER; NASCIMENTO, 2019; FRANCA *et al.*, 2021; T R; REDDY; ACHARYA, 2023).

Devido a complexidade de operação e construção de um lisímetro em grande escala o objetivo deste estudo foi realizar a avaliação das medidas de evapotranspiração obtidas a partir do sistema eletrônico embarcado desenvolvido por Pellison *et al.* (2023), verificando sua precisão e conformidade com as medidas obtidas por um lisímetro de pesagem construído por Gomes Junior, Dal Pai e Dal Pai (2019) na mesma área experimental e com valores estimados pelo método de PM-FAO56 utilizando dados meteorológicos para estimativa da evapotranspiração. Para realizar a precisão e conformidade das medições, uma análise estatística das

medidas foi executada a partir do coeficiente de correlação linear de Pearson (r), do índice de concordância de Wilmott (d), do erro quadrático médio (MSE) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE). Foi aplicado, também, o teste de Kruskal-Wallis complementado pelo teste de Dunn.

Material e Métodos

Localização e Clima

O estudo foi conduzido na Estação de Lisimetria (786 m, 22°51'S e 48°26'W), localizada no Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia, da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Botucatu (SP) - Brasil. O local é totalmente coberto com grama Batatais (*Paspalum notatum*), mantida a uma altura de 10 cm, possuindo área retangular de 15,6 m x 25,6 m, totalizando uma área de 399,36 m², conforme recomenda o relatório 56 da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. O terreno possui uma declividade de 2%, com o solo identificado como Latossolo Vermelho Distroférrico.

A Estação de Lisimetria está localizada em Botucatu, município situado na região Centro-Sul do Estado de São Paulo, Brasil. Utilizando os critérios estabelecidos por Köppen o clima de Botucatu é classificado como CWA, mesotérmico (subtropical e temperado) o período de mais volume de chuva ocorre no verão com maior temperatura, o período de seca e frio ocorre no inverno (SMAABC, 2002; ROSSI *et al.*, 2018).

Análise física e química do solo

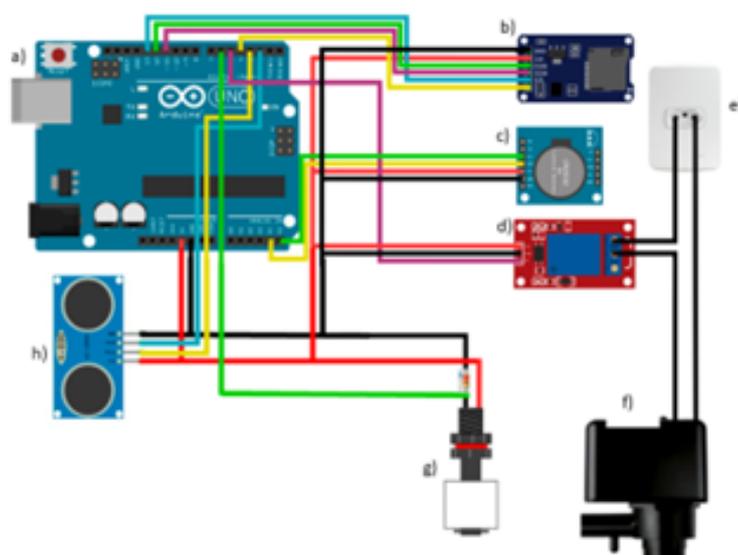
Foram realizadas algumas amostragens de solo, inicialmente, para obter informações sobre seus parâmetros físicos, os quais são essenciais para avaliar o comportamento da água em relação ao estado hídrico ideal para o desenvolvimento da cultura. Além disso, com o conhecimento desses parâmetros, tornou-se possível comparar a variação de seus valores após a recomposição do perfil do solo.

Foram coletadas amostras indeformadas em anéis de Kopeck, em triplicata, de diferentes profundidades do perfil do solo (0 – 0,15 m; 0,15 – 0,30 m; 0,30 – 0,45 m) para determinar a densidade e a umidade volumétrica (inicialmente de saturação e capacidade de campo) do solo na área de estudo. Além disso, amostras de solo foram coletadas e submetidas à secagem ao ar (terra fina seca ao ar – T.F.S.A). Essas amostras de terra fina seca ao ar foram usadas para determinar a análise granulométrica e/ou a textura do solo, sendo coletadas do perfil inicial do solo. Para a análise da densidade das partículas, amostras representativas também foram retiradas das profundidades de 0 – 0,15 m; 0,15 – 0,30 m; 0,30 – 0,45 m, permitindo o cálculo da porosidade total do solo e sua variação ao longo do perfil.

Lisímetro de Lençol Freático Constante

O sistema eletrônico de aquisição de dados e drenagem do lisímetro de lençol freático constante (LLFC) foi produzido com base na plataforma de hardware livre Arduino Uno (Figura 1a), a partir de vários componentes de baixo custo, tais como o módulo SD Card (Figura 1b), que permitiu o armazenamento dos dados em um cartão de memória, o módulo RTC (Figura 1c), que foi responsável por identificar a data e horas das medições captadas, e o módulo relé (Figura 1d), que acionava a bomba d'água de drenagem quando era necessário (Figura 2f), conectada a uma tomada de eletricidade (Figura 1e). Para monitorar o volume de água no tanque intermediário do LLFC utilizou-se um sensor de nível (Figura 1g), e por fim, um sensor ultrassônico de distância (Figura 1h) foi utilizado para identificar o volume de água no tanque superior, onde as medições da evapotranspiração foram realizadas.

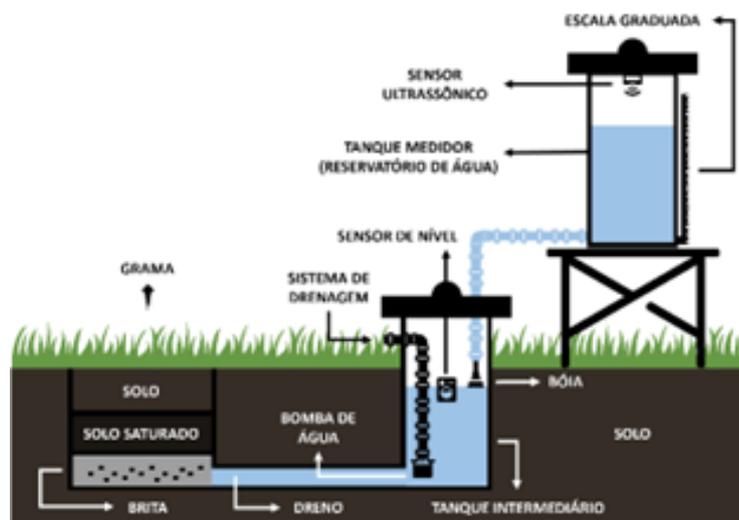
Figura 1 — Esquema de componentes eletrônicos para automatização do LLFC utilizando a plataforma Arduino.



Fonte: Autores (2024)

O LLFC construído (Figura 2) é composto por um tanque superior de 0,70 m de altura e 0,31 m de largura, cujo nível de água é medido pelo sensor ultrassônico, de modo que o valor obtido é utilizado posteriormente no cálculo da evapotranspiração. O tanque superior está diretamente conectado a um tanque intermediário com as mesmas dimensões, responsável pela drenagem da água para o lençol freático. O lençol freático, por sua vez, abastece uma caixa d'água de polietileno com capacidade de 500 litros, que possui 0,58 m de altura, 1,22 m de diâmetro superior e 0,95 m de diâmetro inferior. Essa caixa d'água é o local onde ocorre o processo de evapotranspiração.

Figura 2 — Representação do lisímetro de lençol freático constante (LLFC) com o sistema eletrônico de baixo custo baseado no microcontrolador Arduino.



Fonte: Autores (2024)

A construção e montagem do LLFC foi realizada manualmente, iniciando com a escavação, que permitiu a inserção do tanque intermediário e da caixa d'água de polietileno. No interior da caixa d'água foi colocada uma camada de brita, coberta com manta, e repostos o solo e a grama originais, que haviam sido removidos para a escavação do local. A evapotranspiração (E_{To}), neste caso, foi determinada pela medida da altura do nível da água, realizada pelo sensor ultrassônico. Considerando que a única perda de água é por evapotranspiração e as dimensões do tanque superior e caixa d'água de polietileno, a E_{To} foi calculada em mm pela seguinte expressão:

$$ET_o = (H1 - H2) \frac{A1}{A2} \quad (1)$$

Onde: H1 = leitura atual (mm); H2 = leitura anterior (mm); A1 = área do tanque superior (m²); e A2 = área do tanque de água de polietileno (m²).

Lisímetro de Pesagem

A evapotranspiração também pode ser determinada utilizando um lisímetro de pesagem (LP), que se baseia na variação de um bloco de solo, seja ele nu ou cultivado, pela diferença entre o volume de água que entra ou sai do sistema. As medições realizadas pelo lisímetro de pesagem são consideradas de referência, uma vez que são diretamente relacionadas a uma cultura específica (SOUZA *et al.*, 2011). No estudo de lisimetria, a precipitação representa uma forma de entrada de água no lisímetro, enquanto a evapotranspiração é uma forma de saída da água. No LP, a entrada ou saída de água afeta diretamente o peso da estrutura (massa), permitindo, assim, a identificação do volume de água que foi evaporado pelo solo ou transpirado pela planta. A variação da massa é medida por células de carga e os dados são registrados em um dataloggers (SCHMIDT *et al.*, 2013). Portanto, ao contrário dos métodos convencionais, que registram apenas uma medida diária a partir da anotação de um observador, o uso de instrumentos eletrônicos permite obter uma maior quantidade de registros da evapotranspiração nas partições temporais horárias e diárias (SCHMIDT *et al.*, 2013; SOUSA *et al.*, 2011).

Nesse cenário, o LP utilizado neste estudo, para obter a evapotranspiração (ET_o), usada como medida de referência para a avaliação das medições obtidas pela automação do LLFC, está situado também na Estação de Lisimetria. O LP possui uma base projetada com 3 células de carga que realizam a constante pesagem da estrutura. Essas células de carga foram estrategicamente posicionadas nesses 3 pontos, no sentido de garantir a distribuição uniforme do peso. Portanto, a medida da evapotranspiração neste instrumento é determinada pela variação do peso.

Método de Penman-Monteith (PM-FAO56)

As medidas meteorológicas utilizadas para estimar a evapotranspiração pelo método de PM-FAO56 foram fornecidas pela Estação Meteorológica Lageado da Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) - Botucatu (SP) - Brasil, localizada na latitude 22°51'S, longitude 48°26'O e a uma altitude de 786 metros. Foram utilizadas, portanto, medidas diárias de temperatura média, máxima e mínima do ar, registradas por um termohigrômetro HC2S3 da *Campbell Scientific*, de irradiação solar de ondas curtas, obtidas por um piranômetro CMP3 da *Kipp & Zonen* e de velocidade do vento a 2 metros de altura, captadas por um sensor *MetOne 034B Windset* da *Campbell Scientific*.

O método de PM-FAO56, recomendado no relatório 56 da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (ALLEN *et al.*, 1998), é considerado o mais adequado para obter dados de evapotranspiração, especialmente em situações em que não se tem instrumentos de medição disponíveis. O método utiliza medidas meteorológicas locais que se fundamentam em princípios físicos, levando em conta todos os fatores climáticos que influenciam a evapotranspiração (SCHMIDT *et al.*, 2013). Nesse contexto, a evapotranspiração de referência (ET_o), obtida por meio do método de estimativa de PM-FAO56 e utilizada para comparar com as medições captadas pelo LLFC, pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

Onde: ET_o = evapotranspiração de referência (mm.d⁻¹); R_n = radiação líquida total diária (MJ.m⁻².d⁻¹); G = fluxo de calor no solo (MJ/m².d⁻¹); T = média diária da temperatura do ar a 2m de altura (°C); u₂ = velocidade do vento a 2 m de altura (m/s⁻¹); e_s = pressão de saturação de vapor (kPa); e_a = pressão de vapor atual (kPa); Δ = inclinação da curva de pressão de vapor versus temperatura (kPa °C⁻¹); γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

Métricas de comparação dos dados

Neste estudo, as medidas de evapotranspiração obtidas pela automação do LLFC foram comparadas com as obtidas pelo LP e com os valores estimados pelo método PM-FAO56, utilizando indicadores estatísticos como o coeficiente de correlação linear de Pearson (r), obtido pela Equação 3, índice de concordância de Wilmott (Willmott *et al.*, 1985) (d), obtido pela Equação 4, índice de concordância modificado de Wilmott (Willmott, 1981) (md), obtido pela Equação 5. O Erro Quadrático Médio (MSE), obtido pela Equação 6, e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), obtido pela Equação 7, também foram calculados. Esses indicadores estatísticos fornecem uma visão abrangente da concordância e proximidade dos resultados entre os diferentes métodos de obtenção da evapotranspiração.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \bar{Y}') (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \bar{Y}')^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Y'_i - \bar{Y}'| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \quad (4)$$

$$md = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^j}{\sum_{i=1}^n (|Y'_i - \bar{Y}'| + |Y_i - \bar{Y}|)^j} \quad (5)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n} \quad (6)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Sendo: Y'_i apresentando os valores estimados pelo método de LLFC, Y_i representando os valores de referência (obtidos pelo LP ou PM-FAO56), \bar{Y}' é a média dos valores estimados pelo LLFC e \bar{Y} a média dos valores de referência (WILLMOTT, 1981; WILLMOTT *et al.*, 1985; RINCÓN *et al.*, 2018; RANIERO *et al.*, 2020).

O teste de comparações múltiplas não paramétrico de Kruskal-Wallis foi aplicado com intuito de testar se os três métodos de obtenção dos valores de evapotranspiração apresentam distribuição estatisticamente diferentes, o qual foi complementado com o teste não paramétrico de comparações múltiplas de Dunn.

Resultados e Discussão

Análise do solo

Na tabela I são apresentados os dados relativos à análise granulométrica do solo. É importante ressaltar que a análise granulométrica foi feita somente para o perfil inicial do solo. A densidade das partículas também será apresentada nesta tabela:

Tabela 1 - Análise granulométrica e densidade da partícula (ρ_P) do solo do local de estudo.

Profundidade	Areia	Argila	Silte	Umidade	* ρ_P
Z (m)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)
0 – 0,15	46,9	36,0	17,1	17	2,72
0,15 – 0,30	---	---	---	17	2,74
0,30 – 0,45	---	---	---	16	2,70

* Densidade das partículas feita pelo método do balão volumétrico;

Fonte: GOMES JUNIOR; DAL PAI; DAL PAI (2019).

De acordo com o triângulo textural de solos (FREIRE, 2006), o solo analisado tem uma composição de 46,9% de areia, 36% de argila e 17,1% de silte, classificando-o como Latossolo Franco Argilo-Arenoso (textura média). A Tabela 2 mostra as médias dos valores das umidades volumétricas (capacidade de campo e ponto de murcha permanente), densidade, porosidade total (em função da umidade de saturação) e o intervalo hídrico da umidade do solo.

Tabela 2 - Valores médios das umidades volumétricas (θ_{CC} ; θ_{PMP}), densidade (ρ_s), porosidade total (α) e intervalo hídrico da umidade do solo

Profundidade	θ_{CC}	θ_{PMP}	ρ_s	α	Intervalo hídrico $\theta_{CC} \rightarrow \theta_{PMP}$
Z (m)	(%)	(%)	(g/cm ³)	(%)	CC \rightarrow PMP
0 – 0,15	40	18	1,05	47	22
0,15 – 0,30	36	17	1,11	44	18
0,30 – 0,45	30	16	1,53	32	14
Média	35	17	1,23	41	18

Fonte: GOMES JUNIOR; DAL PAI; DAL PAI (2019).

Os valores de densidade do solo variaram de 1,05 g/cm³ a 1,53 g/cm³, com uma média de 1,23 g/cm³, considerada adequada para solos de textura média. Solos argilosos geralmente variam de 1,00 g/cm³ a 1,25 g/cm³, enquanto solos arenosos variam de 1,25 g/cm³ a 1,40 g/cm³. A menor densidade (1,05 g/cm³) na camada de 0 a 0,15 m deve-se à maior porosidade e à presença do sistema radicular. Na camada de 0,15 m a 0,30 m, a densidade média é de 1,11 g/cm³, refletindo uma estrutura mais frágil. A camada de 0,30 m a 0,45 m apresenta a maior densidade (1,53 g/cm³) e uma estrutura laminar compactada. A porosidade total variou de 32% a 47%, com média de 41%, típica de solos de textura média. O intervalo hídrico variou de 14% nas camadas mais profundas a 22% nas camadas superficiais. A redução da umidade volumétrica e da porosidade total nas camadas mais profundas indica uma boa amostragem, com maior densidade e menor disponibilidade de água devido à compactação.

Análise dos dados de evapotranspiração

Para realizar a avaliação das medidas da automação do LLFC, foi utilizado o período de 21/06/2015 a 22/09/2015, que corresponde aos meses de inverno no local do estudo, não utilizando os dias em que ocorreram precipitação, no inverno é a estação onde os dados dos lisímetros são validados, pois é a época do ano com menor volume de chuva, quando ocorre a precipitação existe dificuldade em se registrar medidas dos lisímetros. Em contrapartida é o momento mais importante de se identificar o volume da evapotranspiração para realizar o manejo de irrigação (época do ano com maior consumo de água na agricultura).

Na Tabela 3 são apresentados os índices usados para ajudar na tomada de decisão, com relação à concordância entre os valores obtidos de ETo, por meio do método de estimativa e medida mensurada em campo. O LLFC foi comparado com o LP e com o método de estimativa de PM usando dados meteorológicos. A comparação dos dados do LLFC com os (LP e PM) apresentaram uma correlação (r) moderada. A compara-



ção entre medidas do LLFC com registros do LP apresentou melhor concordância nos indicadores de Willmott e mdWillmott modificado. Também ao comparar com as medidas do lisímetro de pesagem os menores erros (MSE e RMSE) foram observados.

Tabela 3 - Métricas de comparação dos dados determinados pelo lisímetro de lençol freático constante (LLFC), lisímetro de pesagem (LP) e estimados pelo método de Penman-Monteith (PM)

Métricas de comparação	LLFC x PM	LLFC x LP
r	0,52	0,61
d	0,58	0,77
md	0,40	0,63
MSE	2,19	0,84
RMSE	1,48	0,92

Legenda: r = coeficiente de correlação linear de Pearson; d = índice de concordância de Willmott; md = índice de concordância modificado de Willmott; MSE = erro quadrático médio; RMSE = raiz do erro quadrático médio.

Na Tabela 4 encontram-se as medidas descritivas, média, desvio padrão, mediana, mínimo, máximo e o resultados do teste de comparação dos valores de evapotranspiração obtidos por cada método, indicados por letras maiúsculas próximo ao valor da mediana.

Tabela 4 - Métricas de comparação dos dados determinados pelo lisímetro de lençol freático constante (LLFC), lisímetro de pesagem (LP) e estimados pelo método de Penman-Monteith (PM)

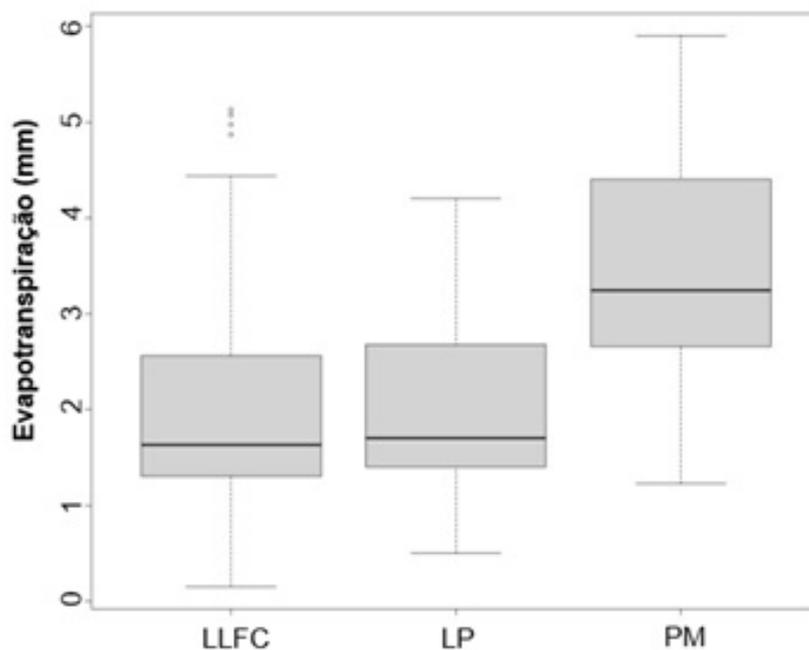
Método De medida	Média (DP)	Mediana [MIN-MAX]
LLFC	2,05 (1,13)	1,63 ^A [0,16-5,13]
LP	2,11 (0,50)	1,70 ^A [0,50-4,20]
PM	3,14 (0,87)	2,98 ^B [0,50-4,67]

Legenda: DP = desvio padrão; Min = valor mínimo; Max = valor máximo. Dois métodos com letras distintas indicam diferenças significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Kruskal Wallis complementada pelo teste de Dunn..

A média e a mediana do LP e do LLFC apresentam valores próximos. O método de PM apresenta maiores valores em relação à média, mediana, mínima e máxima em comparação as medidas obtidas pelo LP e LLFC. A menor e a maior medida de evapotranspiração foram realizadas pelo LLFC, 0,16 mm e 5,13 mm, respectivamente.

O LLFC apresentou a melhor concordância com o LP considerado como método de referência para se obter a evapotranspiração neste estudo. Por meio do gráfico de boxplot, representado pela Figura 3, é possível analisar detalhadamente os dados. Onde, percebe-se que as distribuições das medidas do LLFC se assemelham com as do LP (letras iguais na Tabela 4, indicando que não é possível afirmar que há diferenças significativas na distribuição dos valores entre estes métodos). Por outro lado, a distribuição dos dados de PM apresentou um maior valor mediano e, estatisticamente diferente dos métodos de LLFC e LP (indicado pela letra diferente na Tabela 4).

Figura 3 — Box-Plot da evapotranspiração mensurada pelo lisímetro de lençol freático constante (LLFC), lisímetro de pesagem (LP) e estimada pelo método de Penman-Monteith (PM).



Segundo Carvalho *et al.* (2013) os lisímetros de pesagem são os mais precisos para mensurar a evapotranspiração em períodos inferiores a um dia. Esses instrumentos são ideais para o ajuste de equações ou calibração de instrumentos utilizados para a estimativa da evapotranspiração. Neste sentido, provavelmente não há diferença significativa entre o LLFC e o LP, pois o chanfro dos intervalos de confiança da mediana coincidem. Porém, aparentemente, a evapotranspiração obtida pelo LLFC em relação aos valores encontrados a partir da equação de PM-FAO56, se mostram diferentes.

A questão do LLFC e do LP não apresentarem diferença significativa está no fato dos dois serem instrumentos agrometeorológicos que mensuram a evapotranspiração diretamente, possuindo uma cultura em seus centros e medindo o volume de água transpirado pela planta ou evaporado pelo solo. Já o método de PM realiza a estimativa da evapotranspiração com base nos elementos do clima (temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e vento), o que o caracteriza um método indireto de obtenção desse parâmetro agrometeorológico.

Em um estudo realizado por Vellame *et al.* (2012) foram também comparadas medidas de um LLFC e de um LP. Porém, no caso citado, foram construídos dois lisímetros de pesagem e dois lisímetros de lençol freático constante, utilizando vasos em cultura de laranja em ambiente protegido. Neste caso, os dois lisímetros de lençol freático constante apresentaram boa concordância nas medidas de evapotranspiração em relação aos lisímetros de pesagem, em escala diária, como neste estudo.

Considerações finais

Neste estudo, foi avaliada a precisão e a conformidade das medidas de evapotranspiração obtidas por um lisímetro de lençol freático constante (LLFC), em relação a medidas de referência obtidas por um lisímetro de pesagem (LP), e em relação a valores obtidos a partir do método de estimativa de PM-FAO56, mundialmente utilizado quando não se tem uma instrumentação adequada disponível.

Os coeficientes de correlação linear (r) indicam uma correlação moderada entre as medidas do LLFC e as referências obtidas pelo LP e PM, revelando uma tendência na concordância entre os métodos. Entretanto, a correlação não atinge níveis elevados. Os índices de concordância de Wilmott (d) e o índice de concordância modificado de Wilmott (md) apontam para uma concordância superior entre as medidas do LLFC e do lisíme-

tro de pesagem (LP) em comparação com o PM.

Os valores de erro quadrático médio (MSE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) corroboram a tendência observada nos índices de concordância. O LLFC demonstra MSE e RMSE significativamente inferiores quando comparado ao LP em relação a PM, indicando menor dispersão e maior precisão nas medidas em relação ao instrumento de referência. Portanto, o método automatizado para coleta de medidas de evapotranspiração criado por Pellison (2023) em um LLFC não apresentou diferença significativa comparado ao LP, porém apresentou diferença ao ser comparado ao método de PM-FAO56.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Faculdade de Ciências Agrárias (UNESP) de Botucatu (São Paulo) - Brasil pelo apoio financeiro concedido através das bolsas de estudos (Mestrado e Doutorado).

Referências

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, **FAO, Irrigation and drainage paper**, v. 56, 1998. Disponível em: <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 30 out. 2024.

CARVALHO, H. P.; MELO, B.; ATARASSI, R. T.; CAMARGO, R.; SILVA, C. R.; MORAES, M. R. B. Desenvolvimento de lisímetros de pesagem na cultura do Café. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 29, n. 6, p. 1750-1760, 2013. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/22303>. Acesso em: 30 out. 2024.

DHUNGEL, R.; ANDERSON, R. G.; FRENCH, A.; SABER, M.; SANCHEZ, C. A.; SCUDIERO, E. Assessing evapotranspiration in a lettuce crop with a two-source energy balance model. **Irrigation Science**, v. 41, p. 183-196, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-022-00814-x>. Acesso em: 30 out. 2024.

FARIA, R. T. D.; CAMPECHE, F. D. S.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 237-242, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/L9F84FPfWFH5vCtJkhrLTNp/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 30 out. 2024.

FRANCA, M. V.; MEDEIROS, R. M.; HOLANDA, R. M.; SABOYA, L. M.; ROLIM NATO, F. C.; ARAUJO, W. R. Análise da estimativa da evapotranspiração por diferentes modelos para Amparo de São Francisco – Sergipe. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i13.21505>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/21505/19167>. Acesso em: 30 out. 2024.

FREIRE, O. Solos das regiões tropicais. Botucatu: FEPAF, 2006.

GOMES JR, D. G.; DAL PAI, A.; DAL PAI, E. CONSTRUÇÃO DE LISÍMETRO DE PESAGEM DE SEÇÃO CIRCULAR PARA A MEDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET0): SISTEMA COM TRÊS CÉLULAS DE CARGA, **Irriga**, v. 24, n. 3, p. 486-499, 2019. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/2827>. Acesso em: 30 out. 2024.

LEE, T. S.; NAJIM, M. M. M.; AMINUL, M. H. Estimating evapotranspiration of irrigated rice at the West coast of the Peninsular of Malaysia. **Journal of Applied Irrigation Science**, v. 39, n. 1, p. 103-117, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228860763_Estimating_evapotranspiration_of_irri

gated_rice_at_the_West_Coast_of_the_Peninsular_of_Malaysia. Acesso em: 30 out. 2024.

MATERÁN, F. J. V.; OLIVEIRA, R. A.; CECON, P. R.; SEDIYAMA, HerminiaEmilia PRIETO MARTINEZ, H. E. P.; TAGLIAFERRE, C. Lisímetro com lençol freático constante operando com Irrigâmetro® modificado para medida da evapotranspiração de referência, **Revista Científica UDO Agrícola**, v. 9, n. 2, p. 364-375, 2009. Disponível em: <https://www.bioline.org.br/pdf?cg09047>. Acesso em: 30 out. 2024.

MEISSNER, R.; RUPP, H.; SEYFARTH, M. Advanced Technologies in Lysimetry. In: MUELLER, L., SAPAROV, A., LISCHIED, G. (eds) Novel Measurement and Assessment Tools for Monitoring and Management of Land and Water Resources in Agricultural Landscapes of Central Asia. **Environmental Science and Engineering**, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01017-5_8.

NOLZ, R., CEPUDER, P.; EITZINGER, J. Comparison of lysimeter based and calculated ASCE reference evapotranspiration in a subhumid climate. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, p. 315–324, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-015-1417-y>. Acesso em: 30 out. 2024.

PELLISON, A. T.; FRANCO, J. R.; STUCCHI, G.; CALÇA, M. V. C.; RANIERO, M. R.; DAL PAI, A. Sistema automático de aquisição de dados de evapotranspiração de referência acoplado a um lisímetro de lençol freático constante. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 5, p. 1-10, 2023. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/41720/33844>. Acesso em: 30 out. 2024.

RANIERO, M. R.; CALÇA, M. V. C.; FERNANDO, D. M. Z.; ALMEIDA, O. C. P.; DAL PAI, A. Software for automated reading of sunshine duration by Digital Image Processing. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 9, p. 1599-1605, 2020. Disponível em: <https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/2900/1024>. Acesso em: 30 out. 2024.

ROSSI, T. J.; ESCOBEDO, J. F.; SANTOS, C. M.; ROSSI, L. R.; SILVA, M. B. P.; DAL PAI, E. Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu/SP/Brazil, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 448-459, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117312753>. Acesso em: 30 out. 2024.

RONG, Y.; WANG, W.; HUO, Z.; WANG, C.; ZHANG, C.; HUANG, G. Evapotranspiration and groundwater exchange for border and drip irrigated maize field in arid area with shallow groundwater. **Environmental Earth Sciences**, v. 34, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-022-10715-z>. Acesso em: 30 out. 2024.

SANTOS, C. S.; SANTOS, D.; OLIVEIRA, W. J.; SILVA, P. F.; SANTOS, M.; FONTENELE, A. J. Evapotranspiração de referência e coeficiente de cultivo da pimenteira no agreste alagoano. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 5, p. 883-892, 2016. Disponível em: https://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/458/pdf_297. Acesso em: 30 out. 2024.

SCHMIDT, C. D. S.; PEREIRA, F. A. C.; OLIVEIRA, A. S.; GOMES JUNIOR, J. F.; VELLAME, L. M. Design, installation, and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies. **Water resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 2, p. 77-85, 2013.

SOUSA, I. F.; NETTO, A. O. ; CAMPECHE, L. F. M. S. de.; BARROS, A. C.; SILVA, V. P. R. de.; 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. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/YWwSj9q6FvZqMpLB3F4YQ8B/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 30 out. 2024.

SOUZA, T. S.; EICHENBERGER, A. M.; NASCIMENTO, P. S. Estudo comparativo de diferentes metodologias na determinação da evapotranspiração de referência em Feira de Santana – BA. **Revista Brasileira de**



Climatologia, v. 15, p.737-754, 2019.

SMAABC. São Paulo, 2002. Disponível em: https://sma.fundacaoabc.org/climatologia/classificacao_climatica/sao_paulo. Acesso em: 12 out. 2023.

RINCÓN. A.; JORBA, O.; FRUTOS, M.; ALVAREZ, L.; BARRIOS, F. P.; GONZÁLEZ, J. A. Bias correction of global irradiance modelled with weather and research forecasting model over Paraguay. **Solar Energy**, v. 170, p. 201-211, 2018.

T R, J.; REDDY, N. S.; ACHARYA, U. D. Modeling Daily Reference Evapotranspiration from Climate Variables: Assessment of Bagging and Boosting Regression Approaches. **Water Resour Manage**, v. 37, p. 1013–1032, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-022-03399-4>. Acesso em: 30 out. 2024.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F.; FRANGA JUNIOR, E. F. Lisímetro de pesagem e de lençol freático de nível constante para uso em ambiente protegido. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 1, p. 153-159, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/2130/pdf>. Acesso em: 30 out. 2024.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models, **Physical Geography**, v. 2, p. 184–194, 1981.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K.; LEGATES, D.; O'DONNELL, J. ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

ZHAO, M.; A, G.; LIU, Y.; KONINGS, A. G. Evapotranspiration frequently increases during droughts. **Nat. Clim. Chang**, v. 12, p. 1024–1030, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01505-3>. Acesso em: 30 out. 2024.