

FRANKLIN JOSÉ VALBUENA MATERÁN

**TECNOLOGIA DO IRRIGÂMETRO® APLICADA EM MINILISÍMETRO E
LISÍMETRO COM LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE PARA
DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2006**

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

V139t
2006

Valbuena Materán, Franklin José, 1970-

Tecnologia do irrigâmetro® aplicada em minili-
símetro e lisímetro com lençol freático constante para
determinação da evapotranspiração de referência /
Franklin José Valbuena Materán. – Viçosa : UFV, 2006.
xii, 96f. : il. ; 29cm.

Orientador: Rubens Alves de Oliveira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de
Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Irrigação agrícola - Equipamento e acessórios -
Avaliação. 2. Lisímetro. 3. Evapotranspiração - Medição.
4. Água - Uso. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

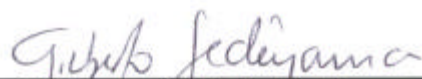
CDD 22.ed. 631.587

FRANKLIN JOSÉ VALBUENA MATERÁN

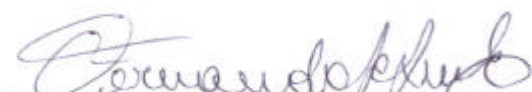
TECNOLOGIA DO IRRIGÂMETRO® APLICADA EM MINILISÍMETRO E
LISÍMETRO COM LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE PARA DETERMINAÇÃO
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA


Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.


APROVADA: 4 de agosto de 2006


Prof. Gilberto Chohaku Sedyama
(Co-Orientador)


Prof. Márcio Mota Ramos


Prof. Fernando Alves Pinto


Prof. Jorge Luiz Pimenta Mello


Prof. Rubens Alves de Oliveira
(Orientador)

Ciertamente te ensalzaré, oh mi Dios el Rey,
y ciertamente bendeciré tu nombre hasta tiempo
indefinido, aun para siempre.

Todo el día te bendeciré, sí, y ciertamente
alabaré tu nombre hasta tiempo indefinido, aún
para siempre.

Jehová es grande y ha de ser alabado en
grande manera, y su grandeza es inescrutable.

Salmo 145: 1-3.

Cuando veas la luz de Dios,
sabrás lo insignificante que es la luz
del sol.

meu Deus e Senhor.

OFEREÇO

Aos meus pais, Francisco Valbuena e Nelida Materán.	À minha amada esposa e preciosos filhos, Johanna de Valbuena, Franklin e Francisco.
Às minhas avós, Maria Materán, Saturna Valbuena.	Às minhas amadas em Cristo, Alcira, Mariela, Zenía, Wendy, Katherin e Rossi.
Aos meus irmãos, Franz, Francisco, Frank, Maria, Maira, Fernando, Patrícia e Roberto.	Aos meus sogros, Alejandro Araujo e Carmen González.
	Aos meus mentores, Prof. Maximiliano Valbuena. Prof. Eduardo Quintero (<i>in memoriam</i>). Prof. Gustavo Soto.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus e ao seu filho Jesus Cristo, sou eternamente grato, a ele só sirvo e diante dele dobro meus joelhos.

À minha Esposa Johanna e aos meus Filhos Franklin e Francisco, por todo o amor e carinho.

Ao meu Pai, por seu valioso apoio, carinho e estímulo.

Às minhas queridas mães Nelida, Maria Eudomenia e Alcira, por suas bênçãos e orações.

À Universidade Federal de Viçosa e à “La Universidad Del Zulia”, pela maravilhosa oportunidade de realizar o Doutorado.

Ao Professor Dr. Rubens Alves de Oliveira, pela confiança, pelo aprendizado e pela constante preocupação para com seus orientados.

Aos Professores Ph. D. Gilberto Sedyama, Ph. D. Paulo Afonso, Dr. Everardo Mantovani, Ph. D. Carlos Sedyama e Ph. D. Luiz Cláudio, por transmitirem seus vastos conhecimentos a seus estudantes como nunca antes vi, com humildade e profundo respeito considerando a todos sempre colegas.

À Professora Dra. Herminia Martinez, pelo constante otimismo e pela supervisão no trabalho de campo.

Ao Professor Dr. Paulo Cecon, pelo apoio a esse mar de estudantes que o procuram, tendo eles a certeza de que seu grande coração (prova unânime de brasileiros e estrangeiros na UFV) não lhe permite deixá-los ir sem antes aclararem suas dúvidas.

Ao Professor Dr. Hugo Ruiz, por sua aguda inteligência e sua visão que o fazem enxergar e dar solução, com facilidade, às dificuldades que surgem nas pesquisas.

À Professora Lêda Faroni, pela sua mão amiga e confiança.

Aos Professores Dr. Marco Oliva e Dra. Rosane Aguiar, por terem autorizado o uso dos equipamentos da Unidade de Crescimento de Plantas (UCP).

Aos Professores Dr. Antônio Alves, Dr. Mauro Martinez, D Ph. D. Paulo Afonso Ferreira, Dr. Márcio Mota, Dr. Antônio Matos e Dr. Wilson Denículi, pela valiosa colaboração durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores Luis Sosa, Betzabé Sulbarán, Rosa Nava, Noel Montiel e Darisol Pacheco, pelo constante apoio e informação relacionados aos processos acadêmicos e administrativos durante meus estudos de pós-graduação no Brasil.

A todos os Professores que fizeram parte da minha vida acadêmica na UFV, pela valiosa colaboração.

Ao meu amigo, irmão e colega de pesquisa Cristiano Tagliaferre, pelo companheirismo.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, especialmente a Edna, Simon, Marcos, Zé Mauro, Claudenilson, Renato, Chicão, Galinári, Maria José e Luiz Eduardo pela ajuda e pelo carinho.

Aos funcionários Gilcemir, Eloísa, Jorge Xavier e Eder pela disponibilidade e atenção com que sempre me trataram.

A Thalís, Edinaldo, Julio, Alesio e Samuel, alunos de Iniciação Científica, pela importante ajuda na realização desta pesquisa.

A Roberto, Altair, Francisco e Carlos, pela colaboração nas diferentes etapas do trabalho de campo.

Aos meus alunos do Curso de Agronomia da “La Universidad Del Zulia”, pelo incentivo e por terem torcido por mim.

Às minhas amigas Dra. Lucia Ramirez, Dra. Alba Durango, Dra. Dina Fonseca, Aline Fonseca, Marley e Joesse, pela amizade em minha estadia em Viçosa.

Aos meus grandes amigos Juan Fonseca, Rodrigo Sanchez, Vinícius e Luis Gustavo, pelo companheirismo e agradáveis conversas.

Aos meus colegas do Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Ambientais, pelo convívio e pela amizade.

Aos meus camaradas de República Anderson (Diamantina), Diogo (Patos de Minas), Juan Jose (Colômbia), Carlos (Juiz de Fora), Daniel (São Gotardo), Teo (São Paulo) e Hernani (Belém do Pará), pelo convívio harmonioso e fraterno.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

FRANKLIN JOSÉ VALBUENA MATERÁN, filho de Francisco Valbuena e Nelida Materán, nasceu em Maracaibo, capital do Estado Zulia, Venezuela, no dia 7 de outubro de 1970.

Em 1995, graduou-se em Engenharia Agrônômica pela “La Universidad Del Zulia”, em Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela.

Entre 1995 e 1996, trabalhou como engenheiro agrônomo supervisor dimensionando sistemas de irrigação na “La Universidad Del Zulia”, no núcleo da cidade de Punto Fijo, Estado Falcón, e na Facultad de Veterinária na cidade de Maracaibo, Estado Zulia.

Em 1997, desempenhou suas atividades na transnacional BAROID como engenheiro de lodo de perfuração de poços petrolíferos na cuenca da lagoa de Maracaibo e na Serra de Perija, no Estado Zulia, Venezuela.

Em 1999, ingressou no Departamento de Engenharia Agrícola da “La Universidad Del Zulia”, como Professor instrutor. Atualmente ostenta a categoria de Professor Assistente.

Em setembro de 2002, iniciou o Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola, na área de Irrigação e Drenagem, da Universidade Federal de Viçosa, sendo transferido para o Programa de Doutorado em setembro de 2003, nessa mesma Instituição, submetendo-se à defesa de tese em agosto de 2006.

ÍNDICE

	Páginas
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1- MINILISÍMETRO COM LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE OPERANDO COM IRRIGÂMETRO® MODIFICADO PARA MEDIDA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA	8
RESUMO	8
INTRODUÇÃO	9
MATERIAL E MÉTODOS.....	12
RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
CONCLUSÕES	28
REFERÊNCIAS	28
CAPÍTULO 2 - LISÍMETRO COM LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE OPERANDO COM IRRIGÂMETRO® MODIFICADO PARA MEDIDA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA	32
RESUMO	32
INTRODUÇÃO	33
MATERIAL E MÉTODOS.....	37
RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS	52
CAPÍTULO 3 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM MINILISÍMETRO COM LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE OPERANDO COM IRRIGÂMETRO® MODIFICADO NA MEDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	56
RESUMO	56
INTRODUÇÃO	57
MATERIAL E MÉTODOS.....	59
RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS	72
CAPÍTULO 4 - PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA DA GRAMA-BATATAIS (<i>Paspalum Notatum</i> FLUGGE) EM MINILISÍMETROS E LISÍMETROS EQUIPADOS COM IRRIGÂMETRO® MODIFICADO, PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES DO NÍVEL FREÁTICO	74

	Páginas
RESUMO	74
INTRODUÇÃO	75
MATERIAL E MÉTODOS.....	78
RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS	92

RESUMO

VALBUENA, Franklin José Materán, D. S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2006. **Tecnologia do Irrigâmetro[®] aplicada em minilísímetro e lisímetro com lençol freático constante para determinação da evapotranspiração de referência.** Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Co-Orientadores: Gilberto Chohaku Sedyama, Paulo Roberto Cecon, Herminia Emilia Prieto Martinez e Hugo Alberto Ruiz.

Este trabalho foi desenvolvido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro[®], pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, localizada a 20° 45' S e 42° 45' O, no Estado de Minas Gerais, no período de julho a dezembro de 2005. Dois experimentos foram conduzidos com grama-batatais (*Paspalum Notatum* Flugge), sendo um com minilísímetros e outro com lisímetros, ambos com lençol freático constante, preenchidos com substrato de areia, alimentados com solução nutritiva e operando com Irrigâmetro[®] modificado. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis freáticos (15, 20, 25 e 30 cm de profundidade), estabelecidos nos minilísímetros (M15, M20, M25 e M30), com quatro repetições. No experimento com os lisímetros, os mesmos tratamentos foram aplicados (L15, L20, L25 e L30), com três repetições. Em ambos os experimentos, utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado. A grama-batatais também foi cultivada em três lisímetros de drenagem preenchidos com Latossolo Vermelho-Amarelo. Os objetivos deste estudo foram: a) determinar a evapotranspiração de referência (ET_o), utilizando-se os lisímetros e minilísímetros, ambos com nível freático constante e operando com Irrigâmetro[®] modificado, bem como estudar o efeito dos níveis freáticos de 15, 20, 25 e 30 cm sobre a ET_o e avaliar seus desempenhos em relação aos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, tanque Classe A e o lisímetro de drenagem, sendo considerado como padrão o método Penman-Monteith FAO 56; b) comparar o desempenho do minilísímetro na determinação da ET_o em relação ao lisímetro com lençol freático constante, ambos operando com Irrigâmetro[®] modificado; c) avaliar o efeito de diferentes níveis freáticos sobre a produtividade de matéria seca e a eficiência do uso da água (EUA) da grama-batatais cultivada em minilísímetros e lisímetros, ambos com lençol freático constante e operando com Irrigâmetro[®] modificado; d) comparar as produtividades de matéria seca e EUA da grama-batatais dos minilísímetros e lisímetros com lençol freático constante em relação à produtividade do lisímetro de drenagem (padrão). Dos métodos de determinação da ET_o analisados, o que apresentou melhor desempenho em todas as

escalas de tempo estudadas foi o método Penman modificado. Os métodos da radiação, lisímetro de drenagem, tanque Classe A, M30 e os lisímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado apresentaram bom desempenho na determinação da ETo, sendo, entre eles, os métodos da Radiação, L15 e L20 os mais precisos e exatos. Os métodos que apresentaram os piores desempenhos foram Hargreaves-Samani e os minilímetros M15, M20, M25, não sendo recomendado seu uso para a estimativa de ETo, nas condições semelhantes às deste estudo, por apresentarem baixa exatidão e menor precisão. A bordadura utilizada nos minilímetros como área-tampão não foi suficiente para evitar o efeito varal, ocasionando maior consumo de água comparativamente ao verificado nos lisímetros de lençol freático e no lisímetro de drenagem. O maior consumo de água nos lisímetros e minilímetros ocorreu no nível freático de 15 cm, decrescendo com o aumento da profundidade, sendo esse efeito mais pronunciado nos minilímetros. A profundidade freática, nos diferentes níveis estudados, não afetou significativamente a produtividade de matéria seca da grama-batatais cultivada nos lisímetros e nos minilímetros. A produtividade média de matéria seca da grama-batatais cultivada nos minilímetros não diferiu significativamente daquela obtida nos lisímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado, nos níveis freáticos de 15, 20 e 30 cm de profundidade. A produtividade de matéria seca de grama-batatais obtida no lisímetro com lençol freático constante mantido a 20 cm de profundidade superou estatisticamente a produtividade obtida no lisímetro de drenagem. A eficiência do uso da água da grama-batatais obtida nos lisímetros e nos minilímetros com lençol freático constante, operando com Irrigâmetro[®] modificado, não variou significativamente nos diferentes níveis freáticos estudados. A eficiência do uso da água da grama-batatais cultivada nos minilímetros não diferiu significativamente daquela obtida nos lisímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado. A eficiência do uso da água da grama-batatais obtida nos lisímetros e nos minilímetros com lençol freático constante, operando com Irrigâmetro[®] modificado, não variou significativamente da obtida no lisímetro de drenagem.

ABSTRACT

VALBUENA, Franklin José Materán, D.S., Universidade Federal de Viçosa, August of 2006. **Technology of Irrigâmetro[®] applied in minilysimeters and lysimeters with constant groundwater table for the determination of the reference evapotranspiration.** Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Co-Advisers: Gilberto Chohaku Sedyama, Paulo Roberto Cecon, Herminia Emília Prieto Martinez and Hugo Alberto Ruiz.

This investigation was carried out in the unit of research and development of the modified Irrigâmetro[®], belonging to the Department of Agricultural Engineering of the Federal University of Viçosa, in Viçosa, state of Minas Gerais, Brazil, located at 20° 45' S and 42° 45' W, in the period from July to December of 2005. Two experiments were conducted with the grass-batatais (*Paspalum notatum* Flugge), with one using minilysimeters and the other with lysimeters both with constant groundwater table, filled sand substrate, fed with nutritive solution and operating with modified Irrigâmetro[®]. The treatments comprised of four constant groundwater tables (15, 20, 25 and 30 cm of dept), established in the minilysimeters (M15, M20, M25 and M30), with four repetitions. In the experiment with the lysimeters, the same treatments were applied (L15, L20, L25 and L30), with three repetitions. In both experiments the research design was entirely randomized. The grass-batatais was also cultivated in three draining lysimeters filled with red-yellow latossoil. The purposes of this investigation were: to determine the reference evapotranspiration (ET_o), by means of the lysimeters and minilysimeters, both with constant groundwater table and operating with modified Irrigâmetro[®], as well as to study the effects of the groundwater levels of 15, 20, 25 and 30 cm on the ET_o and to evaluate their performance in relation to the modified Penman, Radiation, Hargreaves-Samani, Pan and draining lysimeter methods. With the Penman-Monteith FAO 56 method being considered the standard method. To compare the performance of minilysimeter in the determination of the ET_o in relation to the constant level lysimeter, both operating with modified Irrigâmetro[®]. To evaluate the effects of the different groundwater table on the productivity of dry matter and EUA of the grass-batatais cultivated in constant level minilysimeters and lysimeters operating with modified Irrigâmetro[®]. To compare the productivity of dry matter and EUA of the grass-batatais obtained in the minilysimeters and lysimeters with constant groundwater table in relation to the productivity of the draining lysimeter (standard). The methods of

L15, L20, M30, Radiation, draining lysimeter and Pan exhibited a good performance in the determination of the ETo. The methods that exhibited the worst performance was the Hargreaves-Samani and the minilysimeters M15, M20, M25, not being recommended their use for the estimate of the ETo, under conditions similar to those studied in this investigation, due to their low precision and accuracy. The external cylinder used as borders in the minilysimeters as buffer-area were not sufficient to avoid the clothesline effect, leading to a higher consumption of water in comparison to the ones verified in the groundwater table lysimeters and the draining lysimeter. The highest consumption of water occurred in the 15 cm groundwater table, decreasing with depth, with this effect being most pronounced in the minilysimeters. The groundwater table in the different methods studied did not affect significantly the productivity of dry matter of the grass-batatais cultivated in the lysimeters and minilysimeters. The average productivity of dry matter of the grass-batatais cultivated in the minilysimeters did not differ significantly from the one observed for the constant level lysimeters operating with modified Irrigâmetro[®], in the groundwater table of 15, 20 and 20 cm of depth. The dry matter productivity of the grass-batatais obtained with the constant level lysimeter maintained at 20 cm of depth surpassed statistically the productivity obtained with draining lysimeter. The efficiency of the use of water by the grass-batatais obtained in the lysimeters and minilysimeters with constant groundwater table did not vary significantly in the different ground water levels investigated. The efficiency of the use of water by the grass-batatais cultivated in the minilysimeters did not differ statistically from the one obtained in the lysimeters with constant groundwater table operating with modified Irrigâmetro[®], at the different freatic levels investigated. The efficiency of the use of water of the grass-batatais obtained in the lysimeters and minilysimeters with constant groundwater table, operating with modified Irrigâmetro[®], did not vary significantly from the one obtained in the drainage lysimeter.

INTRODUÇÃO GERAL

A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada de uma superfície com vegetação durante determinado período. Também pode ser expressa em valores totais, médios, diários e horários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água, em período predeterminado (BERNARDO et al., 2006).

O conhecimento e a quantificação do processo de evapotranspiração definem a quantidade de água necessária para as culturas, sendo, por isso, um parâmetro fundamental para o planejamento e manejo da irrigação (SEDIYAMA, 1997). A determinação das necessidades hídricas das culturas é usualmente estimada com base nos valores da evapotranspiração de referência (ET_o).

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) propõe vários métodos de estimativa de evapotranspiração de referência (ET_o): o de Penman Monteith FAO 56, o de Penman modificado, o da Radiação e o tanque Classe A, entre outros. No entanto, em locais com pouca disponibilidade de dados climáticos a FAO recomenda o método de Hargreaves-Samani, o qual é baseado em dados de temperaturas máxima e mínima (ALLEN et al., 1988).

No Brasil, é comum o emprego de evapotranspirômetros para determinação da ET_o, sendo o lisímetro de drenagem, de acordo com Silva et al. (1999), o mais simples e o de uso mais difundido, devido à sua simplicidade; porém, apresenta restrições para a obtenção de valores de ET_o em períodos menores do que sete dias.

Método Penman-Monteith FAO 56

O método-padrão de cálculo da evapotranspiração de referência é o de Penman-Monteith FAO 56:

$$ET_o = \frac{0,408\ddot{A}(R_n - G) + \ddot{a} \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\ddot{A} + \ddot{a}(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

em que:

ET_o = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;

R_n = saldo de radiação na superfície da cultura, MJ m⁻² d⁻¹;

- G = densidade do fluxo de calor do solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;
 T = temperatura do ar média diária a 2 m de altura, $^{\circ}\text{C}$;
 u_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, m s^{-1} ;
 e_s = pressão de vapor de saturação, kPa ;
 e_a = pressão de parcial vapor real, kPa ;
 $e_s - e_a$ = déficit de pressão de vapor de saturação, kPa ;
 γ = declividade da curva de pressão de vapor, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$; e
 ψ = coeficiente psicrométrico, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Método Penman modificado

O modelo de Penman é amplamente utilizado por pesquisadores. É um método combinado, pois associa os efeitos do balanço de energia e dos termos aerodinâmicos na estimativa da evapotranspiração. Doorenbos e Pruitt (1974) modificaram a equação de Penman (1948) para lhe dar maior sensibilidade ao vento. Ajustaram o fator c baseado em condições climáticas locais e consideraram $G = 0$, em períodos diários, ou seja:

$$ET_o = c \left[WR_n + (1 - W) 0,27 (1 + 0,00625 U_2) (e_s - e_{s(t)}) \right] \quad (2)$$

em que:

- c = fator de correção proposto pela FAO;
 W = fator de ponderação que depende da temperatura;
 R_n = saldo de radiação, mm d^{-1} ;
 U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, km d^{-1} ;
 e_s = pressão de saturação de vapor à temperatura média diária, mbar ; e
 $e_{s(t)}$ = pressão de saturação de vapor à temperatura de ponto de orvalho média, mbar .

O fator de correção da FAO foi ajustado por Allen e Pruitt (1991):

$$\begin{aligned}
 c = & 0,892 - 0,0781U_d + 0,00219U_d R_s + 0,000402 U_{R\max} R_s + 0,000196 (U_d/U_n) U_d U_{R\max} \\
 & + 0,0000198 (U_d/U_n) U_d U_{R\max} R_s + 0,00000236 U_d U_{R\max} R_s - 0,0000086 (U_d/U_n)^2 U_d \\
 & U_{R\max} - 0,0000000292 (U_d/U_n) U_d (U_{R\max})^2 R_s - 0,0000161 U_{R\max} (R_s)^2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

em que:

- U_d = velocidade média do vento durante o dia, m s^{-1} ;
 U_n = velocidade média do vento durante a noite, m s^{-1} ;

UR_{max} = umidade relativa máxima diária, %;

R_s = radiação solar global à superfície, $mm\ d^{-1}$; e

$Ud/U_m = 2$, valor recomendado por Doorenbos e Pruitt (1977) para o caso da indisponibilidade ou de não confiabilidade dos dados.

Método de Radiação (PEREIRA et al., 1997)

A evapotranspiração é estimada pela seguinte expressão:

$$ET_o = r(W R_s) \quad (4)$$

em que:

r = fator de correção proposta pela FAO;

W = fator de ponderação que depende da temperatura; e

R_s = radiação solar global, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$.

O fator r pode ser calculado por Frevert (1983):

$$r = 1,066 - 0,00128 UR_{med} + 0,045 Ud - 0,0002 UR_{med} Ud - 0,0000315 (UR_{med})^2 - 0,001103 (Ud)^2 \quad (5)$$

em que:

UR_{med} = umidade relativa média (%).

Método do tanque Classe A modificado (DOORENBOS e PRUITT, 1977)

Os tanques de evaporação medem o efeito integrado de radiação, vento, temperatura e umidade do ar sobre a evaporação de uma superfície livre de água.

A estimativa da evapotranspiração é obtida corrigindo-se a evaporação por um coeficiente que depende das condições locais e do posicionamento do tanque em relação à bordadura.

$$ET_o = K_p E_v \quad (6)$$

em que:

K_p = coeficiente do tanque Classe A; e

E_v = evaporação no tanque Classe A, mm por período.

O valor de K_p varia com as condições de contorno do tanque Classe A, ou seja, tamanho e natureza da área de bordadura, condições de umidade relativa do ar e

velocidade do vento. O coeficiente do tanque Classe A da FAO, em superfície gramada, foi ajustado por Allen e Pruitt (1991):

$$K_p = 0,108 - 0,000331 U_d + 0,0422 \ln(\text{bord}) + 0,1434 \ln(\text{URmed}) - 0,000631 [\ln(\text{bord})]^2 \ln(\text{URmed}) \quad (7)$$

em que:

U_d = velocidade média do vento durante o dia, medida a 2 m de altura, m s^{-1} ;

e

Bord = distância da área de bordadura, m.

Método de Hargreaves-Samani (1985)

Este método foi desenvolvido por Hargreaves e Samani nas condições semi-áridas da Califórnia (Davis), a partir da evapotranspiração obtida em lisímetros de pesagem cultivados com grama (PEREIRA et al., 2002). Sua fórmula é a seguinte:

$$ET_o = 0,0023 (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} (T_{\text{med}} + 17,8) Ra \quad (8)$$

em que:

T_{\min} = temperatura mínima do dia, °C;

T_{\max} = temperatura máxima do dia, °C;

T_{med} = temperatura média $[(T_{\max} + T_{\min})/2]$, °C; e

Ra = radiação solar incidente no topo da atmosfera, mm d^{-1} .

Método do lisímetro de drenagem

A evapotranspiração de referência pode ser calculada pela seguinte equação:

$$ET_o = P + I - D \quad (9)$$

em que:

P = precipitação no período, mm;

I = lâmina de água aplicada na irrigação no período, mm; e

D = lâmina de água drenada no período, mm.

A utilização dessas equações por pesquisadores e principalmente produtores é limitada, já que necessitam de conhecimento e treinamento mínimo, da utilização de inúmeros dados meteorológicos e do uso de equipamentos normalmente caros para uso

rotineiro, o que impede, em grande parte, a sua utilização. Já os métodos e dispositivos mais simples apresentam pouca precisão e exatidão em períodos curtos para a determinação da ETo. Essas dificuldades têm sido manifestadas por diversos autores brasileiros (BERNARDO et al., 2006; SILVA, 2003; ROCHA et al. 2003; RESENDE e ALBUQUERQUE, 2002; MOROUELLI et al., 2001; LUNARDI et al., 1999; BERNARDO, 1998; MEDEIROS, 1998).

Segundo Silva et al. (1999), Pereira et al. (1997), Mañas e Valero (1993), Allen e Pruitt (1995), Hargreaves (1994), Allen (1986), Frevert (1983) e Doorenbos e Pruitt (1977), o uso dessas equações em condições climáticas e agronômicas muito diversas daquelas em que foram inicialmente concebidas torna-se limitante, sendo a adaptação dessas fórmulas a um novo conjunto de condições um trabalho difícil, oneroso e dispendioso.

Buscando uma alternativa simples, sensível em períodos curtos, de custo não elevado e alta praticidade para determinação da ETo, foi desenvolvido o Irrigâmetro[®], o qual é um aparelho patenteado pela Universidade Federal de Viçosa para manejo da água em projetos de irrigação. O Irrigâmetro[®] modificado usa o princípio de Mariotte, que permite manter o nível freático constante no minilísímetro, fazendo a reposição da água e fornecendo diretamente o valor da lamina evapotranspirada.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivos:

- Determinar a evapotranspiração de referência (ETo), utilizando-se lisímetros e minilísímetros, ambos com nível freático constante, preenchidos com substrato de areia, alimentados com solução nutritiva e operando com Irrigâmetro[®] modificado, bem como estudar o efeito dos níveis freáticos de 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade sobre a ETo. Os métodos do minilísímetro e lisímetros com lençol freático constante foram confrontados com os métodos Penman modificado, Hargreaves-Samani, Radiação, tanque Classe A e o lisímetro de drenagem, avaliando-se os seus desempenhos com base no método Penman-Monteith FAO 56, considerado como padrão.
- Comparar o desempenho do minilísímetro na determinação da ETo em relação ao lisímetro com lençol freático constante, ambos operando com Irrigâmetro[®] modificado e preenchidos com substrato de areia, vegetados com grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge) e alimentados com solução nutritiva.
- Avaliar o efeito de diferentes níveis freáticos sobre a produtividade de matéria seca e da eficiência do uso da água (EUA) da grama-batatais cultivada nos

minilísímetros e nos lisímetros com lençol freático constante, operando com Irrigâmetro[®] modificado.

- Comparar as produtividades de matéria seca e da eficiência do uso da água da grama-batatais dos minilísímetros e lisímetros com lençol freático constante em relação à produtividade do lisímetro de drenagem (padrão).

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Logan, v. 112, n. 4, p. 348-368, 1986.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 310 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. FAO-24 reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Logan, v. 117, n. 5, p. 758-773, 1991.

BERNARDO, S. Irrigação e produtividade. **Engenharia na Agricultura**, v. 6, n. 3, p. 186-196, 1998.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006. 625 p.

DA SILVA, F. C.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA N. A. Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agroclimatologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 19-23, 1999.

DA SILVA, L. D. **Evapotranspiração do capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.) e Grama-Batatais (*Paspalum notatum* Flugge) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Impr. Univ., 2003. 93 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

FREVERT, D. K.; HILL, R. W.; BRAATEN, B. C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Denver, v. 109, n. 2, p. 265-270, 1983.

HARGREAVES, G. H. Defining and using reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Utah, v. 120, n. 6, p. 1132-1139, 1994.

LUNARDI, M. A.; LUNARDI, D. M.; CAVAGUTI, N. Comparação entre medidas evapotranspirométrica e metodologia da FAO, na determinação da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 4, n. 1, p. 52-65, 1999.

MAÑAS, F. M.; VALERO, J. A. **Agronomía del riego**. Madrid, España: La Universidad de Castilla-La Mancha; Impr. Ediciones Mundi-Prensa, 1992. 732 p.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L.; SILVA, H. **Irrigação por aspersão em hortaliças**: Qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo. Brasília, EMBRAPA Hortaliças, 2001. 111 p.

MEDEIROS, S. L. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região mesoclimática de Santa Maria-RS. **Revista Brasileira de Agroclimatologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 105-109, 1998.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agroclimatologia. Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba, RS: Agropecuária Ltda., 2002. 478 p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba, SP: FEALQ, 1997. 183 p.

SEDIYAMA, G. C. Necessidades de água para os cultivos. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSINO SUPERIOR. **Curso de Engenharia de Irrigação**. Brasília, 1987. 413p.

RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. **Métodos e estratégias de manejo de irrigação**. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA, 2002. 10 p. (Circular técnica,19).

ROCHA, C. R.; GUERRA, A. F.; AZEVEDO, H. M. Ajuste do modelo Chistiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 263-268, 2003.

MINILISÍMETRO COM LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE OPERANDO COM IRRIGÂMETRO[®] MODIFICADO PARA MEDIDA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Franklin José Valbuena Materán, Rubens Alves de Oliveira, Gilberto Chohaku Sedyama, Paulo Roberto Cecon, Herminia Emilia Prieto Martinez e Hugo Alberto Ruiz.

Os autores são: **Franklin José Valbuena Materán**, Candidato a *Doctor Scientiae* em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais (MG), Brasil, bolsista da “La Universidad Del Zulia”; **Rubens Alves de Oliveira**, Professor Adjunto, DEA/UFV, MG, Brasil; **Gilberto Chohaku Sedyama**, Professor Titular, DEA/UFV, MG, Brasil; **Paulo Roberto Cecon**, Professor Adjunto, DI/UFV, MG, Brasil; **Herminia Emilia Prieto Martinez**, Professor Adjunto, DFT/UFV, MG, Brasil; **Hugo Alberto Ruiz**, Professor Titular, DS/UFV, MG, Brasil. **Autor correspondente:** Franklin José Valbuena Materán, Dep. de Engenharia Agrícola, Av. P. H. Rolfs, s/n, 36570-000 Viçosa, MG, Brasil. Tel.: 55-31-3899-2732; e-mail: franklinvalb@yahoo.com.

RESUMO

Este trabalho foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro[®] pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, no período de julho a dezembro de 2005. Instalaram-se 16 minilímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado vegetados com grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge), em delineamento inteiramente casualizado. O Irrigâmetro[®] modificado é um aparelho patenteado pela Universidade Federal de Viçosa para manejo da água em projetos de irrigação. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis freáticos (15, 20, 25 e 30 cm) estabelecidos nos minilímetros (M15, M20, M25 e M30), com quatro repetições. Objetivou-se, no presente trabalho, medir a evapotranspiração de referência (ET_o) utilizando os minilímetros com nível freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado, bem como avaliar o efeito dos tratamentos no seu desempenho em relação aos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, tanque Classe A e o lisímetro de drenagem, sendo o método Penman-Monteith FAO 56 considerado como padrão. Os dados foram coletados diariamente e analisados estatisticamente. Com base nos resultados, verificou-se que os métodos M30, Penman modificado, Radiação, lisímetro de drenagem e tanque classe A apresentaram bom desempenho. Os métodos de pior desempenho foram os minilímetros M15, M20, M25 e Hargreaves-Samani, não sendo recomendado seu uso para a estimativa de ET_o nas condições semelhantes às deste estudo, por apresentarem menor exatidão e menor precisão. No método dos minilímetros, verificou-se maior consumo de água no nível freático de 15 cm de profundidade; esse consumo decresceu com maiores profundidades do lençol freático. A

bordadura utilizada nos minilísímetros como área-tampão não foi suficiente para evitar o efeito varal, ocasionando maior consumo de água comparativamente ao verificado no lisímetro de drenagem

Palavras-chave: Minilísímetro, evapotranspiração, Irrigâmetro[®].

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento e a quantificação do processo de evapotranspiração definem a quantidade de água necessária para as culturas, sendo, por isso, um parâmetro fundamental para o planejamento e manejo da irrigação (SEDIYAMA, 1997).

A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada de uma superfície com vegetação durante determinado período. Pode ser expressa em valores totais, médios, diários e horários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água, em período predeterminado (BERNARDO et al., 2006).

Doorenbos e Pruitt (1977) definiram ETo como a taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa de grama de 8 a 15 cm de altura, uniforme, em ativo crescimento, sombreando completamente o solo sem limitação de água.

Smith (1991) propôs a adoção de uma definição padronizada para a evapotranspiração de referência. A ETo seria aquela que ocorre em uma cultura hipotética, apresentando as seguintes características: altura de 12 cm, resistência de dossel de 69 s m^{-1} e coeficiente de reflexão (albedo) de 0,23, que representaria a evapotranspiração de uma gramínea verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem estresse hídrico.

A evapotranspiração pode ser obtida por métodos indiretos, sendo usadas, dentre outras, as equações de Penman modificada, Radiação, Hargreaves-Samani e Penman-Monteith FAO 56.

A equação original de Penman (1948) possui dois termos, a saber: o da energia (radiação) e o aerodinâmico (vento e umidade do ar). O procedimento utilizado por Doorenbos e Pruitt (1977), para a modificação do modelo de Penman, consistiu na substituição da função vento do modelo original pela função vento proposta por esses autores, a qual foi determinada a partir de medidas diretas da ETo e outros elementos do clima, em várias regiões com diferentes tipos climáticos.

O método da Radiação proposto pela FAO tem sua origem na equação de Makkink, desenvolvida em 1957, sendo modificada por Doorenbos e Pruitt (1977) e DOORENBOS e Kassam (1994), que substituíram os coeficientes a e b da equação

original por um parâmetro c , que é função da umidade relativa do ar e da velocidade do vento (PEREIRA et al., 1997).

Hargreaves e Samani (1985) desenvolveram um método para a estimativa da ETo a partir de dados da radiação solar extraterrestre e da diferença entre a temperatura máxima e a mínima média.

Segundo Allen et al. (1998), o método de Penman-Monteith inclui parâmetros relacionados à troca de energia e ao correspondente fluxo de calor latente (evapotranspiração) na vegetação uniforme e extensa. A maioria desses parâmetros pode ser calculada a partir de dados meteorológicos, e a equação pode ser utilizada para o cálculo direto da evapotranspiração de qualquer cultura, conforme as resistências de superfície e aerodinâmicas da cultura específica.

A estimativa da evapotranspiração também pode ser feita por meio dos evaporímetros, os quais podem ser classificados em dois tipos: um em que a superfície da água fica livremente exposta (tanques de evaporação) e outro em que a evaporação se dá através de uma superfície porosa (atmômetros). Dentre os métodos do primeiro tipo, o mais utilizado é o tanque Classe A, no qual a evaporação é convertida em ETo com emprego do coeficiente do tanque (K_p), desenvolvido por Doorenbos e Pruitt (1977).

Uma alternativa que tem sido utilizada para a obtenção da evapotranspiração por meio de medidas diretas são os lisímetros. Segundo Aboukhaled et al. (1986), a palavra lisímetro é derivada do grego *lysis* e significa dissolução ou movimento, e *metron* significa mensurar. Os lisímetros são recipientes contendo solo, instalados no campo, com superfície coberta por vegetação, para determinação da evapotranspiração de uma cultura em crescimento ou de uma cultura de referência ou, ainda, com superfície sem vegetação, para determinação da evaporação num solo descoberto. Para Bernardo et al. (2006) e Amorim (1998), o método do lisímetro é o mais preciso e considerado, ainda, instrumento-padrão para a determinação da evapotranspiração de referência (ETo).

Segundo Howell et al. (1991) e Aboukhaled et al. (1977), os lisímetros utilizados em pesquisas de evapotranspiração podem ser agrupados em três categorias: (1) não-pesáveis com lençol freático de nível constante; (2) não-pesáveis com drenagem livre; e (3) lisímetros pesáveis, onde a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem.

O lisímetro de drenagem consiste de um tanque enterrado no solo que possui uma rede de tubulações no seu fundo, que conduz a água drenada até um recipiente de medição. A evapotranspiração de referência por ele determinada deve ser em valores

semanais, quinzenais ou mensais (BERNARDO et al., 2006). Já os lisímetros de pesagem são constituídos de uma caixa impermeável sob a qual é instalada uma célula de carga, cuja finalidade é medir a sua variação de peso, obtendo-se, assim, a medida da evapotranspiração. A maior desvantagem do lisímetro de drenagem é seu alto custo limitando seu uso na atividade agrícola e na pesquisa, envolvendo a estimativa da evapotranspiração de referência.

Nos lisímetros não-pesáveis com lençol freático de nível constante, o nível da água é mantido em determinada profundidade. Devido à evapotranspiração, a água é translocada até a zona radicular, por capilaridade. A descida do nível freático causado por esse deslocamento é automaticamente compensada por um mecanismo flutuador, sendo a quantidade de água necessária para repor esse nível, medida também automaticamente (ABOUKHALED et al., 1986).

Segundo Mañas e Valero (1993) e Aboukhaled et al. (1986), uma limitação importante quanto ao uso de lisímetros com lençol freático de nível constante está associada aos problemas freqüentes com os flutuadores e ao desnível dos dispositivos de leitura-alimentação, interferindo diretamente nas medidas de evapotranspiração. Outra limitação mencionada quanto ao uso deste tipo de lisímetro está associada à presença do nível freático, o qual não representa as condições da parcela em seu entorno, provocando um crescimento maior da cultura dentro dos lisímetros que, em consequência disso, fica mais exposta à radiação e aos efeitos do vento, superestimando a evapotranspiração em até 10 ou 20%.

A maioria desses métodos requer, além de pessoal especializado para seu manuseio, instrumentos que geralmente são caros, e outros que se caracterizam por ser volumosos e pesados, limitando seu uso a um só local, razão pela qual a grande maioria dos produtores rejeita esses métodos. O uso do Irrigâmetro[®] modificado desenvolvido acoplado ao minilisímetro se apresenta como uma ferramenta de grande valia, por ser de fácil manuseio, econômico, de fácil mobilidade e não requerer cálculos complexos que facilitam sua utilização pelos produtores.

Os objetivos deste trabalho foram determinar a evapotranspiração de referência (ET_o), utilizando-se os minilisímetros com nível freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado, preenchidos com substrato de areia e alimentado com solução nutritiva, bem como estudar o efeito do nível freático de 15, 20, 25 e 30 cm sobre a ET_o; e avaliar seu desempenho em relação aos métodos Penman modificado, Radiação,

Hargreaves-Samani, tanque Classe A e o lisímetro de drenagem, sendo considerado como padrão o método Penman-Monteith FAO 56.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro[®], pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizada na cidade de Viçosa, MG, com 20° 45' de latitude sul, 42° 45' de longitude oeste e altitude de 651 m. A temperatura média anual de Viçosa é de 19 °C. A umidade relativa do ar é, em média, de 80% e a precipitação média anual, 1.341 mm, com estações seca e chuvosa bem definidas. O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação climática proposta por Köppen, isto é, subtropical, com inverno seco.

2.1. Descrição do minilímetro operando com Irrigâmetro[®] modificado

O minilímetro foi construído com um tubo de PVC de 60 cm de altura, com 450 mm de diâmetro, dentro do qual foi instalado, de maneira concêntrica, outro tubo de PVC, de mesma altura e 250 mm de diâmetro, com área interna de 0,0468 m², no qual foi feito o controle da água consumida pela grama-batatais (Figura 1). O minilímetro foi assentado sobre um estrado de madeira com 15 cm de altura e coberto com uma telha transparente de fibra de vidro, com espessura de 2 mm, localizada 50 cm acima da sua borda.

Uma mangueira de polietileno de 20 mm conectou o fundo do cilindro interno com o Irrigâmetro[®] modificado, construído com tubo de PVC de 75 mm de diâmetro e 1 m de altura. O Irrigâmetro[®] modificado utiliza o princípio de Mariotte, tendo sido usado para manter o nível freático constante no minilímetro, fazendo a reposição da água e fornecendo o valor da lâmina evapotranspirada. A água deslocada no Irrigâmetro[®] modificado foi quantificada por meio de régua milimétrica, sendo a sensibilidade de leitura igual a 0,086 mm, definida pela relação entre as áreas da seção transversal do tubo de alimentação do Irrigâmetro[®] modificado e do cilindro interno do minilímetro.

No preenchimento dos minilímetros foi colocada, inicialmente, uma camada de brita 0, com espessura de 5 cm, sobre a qual foi sobreposta uma camada de 5 cm de brita 1, acima da qual foi colocada uma camada de 45 cm de substrato de areia com granulometria entre 0,104 e 1 mm. A análise granulométrica da areia foi realizada no

Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados são apresentados no Quadro 1.

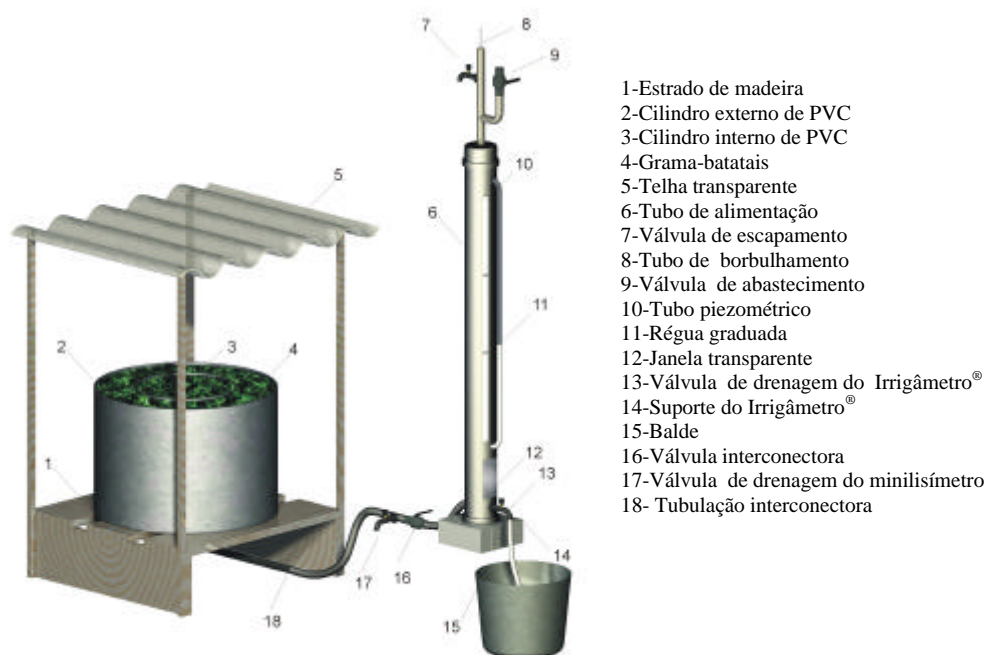


Figura 1 - Partes constituintes do minilímetro com lençol freático constante e do Irrigâmetro[®] modificado.

Quadro 1- Distribuição granulométrica do substrato de areia

Granulometria				Massa Específica (g cm^{-3})	
Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Partículas	Solo
93	4	0	3	2,85	1,50

2.2. Descrição do lisímetro de drenagem

Na área experimental foram instaladas três lisímetros de drenagem, construídos com caixas de cimento-amianto, com as seguintes dimensões: 1,10 m de largura, 1,60 m de comprimento e 0,70 m de profundidade, com área interna de $1,6845 \text{ m}^2$. Na instalação dos lisímetros, as bordas das caixas ficaram 5 cm acima da superfície do solo. O sistema de drenagem desses lisímetros foi constituído de uma camada de brita zero, com espessura de 5 cm, sobre a qual foi sobreposta uma camada de 5 cm de brita 1. No fundo da caixa foi instalada uma rede de drenagem formada por tubos de PVC de 20 mm, com perfurações de 1 mm, conectada a uma estação de coleta da água drenada.

Os lisímetros de drenagem foram preenchidos com material de solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, distribuído em camadas de 10 cm até a espessura total de 70 cm, incluindo as camadas de brita e areia. No início da pesquisa foi feita uma calagem com base no resultado da análise química do solo. A adubação dos lisímetros

de drenagem foi feita mensalmente com aplicação de 20 g m⁻² do fertilizante da formulação NPK 10-10-10. As análises granulométrica e química e a curva de retenção de água no solo foram realizadas nos Laboratórios de Rotina e de Física de Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados são apresentados nos Quadros 2, 3 e 4, respectivamente.

Quadro 2 - Resultado da análise física do solo

Granulometria				Massa Específica (g cm ⁻³)	
Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Partículas	Solo
15	8	0	77	2,62	0,99

Quadro 3 - Resultados da análise química do solo

pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al*	SB*	CTC*	MO*	V*
H ₂ O	mg dm ⁻³					cmol _c dm ⁻³			dag kg ⁻¹	%
4,79	1,00	13,00	0,32	0,08	0,59	6,40	0,43	1,02	2,66	6,30

* H+Al = Acidez Total, SB = Soma de Bases Trocáveis, CTC = Capacidade de Troca Catiônica Efetiva, MO = Matéria Orgânica e V = Índice Saturação de Bases.

Quadro 4 - Valores de umidade do solo, em diferentes potencias matriciais

Potencial Matricial (MPa)	-0,01	-0,03	-0,05	-0,10	-0,20	-0,50	-1,50
Umidade do solo (kg kg ⁻¹)	0,429	0,378	0,294	0,286	0,257	0,244	0,239

Os lisímetros de drenagem foram irrigados diariamente pela superfície, utilizando-se um volume de água suficiente para promover uma pequena drenagem.

Segundo Aboukhaled et al. (1977), a evapotranspiração da cultura pode ser calculada pela seguinte equação:

$$ET_0 = P + I - D \quad (1)$$

em que:

ET₀ = Evapotranspiração de referência, mm no período;

P = precipitação no período, mm;

I = lâmina de água aplicada na irrigação no período, mm; e

D = lâmina de água drenada no período, mm.

2.3. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis freáticos constantes, estabelecidos nos minilísímetros, iguais a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade (M15 , M20 , M25 e M30), com quatro repetições.

2.4. Condução do experimento

O trabalho foi desenvolvido durante o período compreendido entre julho e dezembro de 2005. Dentro e ao redor dos minilísímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado e dos lisímetros de drenagem foi cultivada com grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge). Os minilísímetros de lençol freático constante foram abastecidos com solução nutritiva inicial, descrita no Quadro 5, até atingir os níveis freáticos estabelecidos, sendo o reabastecimento feito com a solução nutritiva descrita no Quadro 6. Tanto a solução nutritiva inicial quanto a de reabastecimento foram formuladas de acordo com Martinez e Silva (2004), Silva (2004) e Ruiz (1997).

O pH e a condutividade elétrica da solução nutritiva de cada minilísímetro com lençol freático constante foram medidos em três profundidades (no fundo, na altura mediana e próximo à superfície do lençol freático), duas vezes por semana, ao longo da pesquisa. O pH foi mantido próximo de 7 com uso de ácido clorídrico 10%, para evitar a alcalinização do substrato. A condutividade elétrica da solução no interior dos minilísímetros foi mantida entre 630 e 1.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, ajustando-se as concentrações dos macros e micronutrientes para evitar deficiência de nutrientes na cultura.

A vegetação total contida em cada minilísímetro e lisímetro de drenagem foi cortada sempre que atingia 15 cm de altura. Para isso, adaptou-se um suporte de metal a uma tesoura para que o corte fosse feito uniformemente, a 8 cm de altura, sendo realizadas 10 podas durante o período experimental.

A medição da evapotranspiração nos minilísímetros foi feita diretamente no Irrigâmetro[®] modificado, sendo realizada diariamente às nove horas da manhã.

Os elementos climáticos diários foram obtidos na Estação Climatológica Principal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, próximo à área experimental, em Viçosa, MG.

Quadro 5 - Fontes de nutrientes utilizadas para compor a solução nutritiva inicial, empregada nos minilísímetros de lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado

Sal	mg L ⁻¹	Sal	g L ⁻¹
H ₃ BO ₃	1,24	Ca(NO ₃) ₂	0,519
CuSO ₄	0,20	KNO ₃	0,202
MnSO ₄	2,53	NH ₄ NO ₃	0,064
(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄	0,09	MgSO ₄	0,246
ZnSO ₄	0,57	NH ₄ H ₂ PO ₄	0,115
FeCl ₃	10,81	CaCO ₃	0,300
Na ₂ EDTA	14,89		

Quadro 6 - Conjuntos de fontes de nutrientes (g L⁻¹) utilizados para compor a solução nutritiva empregada no reabastecimento dos minilísímetros de lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado

Sal	Conjunto 1		Sal	Conjunto 2	
	A	B		A	B
	g L ⁻¹			g L ⁻¹	
H ₃ BO ₃	1,24		Ca(NO ₃) ₂	103,90	
CuSO ₄	0,20		KNO ₃	40,44	
MnSO ₄	2,53		NH ₄ NO ₃	12,80	
(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄	0,09		MgSO ₄		49,20
ZnSO ₄	0,57		NH ₄ H ₂ PO ₄		23,00
FeCl ₃		10,81			
Na ₂ EDTA		14,89			

Durante a condução do experimento houve presença de formigas e lagartas (*Spodoptera* spp.), as quais foram controlados com aplicações de deltametrina e clorpirifós etil. Semanalmente foi feita a limpeza manual do gramado dentro e fora dos dispositivos lisimétricos, para controle de plantas invasoras, especialmente *Cyperus* spp.

2.5. Avaliação

As determinações da evapotranspiração de referência (ET_o) foram obtidas com uso dos métodos Penman Monteith FAO 56, Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, tanque Classe A, lisímetro de drenagem e minilísímetros.

A metodologia utilizada para a avaliação do desempenho dos métodos estudados foi proposta por Allen et al. (1989) e adotada por Jensen et al. (1990), fundamentada no erro-padrão da estimativa (EPE), sendo considerado o método Penman-Monteith FAO 56 como padrão.

O EPE é dado pela seguinte expressão:

$$EPE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(2)

em que:

EPE = erro-padrão da estimativa, mm d⁻¹;

y = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d⁻¹;

\hat{y} = evapotranspiração de referência estimada por cada método utilizado, mm d⁻¹; e

n = número de observações.

A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita com base nos valores do erro-padrão da estimativa (EPE), do índice de concordância “d”, do coeficiente de determinação (r²) e do coeficiente (a) e (b) das respectivas regressões lineares. A melhor alternativa foi aquela que apresentou menor EPE, maior índice “d” e maior r². A precisão é dada pelo coeficiente de determinação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à reta, ou seja, o erro aleatório. A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados.

Matematicamente, a exatidão é dada pelo índice de concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985). A faixa de valores do índice d varia de zero, para completa dispersão entre os valores e 1 para perfeita concordância .

O índice é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left[(|P_i - O_i|) + (|O_i - \bar{O}|) \right]^2} \quad (3)$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste;

O_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d⁻¹;

P_i = evapotranspiração de referência obtida pelos demais métodos, mm d⁻¹; e

\bar{O} = média dos valores de ETo obtida pelo método-padrão, mm d⁻¹.

A análise foi feita com dados diários e médios de 3, 5, 7 e 10 dias da ETo, durante um período de 156 dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 7 está apresentada a classificação dos métodos avaliados de acordo com seu desempenho, os coeficientes a e b da regressão linear, do erro-padrão da estimativa (EPE), do índice de concordância (d) e do coeficiente de determinação (r^2), para os valores diários ETo.

No Quadro 7, verifica-se que os valores de EPE, com base em valores diários de ETo, variaram de 0,383 a 1,360 mm d⁻¹. O menor valor de EPE ocorreu para o método Penman modificado e o maior valor, para o método M15. O erro-padrão da estimativa (EPE) representa uma variação média dos valores de evapotranspiração de referência estimados pelo método considerado em relação aos valores obtidos pelo método Penman-Monteith FAO 56.

Quadro 7 - Classificação dos métodos avaliados de acordo com o seu desempenho, os coeficientes (a) e (b) da regressão linear, erro-padrão de estimativa (EPE), índice de concordância (d) e o coeficiente de determinação (r^2), para valores diários de ETo

Método	Valores Diários					
	Classificação	a	b	EPE	d	r^2
Penman modificado	1	-0,831	1,315	0,383	0,916	0,973
Radiação	2	0,000	1,114	0,553	0,857	0,910
Hargreaves-Samani	6	0,918	0,997	1,027	0,683	0,810
Lisímetro drenagem	5	0,718	0,650	0,917	0,726	0,386
Tanque Classe A	3	0,000	0,861	0,723	0,787	0,950
Minilímetro M15*	9	1,144	0,955	1,360	0,597	0,522
Minilímetro M20*	8	1,038	0,909	1,159	0,640	0,526
Minilímetro M25*	7	1,032	0,862	1,069	0,663	0,502
Minilímetro M30*	4	0,702	0,889	0,898	0,707	0,543

* M15, M20, M25 e M30: lençol freático a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade.

A ordem de classificação dos métodos de determinação da ETo foi feita com base nos valores de EPE, conforme descrito por Allen et al. (1998). Sendo assim, o método Penman modificado o que melhor estimou a ETo diária seguido do método da Radiação.

O método Penman modificado apresentou o maior valor para o índice “d” (0,916), confirmando melhor concordância com os valores de ETo medidos pelo método-padrão, Penman-Monteith FAO 56. Os métodos da Radiação, tanque Classe A, lisímetro de drenagem e o minilímetro M30 apresentaram um índice “d” de 0,857;

0,787; 0,726; e 0,707, respectivamente. Já os métodos Hargreaves-Samani, M25, M20, M15 apresentaram os mais baixos valores de índice “d” de 0,683; 0,663; 0,640 e 0,597, respectivamente.

Os altos valores de coeficientes de determinação encontrados nos métodos Penman modificado e Radiação indicaram um bom ajuste entre os valores diários da evapotranspiração de referência estimados com esses métodos e os valores estimados pelo método Penman-Monteith FAO 56. Os menores valores do coeficiente de determinação apresentados nos demais métodos estudados podem ser explicados pela pouca sensibilidade desses métodos para obtenção de valores diários de ETo.

Na Figura 2 são apresentados os valores diários de ETo obtidos pelos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilísímetros, para as quatro profundidades freáticas estudadas, comparativamente aos valores diários de ETo obtidos pelo método Penman-Monteith FAO 56.

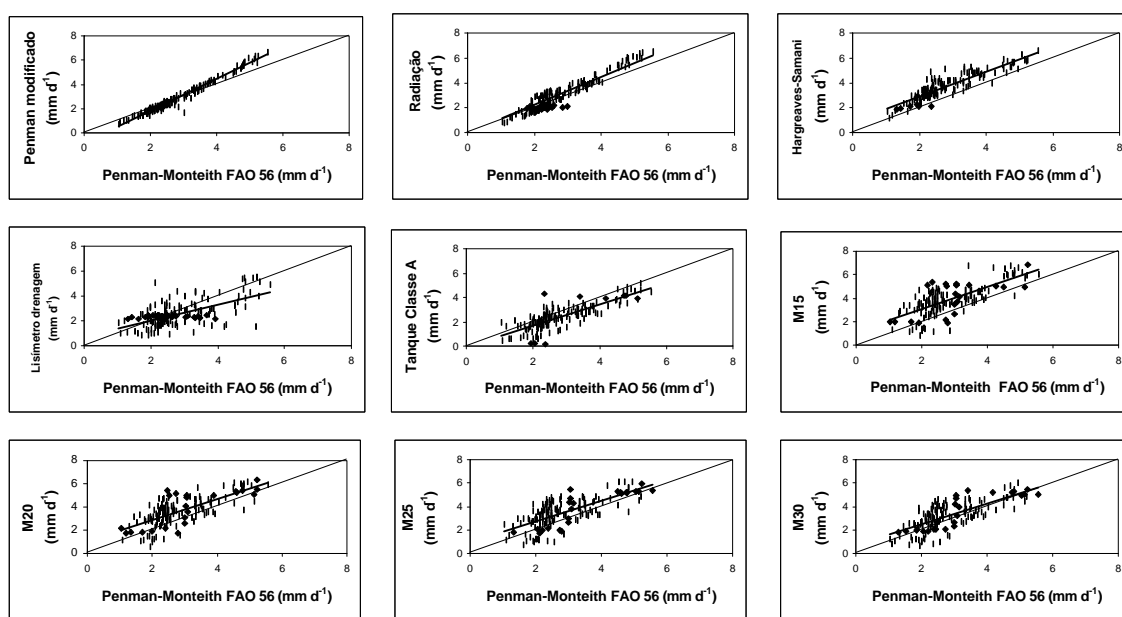


Figura 2 - Valores diários de ETo obtidos pelos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilísímetros, nas quatro profundidades freáticas estudadas, comparativamente aos valores diários de ETo obtidos pelo método Penman-Monteith FAO 56.

Verificam-se, na Figura 2, as melhores concordâncias entre os valores da evapotranspiração estimada pelos métodos Penman modificado e Radiação. A linha representativa das equações dessas regressões, em relação ao método Penman-Monteith FAO 56, foram as que mais se aproximaram da respectiva linha 1:1; entretanto, esses

métodos superestimaram a evapotranspiração de referência, principalmente para os maiores valores de evapotranspiração de referência e subestimaram para os menores valores de ETo. Esse fato pode ser explicado, no caso do método Penman modificado, pelo empirismo na função do vento, a qual originalmente foi desenvolvida para grama nas condições da Inglaterra, e no caso do método Radiação pelo fator de ponderação, que representa as condições do vento e umidade que podem superestimar os valores da evapotranspiração (GARCIA et al, 2004; RANA e KATERJI, 2000; SEDIYAMA, 1996; CUENCA e NICHOLSON, 1982), manifestando a dificuldade da utilização desses métodos e destacando a importância da necessidade da calibração para cada localidade.

Na Figura 2, nota-se a superestimativa da evapotranspiração de referência determinada pelo método Hargreaves-Samani, certamente em decorrência do fato de esse método ser baseado somente na temperatura do ar. Além disso, esse método foi desenvolvido para condições áridas. Resultados semelhantes foram obtidos por Gavilán et al. (2005) na região sul da Espanha. Sentelhas e Camargo (1996), em três locais do Estado de São Paulo, encontraram superestimativas de ETo pelo método de Hargreaves-Samani em relação aos valores estimados por Penman-Monteith FAO 56.

No caso dos minilísímetros, observou-se que, em todos os níveis freáticos constantes estudados, a tendência foi superestimar a ETo em relação aos valores obtidos pelo método-padrão. Contudo, o M30 foi o mais preciso e exato em relação ao M15, M20 e M25, além de superar o desempenho dos métodos lisímetro de drenagem e Hargreaves-Samani, sendo superado seu desempenho ligeiramente pelo tanque Classe A.

Na Figura 2, as linhas de tendência da regressão dos métodos tanque Classe A e lisímetro de drenagem ilustram uma subestimativa da evapotranspiração. Esses resultados estão coerentes com os descritos por vários autores (AMORIM, 1998; MAÑAS et al., 1993; SEDIYAMA, 1990; DOORENBOS e PRUITT, 1977), os quais não recomendam o uso do lisímetro de drenagem e tanque Classe A para medições diárias de ETo, devido à sua pouca sensibilidade para determinações de evapotranspiração em períodos curtos de tempo.

No Quadro 8 está apresentada a classificação dos métodos avaliados de acordo com seu desempenho, os coeficientes a e b da regressão linear, o erro-padrão da estimativa (EPE), o índice de concordância (d) e o coeficiente de determinação (r^2), nos períodos de tempo de 3, 5, 7 e 10 dias.

Quadro 8 - Classificação dos métodos avaliados de acordo com o seu desempenho, os coeficientes (a) e (b) da regressão linear, erro-padrão de estimativa (EPE), índice de concordância (d) e o coeficiente de determinação (r^2), nos períodos de tempo de 3, 5, 7 e 10 dias

Períodos de 3 Dias						
Método	Classificação	a	b	EPE	d	r^2
mm d ⁻¹						
Penman modificado	1	0,000	1,048	0,292	0,932	0,993
Radiação	2	0,000	1,104	0,461	0,865	0,989
Hargreaves-Samani	7	0,000	1,319	1,011	0,660	0,992
Lisímetro drenagem	4	0,000	0,909	0,648	0,774	0,954
Tanque Classe A	3	0,000	0,868	0,534	0,825	0,984
Minilísímetro M15*	9	0,000	1,334	1,287	0,580	0,950
Minilísímetro M20*	8	0,000	1,249	1,092	0,621	0,955
Minilísímetro M25*	6	0,000	1,201	0,984	0,643	0,954
Minilísímetro M30*	5	0,000	1,123	0,795	0,695	0,957
Períodos de 5 Dias						
Penman modificado	1	0,000	1,045	0,274	0,929	0,994
Radiação	2	0,000	1,102	0,439	0,857	0,990
Hargreaves-Samani	7	0,000	1,332	1,030	0,596	0,994
Lisímetro drenagem	4	0,000	0,917	0,565	0,770	0,966
Tanque Classe A	3	0,000	0,873	0,464	0,828	0,988
Minilísímetro M15*	9	0,000	1,337	1,270	0,551	0,962
Minilísímetro M20*	8	0,000	1,254	1,078	0,591	0,958
Minilísímetro M25*	6	0,000	1,206	0,975	0,616	0,956
Minilísímetro M30*	5	0,000	1,127	0,767	0,674	0,961
Períodos de 7 Dias						
Penman modificado	1	0,000	1,042	0,253	0,933	0,995
Radiação	2	0,000	1,090	0,434	0,853	0,989
Hargreaves-Samani	7	0,000	1,334	1,025	0,499	0,996
Lisímetro drenagem	4	0,000	0,920	0,475	0,620	0,977
Tanque Classe A	3	0,000	0,869	0,450	0,824	0,992
Minilísímetro M15*	9	0,000	1,334	1,254	0,553	0,964
Minilísímetro M20*	8	0,000	1,250	1,058	0,592	0,960
Minilísímetro M25*	6	0,000	1,201	0,958	0,615	0,958
Minilísímetro M30*	5	0,000	1,123	0,753	0,673	0,962
Períodos de 10 Dias						
Penman modificado	1	0,000	1,040	0,245	0,932	0,995
Radiação	2	0,000	1,097	0,395	0,862	0,993
Hargreaves-Samani	7	0,000	1,337	1,034	0,581	0,996
Lisímetro drenagem	3	0,000	0,912	0,419	0,830	0,985
Tanque Classe A	4	0,000	0,867	0,446	0,816	0,993
Minilísímetro M15*	9	0,000	1,342	1,278	0,528	0,965
Minilísímetro M20*	8	0,000	1,257	1,078	0,570	0,961
Minilísímetro M25*	6	0,000	1,211	0,971	0,594	0,960
Minilísímetro M30*	5	0,000	1,128	0,747	0,660	0,965

* M15, M20, M25 e M30: lençol freático a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade.

A classificação dos métodos de determinação da ETo nos períodos de 3, 5, 7 e 10 dias, em geral, foi a mesma observada nos valores diários, tendo o método Penman

modificado apresentado o melhor desempenho para estimar a ETo, comparativamente ao método-padrão. Isso pode ser explicado pelo fato de esses dois métodos utilizarem a mesma base física, combinando os termos energético e aerodinâmico. O segundo melhor método foi da Radiação, o qual está fundamentado no termo energético, não levando em consideração as condições do vento e da umidade do ar. Jensen et al. (1990) recomendaram o uso do método Penman e da radiação para determinação diária e quinidial da ETo, respectivamente.

Pelo Quadro 8, verificam-se diminuição progressiva dos valores de erro-padrão da estimativa e aumento do coeficiente de determinação quando o período de observação variou de três a sete dias para o método tanque Classe A. Isso era esperado por causa da redução das flutuações diárias que permite uma melhoria nesses índices estatísticos quando se aumenta de tempo. Segundo Jensen et al. (1990), o método do tanque Classe A é recomendado para melhor ajuste com dados médios de cinco dias, sendo que sua aplicação em períodos de tempo diferentes pode reduzir a sua precisão e exatidão.

No Quadro 8, pode-se verificar que o desempenho do lisímetro de drenagem foi melhorando com o agrupamento dos valores de ETo em períodos maiores, notadamente no período de 10 dias, quando apresentou a terceira melhor colocação. Isso pode ser explicado pela superação da inércia apresentada por esses dispositivos em relação à sua drenagem, que ocorre quando a ETo é medida em períodos menores. Silva (1996) e Mañas e Valero (1993) recomendaram o uso do lisímetro de drenagem para a determinação da ETo em períodos iguais ou superiores a sete dias.

No Quadro 8, pode-se notar que, durante os períodos de 3, 5, 7 e 10 dias, os minilísímetros e o método Hargreaves-Samani foram os que apresentaram os mais altos valores de EPE e os mais baixos valores do índice “d” e do coeficiente de determinação. No entanto, dentre eles destaca-se o M30, que teve a melhor precisão e exatidão.

No caso dos M15, M20 e M25, a superestimativa da ETo em relação ao método padrão pode ser explicada pelas condições de maior exposição da grama-batatais à radiação e, principalmente, ao vento, visto que a superfície da grama ficou posicionada a 75 cm de altura. Isso evidencia que a bordadura oferecida pelo cilindro externo do minilísímetro, desempenhando o papel de área-tampão, foi insuficiente para manter um microambiente que pudesse evitar ou minimizar o efeito do vento e da radiação. No entanto, no M30, o efeito buquê, da radiação e principalmente o efeito varal foram

notadamente amenizados, possivelmente, por uma menor disponibilidade de água no perfil do substrato devido ao fato de o plano freático estar a maior profundidade.

Segundo Mañas e Valero (1993) e Allen et al. (1991), a altura da grama na área efetiva dos lisímetros e na área circunvizinha deve ser homogênea, para evitar diferenças na evapotranspiração.

As diferenças em crescimento das culturas no interior dos lisímetros em relação à área externa, especialmente quando as plantas crescem mais no interior, provocam uma perturbação no movimento horizontal do ar e aumentam o grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura, resultando em maior transpiração da vegetação. A interceptação da radiação solar incidente aumenta numa proporção que pode chegar a 40% (SEDIYAMA, 1996).

No caso do método Hargreaves-Samani, a superestimativa da ETo indicou que ele não se adapta às condições de Viçosa. O baixo desempenho está em desacordo com a sugestão de Allen et al. (1993), que recomendaram a utilização do método Hargreaves-Samani na estimativa da evapotranspiração com dados médios de sete dias.

Nas Figuras 3 a 6, apresentam-se os gráficos resultantes da regressão linear, passando pela origem, para os valores médios de ETo de 3, 5, 7 e 10 dias, respectivamente. Verificaram-se novamente as melhores concordâncias entre os valores da evapotranspiração estimados pelos métodos Penman modificado e Radiação. As retas representativas das equações de regressão para esses dois métodos foram as que mais se aproximaram da linha 1:1, observando-se menor dispersão em torno da linha de tendência, devido à suavização no comportamento das variáveis meteorológicas promovidas pelo uso da média; no entanto, ainda se verifica-se ligeira tendência de esses modelos superestimarem a ETo para maiores valores de evapotranspiração.

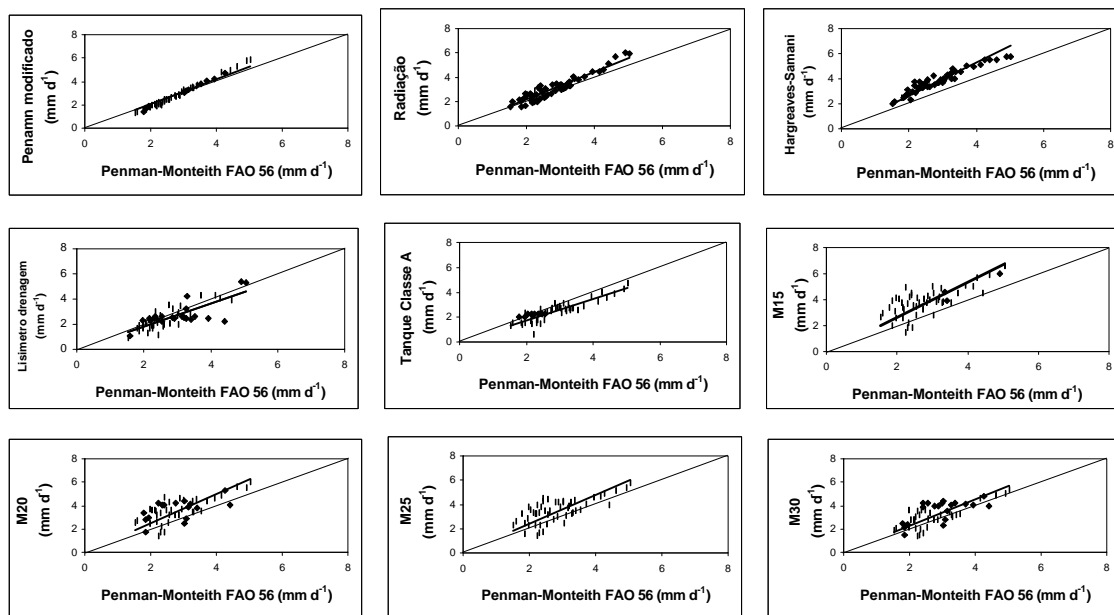


Figura 3 - Relações entre ETo determinada pelo método Penman Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves e Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilísímetros com lençol freático constantes nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de três dias.

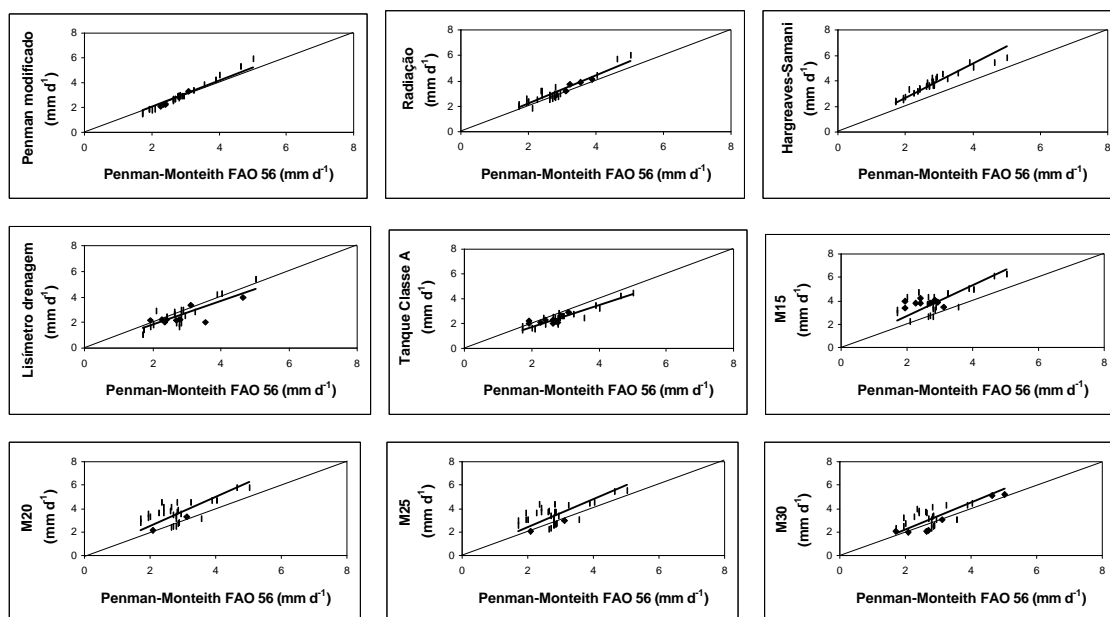


Figura 4 - Relações entre ETo determinada pelo método Penman Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves e Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilísímetros com lençol freático constantes nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de cinco dias.

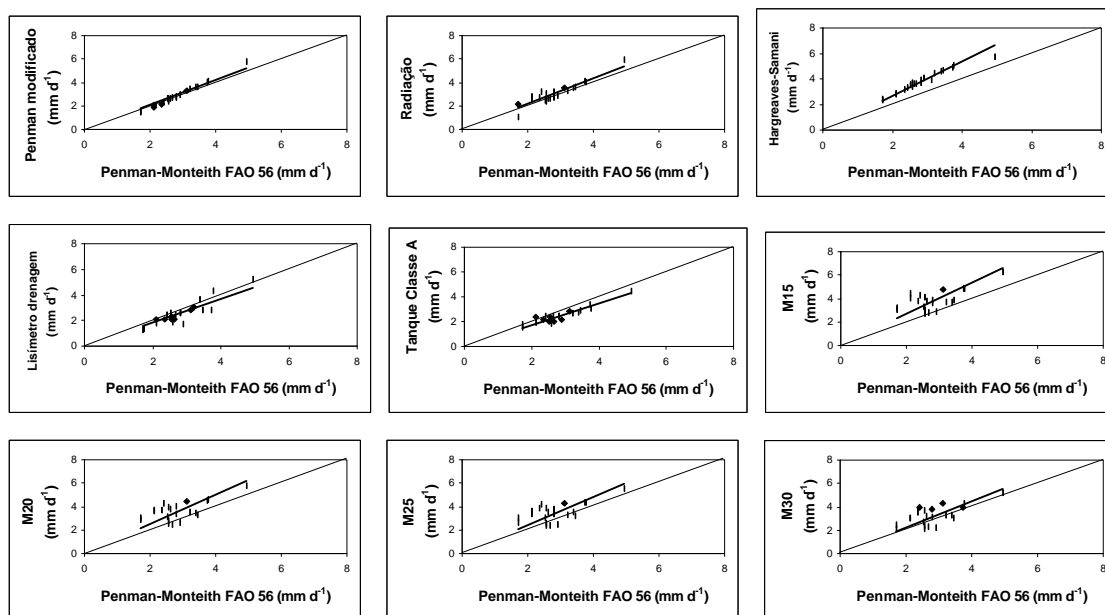


FIGURA 5 - Relações entre ET_0 determinada pelo método Penman Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves e Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilímetros com lençol freático constantes nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de sete dias.

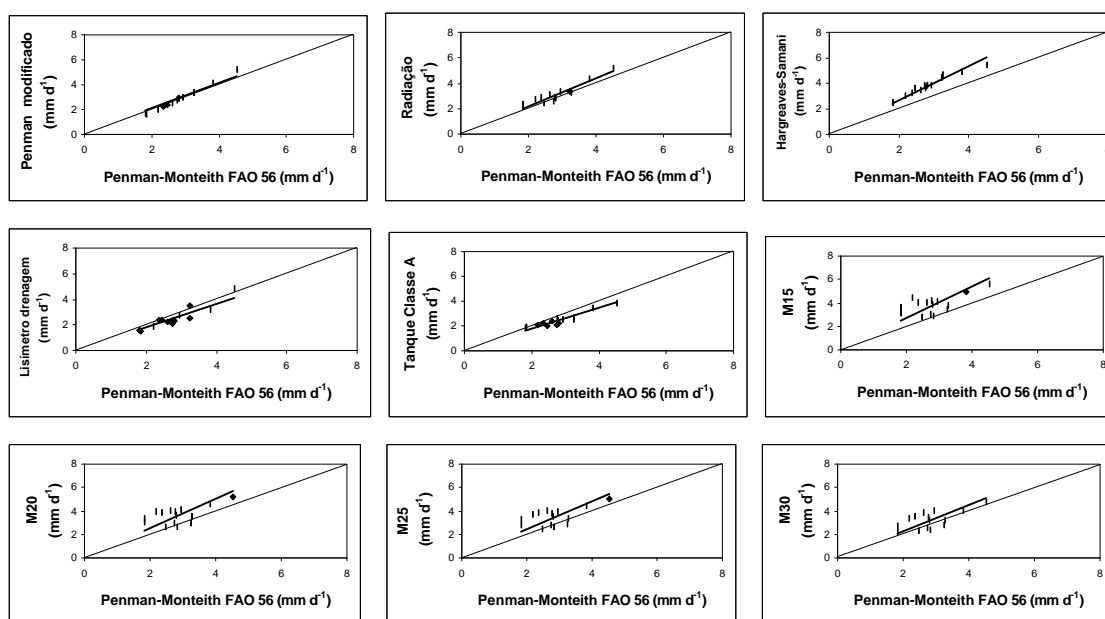


FIGURA 6 - Relações entre ET_0 determinada pelo método Penman Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves e Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilímetros com lençol freático constantes nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de 10 dias.

Na Figuras de 3 a 6, pode-se observar que as linhas de tendência da regressão dos métodos tanque Classe A e lisímetro de drenagem continuaram subestimando a evapotranspiração em relação aos valores estimados pelo método Penman-Monteith FAO 56. Nota-se também, nessas figuras, que o método Hargreaves-Samani e os minilísímetros, de maneira geral, apresentaram tendência de superestimar a ETo nos períodos analisados, tendo por base o método-padrão. Cuenca e Nicholson (1982) afirmaram que o método Hargreaves-Samani não é produto de uma análise teórica e, portanto, representa puramente empirismo. Métodos empíricos geralmente produzem resultados satisfatórios nos locais nos quais foram calibrados, e em locais de clima semelhante, mas não são válidos numa gama ampla de climas.

No Quadro 9, encontram-se a evapotranspiração acumulada no período de estudo para o método Penman-Monteith FAO 56 (444,52 mm), Penman modificado (454,23 mm), Radiação (486,42 mm), Hargreaves-Samani (587,55 mm), lisímetro de drenagem (402,10 mm), tanque Classe A (383,80 mm) e minilísímetros com lençol constante a 15, 20, 25 e 30 cm em relação à superfície (604,34; 567,43; 545,10; e 505,61 mm), respectivamente.

Observa-se, no Quadro 9, que o tanque Classe A e o lisímetro de drenagem subestimaram os valores de evapotranspiração em 13,7 e 9,5%, respectivamente. Já os métodos Hargreaves-Samani, M15, M20, M25, M30, Radiação e Penman modificado superestimaram os valores de evapotranspiração em 32,2%, 36,0%, 27,7%, 22,6%, 13,7%, 9,4% e 2,2%, respectivamente.

Quadro 9 – Valores de evapotranspiração acumulada, medidos e estimados, durante o período experimental

Método	ET média mm d ⁻¹	ET acumulada mm	Variação Porcentual da ETo
Penman-Monteith FAO 56	2,83	444,52	-
Penman modificado	2,89	454,23	2,2
Radiação	3,10	486,42	9,4
Hargreaves-Samani	3,74	587,55	32,2
Lisímetro de drenagem	2,56	402,10	-9,5
Tanque Classe A	2,46	383,80	-13,7
Minilísímetro M15*	3,85	604,34	36,0
Minilísímetro M20*	3,61	567,43	27,7
Minilísímetro M25*	3,47	545,10	22,6
Minilísímetro M30*	3,22	505,61	13,7

* M15, M20, M25 e M30: lençol freático a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade.

O desempenho dos milisímetros observado neste trabalho está de acordo com Allen e Fischer (1990), que encontraram uma superestimativa de 45% da ETo medida

em dois lisímetros de pesagem em relação ao método Penman-Monteith, a qual foi atribuído ao fato de a grama estar 45 cm mais alta em comparação com a altura da cultura hipotética (10 cm). Aboukhaled et al. (1986) relataram aumentos na ordem de 10% a 30% da evapotranspiração da grama mantida 7 a 15 cm mais alta que a normalmente utilizada (10 cm), atribuindo esses resultados principalmente ao efeito varal e à maior incidência da radiação solar sobre os lisímetros.

Dentre os minilísimetros, destaca-se o M30 por apresentar menor superestimativa da ETo, observando-se, também, pequena diferença porcentual em relação ao método da Radiação.

Na Figura 7 está apresentada a relação entre a ET acumulada e a profundidade freática, nos minilísimetros. Observa-se, nessa figura, uma diminuição da evapotranspiração nos minilísimetros à medida que aumenta a profundidade do lençol freático, sendo o M30 o que mais se aproximou da ETo determinada pelo método Penman-Monteith FAO 56. Segundo Grassi (1993), ao aumentar a profundidade do plano freático, diminui a taxa de movimento ascendente da água, sendo menor seu aporte ao processo de evapotranspiração. Assim, os maiores valores de evapotranspiração para as menores profundidades freáticas podem ser devidos ao elevado teor de água no sistema substrato-planta nos minilísimetros, principalmente no nível freático a 15 cm de profundidade.

Dias-Espejo et al. (2005), avaliando minilísimetros de área exposta igual a 0,062 m² e solo com níveis de umidade diferentes, submetidos a condições de advecção, observaram uma evapotranspiração ligeiramente superior nos minilísimetros com maior teor de umidade, devido a um incremento no consumo de calor latente ocasionado pela advecção.

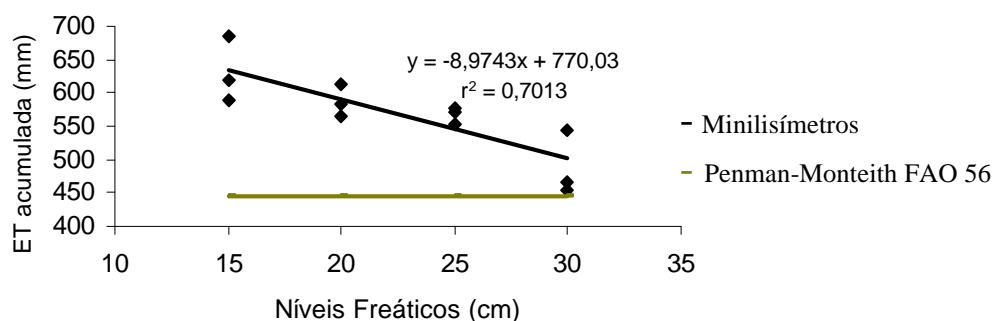


Figura 7 – Relação entre a ET acumulada e a profundidade freática nos minilísimetros.

Diante dos resultados obtidos, há necessidade de se conduzirem estudos nos minilísímetros com níveis freáticos mais profundos, com a finalidade de obter valores mais precisos e exatos em relação ao método-padrão.

4. CONCLUSÕES

- Os métodos M30, Penman modificado, lisímetro de drenagem e tanque Classe A apresentaram bom desempenho.
- Os métodos com os piores desempenhos foram os minilísímetros M15, M20, M25 e Hargreaves-Samani, não sendo recomendado seu uso para a estimativa de ETo nas condições semelhantes às deste estudo, por apresentarem menor exatidão e menor precisão.
- No método dos minilísímetros, verificou-se maior consumo de água no nível freático de 15 cm de profundidade; esse consumo decresceu com as maiores profundidades do lençol freático.
- A bordadura utilizada nos minilísímetros como área-tampão não foi suficiente para evitar o efeito varal, ocasionando maior consumo de água comparativamente ao verificado no lisímetro de drenagem.

5. REFERÊNCIAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Los lisímetros**. Roma: FAO, 1986. 59 p. (FAO, Paper 39).

ANDRADE, L. M. **Efeito de diferentes profundidades freáticas sobre a evapotranspiração e sobre a produção e os componentes da produção do milho-doce (Zea mays L.)**. Viçosa, MG: UFV/DEA, 1991. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ALLEN, R. G. **Reference evapotranspiration calculation software**. For (S.L.): FAO and ASCE standardized equations, Version 2.0, University of Idaho. 2001. 82 p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 310 p. (Irrigation and drainage Paper, 56).

ALLEN, R. G.; FISCHER, D. F. "Low-cost electronic weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, Davis, v. 33, n. 6, p. 1823-1833, 1990.

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. Reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 5, p. 758-772, 1991.

AMORIM, M. C. de. **Avaliação da eficácia do lisímetro de lençol freático constante, do tanque classe “A” e do modelo de Penman-Monteith (FAO) para estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀)**. Viçosa, MG: UFV/DEA, 1998. 56 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A; MANTOVANI, E. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2005. 611 p.

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

CUENCA, R. H.; NICHOLSON, M. T. Application of Penman equation wind function. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Oregon, Div. ASCE, v. 108, p. 13-23, 1982.

SILVA, L. D. **Evapotranspiração do capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.) e Grama-Batatais (*paspalum notatum* Flugge) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem**. Piracicaba, São Paulo: ESALQ/USP, Impr. Univ., 2002. 109 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 24).

FACCIOLI, G. G. **Determinação da evapotranspiração de referencia e da cultura da alface em condições de casa de vegetação, em Viçosa, MG**. Viçosa, Minas Gerais: UFV/DEA, Impr. Univ., 1998. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

GARCIA, M.; RAES, D.; ALLEN, R.; HERBAS, C. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). **Agricultural and Forest Meteorology**, La Paz, v. 125, p. 67-82, 2004.

GAVILÁN, P.; LORITE, I. J.; TORNERO, J.; BERENGENA, J. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating referente ET in a semiarid environment. **Agricultural Water Management**. Córdoba; Article in Press, 2005. p. 25.

GRASSI, J. **Drenaje de tierras agrícolas**. Mérida, Venezuela: Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras, 1991. 317 p.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter design and use for evapotranspiração. In: **Lysimeter for evapotranspiration and environment measurements**. New York: ASCE, 1991. p. 1-19.

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

- MAÑAS, F. M.; VALERO, J. A. **Agronomía del riego**. Madrid, España: La Universidad de Castilla-La Mancha; Impr. Ediciones Mundi-Prensa, 1992. 732 p.
- MARTINEZ, H. E.; DA SILVA, J. B. **Introdução ao cultivo hidropônico de plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2004. 111 p.
- MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Crop coefficient for irrigated beans derived using three reference evaporation methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, Campinas, article in press, 2005. p. 1-9.
- MENDONÇA, J. C.; SOUZA, E. F. de; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região norte fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agroclimatologia. Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba, RS: Agropecuária Ltda., 2002. 478 p.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba, SP: FEALQ, 1997. 183 p.
- PEREIRA, F. A. **Efeitos de diferentes profundidades de lençol freático sobre a evapotranspiração, o coeficiente de cultura, a produção e os componentes de produção da alface (*lactuca sativa* L.)**. Viçosa, MG: UFV/DEA, 1994. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, Bari, v. 13. p. 125-153, 2000.
- RUIZ, A. H. Relações molares de macronutrientes em tecidos vegetais como base para a formulação de soluções nutritivas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 44, n. 255, p. 533-546, 1997.
- SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: Histórico, evolução e análises crítica. **Revista Brasileira de Agroclimatologia**, Santa Maria, v. 4. n. 1, p. I-XII, 1996.
- SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração: necessidade de água para as plantas cultivadas**. Brasília, DF: ABEAS, 1996. 173 p.
- SEDIYAMA, G. C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1990. 143 p.
- SILVA, D. F. **Análises quantitativa e qualitativa do crescimento e desenvolvimento da grama-batatais e grama-esmeralda em diferentes lâminas de irrigação**. Viçosa, MG: UFV/DEA, 2004. 48 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of crop water requirements.** Rome: FAO, 1991. 45 p.

SOUZA, J. L. **Evapotranspiração e coeficiente de cultura do algodoeiro (*G. hirsutum* L.) submetido a diferentes profundidades do lençol freático.** São Paulo: ESALQ/USP, Impr. Univ., 1992. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluation and comparasion of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

LISÍMETRO COM LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE OPERANDO COM IRRIGÂMETRO[®] MODIFICADO PARA MEDIDA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Franklin José Valbuena Materán, Rubens Alves de Oliveira, Paulo Roberto Cecon, Gilberto Chohaku Sedyama, Herminia Emilia Prieto Martinez e Hugo Alberto Ruiz.

Os autores são: **Franklin José Valbuena Materán**, Candidato a *Doctor Scientiae* em Engenharia Agrícola, do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa Minas Gerais (MG), Brasil, bolsista da “La Universidad Del Zulia”; **Rubens Alves de Oliveira**, Professor Adjunto, DEA/UFV, MG, Brasil; **Paulo Roberto Cecon**, Professor Adjunto, DI/UFV, MG, Brasil; **Gilberto Chohaku Sedyama**, Professor Titular, DEA/UFV, MG, Brasil; **Herminia Emilia Prieto Martinez**, Professor Adjunto, DFT/UFV, MG, Brasil e **Hugo Alberto Ruiz**, Professor Titular, DS/UFV, MG, Brasil. **Autor correspondente:** Franklin José Valbuena Materán, Dep. de Engenharia Agrícola, Av. P. H. Rolfs, s/n, 36570-000 Viçosa, MG, Brasil. Tel.: 55-31-3899-2732; e-mail: franklinvalb@yahoo.com.

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro[®] pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, no período de julho a dezembro de 2005. Instalaram-se 12 lisímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado vegetados com grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge), em delineamento inteiramente casualizado. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis freáticos (15, 20, 25 e 30 cm) estabelecidos nos lisímetros (L15, L20, L25 e L30), com três repetições. Objetivou-se, no presente trabalho, medir a evapotranspiração de referência (E_{To}), utilizando os lisímetros com nível freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado, bem como avaliar o efeito dos níveis freáticos no seu desempenho em relação aos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, tanque Classe A e o lisímetro de drenagem, sendo considerado como padrão o método Penman-Monteith FAO 56. Os dados foram coletados todos os dias e analisados estatisticamente. Com base nos resultados, verificou-se que os métodos L15, L20, Radiação, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e lisímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado apresentaram bom desempenho na determinação da E_{To}. O bom resultado obtido com o lisímetro de lençol freático constante nessas duas profundidades deveu-se à alta sensibilidade de leitura do Irrigâmetro[®] modificado e à inexistência de resistência mecânica ao movimento da solução nutritiva. Nos métodos dos lisímetros, verificou-se maior consumo de água no nível freático de 15 cm de profundidade; esse consumo decresceu com maiores profundidades do lençol freático. O método de pior desempenho foi Hargreaves-Samani, não sendo recomendado seu uso para a estimativa

de ETo, nas condições semelhantes às deste estudo, por apresentar menor exatidão e menor precisão.

Palavras-chave: Evapotranspiração, grama-batatais, Irrigâmetro[®], lisímetro.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento e a quantificação do processo de evapotranspiração definem a quantidade de água necessária para as culturas, sendo, por isso, um parâmetro fundamental para o planejamento e manejo da irrigação (SEDIYAMA, 1997). A determinação das necessidades hídricas das culturas é usualmente estimada com base nos valores da evapotranspiração de referência (ETo).

A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada de uma superfície com vegetação durante determinado período. Pode ser expressa em valores totais, médios, diários e horários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água em período predeterminado (BERNARDO et al., 2006).

Doorenbos e Pruitt (1977) definiram ETo como a taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa de grama de 8 a 15 cm de altura, uniforme, em ativo crescimento, sombreando completamente o solo sem limitação de água.

Smith (1991) propôs a adoção de uma definição padronizada para a evapotranspiração de referência. A ETo será aquela que ocorre em uma cultura hipotética, apresentando as seguintes características: altura de 12 cm, resistência de dossel de 69 s m^{-1} e coeficiente de reflexão (albedo) de 0,23, o que representaria a evapotranspiração de uma gramínea verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem estresse hídrico.

A Organização das Nações para a Alimentação e Agricultura (FAO) propõe vários métodos de estimativa de evapotranspiração de referência (ETo): o de Penman-Monteith FAO 56, o de Penman modificado, o da Radiação e o tanque Classe A, entre outros. No entanto, em locais com pouca disponibilidade de dados climáticos a FAO recomenda o método de Hargreaves-Samani, o qual é baseado em dados de temperaturas máxima e mínima (ALLEN et al., 1998).

Segundo Allen et al. (1998), o método de Penman-Monteith inclui parâmetros relacionados à troca de energia e ao correspondente fluxo do calor latente (evapotranspiração) na vegetação uniforme e extensa. A maioria dos parâmetros pode ser calculada a partir de dados meteorológicos e a equação, utilizada para o cálculo

direto da evapotranspiração de qualquer cultura, conforme as resistências de superfície e aerodinâmicas da cultura específica.

A equação original de Penman (1948) possui dois termos, a saber: o da energia (radiação) e o aerodinâmico (vento e umidade do ar). O procedimento utilizado por Doorenbos e Pruitt (1977), para a modificação do modelo de Penman, consistiu na substituição da função vento do modelo original pela função vento proposta por esses autores, a qual foi determinada a partir de medidas diretas da ETo e outros elementos do clima, em várias regiões com diferentes tipos climáticos.

O método da Radiação, proposto pela FAO, tem sua origem na equação de Makkink, desenvolvida em 1957, sendo modificada por Doorenbos e Pruitt (1977) e Doorenbos e Kassam (1994), que substituíram os coeficientes a e b da equação original por um parâmetro c, que é função da umidade relativa do ar e da velocidade do vento (PEREIRA et al., 1997).

A estimativa da evapotranspiração também pode ser feita por meio de evaporímetros, os quais podem ser classificados em dois tipos: um em que a superfície da água fica livremente exposta (tanques de evaporação) e o outro em que a evaporação se dá através de uma superfície porosa (atmômetros). Dentro do primeiro tipo, o mais utilizado é o tanque Classe A. Com referência a esse último, Doorenbos e Pruitt (1977) recomendaram o ajuste das leituras de evaporação no tanque Classe A às estimativas da ETo com o emprego dos coeficientes de tanque (Kp).

HArgreaves e Samani (1985) desenvolveram um método para a estimativa da ETo a partir de dados da radiação solar extraterrestre e da diferença entre a temperatura máxima e a mínima média.

Segundo Mantovani (1993), a complexidade do processo da evapotranspiração das culturas exige a utilização de metodologias empíricas para sua estimativa. Isso faz com que, para obter resultados precisos, sejam necessários avaliar e calibrar regionalmente as metodologias disponíveis em cada local. Além do anterior, esses métodos requerem mão-de-obra especializada e a utilização de instrumentos sofisticados, que em muitos casos são limitativos para a maioria dos produtores devido ao seu alto custo.

Uma alternativa que tem sido utilizada para a obtenção da evapotranspiração por meio de medidas diretas são os lisímetros. Segundo Aboukhaled et al. (1986), a palavra lisímetro é derivada do grego *lysis* e significa dissolução ou movimento, e *metron* significa mensurar. Os lisímetros são reservatórios cheios de solo localizados no campo,

com superfície coberta por vegetação, para determinação da evapotranspiração de uma cultura em crescimento ou de uma cultura de referência ou, ainda, com superfície sem vegetação, para determinação da evaporação num solo descoberto. Para Bernardo et al. (2006) e Amorim (1998), o método do lisímetro é o mais preciso e considerado ainda instrumento-padrão para a determinação da evapotranspiração de referência (ET_o).

Segundo Aboukhaled et al. (1977) e Howell et al. (1991), os lisímetros utilizados em pesquisas de evapotranspiração podem ser agrupados em três categorias: (1) não-pesáveis com lençol freático de nível constante; (2) não-pesáveis com drenagem livre; e (3) lisímetros pesáveis, onde a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem.

Os lisímetros de drenagem consistem num tanque instalado no solo que apresenta uma rede de tubulações, permitindo conduzir a água drenada até um recipiente. A evapotranspiração de referência, por eles determinada, deve ser em termos de médias semanais, quinzenais ou mensais (BERNARDO et al., 2006). Já os lisímetros de pesagem são constituídos de uma caixa impermeável sobre a qual é instalada uma célula de carga, cuja finalidade é medir a sua variação de peso, obtendo-se, assim, a medida da evapotranspiração. A maior desvantagem é o alto custo do sistema, limitando seu uso na atividade agrícola e na pesquisa, envolvendo a estimativa da evapotranspiração de referência.

Uma opção economicamente acessível são os lisímetros não-pesáveis com lençol freático constante, em que o nível da água é mantido a determinada profundidade, na qual, devido à evapotranspiração, a água é translocada até a zona radicular, por capilaridade. A descida do nível freático causado por esse deslocamento é automaticamente compensada por um mecanismo flutuador (ABOUKHALED et al., 1986).

Segundo Mañas e Valero (1993) e Aboukhaled et al. (1986), uma limitação importante quanto ao uso de lisímetros está associada aos problemas frequentes com os flutuadores e o desnível dos dispositivos de leitura-alimentação, interferindo diretamente nas medidas de evapotranspiração. Outra limitação mencionada quanto ao uso de lisímetros está associada à presença do nível freático, que não representa as condições da parcela em seu entorno, provocando um crescimento maior da cultura dentro dos lisímetros que, em consequência disso, fica mais exposta à radiação e aos efeitos do vento, superestimando a evapotranspiração em até 10 ou 20%.

De acordo com Amorim (1998), no Brasil tem sido muito utilizado o lisímetro de lençol freático constante com grama em caixas de cimento-amianto, principalmente com grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge) como cultura de referência.

Medeiros et al. (2005), testando os métodos de Penman-Monteith FAO 56 e tanque Classe A e considerando como método-padrão um lisímetro com lençol freático constante mantido a 40 cm em relação à superfície, preenchido com um solo classificado como Latossolo Vermelho e vegetado com grama-batatais, concluíram que o método Penman-Monteith FAO 56 superestimou em 13,4%, e o tanque Classe A subestimou em 1,4% os valores da ETo medidos no lisímetro com lençol freático constante.

Silva (1996), utilizando um lisímetro de Pesagem como método-padrão para avaliar o desempenho dos métodos Penman-Monteith FAO 56, tanque Classe A, lisímetro de drenagem e um lisímetro lençol freático constante mantido a 35 cm de profundidade, num solo Alfisol vegetado com grama-batatais, concluiu que, à exceção do tanque Classe A, que subestimou a ETo em 36%, os demais métodos superestimaram os valores de evapotranspiração em 11,4%, 18% e 11%, respectivamente.

Faccioli (1998), utilizando como método-padrão um lisímetro de nível freático constante mantido a 25 cm em relação à superfície, num solo argiloso cultivado com grama-batatais, para avaliar o desempenho dos métodos Penman-Monteith FAO 56, Penman 63, FAO-Penman corrigido, FAO-Penman, FAO-radiação, FAO-Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani e tanque Classe A, concluiu que todos os métodos estudados superestimaram a ETo.

Os lisímetros com lençol freático constante têm sido mais usados para estudar a evapotranspiração de culturas de interesse comercial. No entanto, o efeito de diferentes níveis freáticos sobre a evapotranspiração de referência não tem sido estudado.

Pereira (1994), estudando o efeito de quatro profundidades freáticas sobre o consumo de água da alface num Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, observou que a evapotranspiração foi maior no tratamento com lençol freático a 25 cm, sendo verificado decréscimo com o aumento da profundidade freática para 35, 45 e 55 cm.

Andrade (1991) constatou maior consumo de água pela cultura do milho-doce num Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, no nível freático de 30 cm de profundidade. Esse consumo decresceu em função das maiores profundidades do lençol freático.

Sousa (1992), estudando o efeito de três profundidades do lençol freático (25, 50 e 75 cm) sobre o consumo hídrico do algodoeiro, num Latossolo Roxo Distrófico, concluiu que houve superestimação da evapotranspiração quando o lençol freático esteve a 25 cm. Entretanto, o desenvolvimento do algodoeiro foi melhor quando o lençol esteve a 75 cm de profundidade.

Os objetivos deste trabalho foram determinar a evapotranspiração de referência (ET_o), utilizando-se os lisímetros com nível freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado, preenchidos com substrato de areia e alimentado com solução nutritiva, bem como estudar o efeito do nível freático de 15, 20, 25 e 30 cm sobre a ET_o e avaliar seu desempenho em relação aos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, tanque Classe A e o lisímetro de drenagem, sendo considerado como padrão o método Penman-Monteith FAO 56.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro[®], pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizada na cidade de Viçosa, MG, com 20° 45' de latitude sul, 42° 45' de longitude oeste e altitude de 651 m. A temperatura média anual de Viçosa é de 19 °C. A umidade relativa do ar é, em média, de 80% e a precipitação média anual, 1.341 mm, com estações seca e chuvosa bem definidas. O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação climática proposta por Köeppen, isto é, subtropical, com inverno seco.

2.1. Descrição do lisímetro com nível freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado

Os lisímetros foram construídos com caixas de cimento-amianto (Figura 1), com as seguintes dimensões: 1,10 m de largura, 1,60 m de comprimento e 0,70 m de profundidade, apresentando uma área interna de 1,6845 m². Na instalação dos lisímetros, as bordas das caixas ficaram 5 cm acima da superfície do solo. No fundo de cada lisímetro foi montada uma rede de distribuição constituída de três tubos de PVC de 20 mm.

Cada lisímetro foi conectado a um Irrigâmetro[®] modificado através de uma tubulação de PVC de 20 mm. O Irrigâmetro[®] modificado foi construído com tubo de alimentação de PVC, com diâmetro de 200 mm e 1 m de altura. O Irrigâmetro[®]

modificado utiliza o princípio de Mariotte, tendo sido usado para manter o nível freático constante no lisímetro, fazendo a reposição da água e fornecendo diretamente o valor da lâmina evapotranspirada. A água deslocada no Irrigâmetro[®] modificado foi quantificada por meio de régua milimétrica, sendo a sensibilidade de leitura igual a 0,01 mm, definida pela relação entre as áreas da seção transversal do tubo de alimentação do Irrigâmetro[®] modificado e da seção transversal do lisímetro.

No preenchimento dos lisímetros foi colocada primeiramente uma camada de brita 0, de 5 cm de altura, seguida de outra camada de brita 1, de 7 cm de altura acima da qual foi colocado um substrato de areia com granulometria entre 0,104 e 1 mm. A análise granulométrica da areia foi realizada no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1- Distribuição granulométrica do substrato de areia.

Granulometria				Massa Específica (g cm ⁻³)	
Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Partículas	Solo
93	4	0	3	2,85	1,50

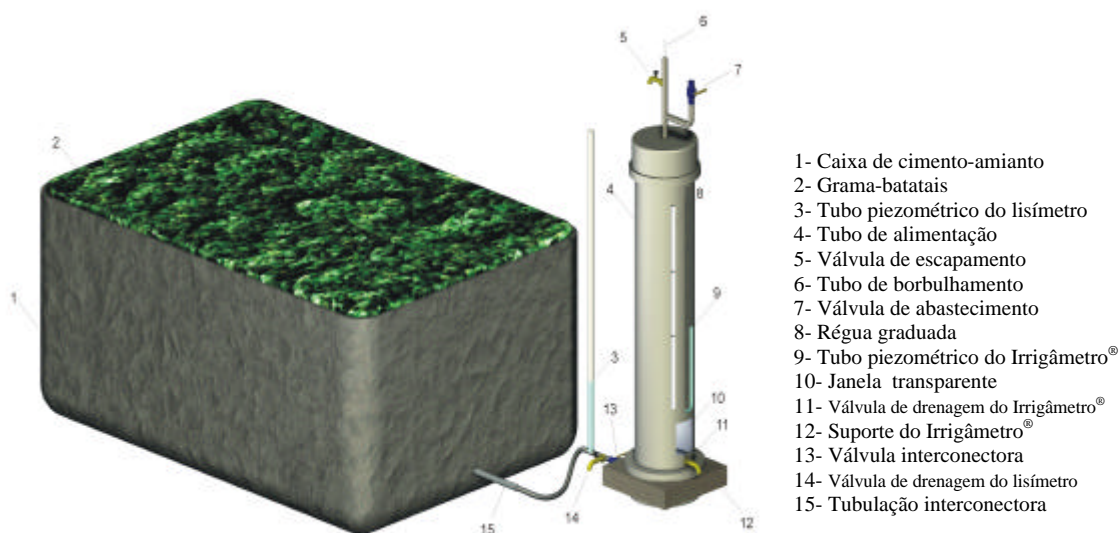


Figura 1 - Partes constituintes do lisímetro com lençol freático constante e do Irrigâmetro[®] modificado.

2.2. Descrição do lisímetro de drenagem

Na área experimental foram instalados três lisímetros de drenagem, construídos com caixas de cimento-amianto, com as seguintes dimensões: 1,10 m de largura, 1,60 m de comprimento e 0,70 m de profundidade, com área interna de 1,6845 m². Na

instalação dos lisímetros, as bordas das caixas ficaram 5 cm acima da superfície do solo. O sistema de drenagem desses lisímetros foi constituído de uma camada de brita zero, com espessura de 5 cm, sobre a qual repousa uma camada de 5 cm de brita 1. No fundo da caixa foi instalada uma rede de drenagem formada por tubos de PVC de 20 mm, com perfurações de 1 mm, conectada a uma estação de coleta da água drenada.

Os lisímetros de drenagem foram preenchidos com material de solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, distribuído em camadas de 10 cm até a espessura total de 70 cm, incluindo as camadas de brita e areia. No início da pesquisa foi feita uma calagem com base no resultado da análise química do solo. A adubação nos lisímetros de drenagem foi feita mensalmente com aplicação de 20 g m⁻² do fertilizante da formulação NPK 10-10-10. As análises granulométrica e química e a curva de retenção de água no solo foram realizadas nos Laboratórios de Rotina e de Física de Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados são apresentados nos Quadros 2, 3 e 4, respectivamente.

Quadro 2 - Resultado da análise física do solo

Granulometria				Massa Específica (g cm ⁻³)	
Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Partículas	Solo
15	8	0	77	2,62	0,99

Quadro 3 - Resultados da análise química do solo

pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al*	SB*	CTC*	MO*	V*
H ₂ O	mg dm ⁻³					cmol _c dm ⁻³			dag kg ⁻¹	%
4,79	1,00	13,00	0,32	0,08	0,59	6,40	0,43	1,02	2,66	6,30

* H+Al = Acidez Total, SB = Soma de Bases Trocáveis, CTC = Capacidade de Troca Catiônica Efetiva, MO = Matéria Orgânica e V = Índice Saturação de Bases.

Quadro 4 - Valores de umidade do solo, em diferentes potencias matriciais

Potencial Matricial (MPa)	-0,01	-0,03	-0,05	-0,10	-0,20	-0,50	-1,50
Umidade do solo (kg kg ⁻¹)	0,429	0,378	0,294	0,286	0,257	0,244	0,239

Os lisímetros de drenagem foram irrigados diariamente, utilizando-se um volume de água suficiente para promover uma pequena drenagem.

Segundo Aboukhaled et al. (1977), a evapotranspiração da cultura pode ser calculada pela seguinte equação:

$$ET_o = P + I - D \quad (1)$$

em que:

- ET_o = evapotranspiração de referência, mm no período;
P = precipitação no período, mm;
I = lâmina de água aplicada na irrigação no período, mm; e
D = lâmina de água drenada no período, mm.

2.3. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis freáticos constante, estabelecidos nos lisímetros, iguais a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade (L15 ,L20 ,L25 e L30), com três repetições.

2.4. Condução do experimento

O trabalho foi desenvolvido no período de julho a dezembro de 2005. Dentro e ao redor dos lisímetros foi cultivada com grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge). Os lisímetros de lençol freático constante foram abastecidos com solução nutritiva inicial, descrita no Quadro 5, até atingir os níveis freáticos estabelecidos. O reabastecimento foi feito com a solução nutritiva descrita no Quadro 6; tanto a solução nutritiva inicial quanto a de reabastecimento foram formuladas de acordo com Martinez e Silva (2004), Silva (2004) e Ruiz (1997). O pH e a condutividade elétrica da solução nutritiva de cada lisímetro operando com Irrigâmetro[®] modificado foram medidos em três profundidades (no fundo, na altura mediana e próximo à superfície do lençol freático) duas vezes por semana, ao longo da pesquisa. O pH foi mantido próximo de 7 com o uso de ácido clorídrico 10% para evitar a alcalinização do substrato. A condutividade elétrica da solução no interior dos lisímetros foi mantida próximo entre 630 e 1.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, ajustando-se as concentrações de macro e micronutrientes da solução nutritiva de reabastecimento para evitar manifestações de deficiência de nutrientes na cultura.

A vegetação total contida em cada lisímetro com lençol freático constante e lisímetro de drenagem foi cortada sempre que atingia 15 cm de altura. Para isso, adaptou-se um suporte de metal a uma tesoura para que o corte fosse feito uniformemente a 8 cm de altura, sendo realizadas 10 podas durante o período experimental.

A medição da evapotranspiração ocorrida nos lisímetros foi feita no Irrigâmetro[®] modificado, sendo realizada diariamente às nove horas da manhã.

Os elementos climáticos diários foram obtidos na Estação Climatológica Principal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, próximo à área experimental, em Viçosa, MG.

Quadro 5 - Fontes de nutrientes utilizadas para compor a solução nutritiva inicial, empregada dos lisímetros de lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado

Sal	mg L ⁻¹	Sal	g L ⁻¹
H ₃ BO ₃	1,24	Ca(NO ₃) ₂	0,519
CuSO ₄	0,20	KNO ₃	0,202
MnSO ₄	2,53	NH ₄ NO ₃	0,064
(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄	0,09	MgSO ₄	0,246
ZnSO ₄	0,57	NH ₄ H ₂ PO ₄	0,115
FeCl ₃	10,81	CaCO ₃	0,300
Na ₂ EDTA	14,89		

Quadro 6 - Conjuntos de fontes de nutrientes (g L⁻¹) utilizados para compor a solução nutritiva empregada no reabastecimento dos lisímetros de lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado

Sal	Conjunto 1		Sal	Conjunto 2	
	A	B		A	B
	g L ⁻¹			g L ⁻¹	
H ₃ BO ₃	1,24		Ca(NO ₃) ₂	103,90	
CuSO ₄	0,20		KNO ₃	40,44	
MnSO ₄	2,53		NH ₄ NO ₃	12,80	
(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄	0,09		MgSO ₄		49,20
ZnSO ₄	0,57		NH ₄ H ₂ PO ₄		23,00
FeCl ₃		10,81			
Na ₂ EDTA		14,89			

Durante a condução do experimento houve presença de lagartas (*Spodoptera* spp.) e formigas, as quais foram controladas com aplicações de deltametrina e clorpirifós etil.

Semanalmente foi feita a limpeza manual do gramado dentro e fora dos dispositivos lisimétricos, para controle de plantas invasoras, especialmente *Cyperus* spp.

2.5. Avaliação

As determinações da evapotranspiração de referência (ET_o) foram obtidas com uso dos métodos de Penman-Monteith FAO 56, Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, tanque Classe A, lisímetro de drenagem e os lisímetros com lençol freáticos constante operando com Irrigâmetro[®] modificado.

A metodologia utilizada para a avaliação do desempenho dos métodos estudados foi proposta por Allen et al. (1989) e adotada por Jensen et al. (1990), fundamentada no erro-padrão da estimativa (EPE), sendo considerado o método Penman-Monteith FAO 56 como padrão.

O EPE é dado pela seguinte expressão:

$$EPE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

em que:

EPE = erro-padrão da estimativa, mm d⁻¹;

y = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d⁻¹;

= evapotranspiração de referência estimada nos método utilizado, mm d⁻¹; e

n = número de observações.

A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita com base nos valores do erro-padrão da estimativa (EPE), do índice de concordância “d”, do coeficiente de determinação (r²) e dos coeficientes (a) e (b) das respectivas regressões lineares. A melhor alternativa foi aquela que apresentou menor EPE, maior índice “d” e maior r². A precisão é dada pelo coeficiente de determinação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à reta, ou seja, o erro aleatório. A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados.

Matematicamente, a exatidão é dada por um índice designado concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (Willmott et al., 1985). A faixa de valores do índice d varia de zero para uma completa dispersão entre os valores e 1 para uma perfeita concordância.

O índice é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left[(|P_i - O_i|) + (|O_i - \bar{O}|) \right]^2} \quad (3)$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste;

O_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d⁻¹;

P_i = evapotranspiração de referência obtida pelos demais métodos, mm d^{-1} ; e
 = média dos valores de E_{To} obtida pelo método-padrão, mm d^{-1} .

A análise foi feita com dados diários e médios de 3, 5, 7 e 10 dias da E_{To} , durante um período de 156 dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 7 está apresentada a classificação dos métodos avaliadas de acordo com seu desempenho, os coeficientes a e b da regressão linear, valores do erro-padrão da estimativa (EPE), do índice de concordância (d) e do coeficientes de determinação (r^2), para os valores diários de E_{To} .

No Quadro 7, verifica-se que os valores de EPE, com base em valores diários de E_{To} , apresentaram variação de 0,383 a 1,027 mm d^{-1} . Observou-se o menor valor para o método Penman modificado e o maior valor, para o método Hargreaves-Samani. O erro-padrão da estimativa (EPE) representa uma variação média dos valores de evapotranspiração de referencia estimados pelo método considerado em relação aos valores obtidos de E_{To} pelo método Penman-Monteith FAO 56.

Quadro 7 - Classificação dos métodos avaliados de acordo com o seu desempenho, os coeficientes (a) e (b) da regressão linear, o erro-padrão de estimativa (EPE), o índice de concordância (d) e o coeficiente de determinação (r^2), para valores diários de E_{To}

Método	Valores Diários					
	Classificação	a	b	EPE	d	r^2
Penman modificado	1	-0,831	1,315	0,383	0,916	0,973
Radiação	2	0,000	1,114	0,553	0,857	0,910
Hargreaves-Samani	9	0,918	0,997	1,027	0,683	0,810
Lisímetro de drenagem	8	0,718	0,650	0,917	0,726	0,386
Tanque Classe A	7	0,000	0,861	0,723	0,787	0,950
Lisímetro L15*	3	0,000	0,886	0,582	0,833	0,969
Lisímetro L20*	4	0,000	0,884	0,593	0,828	0,968
Lisímetro L25*	5	0,000	0,856	0,631	0,813	0,968
Lisímetro L30*	6	0,000	0,849	0,632	0,811	0,970

* L15, L20, L25 e L30: lençol freático a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade.

A classificação dos métodos de E_{To} foi feita com base nos valores de EPE, conforme descrito por Allen et al. (1998). Sendo assim, o método Penman modificado foi o que melhor estimou a E_{To} diária, seguido do método da radiação seguido por mínima diferença pelos métodos L15 e L20.

O modelo Penman modificado apresentou o maior valor para o índice “d” (0,916), confirmando uma melhor concordância com os valores de ETo medido pelo método padrão, Penman-Monteith FAO 56. Os métodos da Radiação e os lisímetros de lençol freático constante apresentaram valores entre 0,857 e 0,811 sendo considerados de concordância alta, com a ressalva de que os métodos Hargreaves-Samani, lisímetro de drenagem e tanque Classe A exibiram os mais baixos valores de índice “d” de 0,683; 0,726; e 0,787, respectivamente.

Os altos valores de coeficientes de determinação encontrados nos métodos Penman modificado, Radiação, L15, L20, L25 e L30 indicam bom ajuste aos valores diários de ETo estimados pelo método Penman-Monteith FAO 56. Os mais baixos valores de coeficiente de determinação apresentados pelos métodos lisímetro de drenagem, Hargreaves-Samani e tanque Classe A podem ser explicados pela grande dispersão dos valores diários obtidos de evapotranspiração devido à pouca sensibilidade desses métodos para a obtenção de valores diários, sendo o lisímetro de drenagem o menos sensível.

Na Figura 2 são apresentados os valores diários de ETo obtidos pelos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, lisímetros de drenagem, tanque Classe A e lisímetros, para as quatro profundidades freáticas estudadas, comparativamente aos valores diários de ETo obtidos pelo método Penman-Monteith FAO 56.

Verificam-se, na Figura 2, as melhores concordâncias entre os valores da evapotranspiração estimadas pelos métodos Penman modificado e Radiação. A linha representativa das equações dessas regressões para essa variável foram as que mais se aproximaram da respectiva linha 1:1, entretanto os modelo superestimaram a evapotranspiração de referência, principalmente nos períodos com altos valores de evapotranspiração, e subestimaram em períodos com baixos valores de ETo.

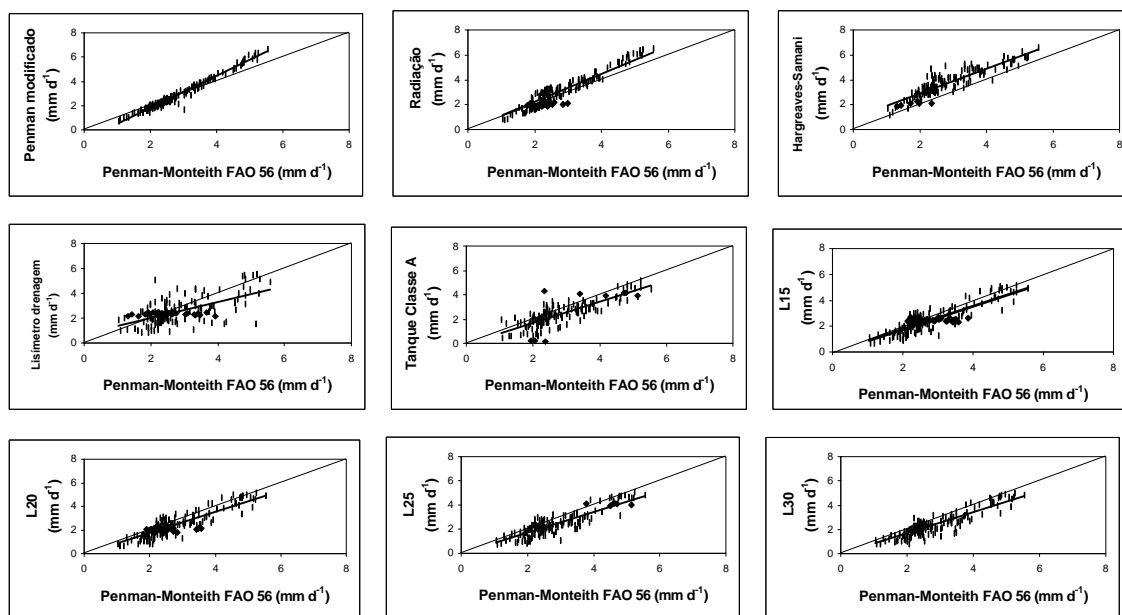


Figura 2- Valores diários de ETo obtidos pelos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilísímetros, para as quatro profundidades freáticas estudadas, comparativamente aos valores diários de ETo obtidos pelo método Penman-Monteith FAO 56.

Esse fato pode ser explicado no caso do método Penman modificado pelo empirismo na função do vento, a qual originalmente foi desenvolvida para grama nas condições da Inglaterra, e no caso do método Radiação pelo fator de ponderação que representa as condições do vento e umidade que podem superestimar os valores da evapotranspiração (GARCIA et al., 2004; RANA e KATERJI, 2000; CUENCA e NICHOLSON, 1982), manifestando a dificuldade da utilização desses métodos e destacando a importância da necessidade da calibração para cada localidade.

Nota-se ainda, na Figura 2, uma superestimativa da evapotranspiração estimada pelo método Hargreaves e Samani, certamente em decorrência do fato de ser baseado somente na temperatura do ar. Além disso, esse método foi desenvolvido para condições áridas. Resultados semelhantes foram obtidos por Gavilán et al. (2005) na região sul da Espanha, Sentelhas e Camargo (1996), nas três locais do Estado de São Paulo, encontraram superestimativas de ETo pelo método de Hargreaves-Samani em relação aos valores estimados por Penman-Monteith FAO 56.

Na Figura 2, as linhas de tendência da regressão dos métodos tanque Classe A e lisímetro de drenagem ilustram uma subestimação da evapotranspiração. Esses resultados estão coerentes com os resenhados por vários autores (AMORIM, 1998; MAÑAS e VALERO, 1993; SEDIYAMA, 1990; DOORENBOS e PRUITT, 1977) os

quais não recomendaram esses dispositivos em razão da sua pouca sensibilidade a medições diárias de evapotranspiração. A mesma tendência foi apresentada pelos lisímetros com lençol freático constante, porém com “performance” muito superior, em função do menor erro-padrão da estimativa e maior índice “d”.

No Quadro 8 esta apresentada a classificação dos métodos avaliados de acordo com seu desempenho, os coeficientes a e b da regressão linear, do erro-padrão da estimativa (EPE), do índice de concordância (d) e do coeficiente de determinação (r^2), nos períodos de tempo de 3, 5, 7 e 10 dias.

Verifica-se, no Quadro 8, que o método Penman modificado foi considerado novamente o melhor método de determinação da ETo, uma vez que ocupou o primeiro lugar na classificação nos diferentes períodos estudados. O segundo melhor método foi Radiação, que unicamente foi deslocado dessa posição pelo método L15, para valores médios de sete dias; nos restantes períodos estudados, o desempenho do L15 foi considerado o terceiro melhor. Observou-se que os lisímetros com lençol freático apresentaram características adequadas para serem utilizados em estudos de evapotranspiração para todos períodos, sendo o L15 e L20 os mais exatos e precisos, de acordo com a metodologia de análises de métodos proposta por Allen et al. (1989).

Observam-se, no Quadro 8, diminuição progressiva no erro-padrão da estimativa e aumento no coeficiente de determinação em todos os métodos estudados, indicando maior precisão com o aumento do período de observação; esse comportamento ficou mais evidente no desempenho do tanque Classe A. Isso era esperado por causa da suavização das flutuações diárias que permite uma melhoria nesse índice estatístico quando se aumenta a escala de tempo. Segundo Jensen et al. (1990), o método do tanque Classe A é recomendado para um melhor ajuste com dados médios de cinco dias, sendo que sua aplicação em períodos de tempo inferior pode reduzir a sua precisão e exatidão. Por sua vez, Doorenbos e Pruitt (1997) recomendaram o uso de tanque Classe A para estimar as necessidades hídricas das culturas em períodos de 10 dias ou mais.

Quadro 8 - Classificação dos métodos avaliados de acordo com o seu desempenho, os coeficientes (a) e (b) da regressão linear, o erro-padrão de estimativa (EPE), o índice de concordância (d) e o coeficiente de determinação (r^2), nos períodos de tempo de 3, 5, 7 e 10 dias

Períodos de 3 Dias						
Método	Classificação	a	b	EPE	d	r^2
mm d ⁻¹						
Penman modificado	1	0,000	1,048	0,292	0,932	0,993
Radiação	2	0,000	1,104	0,461	0,865	0,989
Hargreaves-Samani	9	0,000	1,319	1,011	0,660	0,992
Lisímetro de drenagem	8	0,000	0,909	0,648	0,774	0,954
Tanque Classe A	5	0,000	0,868	0,534	0,825	0,984
Lisímetro L15*	4	0,000	0,890	0,474	0,839	0,983
Lisímetro L20*	3	0,000	0,887	0,474	0,840	0,984
Lisímetro L25*	6	0,000	0,859	0,535	0,815	0,983
Lisímetro L30*	7	0,000	0,853	0,539	0,812	0,984
Períodos de 5 Dias						
Penman modificado	1	0,000	1,045	0,274	0,929	0,994
Radiação	2	0,000	1,102	0,439	0,857	0,990
Hargreaves-Samani	9	0,000	1,332	1,030	0,596	0,994
Lisímetro de drenagem	8	0,000	0,917	0,565	0,770	0,966
Tanque Classe A	5	0,000	0,873	0,464	0,828	0,988
Lisímetro L15*	3	0,000	0,896	0,445	0,818	0,985
Lisímetro L20*	4	0,000	0,892	0,451	0,814	0,985
Lisímetro L25*	7	0,000	0,864	0,511	0,783	0,984
Lisímetro L30*	6	0,000	0,859	0,510	0,784	0,986
Períodos de 7 Dias						
Penman modificado	1	0,000	1,042	0,253	0,933	0,995
Radiação	4	0,000	1,090	0,434	0,853	0,989
Hargreaves-Samani	9	0,000	1,334	1,025	0,499	0,996
Lisímetro de drenagem	6	0,000	0,920	0,475	0,620	0,977
Tanque Classe A	5	0,000	0,869	0,450	0,824	0,992
Lisímetro L15*	2	0,000	0,890	0,416	0,833	0,990
Lisímetro L20*	3	0,000	0,886	0,418	0,832	0,991
Lisímetro L25*	7	0,000	0,859	0,487	0,797	0,990
Lisímetro L30*	8	0,000	0,853	0,492	0,793	0,992
Períodos de 10 Dias						
Penman modificado	1	0,000	1,040	0,245	0,932	0,995
Radiação	2	0,000	1,097	0,395	0,862	0,993
Hargreaves-Samani	9	0,000	1,337	1,034	0,581	0,996
Lisímetro de drenagem	5	0,000	0,912	0,419	0,830	0,985
Tanque Classe A	6	0,000	0,867	0,446	0,816	0,993
Lisímetro L15*	3	0,000	0,893	0,398	0,831	0,992
Lisímetro L20*	4	0,000	0,888	0,403	0,829	0,992
Lisímetro L25*	7	0,000	0,861	0,479	0,789	0,991
Lisímetro L30*	8	0,000	0,853	0,489	0,780	0,992

* L15, L20, L25 e L30: lençol freático a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade.

No Quadro 8, pode-se verificar que o desempenho do lisímetro de drenagem foi melhorando com o agrupamento dos valores da ETo, notadamente no período de 10 dias, quando apresentou a quinta melhor colocação. Isso pode ser explicado pela superação da inércia apresentada por esses dispositivos em relação à sua drenagem, que ocorre quando a ETo é medida em períodos menores. Silva (1996) e Mañas e Valero (1993) recomendaram o uso do lisímetro de drenagem para a determinação da ETo em períodos iguais ou superiores a sete dias.

No Quadro 8, pode-se notar que durante os períodos de tempo de 3, 5, 7 e 10 dias o método Hargreaves-Samani foi o que apresentou os mais altos valores de EPE e os mais baixos valores do índice “d”, tornando-se o de pior desempenho. Os resultados obtidos por esse método para a estimativa de ETo apontaram que ele não é recomendado para as condições de Viçosa. Esse desempenho está em desacordo com o preconizado por Jensen et al. (1990), que recomendaram a utilização do método Hargreaves-Samani na estimativa da evapotranspiração para dados médios de 10 dias.

Nas Figuras de 3 a 6, apresentam-se os gráficos resultantes da regressão linear, passando pela origem, para os valores médios de ETo de 3, 5, 7 e 10 dias, respectivamente. Verificaram-se, novamente, as melhores concordâncias entre os valores de evapotranspiração determinados pelos métodos Penman modificado, Radiação, L15 e L20. As retas representativas das equações de regressão para estes foram as que mais se aproximaram da linha 1:1, observando-se menor dispersão em torno da linha de tendência, devido à suavização no comportamento das variáveis meteorológicas e, no caso de L15 e L20, pela amenização dos valores da ETo, promovidas pelo uso da média; no entanto, ainda se observa ligeira tendência dos modelos Penman modificado e Radiação de superestimar a ETo nas maiores valores de evapotranspiração, enquanto os lisímetros com lençol freático constante, continuaram subestimando a ETo em todos os períodos estudados.

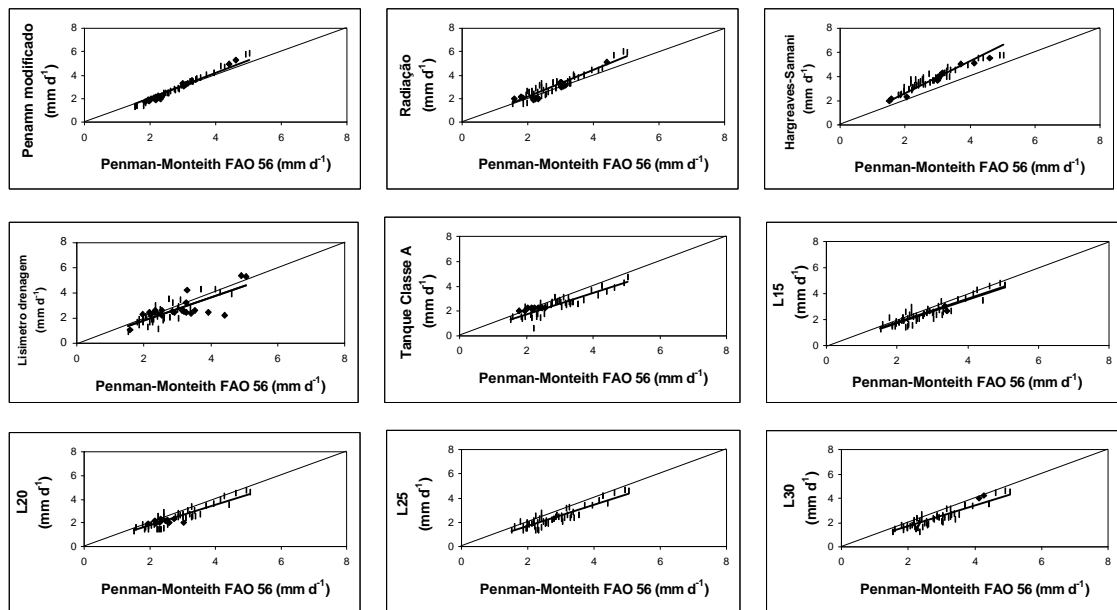


Figura 3 - Relação entre ET_0 determinada pelo método Penman-Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e lisímetros com lençol freático constante nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de três dias.

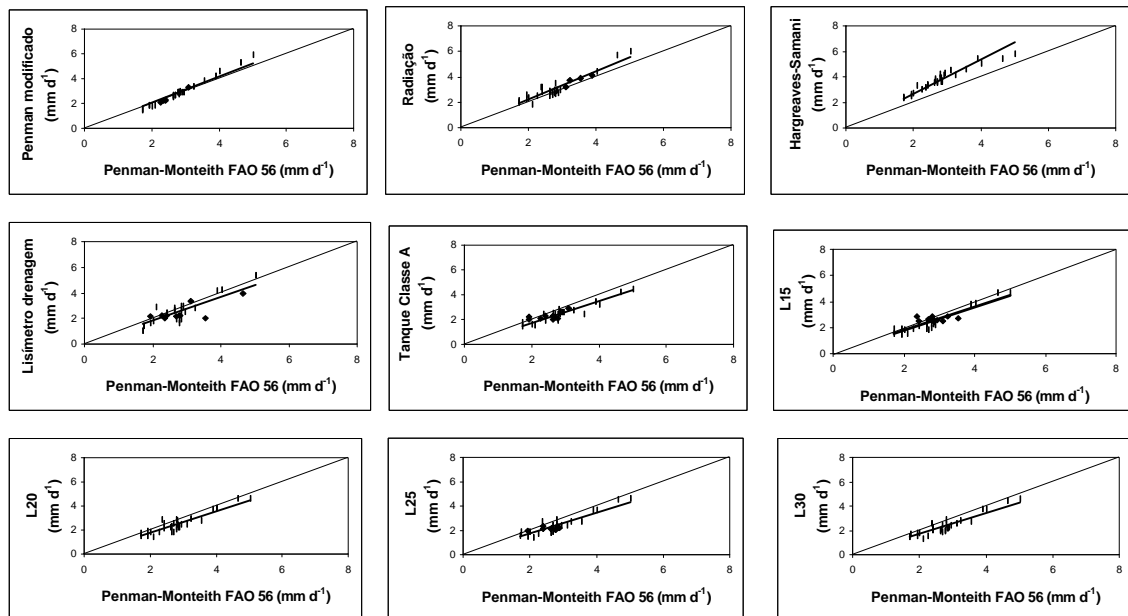


Figura 4 - Relação entre ET_0 determinada pelo método Penman-Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e lisímetros com lençol freático constante nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de cinco dias.

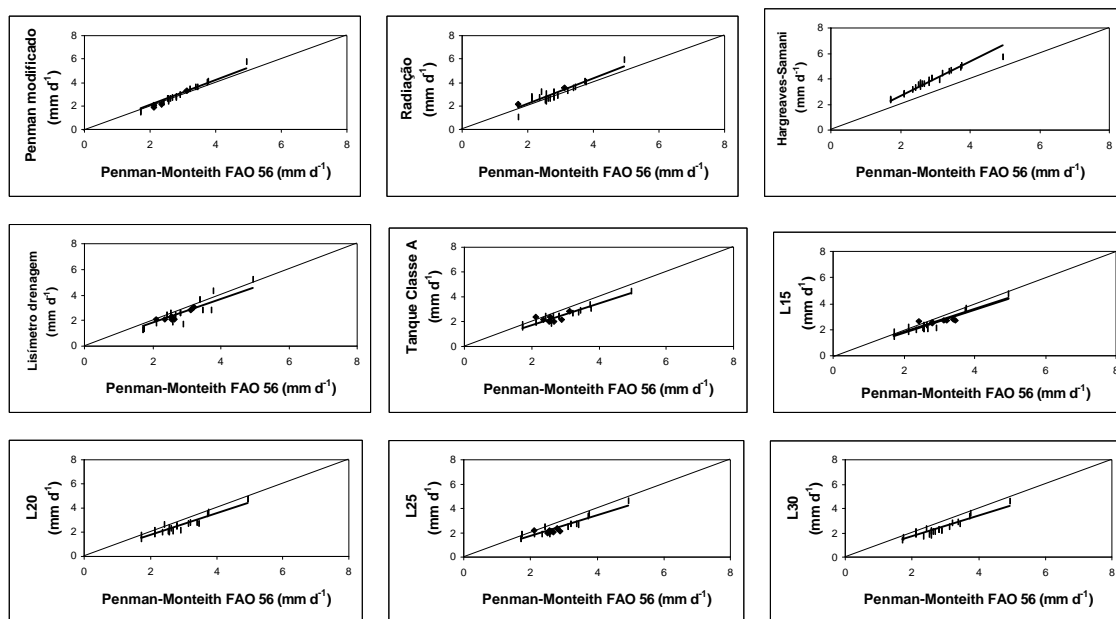


Figura 5 - Relação entre ETo determinada pelo método Penman-Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e lisímetros com lençol freático constante nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de sete dias.

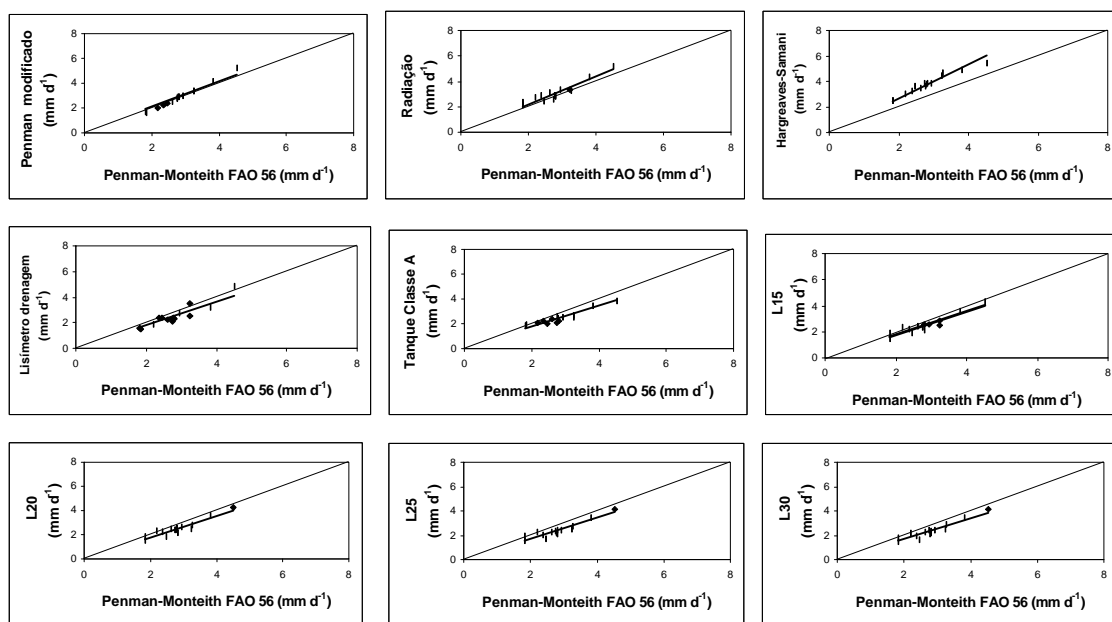


Figura 6 - Relação entre ETo determinada pelo método Penman-Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e lisímetros com lençol freático constante nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de 10 dias.

Nas Figuras 3 a 6, pode-se observar que as linhas de tendência da regressão dos métodos tanque Classe A, lisímetro de drenagem, L15, L20, L25 e L30 continuaram subestimando a evapotranspiração em relação aos valores estimados pelo método Penman-Monteith FAO 56. Nota-se também nessas figuras que o método Hargreaves-

Samani apresentou tendência de superestimar a ETo, tendo por base o método-padrão nos períodos analisados. Cuenca e Nicholson (1982) afirmaram que o modelo Hargreaves-Samani não é o produto de uma análise teórica e, portanto, representa puramente empirismo. Métodos empíricos geralmente produzem resultados satisfatórios, nos locais nos quais foram calibrados, e em locais de climas semelhantes, mas não são válidos numa gama ampla de climas.

No Quadro 9, encontram-se a evapotranspiração acumulada no período de estudo para o Método Penman-Monteith FAO 56 (444,52 mm), Penman modificado (454,23 mm), Radiação (486,42 mm), Hargreaves-Samani (587,55 mm), tanque Classe A (383,80 mm), lisímetro de drenagem (402,10 mm), lisímetros com lençol constante modificado a 15, 20, 25 e 30 cm em relação à superfície (391,14; 389,50; 377,68; 373,60 mm), respectivamente, e o lisímetro de drenagem (402,10 mm).

Quadro 9 – Valores de evapotranspiração de referência acumulada (ETo), medidos e estimados, durante o período experimental

Método	ETo média	ETo acumulada	Variação
	mm d ⁻¹	mm	Porcentual da ETo
Penman-Monteith FAO 56	2,83	444,52	-
Penman modificado	2,89	454,23	2,2
Radiação	3,10	486,42	9,4
Hargreaves-Samani	3,74	587,55	32,2
Lisímetro de drenagem	2,56	402,10	-9,5
Tanque Classe A	2,46	383,80	-13,7
Lisímetro L15*	2,49	391,14	-12,0
Lisímetro L20*	2,48	389,50	-12,4
Lisímetro L25*	2,41	377,68	-15,0
Lisímetro L30*	2,38	373,66	-15,9

* L15, L20, L25 e L30: lençol freático a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade.

Observa-se, no Quadro 9, que os modelos Hargreaves-Samani, Radiação e Penman modificado superestimaram os valores de evapotranspiração em 32,2%; 9,4%; e 2,2%, respectivamente. Já o tanque Classe A, lisímetro de drenagem, L15, L20, L25 e L30 subestimaram em 13,7%; 9,5%; 12%; 12,4%; 15,0%; e 15,9%, respectivamente.

No Quadro 9, pode ser destacada uma leve tendência nos lisímetros com lençol freático constante a uma maior subestimativa da evapotranspiração, à medida que o nível da solução nutritiva nos lisímetros aumenta em relação à superfície. Segundo Grassi (1993), ao aumentar a profundidade do plano freático, diminui a taxa de movimento ascendente da água, sendo menor seu aporte ao processo de evapotranspiração. Assim, os maiores valores de evapotranspiração para as menores

profundidades freáticas podem ser devidos ao elevado teor de água no sistema substrato-planta nos lisímetros, principalmente no nível freático a 15 cm de profundidade.

4. CONCLUSÕES

- Os métodos L15, L20, Radiação, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e lisímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro® modificado apresentaram um bom desempenho na determinação da ETo. O bom resultado obtido com o lisímetro de lençol freático constante nessas duas profundidades deveu-se à alta sensibilidade de leitura do Irrigâmetro® modificado e à inexistência de resistência mecânica ao movimento da solução nutritiva.

- Nos métodos dos lisímetros, verificou-se maior consumo de água no nível freático de 15 cm de profundidade; esse consumo decresceu com maiores profundidades do lençol freático.

- O método de pior desempenho foi Hargreaves-Samani, não sendo recomendado seu uso para a estimativa de ETo, nas condições semelhantes às deste estudo, por apresentar menor exatidão e menor precisão.

5. REFERÊNCIAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Los lisímetros**. Roma: FAO, 1986. 59 p. (FAO, Paper 39).

ANDRADE, L. M. **Efeito de diferentes profundidades freáticas sobre a evapotranspiração e sobre a produção e os componentes da produção do milho-doce (*Zea mays* L.)**. Viçosa, MG: UFV/DEA, 1991. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ALLEN, R. G. **Reference evapotranspiration calculation software**. [S.L.] For FAO and ASCE standardized equations (Version 2.0), University of Idaho, 2001. 82 p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 310 p. (Irrigation and drainage Paper, 56).

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. Reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 5, p. 758-772, 1991.

AMORIM, M. C. de. **Avaliação da eficácia do lisímetro de lençol freático constante, do tanque classe “A” e do modelo de Penman-Monteith (FAO) para estimativa da**

evapotranspiração de referência (ET₀). Viçosa, MG: UFV/DEA, 1998. 56 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. CH.; SOARES, A. A.; **Manual de irrigação**. 7a. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006. 611 p.

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

CUENCA, R. H.; NICHOLSON, M. T. Application of Penman equation wind function. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Oregon, Div. ASCE, v. 108, p. 13-23, 1982.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 24).

FACCIOLI, G. G. **Determinação da evapotranspiração de referencia e da cultura da alface em condições de casa de vegetação, em Viçosa, MG**. Viçosa, MG: UFV/DEA, Impr. Univ., 1998. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

GARCIA, M.; RAES, D.; ALLEN, R.; HERBAS, C. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). **Agricultural and Forest Meteorology**, La Paz, v. 125, p. 67-82, 2004.

GAVILÁN, P.; LORITE, I. J.; TORNERO, J.; BERENGENA, J. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating referente ET in a semiarid environment. **Agricultural Water Management**, Córdoba. Article in Press. p. 25. 2005.

GRASSI, C. J. **Fundamentos del riego**. Mérida, Venezuela: Impr. C.I.D.I.A.T., 1993. 408 p.

HARGREAVES, G. H. Defining and using reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Utah, v. 120, n. 6. p. 1132-1139, 1994.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. **Amer. Soc. Agric. Eng. Meeting**, Chicago, (Paper 85-2517) 1985.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter design and use for evapotranspiração. In: **Lysimeter for evapotranspiration and environment measurements**. New York: ASCE, 1991. p. 1-19.

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

MANTOVANI, E. C. **Desarrollo y evaluación de modelos para el manejo del riego: estimación de la uniformidad de aplicación del riego sobre la producción de los cultivos**. Córdoba: ETSIA, Universidad de Córdoba, 1993. 184 f. (Tesis doctoral).

- MAÑAS, F. M.; VALERO, J. A. **Agronomía del riego**. Madrid, España: La Universidad de Castilla-La Mancha; Impr. Ediciones Mundi-Prensa, 1992. 732 p.
- MARTINEZ, H. E.; DA SILVA, J. B. **Introdução ao cultivo hidropônico de plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2004. 111 p.
- MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Crop coefficient for irrigated beans derived using three reference evaporation methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, Campinas, article in press, p. 1-9, 2005.
- MENDONÇA, J. C.; SOUZA, E. F. de; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região norte fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agroclimatologia. Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba, RS: Agropecuária Ltda., 2002. 478 p.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba, SP: FEALQ, 1997. 183 p.
- PEREIRA, F. A. **Efeitos de diferentes profundidades de lençol freático sobre a evapotranspiração, o coeficiente de cultura, a produção e os componentes de produção da alface (*lactuca sativa* L.)**. Viçosa, MG: UFV/DEA, 1994. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, Bari, v. 13, p. 125-153, 2000.
- RUIZ, A. H. Relações molares de macronutrientes em tecidos vegetais como base para a formulação de soluções nutritivas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 44, n. 255, p. 533-546, 1997.
- SEDIYAMA, G. C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1990. 143 p.
- SILVA, F. C. **Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Impr. Univ., 1996. 68 f. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SILVA, L. D. **Evapotranspiração do capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.) e Grama-Batatais (*paspalum notatum* Flugge) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Impr. Univ., 2002. 109 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração: necessidade de água para as plantas cultivadas**. Brasília, DF: ABEAS, 1996. 173 p.

SILVA, D. F. **Analises quantitativa e qualitativa do crescimento e desenvolvimento da grama-batatais e grama-esmeralda em diferentes lâminas de irrigação.** Viçosa, MG: UFV/DEA, 2004. 48 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of crop water requirements.** Rome: FAO, 1991. 45 p.

SOUZA, J. L. **Evapotranspiração e coeficiente de cultura do algodoeiro (*G. hirsutum* L.) submetido a diferentes profundidades do lençol freático.** Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Impr. Univ., 1992. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluation and comparasion of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM MINILISÍMETRO COM LENÇOL
FREÁTICO CONSTANTE OPERANDO COM IRRIGÂMETRO®
MODIFICADO NA MEDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA**

Franklin José Valbuena Materán, Rubens Alves de Oliveira, Hugo Alberto Ruiz, Paulo Roberto Cecon, Gilberto Chohaku Sedyama e Herminia Emilia Prieto Martínez.

Os autores são: **Franklin José Valbuena Materán**, Candidato a *Doctor Scientiae* em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais (MG), Brasil, bolsista da “La Universidad Del Zulia”; **Rubens Alves de Oliveira**, Professor Adjunto, DEA/UFV, MG, Brasil; **Hugo Alberto Ruiz**, Professor Titular, DS/UFV, MG, Brasil; **Paulo Roberto Cecon**, Professor Adjunto, DI/UFV, MG, Brasil; **Gilberto Chohaku Sedyama**, Professor Titular, DEA/UFV, MG, Brasil; e **Herminia Emilia Prieto Martínez**, Professor Adjunto, DFT/UFV, MG, Brasil. **Autor correspondente:** Franklin José Valbuena Materán, Dep. de Engenharia Agrícola, Av. P. H. Rolfs, s/n, 36570-000 Viçosa, MG, Brasil. Tel.: 55-31-3899-2732; e-mail: franklinvalb@yahoo.com

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro®, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, no período de julho a dezembro de 2005. Dois experimentos foram conduzidos com grama-batatais (*Paspalum Notatum* Flugge), sendo um com minilísímetros e outro com lisímetros, ambos com lençol freático constante e operando com Irrigâmetro® modificado. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis freáticos (15, 20, 25 e 30 cm de profundidade), estabelecidos nos minilísímetros (M15, M20, M25 e M30), com quatro repetições. No experimento com os lisímetros, os mesmos tratamentos foram aplicados (L15, L20, L25 e L30), com três repetições. Em ambos os experimentos, utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado. Objetivou-se, no presente trabalho, medir a evapotranspiração de referência (ET_o), utilizando minilísímetros operando com Irrigâmetro® modificado com nível freático constante estabelecido em quatro profundidades, bem como avaliar o efeito dos tratamentos no seu desempenho em relação ao lisímetro com lençol freático constante, também operando com Irrigâmetro® modificado. Os dados foram coletados todos os dias e analisados estatisticamente. Os métodos L15, L20 e M30 apresentaram bom desempenho. Nos minilísímetros ocorreu maior consumo de água pela grama-batatais, por causa do efeito buquê e principalmente ao efeito varal e à maior exposição da cultura à radiação. O maior consumo de água nos minilísímetros e nos lisímetros ocorreu no nível freático de 15 cm, decrescendo com o aumento da profundidade, sendo esse efeito mais pronunciado nos minilísímetros. A bordadura utilizada nos

minilísímetros como área-tampão não foi suficiente para evitar o efeito varal, ocasionando maior consumo de água ao verificado nos lisímetros.

Palavras-chaves: Evapotranspiração, grama-batatais, Irrigâmetro[®], minilísímetro e lisímetro.

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada de uma superfície com vegetação durante determinado período. Pode também ser expressa em valores totais, médios, diários e horários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água, em período predeterminado (BERNARDO et al., 2006).

O conhecimento e a quantificação do processo de evapotranspiração definem a quantidade de água necessária para as culturas, sendo, por isso, um parâmetro fundamental para o planejamento e manejo da irrigação (SEDIYAMA, 1997). A determinação das necessidades hídricas das culturas é usualmente estimada com base nos valores da evapotranspiração de referência (ET_o).

Doorenbos e Pruitt (1977) definiram ET_o como a taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa de grama de 8 a 15 cm de altura, uniforme, em ativo crescimento, sombreando completamente o solo sem limitação de água.

Smith (1991) propôs a adoção de uma definição padronizada para a evapotranspiração de referência. A ET_o seria aquela que ocorre em uma cultura hipotética, apresentando as seguintes características: altura de 12 cm, resistência de dossel de 69 s m⁻¹ e coeficiente de reflexão (albedo) de 0,23, que representaria a evapotranspiração de uma gramínea verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem estresse hídrico.

A evapotranspiração pode ser obtida por meio de medidas diretas, através da utilização do lisímetro. Segundo Aboukhaled et al. (1986), a palavra lisímetro é derivada do grego *lysis* e significa dissolução ou movimento, e *metron* significa mensurar. Os lisímetros são reservatórios cheios de solo localizados no campo, com superfície coberta por vegetação, para determinação da evapotranspiração de uma cultura em crescimento ou de uma cultura de referência ou, ainda, com superfície sem vegetação, para determinação da evaporação num solo descoberto. Para Bernardo et al. (2006) e Amorim (1998), o método do lisímetro é o mais preciso e considerado ainda instrumento-padrão para a determinação da evapotranspiração de referência (ET_o).

Segundo Aboukhaled et al. (1986) e Howell et al. (1991), os lisímetros utilizados em pesquisas de evapotranspiração usualmente podem ser agrupados em três categorias: (1) não-pesáveis com lençol freático de nível constante; (2) não-pesáveis com drenagem livre; e (3) lisímetros pesáveis, em que a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem.

Nos lisímetros não-pesáveis com lençol freático de nível constante, o nível da água é mantido em determinada profundidade. Devido a evapotranspiração, a água é translocada até a zona radicular, por capilaridade. A descida do nível freático causado por esse deslocamento é automaticamente compensada por um mecanismo flutuador, sendo a quantidade de água necessária para repor esse nível, medida também automaticamente (ABOUKHALED et al., 1986).

A posição do lençol freático determina as condições de umidade da zona radicular e, portanto, influi no suprimento de água e na aeração do solo. Assim, lençóis freáticos superficiais contribuem para uma deficiência na aeração e restringem o sistema radicular nas camadas superficiais do solo, limitando consideravelmente a quantidade de nutrientes do solo disponíveis às plantas (WILLIAMSOM, 1964; GRABLE, 1966; FOLLETT et al. 1974; CHAUDHARY et al. 1975; LARCHER, 2004; TAIZ e ZEIGER, 2004). No entanto, o rebaixamento excessivo do lençol freático poderá ocasionar deficiências hídricas, sendo responsáveis pela redução na produtividade (WILLIAMSOM e KRIZ, 1970).

Segundo Mañas e Valero (1993) e Aboukhaled et al. (1986), uma limitação importante quanto ao uso dos lisímetros com nível freático constante está associada aos problemas freqüentes com os flutuadores e o desnível dos dispositivos de leitura-alimentação, interferindo diretamente nas medidas de evapotranspiração.

Em relação à área dos lisímetros, Aboukhaled et al. (1986) afirmaram que a evapotranspiração medida em lisímetros de área reduzida ($0,27 \text{ m}^2$) apresentam grandes erros e desvios (10 a 20%). Porém, com lisímetros de área de 4 m^2 , obtêm-se valores de evapotranspiração confiáveis e válidos para períodos de 10 dias. Howell et al. (1991) afirmaram que a forma e área do lisímetro devem ser definidas a partir do tipo de cultura a ser utilizada, principalmente em função da dimensão do seu sistema radicular. No caso da grama ou da alfafa, a área do lisímetro não apresenta nenhum efeito crítico sobre a medida da evapotranspiração. Contudo, os lisímetros comumente utilizados caracterizam-se por ser volumosos e pesados, limitando seu uso a um só local, razão

pela qual a grande maioria dos produtores rejeita esses métodos, sendo utilizados exclusivamente em pesquisas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do minilísímetro operando com Irrigâmetro[®] modificado, na medição da evapotranspiração de referência (ET_o), mantendo-se o nível freático constante nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro[®], pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizada na cidade de Viçosa, MG, com 20° 45' de latitude sul, 42° 45' de longitude oeste e altitude de 651 m. A temperatura média anual de Viçosa é de 19 °C. A umidade relativa do ar é, em média, de 80% e a precipitação média anual, 1.341 mm, com estações seca e chuvosa bem definidas. O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação climática proposta por Köppen, isto é, subtropical, com inverno seco.

2.1. Delineamento experimental e tratamentos

Dois experimentos foram conduzidos com grama-batatais (*Paspalum Notatum* Flugge), sendo um com minilísímetros e outro com lisímetros, ambos com lençol freático constante e operando com Irrigâmetro[®] modificado. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis freáticos (15, 20, 25 e 30 cm de profundidade), estabelecidos nos minilísímetros (M15, M20, M25 e M30), com quatro repetições. No experimento com os lisímetros, os mesmos tratamentos foram aplicados (L15, L20, L25 e L30), com três repetições. Em ambos os experimentos, utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado.

2.2. Descrição do minilísímetro operando com Irrigâmetro[®] modificado

O minilísímetro foi construído com tubo de PVC de 60 cm de altura e 450 mm de diâmetro, dentro do qual foi instalado, de maneira concêntrica, outro tubo de PVC, de mesma altura e 250 mm de diâmetro, com área interna de 0,0468 m², no qual foi feito o controle da água consumida pela grama-batatais (Figura 1). O minilísímetro foi assentado sobre um estrado de madeira com 15 cm de altura e coberto com uma telha transparente de fibra de vidro, com espessura de 2 mm, localizada 50 cm acima da sua borda.

Uma mangueira de polietileno de 20 mm conectou o fundo do cilindro interno com o Irrigâmetro[®] modificado, construído com tubo de PVC de 75 mm de diâmetro e 1 m de altura. O Irrigâmetro[®] modificado usa o princípio de Mariotte, tendo sido usado para manter o nível freático constante no minilísímetro, fazendo a reposição da água e fornecendo diretamente o valor da lâmina evapotranspirada. A água deslocada no Irrigâmetro[®] modificado foi quantificada por meio de régua milimétrica, sendo a sensibilidade de leitura igual a 0,086 mm, definida pela relação entre as áreas da seção transversal do tubo de alimentação do Irrigâmetro[®] modificado e do cilindro interno do minilísímetro.

No preenchimento dos minilísímetros foi colocada inicialmente uma camada de brita 0, com espessura de 5 cm, sobre a qual foi sobreposta uma camada de 5 cm de brita 1, acima da qual foi colocada uma camada de 45 cm de substrato de areia com granulometria entre 0,104 e 1 mm. A análise granulométrica da areia foi realizada no Laboratório de Física de Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1- Distribuição granulométrica do substrato de areia.

Granulometria				Massa Específica (g cm ⁻³)	
Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Partículas	Solo
93	4	0	3	2,85	1,50



Figura 1 - Partes constituintes do minilísímetro com lençol freático constante e do Irrigâmetro[®] modificado.

2.3. Descrição do lisímetro com nível freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado

Os lisímetros foram construídos com caixas de cimento-amianto (Figura 2), com as seguintes dimensões: 1,10 m de largura, 1,60 m de comprimento e 0,70 m de profundidade, apresentando uma área interna de 1,6845 m². Na instalação dos lisímetros, as bordas das caixas ficaram 5 cm acima da superfície do solo. No fundo de cada lisímetro foi construída uma rede de distribuição constituída de três tubos de PVC de 20 mm.

Cada lisímetro foi conectado a um Irrigâmetro[®] modificado através de uma tubulação de PVC de 20 mm. O Irrigâmetro[®] modificado foi construído com um tubo de alimentação de PVC com diâmetro de 200 mm e 1 m de altura. O Irrigâmetro[®] modificado usa o princípio de Mariotte, tendo sido usado para manter o nível freático constante no minilísímetro, fazendo a reposição da água e fornecendo diretamente o valor da lamina evapotranspirada. A água deslocada no Irrigâmetro[®] modificado foi quantificada por meio de régua milimétrica, sendo a sensibilidade de leitura igual a 0,01 mm, definida pela relação entre as áreas da seção transversal do tubo de alimentação do Irrigâmetro[®] modificado e da seção transversal do lisímetro.

No preenchimento dos lisímetros foi colocada inicialmente uma camada de brita 0, de 5 cm de altura, seguida de outra camada de brita 1, de 7 cm de altura, acima da qual foi colocado um substrato de areia com granulometria entre 0,104 e 1 mm. A análise granulométrica da areia foi realizada no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados são apresentados no Quadro 1.

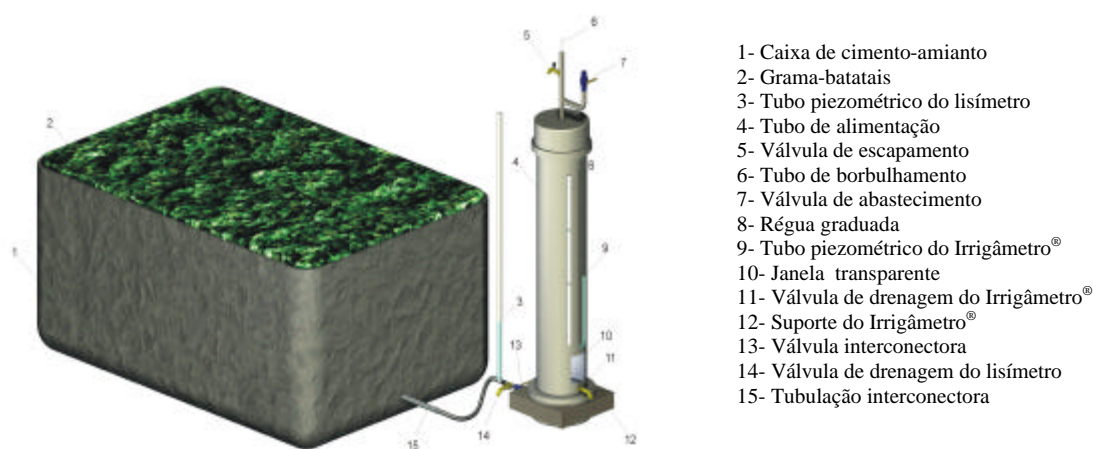


Figura 2 - Partes constituintes do lisímetro com lençol freático constante e do Irrigâmetro[®] modificado.

2.4. Condução do experimento

O trabalho foi desenvolvido durante o período compreendido entre julho e dezembro de 2005. Dentro e ao redor dos minilísímetros e dos lisímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado foi cultivada com grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge). Os minilísímetros e lisímetros de lençol freático constante foram abastecidos com solução nutritiva inicial, descrita no Quadro 2, até atingir os níveis freáticos estabelecidos, sendo o reabastecimento feito com a solução nutritiva descrita no Quadro 3. Tanto a solução nutritiva inicial quanto a de reabastecimento foram formuladas de acordo com Martinez e Silva (2004), Silva (2004) e Ruiz (1997).

O pH e a condutividade elétrica da solução nutritiva de cada minilísímetro e lisímetro com lençol freático constante foram medidos em três profundidades (no fundo, na altura mediana e próximo à superfície do lençol freático), duas vezes por semana, ao longo da pesquisa. O pH foi mantido próximo de 7 com o uso de ácido clorídrico 10% para evitar a alcalinização do substrato. A condutividade elétrica da solução no interior dos minilísímetros e lisímetros foi mantida entre 630 e 1.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, ajustando-se as concentrações dos macros e micronutrientes da solução nutritiva de reabastecimento para evitar deficiência de nutrientes na cultura.

A vegetação total contida em cada lisímetro e minilísímetro foi cortada sempre que atingia 15 cm de altura. Para isso, adaptou-se um suporte de metal a uma tesoura para que o corte fosse feito uniformemente a 8 cm de altura, sendo realizadas 10 podas durante o período experimental.

A medição da evapotranspiração ocorrida nos lisímetros e minilísímetros foi feita diretamente no Irrigâmetro[®] modificado, sendo realizada diariamente às nove horas da manhã.

Os elementos climáticos diários foram obtidos na Estação Climatológica Principal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, próximo à área experimental, em Viçosa, MG.

Quadro 2 - Fontes de nutrientes utilizadas para compor a solução nutritiva inicial, empregada dos minilísímetros e lisímetros de lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado

Sal	mg L ⁻¹	Sal	g L ⁻¹
H ₃ BO ₃	1,24	Ca(NO ₃) ₂	0,519
CuSO ₄	0,20	KNO ₃	0,202
MnSO ₄	2,53	NH ₄ NO ₃	0,064
(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄	0,09	MgSO ₄	0,246
ZnSO ₄	0,57	NH ₄ H ₂ PO ₄	0,115
FeCl ₃	10,81	CaCO ₃	0,300
Na ₂ EDTA	14,89		

Quadro 3 - Conjuntos de fontes de nutrientes (g L⁻¹) utilizados para compor a solução nutritiva empregada no reabastecimento dos minilísímetros e lisímetros de lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado

Sal	Conjunto 1		Sal	Conjunto 2	
	A	B		A	B
	g L ⁻¹			g L ⁻¹	
H ₃ BO ₃	1,24		Ca(NO ₃) ₂	103,90	
CuSO ₄	0,20		KNO ₃	40,44	
MnSO ₄	2,53		NH ₄ NO ₃	12,80	
(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄	0,09		MgSO ₄		49,20
ZnSO ₄	0,57		NH ₄ H ₂ PO ₄		23,00
FeCl ₃		10,81			
Na ₂ EDTA		14,89			

Durante a condução do experimento houve a presença de formigas e lagartas (*Spodoptera* spp.), as quais foram controladas com aplicações de deltametrina e clorpirifós etil.

Semanalmente foi feita a limpeza manual do gramado dentro e fora dos dispositivos lisimétricos, para controle de plantas invasoras, especialmente *Cyperus* spp.

2.5. Avaliação

As estimativas da evapotranspiração de referência (ET_o) foram medidas com o uso dos minilísímetros e lisímetros, ambos com lençol freático constante e operando com Irrigâmetro[®] modificado.

A metodologia utilizada para avaliação do desempenho do minilísímetro foi proposta por Allen et al. (1986) e adotada por Jensen et al. (1990), fundamentada no erro-padrão da estimativa (EPE) calculado pela equação:

$$EPE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

em que:

EPE = erro-padrão da estimativa, mm d⁻¹;

y = evapotranspiração de referência determinada no lisímetro, mm d⁻¹;

= evapotranspiração de referência determinada no minilímetro, mm d⁻¹; e

n = número de observações.

A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita com base nos valores do erro-padrão da estimativa (EPE), do índice de concordância (d), do coeficiente de determinação (r²) e dos coeficientes (a) e (b) das respectivas regressões lineares. A melhor alternativa foi aquela que apresentou menor EPE, maior índice “d” e maior r. A precisão é dada pelo coeficiente de determinação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à reta, ou seja, o erro aleatório. A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados.

Matematicamente, a exatidão é dada pelo índice de concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (Willmott et al., 1985). A faixa de valores do índice d varia de zero para completa dispersão entre os valores e 1 para perfeita concordância.

O índice é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left[(|P_i - O_i|) + (|O_i - \bar{O}|) \right]^2} \quad (2)$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste;

O_i = evapotranspiração de referência determinada no lisímetro, mm d⁻¹;

P_i = evapotranspiração de referência determinada no minilímetro, mm d⁻¹; e

= média dos valores de ETo obtidos no lisímetro, mm d⁻¹.

A análise foi feita com dados diários e médios de 3, 5, 7 e 10 dias da ETo, durante um período de 156 dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 4 estão apresentados os valores dos coeficientes a e b da regressão linear, do erro-padrão da estimativa (EPE), do índice de concordância (d), de determinação (r^2) e a classificação para as comparações entre os métodos do lisímetro e do minilísímetro nas diferentes profundidades freáticas, nos diversos períodos de tempo estudados.

No Quadro 4, verifica-se que os menores valores de EPE, em todos os períodos estudados, ocorreram no nível freático de 30 cm e os maiores, no nível freático de 15 cm. Os mais altos valores do índice “d” foram nas maiores profundidades freáticas, confirmando que a melhor concordância entre os valores de ETo medidos no lisímetro e no minilísímetro ocorreu no nível freático de 30 cm e a pior concordância no nível freático de 15 cm.

O agrupamento dos dados em períodos de tempo maiores resultou em menor concordância entre os valores de ETo medidos nos lisímetros e minilísímetros com lençol freático constante.

No caso do coeficiente de determinação (r^2), pode-se observar, no Quadro 4, incremento de seus valores com o aumento do período de estudo. Isso é resultante da menor dispersão dos dados promovida pelo agrupamento dos valores de ETo em períodos maiores.

Quadro 4 - Valores do intercepto (a), coeficiente angular da equação de ajuste (b), do erro- padrão de estimativa (EPE), do índice de concordância (d), do coeficiente de determinação (r^2) e da classificação para as comparações entre os métodos do lisímetro e do minilísímetro nas profundidades freáticas de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de tempo de 1, 3, 5, 7 e 10 dias

Valores Diários						
Comparação	a	b	EPE mm d ⁻¹	d	r^2	Classificação
L15 vs. M15	1,21	1,06	1,53	0,58	0,72	4
L20 vs. M20	1,12	1,00	1,30	0,62	0,74	3
L25 vs. M25	1,12	0,98	1,26	0,62	0,69	2
L30 vs. M30	0,99	0,93	1,11	0,65	0,63	1
Período de 3 Dias						
Comparação	a	b	EPE	d	r^2	Classificação
L15 vs. M15	1,17	1,08	1,48	0,53	0,75	4
L20 vs. M20	1,10	1,02	1,26	0,57	0,75	3
L25 vs. M25	1,13	0,98	1,21	0,57	0,69	2
L30 vs. M30	0,99	0,94	1,03	0,62	0,65	1
Período de 5 Dias						
Comparação	a	b	EPE	d	r^2	Classificação
L15 vs. M15	1,40	0,98	1,46	0,52	0,74	4
L20 vs. M20	1,29	0,94	1,24	0,56	0,73	3
L25 vs. M25	1,30	0,91	1,20	0,56	0,67	2
L30 vs. M30	0,00	1,14	1,01	0,62	0,65	1
Período de 7 Dias						
Comparação	a	b	EPE	d	r^2	Classificação
L15 vs. M15	0,00	1,50	1,47	0,48	0,98	4
L20 vs. M20	0,00	1,41	1,25	0,52	0,97	3
L25 vs. M25	0,00	1,40	1,21	0,52	0,97	2
L30 vs. M30	0,00	1,31	1,02	0,58	0,97	1
Período de 10 Dias						
Comparação	a	b	EPE	d	r^2	Classificação
L15 vs. M15	0,00	1,51	1,49	0,45	0,98	4
L20 vs. M20	0,00	1,42	1,27	0,49	0,98	3
L25 vs. M25	0,00	1,41	1,23	0,50	0,97	2
L30 vs. M30	0,00	1,32	1,03	0,57	0,97	1

Nas Figuras 3, 4, 5, 6 e 7 estão apresentadas as relações entre os valores de ETo obtidas nos lisímetros e nos minilísímetros operando com Irrigâmetro[®] modificado nos diferentes níveis freáticos, nos períodos diários e de 3, 5, 7 e 10 dias, respectivamente. Verificou-se, em todos os períodos e níveis freáticos estudados, maior consumo de água nos minilísímetros em relação aos lisímetros. Esse fato pode ser explicado pelas condições de maior exposição da grama ao vento e à radiação, visto que a superfície da cultura ficou posicionada a 75 cm de altura. Isso evidencia que a bordadura oferecida

pele cilindro externo, desempenhando o papel de área-tampão, foi insuficiente para manter um microambiente que pudesse evitar o efeito varal.

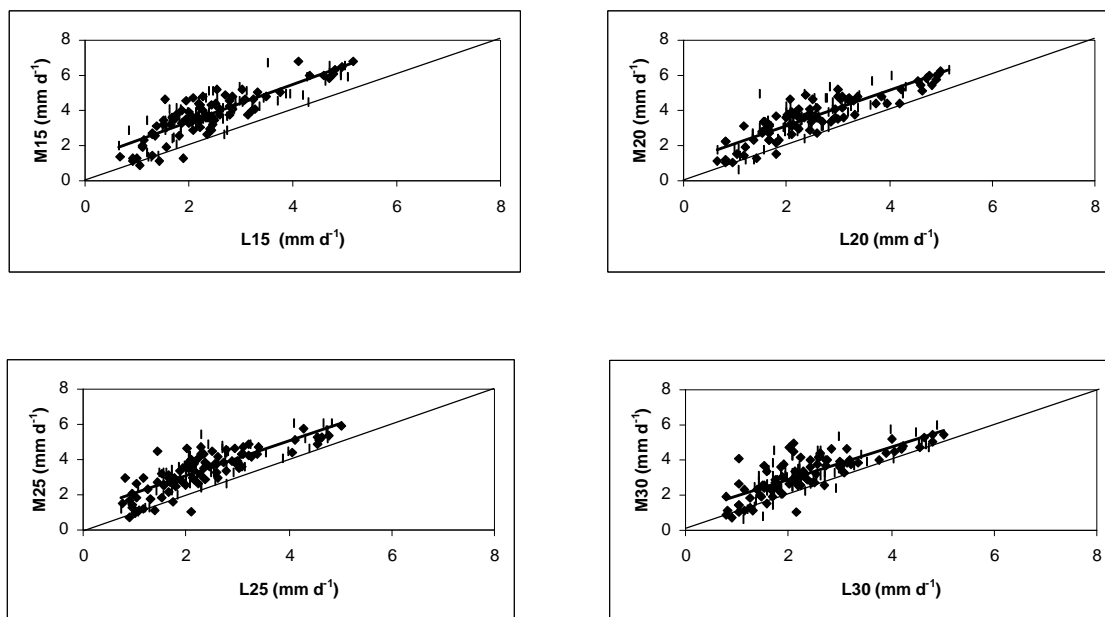


Figura 3 - Relação entre a ETo determinada pelo método lisímetro e o milisímetros com nível freático constante a 15, 20, 25 e 30 cm, para valores diários da ETo.

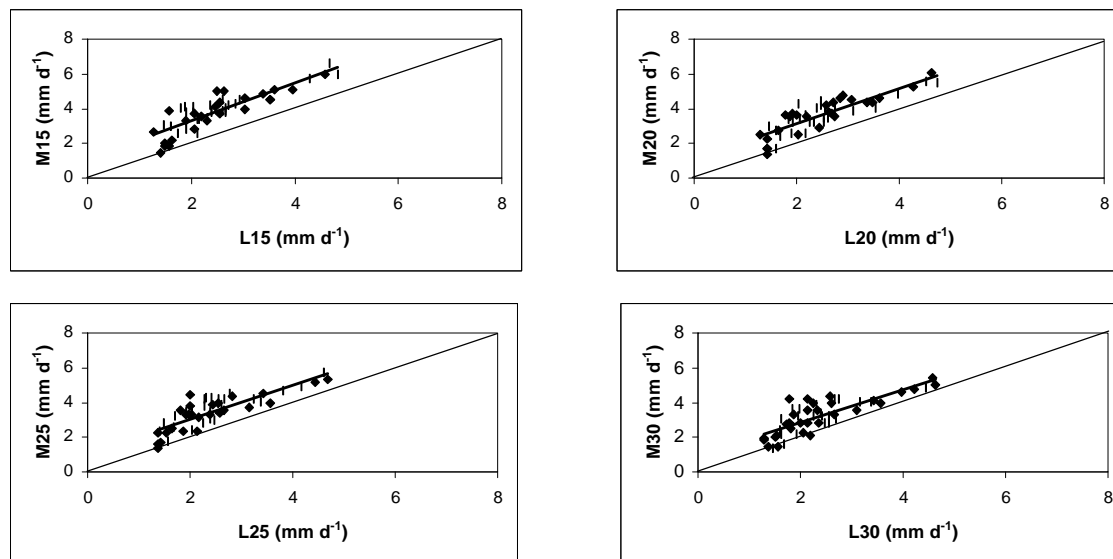


Figura 4 - Relação entre a ETo determinada pelo método lisímetro e os milisímetros com nível freático constante a 15, 20, 25 e 30 cm, no período de três dias.

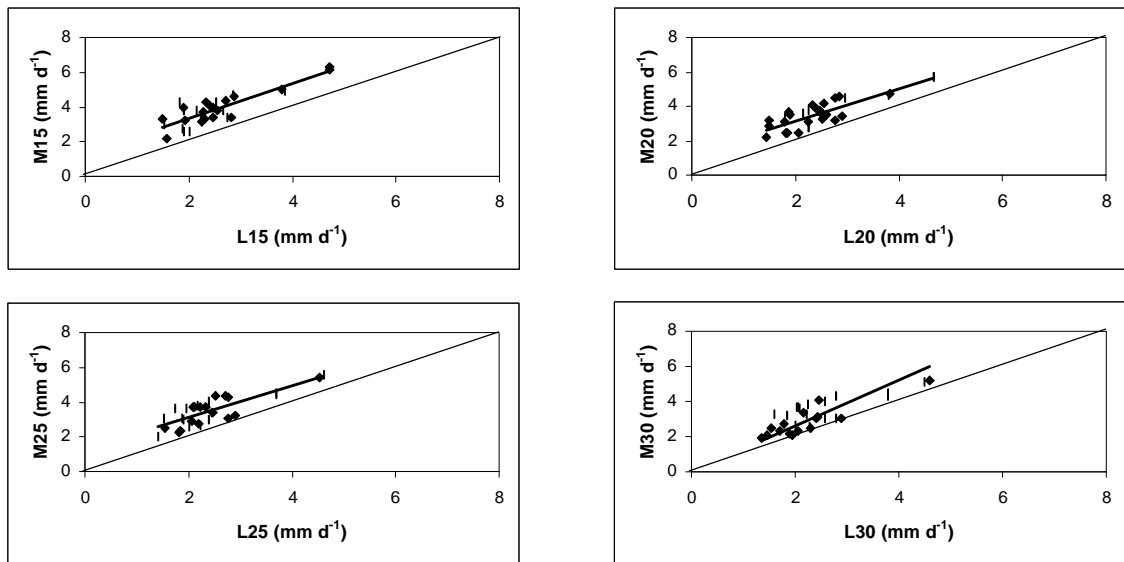


Figura 5 - Relação entre a ETo determinada pelo método lisímetro e os milímetros com nível freático constante a 15, 20, 25 e 30 cm, no período de cinco dias.

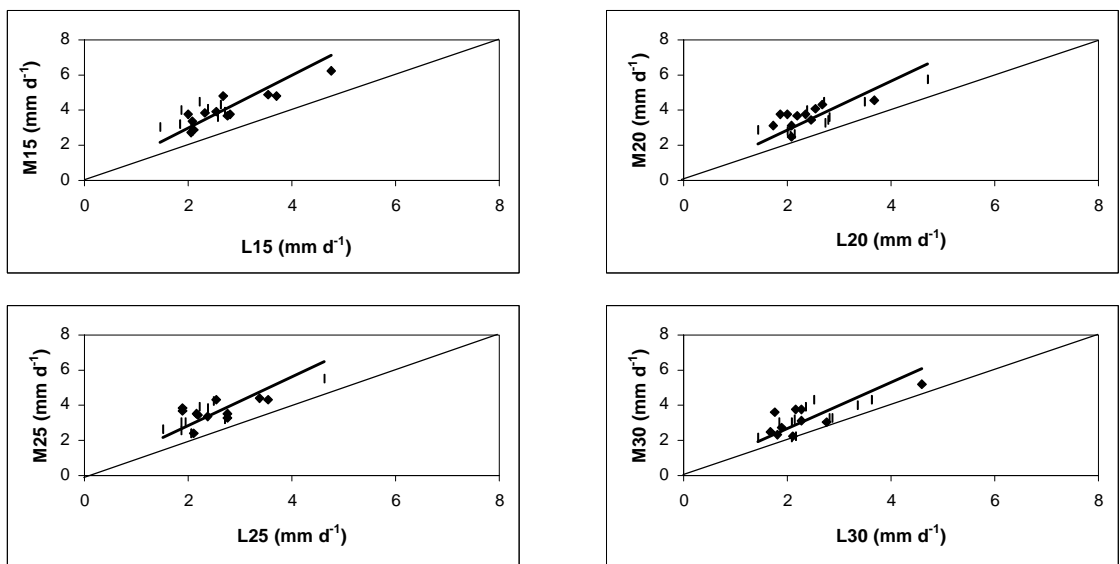


Figura 6 - Relação entre a ETo determinada pelo método lisímetro e os milímetros com nível freático constante a 15, 20, 25 e 30 cm, no período de sete dias.

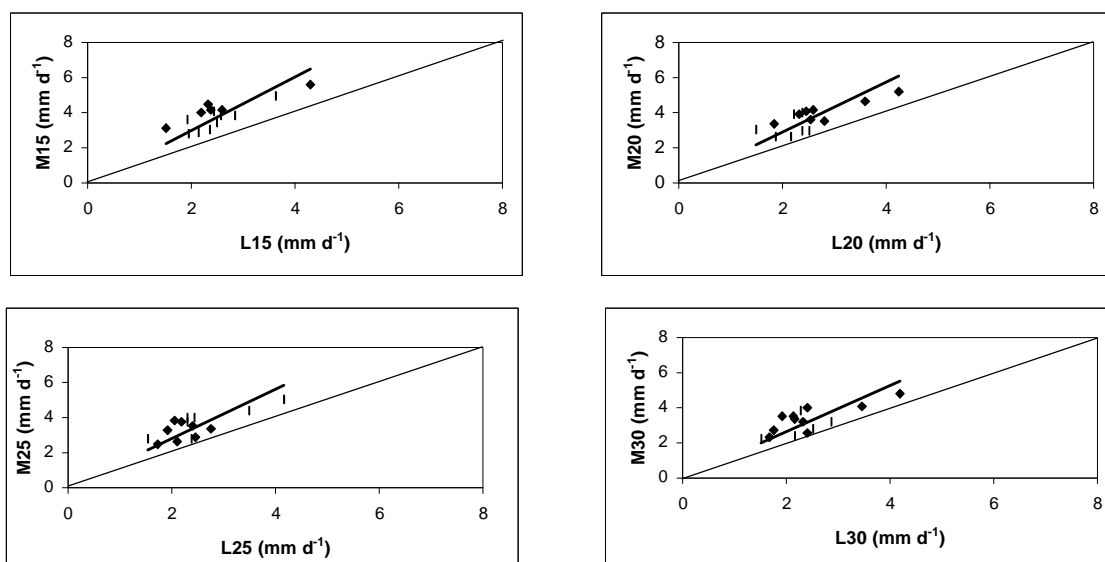


Figura 7 - Relação entre a ETo determinada pelo método lisímetro e os milímetros com nível freático constante a 15, 20, 25 e 30 cm, no período de 10 dias.

Segundo Mañas et al. (1993) e Allen et al. (1991), a altura da grama na área efetiva dos lisímetros e na área circunvizinha deve ser homogênea, para evitar diferenças na evapotranspiração.

As diferenças em crescimento das culturas no interior dos lisímetros em relação à área externa, especialmente quando as plantas crescem mais no interior, provocam perturbação no movimento horizontal do ar e aumentam o grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura, resultando em maior transpiração da vegetação. A interceptação da radiação solar incidente aumenta numa proporção que pode chegar a 40% (SEDIYAMA, 1996).

No Quadro 5 encontram-se os valores de evapotranspiração acumulada, no período estudado, nos lisímetros e minilísimetros dos diferentes níveis freáticos. Nesse quadro, observa-se maior redução percentual da evapotranspiração ocorrida nos minilísimetros comparativamente aos lisímetros, sendo que o efeito varal sobre a evapotranspiração nos minilísimetros foi incrementado à medida que diminuiu a profundidade freática, devido ao maior potencial hídrico no sistema substrato-planta.

Dias-Espejo et al. (2005), avaliando minilísimetros de área exposta à evapotranspiração de 0,062 m², com regime de umidades diferentes e submetidos a condições de advecção, observaram uma evapotranspiração ligeiramente superior nos minilísimetros com maior teor de água em relação aos de menor teor de umidade, devido a um incremento no consumo de calor latente ocasionado pela advecção, induzido por maior disponibilidade de umidade.

A análise conjunta das Figuras 3 a 7 e do Quadro 5 indicou que o aumento da profundidade freática acarreta maior redução no consumo de água da grama-batatais plantada nos minilímetros, comparativamente aos lisímetros. Isso indica que o uso do minilímetro pode ser viabilizado com melhor ajuste do gramado submetido à maior profundidade freática, a fim de reduzir o efeito varal sobre a evapotranspiração.

Quadro 5 – Valores de evapotranspiração acumulada (ET) nos lisímetros e minilímetros nas diversas profundidades freáticas, durante o período experimental e a variação percentual entre eles

Dispositivo	ET acumulada (mm)	Dispositivo	ET acumulada (mm)	Diferença Percentual (%)
L15	391,14	M15	604,34	54,51
L20	389,50	M20	567,43	45,68
L25	377,68	M25	545,10	44,33
L30	373,66	M30	505,61	35,31

O desempenho dos milímetros observado neste trabalho está de acordo com os resultados obtidos por Allen e Fischer (1990), que encontraram uma superestimação de 45% da ETo, medida em dois lisímetros de pesagem em relação ao método Penman-Monteith. Isso foi atribuído ao fato de a grama estar 45 cm mais alta em comparação com a altura da cultura hipotética (10 cm) adotada no método Penman-Monteith. Aboukhaled et al. (1986) relataram aumentos na ordem de 10% a 30% da evapotranspiração quando a grama foi mantida de 7 a 15 cm mais alta que a grama de referência (10 cm). Esses autores atribuíram esses resultados ao efeito varal e à maior incidência da radiação solar sobre os lisímetros.

No Quadro 6, encontram-se a evapotranspiração acumulada no período de estudo para o método Penman-Monteith FAO 56 (444,52 mm), M15 (604,34 mm), M20 (567,43 mm), M25 (545,10 mm), M30 (505,61 mm), L15 (391,14 mm), L20 (389,50 mm), L25 (377,68 mm) e L30 (373,66 mm).

Observa-se, no Quadro 6, que os lisímetros subestimaram os valores de evapotranspiração em 12,0, 12,4, 15,0, 15,9, respectivamente. Já os métodos M15, M20, M25 e M30 superestimaram os valores de evapotranspiração em 36,0%, 27,7%, 22,6%; e 13,7%, respectivamente.

Quadro 6 – Valores de evapotranspiração acumulada, medidos e estimados, durante o período experimental

Método	ETo média mm d ⁻¹	ETo acumulada mm	Variação porcentual da ETo
Penman-Monteith FAO 56	2,83	444,52	-
Minilisímetro M15*	3,85	604,34	36,0
Minilisímetro M20*	3,61	567,43	27,7
Minilisímetro M25*	3,47	545,10	22,6
Minilisímetro M30*	3,22	505,61	13,7
Lisímetro L15*	2,49	391,14	-12,0
Lisímetro L20*	2,48	389,50	-12,4
Lisímetro L25*	2,41	377,68	-15,0
Lisímetro L30*	2,38	373,66	-15,9

* M15, M20, M25 e M30: lençol freático a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade.

* L15, L20, L25 e L30: lençol freático a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade.

No Quadro 6, pode ser destacada uma tendência nos minilisímetros e lisímetros com lençol freático constante a uma diminuição da evapotranspiração, à medida que o nível da solução nutritiva aumenta em relação à superfície. Segundo Grassi (1993), ao aumentar a profundidade do plano freático diminui a taxa de movimento ascendente da água, sendo menor seu aporte ao processo de evapotranspiração. Assim, os maiores valores de evapotranspiração nas menores profundidades freáticas podem ser devidos ao elevado teor de água no sistema substrato-planta nos minilisímetros e lisímetros, principalmente no nível freático a 15 cm de profundidade.

4. CONCLUSÕES

- Os métodos L15, L20 e M30 apresentaram bom desempenho.
- Nos minilisímetros ocorreu maior consumo de água pela grama-batatais, por causa do efeito buquê e principalmente do efeito varal e da maior exposição da cultura à radiação.
- O maior consumo de água nos minilisímetros e nos lisímetros ocorreu no nível freático de 15 cm, decrescendo com o aumento da profundidade, sendo esse efeito mais pronunciado nos minilisímetros.
- A bordadura utilizada nos minilisímetros como área-tampão não foi suficiente para evitar o efeito varal, ocasionando maior consumo de água ao verificado nos lisímetros.

5. REFERÊNCIAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Los lisímetros**. Roma: FAO, 1986. 59 p. (FAO, Paper 39).

ALLEN, R. G. A penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Logan, v. 112, n. 4, p. 758-772, 1986.

ALLEN, R. G. **Reference evapotranspiration calculation software**. For FAO and ASCE standardized equations. Version 2.0. University of Idaho, 2001. 82 p.

ALLEN, R. G.; FISCHER, D. F. "Low-cost electronic weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, Davis, v. 33, n. 6, p. 1823-1833, 1990.

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. Reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 5, p. 758-772, 1991.

AMORIM, M. C. de. **Avaliação da eficácia do lisímetro de lençol freático constante, do tanque classe "A" e do modelo de Penman-Monteith (FAO) para estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀)**. Viçosa, MG: UFV/DEA, 1998. 56 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. CH.; SOARES, A. A.; **Manual de irrigação**. 7a. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006. 611 p.

CHAUDHARY, T. N.; BHATNAGAR, V. K.; PHIHAR, S. S. Corn yield and nutrient uptake as affected by water table depth and soil submergence. **Agronomy Journal**. Mandan, v. 67, p. 745-9, 1975.

DIAZ-ESPEJO, A. V.; KNIGHT, R. Illustration of micro-scale advection using grid-pattern mini-lysimeters. **Agricultural and Forest Meteorology**, Reading, v. 129, p. 39-52, 2005.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

FOLLET, R. F.; ALLMARAS, R. R.; REICHMAN, G. S. Distribution of corn roots cultivars to flooding. **Agronomy Journal**. Mandan, v.66, p. 288-92, 1974.

GRABLE, A. R. Soil aeration and plant growth. **Advance Agronomy**. Grand Junction, v. 18: 57-106, 1966.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter design and use for evapotranspiração. In: **Lysimeter for evapotranspiration and environment measurements**. New York: ASCE, 1991. p. 1-19.

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

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Trad. de PRADO, C. H. São Carlos; SP: Rima, 2004. 531 p.

MAÑAS, F. M.; VALERO, J. A. **Agronomía del riego**. Madrid, España: La Universidad de Castilla-La Mancha; Impr. Ediciones Mundi-Prensa, 1992. 732 p.

MARTINEZ, H. E.; DA SILVA, J. B. **Introdução ao cultivo hidropônico de plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2004. 111 p.

RUIZ, A. H. Relações molares de macronutrientes em tecidos vegetais como base para a formulação de soluções nutritivas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 44, n. 255, p. 533-546, 1997.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: Histórico, evolução e análises crítica. **Revista Brasileira de Agroclimatologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. I-XII, 1996.

SILVA, D. F. **Análises quantitativa e qualitativa do crescimento e desenvolvimento da grama-batatais e grama-esmeralda em diferentes lâminas de irrigação**. Viçosa, MG: UFV/DEA, 2004. 48 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Trad. SANTARÉM, R. E. 3. ed. Porto Alegre: Artemed, 2004. 719 p.

WILLIAMSOM, R. E. The effect of root aeration on plant growth. **Soil Sci. Soc. Proc.** Raleigh, v. 28, p. 86-90, 1964.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluation and comparasion of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

WILLIAMSON, R. E.; KRIZ, G. J. Response of agricultural crops to flooding, depth of water, and gaseous composition. **Transactions of the ASAE**, Raleigh, v. 13, n.1, p. 216-20, 1970.

PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA DA GRAMA-BATATAIS
(*Paspalum notatum* Flugge) EM MINILISÍMETROS E LISÍMETROS
EQUIPADOS COM IRRIGÂMETRO[®] MODIFICADO, PARA DIFERENTES
PROFUNDIDADES DO NÍVEL FREÁTICO

Franklin José Valbuena Materán, Rubens Alves de Oliveira, Herminia Emilia Prieto Martinez, Hugo Alberto Ruiz, Paulo Roberto Cecon e Gilberto Chohaku Sedyama.

Os autores são: **Franklin José Valbuena Materán**, Candidato a *Doutor Scientiae* em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais (MG), Brasil, bolsista da “La Universidad Del Zulia”; **Rubens Alves de Oliveira**, Professor Adjunto, DEA/UFV, MG, Brasil; **Herminia Emilia Prieto Martinez**, Professor Adjunto, DFT/UFV, MG, Brasil; **Hugo Alberto Ruiz**, Professor Titular, DS/UFV, MG, Brasil; **Paulo Roberto Cecon**, Professor Adjunto, DI/UFV, MG, Brasil; **Gilberto Chohaku Sedyama**, Professor Titular, DEA/UFV, MG, Brasil. **Autor correspondente:** Franklin José Valbuena Materán, Depto. de Engenharia Agrícola, Av. P. H. Rolfs, s/n, 36570-000 Viçosa, MG, Brasil. Tel.: 55-31-3899-2732; e-mail: franklinvalb@yahoo.com

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro[®], pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, no período de julho a dezembro de 2005. Dois experimentos foram conduzidos com grama-batatais (*Paspalum Notatum* Flugge), sendo um com minilísímetros e outro com lisímetros, ambos com lençol freático constante, preenchidos com substrato de areia e operando com Irrigâmetro[®] modificado. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis freáticos (15, 20, 25 e 30 cm de profundidade), estabelecidos nos minilísímetros (M15, M20, M25 e M30), com quatro repetições. No experimento com os lisímetros, os mesmos tratamentos foram aplicados (L15, L20, L25 e L30), com três repetições. Em ambos os experimentos, utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado. A grama-batatais também foi cultivada em três lisímetros de drenagem preenchidos com Latossolo Vermelho-Amarelo. Cada minilísímetro, lisímetro com lençol freático constante e lisímetro de drenagem foi considerado uma parcela experimental, e a vegetação delas foi cortada a 8 cm sempre que atingia 15 cm de altura, sendo realizadas 10 podas durante o período experimental. Neste trabalho, objetivou-se: avaliar o efeito dos quatro níveis freáticos sobre a produtividade de matéria seca da grama-batatais cultivada em minilísímetros e lisímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado; e comparar a produtividade de matéria seca e a eficiência do uso da água (EUA) da grama-batatais obtida nos minilísímetros e lisímetros, ambos com lençol freático e operando com Irrigâmetro[®] modificado, em relação à produtividade de matéria seca e

EUA da grama-batatais obtida no lisímetro de drenagem (padrão). Com base nos resultados, verificou-se que, à exceção do nível freático de 25 cm, as produtividades de matéria seca da grama-batatais tanto nos minilímetro quanto nos lisímetros não variaram significativamente, nos diferentes níveis freáticos estudados. A produtividade média de matéria seca da grama-batatais cultivada nos minilímetros não diferiu significativamente da produtividade média obtida no lisímetro com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado. A produtividade de matéria seca de grama-batatais obtida no lisímetro com lençol freático constante mantido a 20 cm de profundidade superou estatisticamente a produtividade obtida no lisímetro de drenagem. A bordadura utilizada nos minilímetros como área-tampão não foi suficiente para evitar o efeito varal, ocasionando maior consumo de água comparativamente ao verificado nos lisímetros de lençol freático e no lisímetro de drenagem. A eficiência do uso da água média da grama-batatais nos lisímetros e nos minilímetros não variou significativamente nos diferentes níveis freáticos estudados. A eficiência do uso da água média da grama-batatais cultivada nos minilímetros não diferiu significativamente da obtida nos lisímetros, nos diferentes níveis freáticos estudados. A eficiência do uso da água da grama-batatais obtidas nos lisímetros e nos minilímetros com lençol freático constante, operando com Irrigâmetro[®] modificado, não variaram significativamente da obtida no lisímetro de drenagem.

Palavras-chaves: Evapotranspiração de referência, Irrigâmetro[®], lisímetro, e minilímetro.

1. INTRODUÇÃO

Na literatura, as duas definições mais comuns para evapotranspiração de referência consideram como cultura de referência a grama (ET_o) e a alfafa (ET_r) (SEDIYAMA, 1996; PEREIRA et al., 1997). Doorenbos e Pruitt (1997) definiram ET_o como a evapotranspiração que ocorre em extensa superfície de grama, com altura de 8 a 15 cm, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem restrição de água. Jensen (1973) definiu ET_r como a evapotranspiração que se verifica em uma cultura de alfafa, de 30 a 50 cm de altura e bordadura mínima de 100 m, cultivada sem deficiência hídrica. Embora se reconheça que a alfafa possui característica aerodinâmica mais representativa que a grama, esta última é mais utilizada, pelo simples fato de a grande maioria das estações agrometeorológicas ser gramada (JENSEN, 1973; SMITH, 1991).

A determinação da evapotranspiração de áreas gramadas pode ser feita por meio de medidas diretas utilizando os lisímetros. Segundo Aboukhaled et al. (1986), a palavra lisímetro é derivada do grego *lysis* e significa dissolução ou movimento, e *metron* significa mensurar. Os lisímetros são recipientes cheios de solo localizados no campo, para representarem o ambiente local, com superfície coberta por vegetação ou em solo sem vegetação, para determinação da evapotranspiração de uma cultura em crescimento, ou de uma cultura de referência ou, ainda, da evaporação num solo descoberto. Para Bernardo et al. (2006) e Amorim (1998), o método do lisímetro é o mais preciso e considerado ainda instrumento-padrão para a determinação da evapotranspiração de referência (ET_o).

Segundo Aboukhaled et al. (1986) e Howell et al. (1991), os lisímetros utilizados em pesquisas de evapotranspiração usualmente podem ser agrupados em três categorias: (1) não-pesáveis com lençol freático de nível constante; (2) não-pesáveis com drenagem livre e (3) lisímetros pesáveis, em que a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem.

Nos lisímetros não-pesáveis com lençol freático de nível constante, o nível da água é mantido em determinada profundidade, na qual, devido à evapotranspiração, a água é translocada até a zona radicular, por capilaridade. A descida do nível freático causado por esse deslocamento é automaticamente compensada por um mecanismo flutuador, sendo a quantidade de água necessária para repor esse nível medida também automaticamente (ABOUKHALED et al., 1986).

A posição do lençol freático determina as condições de umidade da zona radicular e, portanto, influi no suprimento de água e na aeração do solo. Assim, lençóis freáticos superficiais contribuem para uma deficiência na aeração e restringem o sistema radicular nas camadas superficiais do solo, limitando consideravelmente a quantidade de nutrientes do solo disponíveis às plantas (WILLIAMSOM, 1964; GRABLE, 1966; FOLLETT et al., 1974; CHAUDHARY et al., 1975; LARCHER, 2004; TAIZ e ZEIGER, 2004). No entanto, o rebaixamento excessivo do lençol freático poderá ocasionar deficiências hídricas, sendo responsável pela redução na produtividade (WILLIAMSOM e KRIZ, 1970).

O lisímetro de drenagem é o mais simples e o de uso mais difundido no Brasil, consistindo de um tanque instalado no solo que apresenta uma rede de tubulações, permitindo conduzir a água drenada até um recipiente. A evapotranspiração de referência, por ele determinada, deve ser em termos de médias semanais, quinzenais ou

mensais (BERNARDO et al. 2006; AMORIM, 1998; SILVA 1996). Já os lisímetros de pesagem são constituídos de uma caixa impermeável sobre a qual é instalada uma célula de carga, cuja finalidade é medir a sua variação de peso, obtendo-se, assim, a medida da evapotranspiração.

No Brasil, as dificuldades econômicas têm exigido dos pesquisadores muita criatividade, quanto à necessidade de se obterem medidas de evapotranspiração, já que equipamentos como os lisímetros de pesagem, embora mais precisos, têm custos muito elevados. Dessa forma, tornou-se comum o emprego de evapotranspirômetros, quer sejam de drenagem ou de lençol freático constante (LUNARDI, 1999). Dentre os pesquisadores, podem-se citar os trabalhos de Assis (1978), Encarnação (1980), Barbieri (1981), Mantovani (1986), Cury e Villa Nova (1989), Espínola Sobrinho et al. (1989), Amorin (1994), Pavani (1995), Peres et al. (1995), Silva (1996), Camargo e Sentelhas (1997), Faccioli (1998), Medeiros (1998), Lunardi (1999), Silva et al. (1999), Lunardi et al. (2002) e Silva (2004), os quais, em sua maioria, têm adotado a grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge) como cultura de referência.

Embora já exista informação técnica sobre a grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge), há necessidade de estudar o efeito de profundidades freáticas sobre seu crescimento nos lisímetros com lençol freático constante, já que estudos desse tipo ainda hoje são praticamente inexistentes na literatura, principalmente quando a informação gerada por eles é utilizada para o planejamento e manejo da agricultura irrigada de culturas de alto valor comercial.

Segundo Grassi (1993), a importância em conhecer a evapotranspiração é a estreita relação entre a transpiração e a produção de biomassa da planta. Para Nas-Nrc (1962), a matéria seca, ou volume de biomassa produzido, é considerada a mais simples e importante medida de crescimento da planta e, provavelmente, o reflexo das condições de ambientes responsáveis pelo seu crescimento.

Nesse contexto, objetivou-se, com o presente estudo, avaliar o efeito de diferentes níveis freáticos sobre a produtividade de matéria seca da grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge) cultivada em minilímetros e lisímetros, ambos preenchidos com substrato de areia, alimentados com solução nutritiva, com lençol freático constante e operando com Irrigâmetro[®] modificado, bem como comparar as produtividades de matéria seca e a eficiência do uso da água (EUA) da grama-batatais dos minilímetros e lisímetros com lençol freática constante em relação à produtividade do lisímetro de drenagem (padrão).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro[®], pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizada na cidade de Viçosa, MG, com 20° 45' de latitude sul, 42° 45' de longitude oeste e altitude de 651 m. A temperatura média anual de Viçosa é de 19 °C. A umidade relativa do ar é, em média, de 80% e a precipitação média anual, de 1.341 mm, com estações seca e chuvosa bem definidas. O clima da região é do tipo Cwa, segundo classificação climática proposta por Köppen, isto é, subtropical, com inverno seco.

2.1. Delineamento experimental e tratamentos

Dois experimentos foram conduzidos com grama-batatais (*Paspalum Notatum* Flugge), sendo um com minilímetros e outro com lisímetros, ambos com lençol freático constante e operando com Irrigâmetro[®] modificado. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis freáticos (15, 20, 25 e 30 cm de profundidade), estabelecidos nos minilímetros (M15, M20, M25 e M30), com quatro repetições. No experimento com os lisímetros, os mesmos tratamentos foram aplicados (L15, L20, L25 e L30), com três repetições. Em ambos os experimentos, utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado. A grama-batatais também foi cultivada em três lisímetros de drenagem.

2.2. Descrição do minilímetro com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado

O minilímetro foi construído com tubo de PVC de 60 cm de altura e 450 mm de diâmetro, dentro do qual foi instalado, de maneira concêntrica, outro tubo de PVC, de mesma altura e 250 mm de diâmetro, com área interna de 0,0468 m², no qual foi feito o controle da água consumida pela grama-batatais (Figura 1). O minilímetro foi assentado sobre um estrado de madeira com 15 cm de altura e coberto com uma telha transparente de fibra de vidro, com espessura de 2 mm, localizada 50 cm acima da sua borda.

Uma mangueira de polietileno de 20 mm conectou o fundo do cilindro interno com o Irrigâmetro[®] modificado, construído com tubo de PVC de 75 mm de diâmetro e 1

m de altura. O Irrigâmetro[®] modificado usa o princípio de Mariotte tendo sido usado para manter o nível freático constante no minilímetro, fazendo a reposição da água e fornecendo diretamente o valor da lâmina evapotranspirada. A água deslocada no Irrigâmetro[®] modificado foi quantificada por meio de régua milimétrica, sendo a sensibilidade de leitura igual a 0,086 mm, definida pela relação entre as áreas da seção transversal do tubo de alimentação do Irrigâmetro[®] modificado e do cilindro interno do minilímetro.

No preenchimento dos minilímetros foi colocada inicialmente uma camada de brita 0, com espessura de 5 cm, sobre a qual repousou uma camada de 5 cm de brita 1, acima da qual foi colocada uma camada de 45 cm de substrato de areia com granulometria entre 0,104 e 1 mm. A análise granulométrica da areia foi realizada no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1- Distribuição granulométrica do substrato de areia

Granulometria				Massa Específica (g cm ⁻³)	
Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Partículas	Solo
93	4	0	3	2,85	1,50



Figura 1 - Partes constituintes do minilímetro com lençol freático constante e do Irrigâmetro[®] modificado.

2.3. Descrição do lisímetro com lençol freático constante e operando com Irrigâmetro[®] modificado

Os lisímetros foram construídos com caixas de cimento-amianto (Figura 2), com as seguintes dimensões: 1,10 m de largura, 1,60 m de comprimento e 0,70 m de profundidade, apresentando uma área interna de 1,6845 m². Na instalação dos lisímetros, as bordas das caixas ficaram 5 cm acima da superfície do solo. No fundo de cada lisímetro foi construída uma rede de distribuição constituída de três tubos de PVC de 20 mm.

Cada lisímetro foi conectado a um Irrigâmetro[®] modificado através de uma tubulação de PVC de 20 mm. O Irrigâmetro[®] modificado foi construído com tubo de alimentação de PVC com diâmetro de 200 e 1 m de altura. O Irrigâmetro[®] modificado usa o princípio de Mariotte para manter o nível freático constante no minilímetro, fazendo a reposição da água e fornecendo diretamente o valor da lamina evapotranspirada. A água deslocada no Irrigâmetro[®] modificado foi quantificada por meio de régua milimétrica, sendo a sensibilidade de leitura igual a 0,01 mm, definida pela relação entre as áreas da seção transversal do tubo de alimentação do Irrigâmetro[®] modificado e da seção transversal do lisímetro.

No preenchimento dos lisímetros foi colocada inicialmente uma camada de brita 0, de 5 cm de altura, seguida de outra camada de brita 1, de 7 cm de altura, acima da qual foi colocada um substrato de granulometria entre 0,104 e 1 mm. A análise granulométrica da areia foi realizada no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados são apresentados no Quadro 1.

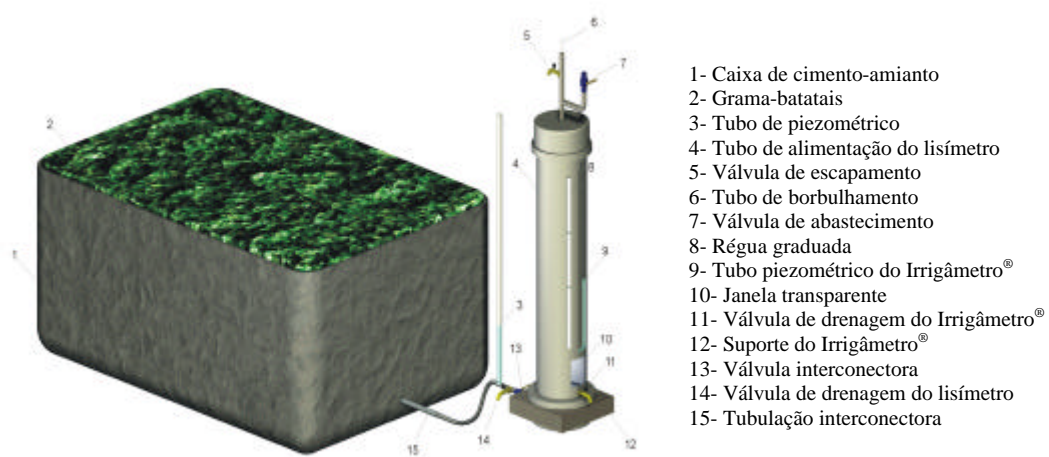


Figura 2 – Partes constituintes do lisímetro com lençol freático constante e do Irrigâmetro[®] modificado.

2.4. Descrição do lisímetro de drenagem

Na área experimental foram instalados três lisímetros de drenagem, construídos com caixas de cimento-amianto, com as seguintes dimensões: 1,10 m de largura, 1,60 m de comprimento e 0,70 m de profundidade, com área interna de 1,6845 m². Na instalação dos lisímetros, as bordas das caixas ficaram 5 cm acima da superfície do solo. O sistema de drenagem desses lisímetros foi constituído de uma camada de brita zero, com espessura de 5 cm, sobre a qual repousa uma camada de 5 cm de brita 1. No fundo da caixa foi instalada uma rede de drenagem formada por tubos de PVC de 20 mm, com perfurações de 1 mm, conectada a uma estação de coleta da água drenada.

Os lisímetros de drenagem foram preenchidos com material de solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, distribuído em camadas de 10 cm até a espessura total de 70 cm, incluindo as camadas de brita e areia. No início da pesquisa foi feita uma calagem com base no resultado da análise química do solo. A adubação nos lisímetros de drenagem foi feita mensalmente com aplicação de 20 g m⁻² do fertilizante da formulação NPK 10-10-10. As análises granulométrica e química e a curva de retenção de água no solo foram realizadas nos Laboratórios de Rotina e de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados são apresentados nos Quadros 2, 3 e 4, respectivamente.

Quadro 2 - Resultado da análise física do solo

Granulometria				Massa Específica (g cm ⁻³)	
Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Partículas	Solo
15	8	0	77	2,62	0,99

Quadro 3 - Resultados da análise química do solo

pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al*	SB*	CTC*	MO*	V*
H ₂ O	mg dm ⁻³					cmol _c dm ⁻³			dag kg ⁻¹	%
4,79	1,00	13,00	0,32	0,08	0,59	6,40	0,43	1,02	2,66	6,30

* H+Al = Acidez Total, SB = Soma de Bases Trocáveis, CTC = Capacidade de Troca Catiônica Efetiva, MO = Matéria Orgânica e V = Índice Saturação de Bases.

Quadro 4 - Valores de umidade do solo, em diferentes potencias matriciais

Potencial Matricial (MPa)	-0,01	-0,03	-0,05	-0,10	-0,20	-0,50	-1,50
Umidade do solo (kg kg ⁻¹)	0,429	0,378	0,294	0,286	0,257	0,244	0,239

Os lisímetros de drenagem foram irrigados diariamente pela superfície, utilizando-se um volume de água suficiente para promover uma pequena drenagem.

Segundo Aboukhaled et al. (1977), a evapotranspiração pode ser calculada pela seguinte equação:

$$E_{To} = P + I - D \quad (1)$$

em que:

E_{To} = evapotranspiração de referência, mm no período;

P = precipitação no período, mm;

I = lâmina de água aplicada na irrigação no período, mm; e

D = lâmina de água drenada no período, mm.

2.5. Condução do experimento

O trabalho foi desenvolvido durante o período compreendido entre julho e dezembro de 2005. Dentro e ao redor dos minilímetros e lisímetros foi cultivado com grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge). Os minilímetros e lisímetros de lençol freático constante foram abastecidos com solução nutritiva inicial, descrita no Quadro 5, até atingir os níveis freáticos estabelecidos, sendo o reabastecimento feito com a solução nutritiva descrita no Quadro 6. Tanto a solução nutritiva inicial quanto a de reabastecimento foram formuladas de acordo com Martinez e Silva (2004), Silva (2004) e Ruiz (1997).

O pH e a condutividade elétrica da solução nutritiva de cada minilímetro e lisímetro com lençol freático constante foram medidos em três profundidades (no fundo, na altura mediana e próximo à superfície do lençol freático) duas vezes por semana, ao longo da pesquisa. O pH foi mantido próximo de 7 com o uso de ácido clorídrico 10% para evitar a alcalinização do substrato. A condutividade elétrica da solução no interior dos minilímetros e lisímetros foi mantida entre 630 e 1.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, ajustando-se as concentrações de macro e micronutrientes da solução nutritiva de reabastecimento para evitar a deficiência de nutrientes na cultura.

Cada minilímetro, lisímetro com lençol freático constante e lisímetro de drenagem foi considerado uma parcela experimental. Em cada parcela, a vegetação foi cortada sempre que atingia 15 cm de altura. Para isso, adaptou-se um suporte de metal a uma tesoura para que o corte fosse feito uniformemente a 8 cm de altura, sendo realizadas 10 podas durante os períodos experimentais, acondicionando-se o material colhido em sacos de papel devidamente identificados. Posteriormente, as amostras foram levadas à estufa de circulação forçada de ar, a 75 °C, por 72 horas. Em seguida

foram colocadas em dessecadores até resfriar à temperatura ambiente e, finalmente, pesadas em balança de precisão para a obtenção da matéria seca.

A medição da evapotranspiração ocorrida nos lisímetros e minilísímetros foi feita diretamente no Irrigâmetro[®] modificado, sendo realizada diariamente às nove horas da manhã.

Os elementos climáticos diários foram obtidos na Estação Climatológica Principal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, próximo à área experimental, em Viçosa, MG.

Quadro 5 - Fontes de nutrientes utilizadas para compor a solução nutritiva inicial, empregada dos minilísímetros e lisímetros de lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado

Sal	mg L ⁻¹	Sal	g L ⁻¹
H ₃ BO ₃	1,24	Ca(NO ₃) ₂	0,519
CuSO ₄	0,20	KNO ₃	0,202
MnSO ₄	2,53	NH ₄ NO ₃	0,064
(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄	0,09	MgSO ₄	0,246
ZnSO ₄	0,57	NH ₄ H ₂ PO ₄	0,115
FeCl ₃	10,81	CaCO ₃	0,300
Na ₂ EDTA	14,89		

Quadro 6 - Conjuntos de fontes de nutrientes (g L⁻¹) utilizados para compor a solução nutritiva empregada no reabastecimento dos minilísímetros e lisímetros de lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado

Sal	Conjunto 1		Sal	Conjunto 2	
	A	B		A	B
	g L ⁻¹			g L ⁻¹	
H ₃ BO ₃	1,24		Ca(NO ₃) ₂	103,90	
CuSO ₄	0,20		KNO ₃	40,44	
MnSO ₄	2,53		NH ₄ NO ₃	12,80	
(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄	0,09		MgSO ₄		49,20
ZnSO ₄	0,57		NH ₄ H ₂ PO ₄		23,00
FeCl ₃		10,81			
Na ₂ EDTA		14,89			

Durante a condução do experimento houve a presença de lagartas (*Spodoptera* spp.) e formigas, as quais foram controladas com aplicações de deltametrina e clorpirifós etil.

Semanalmente foi feita a limpeza manual do gramado dentro e fora dos dispositivos lisimétricos, para controle de plantas invasoras, especialmente *Cyperus* spp.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 estão apresentados os valores médios da produtividade de matéria seca da grama-batatais obtida nos minilísímetros, operando com Irrigâmetro[®] modificado e submetidos a diferentes níveis freáticos, e no lisímetro de drenagem, como também o resultado do teste de Dunnett.

Tabela 1 – Valores médios da produtividade de matéria seca da grama-batatais obtida nos minilísímetros, operando com Irrigâmetro[®] modificado em diferentes níveis freáticos, e nos lisímetros de drenagem

Dispositivo	Matéria seca (g m ⁻²)
Minilísímetro M15	313,90 ^{n.s}
Minilísímetro M20	416,30 ^{n.s}
Minilísímetro M25	434,04 ^{n.s}
Minilísímetro M30	367,27 ^{n.s}
Lisímetro de drenagem	265,55

CV= 30,12%.

^{n.s.}: não-significativo a 5% de probabilidade, em relação ao lisímetro de drenagem pelo teste de Dunnett.

Verifica-se, na Tabela 1, que as médias da produtividade da matéria seca acumulada obtida nos minilísímetros, em todos os níveis freáticos estudados, foram estatisticamente iguais à obtida no lisímetro de drenagem. Isso foi possivelmente devido ao alto valor do coeficiente de variação (30,12%) observado no experimento com os minilísímetros. Essa alta variabilidade na produtividade da matéria seca nos minilísímetros ocorreu possivelmente devido aos espaços não vegetados originados na eliminação de plantas invasoras, principalmente *Cyperus* spp., e também por danos causados pela presença de lagarta (*Spodoptera* spp.), verificada em três ocasiões. Ainda que esses problemas tenham ocorrido também nos lisímetros com lençol freático constante, o efeito na variabilidade da produtividade de matéria seca nos minilísímetros foi mais acentuado por causa de a área ser bem menor (0,0468 m²) em relação à área do lisímetro (1,6845 m²).

Segundo Frame (1981) e Mannetje (2000), a área para a determinação da massa de forragem geralmente varia de 0,25 a 3,0 m². Essas áreas podem ter formatos quadrado, retangular ou circular. Apesar da grande amplitude dos valores apresentados, existe uma relação inversa entre o tamanho da parcela e o erro experimental. Portanto,

aumento no tamanho da parcela acarreta redução na variação entre as parcelas (STEEL e TORRIE, 1980).

Guzman (1991), estudando o tamanho amostral na avaliação da matéria seca para gramíneas de clima tropical na região de Viçosa, Minas Gerais, concluiu que o tamanho ótimo é de 1 m². Para esse tamanho, o CV foi de 17,8%, sendo que as parcelas menores (0,25 e 0,5 m²) deram CV maiores (31,7 e 24,5%, respectivamente), não sendo suficientemente precisas para pesquisa do rendimento de matéria seca.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios da produtividade de matéria seca da grama-batatais, obtida nos lisímetros operando com Irrigâmetro[®] modificado e submetidos a diferentes níveis freáticos e no lisímetro de drenagem, como também o resultado do teste de Dunnett.

Verifica-se, pela Tabela 2, que a média da produtividade de matéria seca da grama-batatais no lisímetro L20 foi estatisticamente superior à obtida no lisímetro de drenagem. Possivelmente, essa superioridade está relacionada à melhor disponibilidade de nutrientes. Segundo Pereira et al. (1997), nos lisímetros de drenagem ocorre lixiviação de nutrientes que pode afetar o crescimento das plantas, por causa da percolação freqüente, necessária no processo de obtenção da evapotranspiração.

Tabela 2 – Valores médios da produtividade de matéria seca da grama-batatais obtida nos lisímetros, operando com Irrigâmetro[®] modificado em diferentes níveis freáticos, e nos lisímetros de drenagem

Dispositivo	Matéria seca (g m ⁻²)
Lisímetro L15	346,99 ^{n.s.}
Lisímetro L20	383,18*
Lisímetro L25	251,86 ^{n.s.}
Lisímetro L30	356,75 ^{n.s.}
Lisímetro de drenagem	265,55

CV= 15,50%

^{n.s.}: não-significativo a 5% de probabilidade, em relação ao lisímetro de drenagem, pelo teste de Dunnett.

* : difere estatisticamente a 5% de probabilidade, em relação ao lisímetro de drenagem, pelo teste de Dunnett.

Na Tabela 2, observa-se que as médias da produtividade de matéria seca da grama-batatais nos lisímetros L15, L25 e L30 foram inferiores à obtida no lisímetro L20. No caso do lisímetro L15, a produtividade de matéria seca pode ter sido afetada por déficit de oxigênio ocasionado pela menor profundidade freática. De acordo com Grable (1966), o déficit de oxigênio no sistema radicular das plantas submetidas ao excesso de água no solo é responsável pela diminuição do crescimento e

desenvolvimento das plantas. Já nos lisímetros L25 e L30 a causa pode ser atribuída ao déficit de umidade devido a níveis freáticos mais profundos. Segundo Taiz e Zeiger (2004), o déficit hídrico provoca diminuição no conteúdo de água na planta, provocando decréscimo no turgor celular das folhas que pode reduzir seu crescimento. As produtividades médias de matéria seca da grama-batatais obtidas nos lisímetros L15, L25 e L30 foram estatisticamente iguais à do lisímetro de drenagem, no nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados da análise conjunta da produtividade de matéria seca da grama-batatais nos lisímetros e minilísímetros operando com Irrigâmetro[®] modificado e submetidos a diferentes níveis freáticos.

Tabela 3 - Valores médios da produtividade da matéria seca da grama-batatais (g m^{-2}) nos lisímetros e minilísímetros operando com Irrigâmetro[®] modificado e submetidos a diferentes níveis freáticos

Nível Freático (cm)	Dispositivos	
	Minilísímetros	Lisímetros
15	313,90 ^a	346,99 ^a
20	416,30 ^a	383,18 ^a
25	434,04 ^a	251,86 ^b
30	367,26 ^a	356,75 ^a

CV= 26,47%. As médias seguidas pela mesma letra na linha, para cada nível freático, não diferem estatisticamente entre si, no nível de 5%, pelo teste F.

Observa-se, na Tabela 3, que as médias de produtividade de matéria seca da grama-batatais obtidas nos minilísímetros foram estatisticamente iguais às medias obtidas nos lisímetros, nas diversas profundidades freáticas estudadas, com exceção do nível freático de 25 cm. Os resultados estão em desacordo com Mañas e Valero (1993), os quais mencionaram que lisímetros de área reduzida provocam maior crescimento das plantas neles cultivadas. No entanto, no nível freático de 25 cm observou-se que existe diferença significativa na produtividade de matéria seca da grama-batatais entre os minilísímetros e lisímetros. Isso foi ocasionado pela diminuição na produtividade de matéria seca da grama-batatais decorrente da presença de lagartas que ocorreram durante o desenvolvimento da pesquisa, que mesmo tendo sido controladas afetaram, de certa maneira a grama-batatais e, em maior grau, a contida nos lisímetros L25, que apresentaram as médias mais baixas.

A Figura 3 apresenta a estimativa da produtividade de matéria seca da grama-batatais nos minilísímetros operando com Irrigâmetro[®] modificado e submetidos a diferentes níveis freáticos.

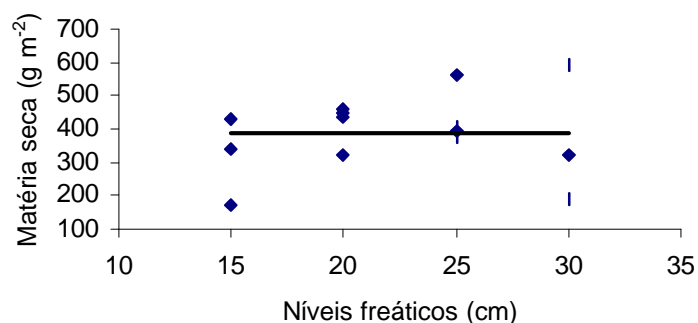


Figura 3 – Estimativa da produtividade de matéria seca da grama-batatais nos minilísímetros operando com Irrigâmetro[®] modificado e submetidos a diferentes níveis freáticos.

Na Figura 3, observa-se que não houve diferença significativa na produtividade de matéria seca da grama-batatais nos minilísímetros submetidos aos diferentes níveis freáticos estudados, sendo as produtividades de matéria seca da grama-batatais obtidas nos minilísímetros iguais à média da estimativa ($Y_{\text{Minilísímetro}} =$) obtida de $382,86 \text{ g m}^{-2}$.

A Figura 4 apresenta a estimativa da produtividade de matéria seca da grama-batatais nos lisímetros, em função dos níveis freáticos aplicados.

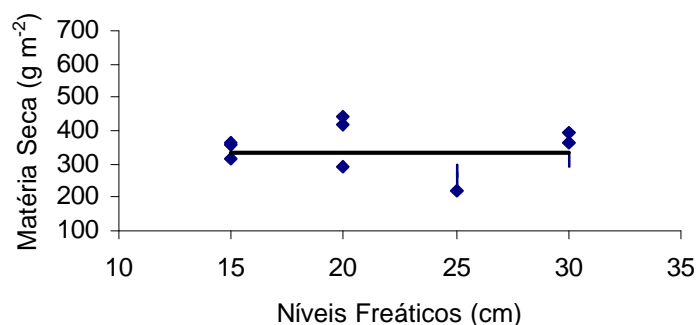


Figura 4 – Estimativa da produtividade de matéria seca da grama-batatais nos lisímetros, em função dos níveis freáticos aplicados.

Observa-se na Figura 4 que não houve diferença significativa na produtividade de matéria seca da grama-batatais cultivada nos lisímetros, quando se aplicaram os diferentes níveis freáticos estudados, sendo as produtividades de matéria seca da grama-batatais nos lisímetros iguais à média da estimativa ($Y_{\text{Lisímetro}} =$) obtida de $334,70 \text{ g m}^{-2}$.

A eficiência de uso da água (EUA) foi obtida por meio da relação entre a matéria seca acumulada da grama-batatais, em g m^{-2} , e a quantidade de água consumida acumulada no processo de evapotranspiração, em mm.

Na Figura 5 encontram-se as médias de evapotranspiração acumulada da grama-batatais obtidas nos minilísímetros e lisímetros com lençol freático constante e nos lisímetros de drenagem.

Analisando a Figura 5, pode-se verificar que o maior consumo de água ocorreu tanto no minilísímetro quanto no lisímetro com lençol freático mantido a 15 cm de profundidade. Esse consumo decresceu nas maiores profundidades freáticas. Segundo Grassi (1993), ao aumentar a profundidade do plano freático, diminui a taxa de movimento ascendente da água, sendo menor seu aporte ao processo de evapotranspiração. Assim, os maiores valores de evapotranspiração para as menores profundidades freáticas podem ser devidos ao elevado teor de água no sistema substrato-planta nos minilísímetros e lisímetros, principalmente no nível freático a 15 cm de profundidade.

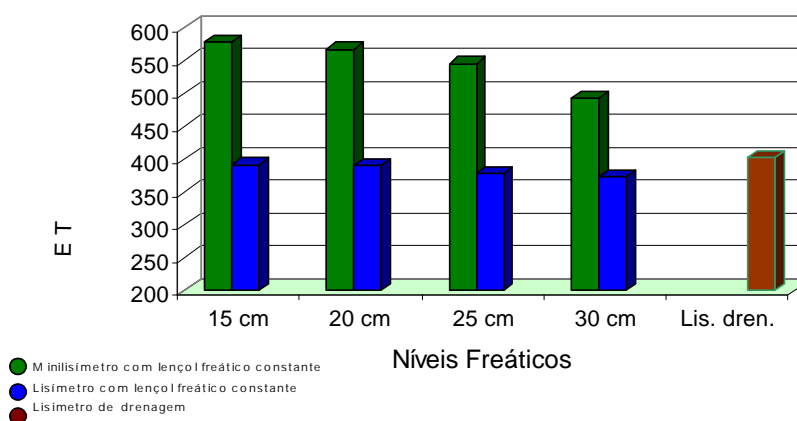


Figura 5 - Evapotranspiração acumulada da grama-batatais nos minilísímetros e lisímetros com lençol freático mantido constante em diferentes profundidades e no lisímetro de drenagem.

Verifica-se também, na Figura 5, que nos minilísímetros ocorreu maior evapotranspiração do que nos lisímetros com lençol freático constante e no lisímetro de drenagem. Esse maior consumo de água pode ser explicado pelas condições de maior exposição da grama ao vento e à radiação, visto que a superfície da cultura ficou posicionada a 75 cm de altura. Isso evidencia que a bordadura oferecida pelo cilindro externo, desempenhando o papel de área-tampão, foi insuficiente para manter um microambiente que pudesse evitar o efeito varal.

Segundo Mañas et al. (1993) e Allen et al. (1991), a altura da grama na área efetiva dos lisímetros e na área circunvizinha deve ser homogênea, para evitar diferenças na evapotranspiração.

As diferenças em crescimento das culturas no interior dos lisímetros em relação à área externa, especialmente quando as plantas crescem mais no interior, provocam perturbação no movimento horizontal do ar e aumenta o grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura, resultando em maior transpiração da vegetação. A interceptação da radiação solar incidente aumenta numa proporção que pode chegar a 40% (SEDIYAMA, 1996).

Na Figura 5, verifica-se, ainda, maior consumo de água no lisímetro de drenagem em relação aos lisímetros com lençol constante operando com Irrigâmetro[®] modificado. Isso possivelmente foi devido às irrigações diárias feitas nos lisímetros de drenagem que proporcionaram elevado teor de água na superfície e no sistema solo-planta, contribuindo para maior evapotranspiração. Ademais, o lisímetro de drenagem foi preenchido com Latossolo Vermelho-Amarelo, sendo os lisímetros com lençol freático constante preenchidos com substrato de areia. Segundo Gardner e Fireman (1958), a taxa de evaporação da água na areia é inferior à da água no solo, devido à maior condutividade hidráulica e à menor capacidade de ascensão capilar da areia.

Os valores médios de EUA da grama-batatais em função dos diferentes níveis freáticos aplicados aos minilímetros de lençol freático operando com Irrigâmetro[®] modificado e ao lisímetro de drenagem estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios da eficiência do uso da água ($\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$) da grama-batatais nos minilímetros com lençol freático mantido constantes nas profundidades estudadas e no lisímetro de drenagem

Dispositivo	EUA ($\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$)
Minilímetro L15	0,54 ^{n.s}
Minilímetro L20	0,74 ^{n.s}
Minilímetro L25	0,80 ^{n.s}
Minilímetro L30	0,75 ^{n.s}
Lisímetro de drenagem	0,66

CV= 33,31%.

^{n.s.} : não-significativo a 5% de probabilidade, em relação ao lisímetro de drenagem, pelo teste de Dunnett.

Verifica-se na Tabela 4 que a EUA obtida nos minilímetros com diferentes níveis freáticos não diferiu estatisticamente daquela obtida no lisímetro de drenagem.

As médias da EUA da grama-batatais em função dos diferentes níveis freáticos aplicados aos lisímetros de lençol freático operando com Irrigâmetro[®] modificado e ao lisímetro de drenagem estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores médios da eficiência do uso da água ($\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$) da grama-batatais, nos lisímetros com lençol freático mantido constante nas diferentes profundidades estudadas e no lisímetro de drenagem

Dispositivos	EUA ($\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$)
Lisímetro L15	0,89 ^{n.s}
Lisímetro L20	0,98 ^{n.s}
Lisímetro L25	0,67 ^{n.s}
Lisímetro L30	0,95 ^{n.s}
Lisímetro de drenagem	0,66

CV= 17,10%

^{n.s.}: não-significativo a 5% de probabilidade, em relação ao lisímetro de drenagem pelo teste de Dunnett.

Na Tabela 5 pode-se constatar que não houve diferença estatística entre as médias da EUA, pelo teste de Dunnett, no nível de probabilidade de 5%. O valor médio da EUA nos lisímetros de drenagem foi de $0,66 \text{ g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$, no período de julho a dezembro, valor próximo ao obtido por Silva (2004) em experimento com lisímetros de drenagem vegetados com grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugem) cultivada em Viçosa, MG. Essa autora encontrou, no período de julho a outubro, o valor de eficiência do uso da água média de $0,65 \text{ g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$, com valor mais alto de $0,86 \text{ g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ no mês de setembro e valor mais baixo de $0,42 \text{ g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ no mês de agosto, não tendo havido diferença estatística entre as médias da eficiência do uso da água, em um nível de significância de 5%, pelo teste de Tukey.

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados da análise conjunta da eficiência do uso da água da grama-batatais nos lisímetros e minilísímetros operando com Irrigâmetro[®] modificados, submetidos a diferentes níveis freáticos. Observa-se, nessa tabela, que as médias de EUA obtidas nesses dois dispositivos não diferiram entre si em uma mesma profundidade freática, pelo teste de F no nível de 5% de probabilidade.

Tabela 6 - Valores médios da eficiência do uso da água ($\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$) da grama-batatais nos lisímetros e minilísímetros com lençol freático constante mantido em diferentes profundidades

Nível Freático (cm)	Dispositivos	
	Minilísímetros	Lisímetros
15	0,54 ^a	0,89 ^a
20	0,74 ^a	0,98 ^a
25	0,80 ^a	0,67 ^a
30	0,75 ^a	0,95 ^a

CV= 26,32%. As médias seguidas pela mesma letra na linha, cada nível freático, não diferem estatisticamente entre si, no nível de 5%, pelo teste F.

Na Figura 6 é apresentada a estimativa da EUA da grama-batatais obtida no minilísímetro operando com Irrigâmetro[®] modificado, em função dos níveis freáticos estudados.

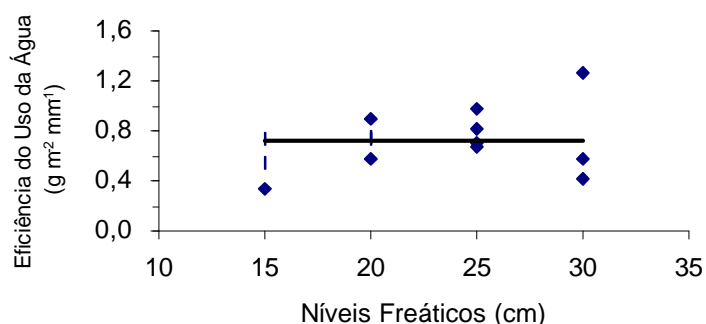


Figura 6 – Estimativa da EUA da grama-batatais obtida no minilísímetro operando com Irrigâmetro[®] modificado, em função dos níveis freáticos estudados.

Observa-se, na Figura 6, que não houve diferença significativa na eficiência do uso da água da grama-batatais nos minilísímetros operando com Irrigâmetro[®] modificado, quando se aplicaram os diferentes níveis freáticos estudados, sendo a EUA da grama-batatais nos minilísímetro igual à média da estimativa ($Y_{EUA \text{ minilísímetro}} =$) obtida de $0,71 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$.

Na Figura 7 é apresentada a estimativa da EUA de grama-batatais obtida nos lisímetros operando com Irrigâmetro[®] modificado, em função dos níveis freáticos estudados.

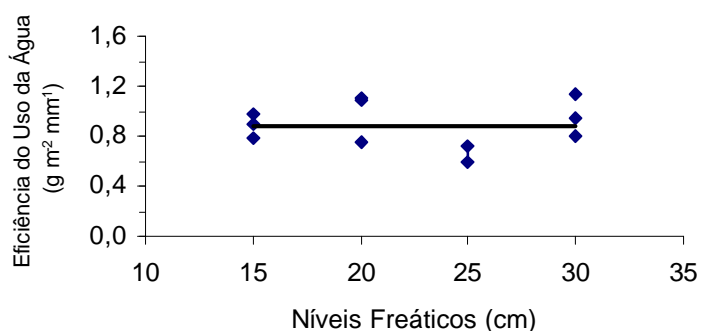


Figura 7 – Estimativa da EUA da grama-batatais obtida nos lisímetros operando com Irrigâmetro[®] modificado, em função dos diferentes níveis freáticos.

À semelhança do que ocorreu com os minilísímetros, observa-se, na Figura 7, que não houve diferença significativa na eficiência do uso da água da grama-batatais nos lisímetros operando com Irrigâmetro[®] modificado, quando se aplicaram os diferentes níveis freáticos, sendo a EUA da grama-batatais nos minilísímetros igual à média da estimativa obtida de $0,87 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ($Y_{EUA \text{ Lisímetro}} =$).

4. CONCLUSÕES

A profundidade freática, nos diferentes níveis estudados, não afetou significativamente a produtividade de matéria seca da grama-batatais cultivada nos lisímetros e nos minilísímetros.

A produtividade média de matéria seca da grama-batatais cultivada nos minilísímetros não diferiu significativamente daquela obtida nos lisímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado, nos níveis freáticos de 15, 20 e 30 cm de profundidade.

A produtividade de matéria seca de grama-batatais obtida no lisímetro com lençol freático constante mantido a 20 cm da profundidade superou estatisticamente a produtividade obtida no lisímetro de drenagem.

A bordadura utilizada nos minilísímetros como área-tampão não foi suficiente para evitar o efeito varal, ocasionando maior consumo de água comparativamente ao verificado nos lisímetros de lençol freático e no lisímetro de drenagem.

A eficiência do uso da água da grama-batatais nos lisímetros e nos minilísímetros com lençol freático constante, operando com Irrigâmetro[®] modificado, não variaram significativamente nos diferentes níveis freáticos estudados.

A eficiência do uso da água da grama-batatais cultivada nos minilísímetros não diferiu significativamente daquela obtida nos lisímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] modificado, nos diferentes níveis freáticos estudados.

A eficiência do uso da água da grama-batatais obtidas nos lisímetros e nos minilísímetros com lençol freático constante, operando com Irrigâmetro[®] modificado, não variaram significativamente da obtida no lisímetro de drenagem.

5. REFERÊNCIAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Los lisímetros**. Roma: FAO, 1986. 59 p. (FAO, Paper 39).

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. Reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 5, p. 758-772, 1991.

AMORIM, M. C. de. **Avaliação da eficácia do lisímetro de lençol freático constante, do tanque classe “A” e do modelo de Penman-Monteith (FAO) para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)**. Viçosa, MG: UFV/DEA, 1998. 56 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ASSIS, F. N. **O uso do evapotranspirômetro no estudo de algumas relações entre a evapotranspiração medida e estimada.** Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Impr. Univ., 1978. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BARBIERI, W.E. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-açúcar (Saccharum spp.).** Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Impr. Univ., 1981. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agroclimatologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação.** 6. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006. 596 p.

CAMARGO, A. P.; SENTALHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agroclimatologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMPOS, H. **Estatística aplicada à experimentação com cana-de-açúcar.** Piracicaba, SP: FEALQ, 1984. 292 p.

CHAUDHARY, T. N.; BHATNAGAR, V. K.; PHIHAR, S. S. Corn yield and nutrient uptake as affected by water table depth and soil submergence. **Agronomy Journal**, Mandan, v. 67, p. 745-9, 1975.

CURY, D. M.; VILLA NOVA, N. A. Determinação do coeficiente de cultura (Kc) do repolho (*Brassica oleracea* var. capitata L.). **Científica**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 109-19, 1989.

SILVA, F. CH. **Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência.** Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Impr. Univ., 1996. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, L. D. **Evapotranspiração do capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.) e Gramma-Batatais (*paspalum notatum* Flugge) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem.** Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Impr. Univ., 2002. 109 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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

ENCARNAÇÃO, C. R. F. **Estudo da demanda de água do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) var. goiano precoce.** Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Impr. Univ., 1980. 62 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ESPINOLA, S. J.; MEDINA, B. F.; MAIA NETO, J. M. Estimativa da evapotranspiração máxima e coeficiente de cultivo para feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) e milho (*Zea mays* L.), **Caatinga**, Mossoró, RN, v.1, n. 6, p. 118-35, 1989.

FACCIOLI, G. G. **Determinação da evapotranspiração de referencia e da cultura da alface em condições de casa de vegetação, em Viçosa, MG.** Viçosa, Minas Gerais: UFV/DEA, Impr. Univ., 1998. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

FOLLET, R. F.; ALLMARAS, R. R.; REICHMAN, G. S. Distribution of corn roots cultivars to flooding. **Agronomy Journal**. Mandan, v. 66, p. 288-92, 1974.

FRAME, J. HERBAGE MASS. IN: HODGSON, J.; BAKER, R.D.; DAVIES, A.; LAIDLAW, A.S; LEAVER, J.D. (Eds.). **Sward measurement handbook**. British Grassland Society/Grassland Research Institute, Hurley, Maidenhead, Berkshire,UK: 1981. p. 39-69.

GARDNER, W. R.; FIREMAN, M. Laboratory studies of evapotranspiration from soil columns in the presence of a water table. **Soil science**. v. 85, p. 244-249. 1958.

GRABLE, A. R. Soil aeration and plant growth. **Advance Agronomy**, Grand Junction, v. 18, p. 57-106, 1966.

GRASSI, C. J. **Fundamentos del riego**. Mérida, Venezuela: Impr. C.I.D.I.A.T., 1993. 408 p.

GUZMAN, G. A. **Tamanho e forma da unidade amostral na avaliação da disponibilidade de matéria seca em pastagem de Viçosa-MG.** Viçosa, MG: UFV/DZO, 1991. 98 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration. In: **Lysimeter for evapotranspiration and environment measurements**. New York: ASCE, 1991. p. 1-19.

JENSEN, M. E. **Consumptive of water and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1973. 215 p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Trad. PRADO, C. H. São Carlos, SP: Impr. Rima, 2004. 531 p.

LUNARDI, A. M.; LUNARDI, D. M.; CAVAGUTI, N. Comparação entre medidas evapotranspirométricas e metodologia da FAO, na determinação da evapotranspiração de referência. **IRRIGA**, Botucatu, v. 4, n. 1, p. 52-66, 1999.

LUNARDI, D. M.; LUNARDI, M. A.; FURLAN, M. A. Efeito da umidade da superfície do solo no desempenho do método de Penman original e modificado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental**, Santa Maria, v. 6 , n. 1, p. 88-92, 2002.

MAÑAS, F. M.; VALERO, J. A. **Agronomía del riego**. Madrid, España: La Universidad de Castilla-La Mancha; Impr. Ediciones Mundi-Prensa, 1992. 732 p.

MANNETJE'T L. Measuring biomass of grassland. In: MANNETJE'T L.; JONES, R. M.(Eds) **Field and laboratory methods for grassland and animal production research**. Wallingford: CAB International, 2000. cap. 7, p. 151-177.

MANTOVANI, E. C. **Determinação do coeficiente de cultura para o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado, em duas épocas de plantio**, Viçosa, MG: UFV/DEA, 1986. 73 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MARTINEZ, H. E.; DA SILVA, J. B. **Introdução ao cultivo hidropônico de plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2004. 111 p.

MEDIEROS, S. L. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região mesoclimática de Santa Maria-RS. **Revista Brasileira de Agroclimatologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 105-109, 1998.

NAS-NRC National Academic of Science – National Reserch Council. **Basic problems and techniques in range research**. Washington, 1962. 342 p.

PAVANI, L. C. **Evapotranspiração e produtividade em feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) c.v. Goiano Precoce, sob três níveis de potencial de água no solo**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Impr. Univ., 1985. 171 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba, SP: FEALQ, 1997. 183 p.

PERES, J. G.; PEREIRA, A. R.; FRIZZONE, J. A. Avaliação do modelo Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência padronizada pela FAO. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 6, n. 1, p. 65-75, 1995.

PIMENTEL GOMEZ, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba, SP: FEALQ, 2002, 309 p.

RUIZ, A. H. Relações molares de macronutrientes em tecidos vegetais como base para a formulação de soluções nutritivas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 44, n. 255, p. 533-546, 1997.

SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração: necessidade de água para as plantas cultivadas**. Brasília, DF: ABEAS, 1996. 173 p.

SILVA, C. F.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A. Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agroclimatologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 19-23, 1999.

SILVA, D. F. **Análises quantitativa e qualitativa do crescimento e desenvolvimento da grama-batatais e grama-esmeralda em diferentes lâminas de irrigação**. Viçosa, MG: UFV/DEA, 2004. 48 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistics**. New York, McGraw-Hill Book Company Inc., 1960. 418 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Trad. SANTARÉM, R. E. 3. ed. Porto Alegre: Artemed, 2004. 719 p.

WILLIAMSON, R. E. The effect of root aeration on plant growth. **Soil Sci. Soc. Proc.**, Raleigh, v. 28, p. 86-90, 1964.

WILLIAMSON, R. E.; KRIZ, G. J. Response of agricultural crops to flooding, depth of water, and gaseous composition. **Transactions of the ASAE**, Raleigh, v.13, n.1, p 216-20, 1970.