

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

DISSERTAÇÃO

**Instalação e Calibração de Lisímetro de
Pesagem e Determinação da
Evapotranspiração de Referência para a
Região de Seropédica-RJ**

Francisco Alves da Cruz

2005



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

**INSTALAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE LISÍMETRO DE PESAGEM E
DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DE SEROPÉDICA-RJ**

FRANCISCO ALVES DA CRUZ

Sob a Orientação do Professor
Daniel Fonseca de Carvalho

Dissertação submetida como
requisito parcial para obtenção do
grau de “**Mestre em Ciências**” em
Fitotecnia

Seropédica, RJ
Fevereiro, 2005

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

FRANCISCO ALVES DA CRUZ

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Fitotecnia, como requisito parcial para obtenção do grau de “**Mestre em Ciências**” em Fitotecnia

DISSERTAÇÃO APROVADA EM:

Daniel Fonseca de Carvalho (Dr.) UFRRJ
(Orientador)

Leonardo Duarte Batista da Silva (Dr.) Bolsista RD-CNPq

Elias Fernandes de Souza (Dr.) UENF

Aos meus pais Aurenita e Domingos,

à minha esposa Elisangela,

à minha filha Francieli,

à professora Marilurdes,

dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida. Por tudo.

Ao professor Dr. Daniel Fonseca de Carvalho pela orientação, pela amizade e pelo incentivo. Aliás, principalmente por aceitar me orientar sem bolsa de custeio dos estudos.

Ao Dr. Leonardo Duarte Batista da Silva, bolsista RD – CNPq, pela camaradagem, convívio e contribuição fundamental para a realização deste trabalho.

Ao engenheiro agrônomo da TOPOTEC, Alessandro Wallace Barros dos Santos, pelo apoio e confiança.

Ao professor Acácio Geraldo de Carvalho do DPF/IF/UFRRJ, pela grande idéia da persistência, mostrando que quando tudo parece estar perdido, ainda existe uma luz a brilhar.

Ao professor Mauro Antônio Homem Antunes do DE/IT/UFRRJ, pelas sugestões e pela tradução na confecção do abstract.

Aos professores João Gonçalves Bahia e Luiz Guimarães Barbosa do DE/IT/UFRRJ, pelo apoio incondicional, incentivo e acima de tudo pela amizade e consideração recíproca.

Ao SIPA - Sistema integrado de produção agroecológica (Fazendinha) representado pelo professor Raul Lucena (DF/IA/UFRRJ) e pelo pesquisador José Guilherme (EMBRAPA - Agrobiologia), pelo espaço cedido para montagem dos experimentos e pelo apoio.

Aos estagiários e bolsistas que contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente César e Elenilson (estudantes de Agronomia) e Adilson, Sandro e Marinaldo (estudantes de Engenharia agrícola).

Ao professor Marcos Vinícius Folegatti (ESALQ/USP) e à Campbell Scientific do Brasil pelo empréstimo dos sensores meteorológicos e datalogger.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 Evapotranspiração: conceitos e terminologia	12
2.2 Métodos de determinação e estimativa	16
2.2.1 Método direto	16
2.2.2 Métodos indiretos	20
2.2.3 Critérios para escolha do método	24
2.3 Correlação apresentada entre os métodos	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 Caracterização da área	28
3.2 Construção do lisímetro	29
3.3 Instalação e calibração do lisímetro	32
3.4 Coleta de dados climáticos	37
3.5 Manejo da área do lisímetro	39
3.6 Determinação da ETo	40
3.6.1 Lisímetro	40
3.6.2 Fórmulas matemáticas	41
3.6.2.1 Hargreaves-Samani	32
3.6.2.2 Penman – Monteith	33
3.6.3 Tanque Classe A	46
3.7 Correlação entre os métodos	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Calibração do lisímetro	49
4.2 ETo obtida pelo lisímetro	50
4.3 ETo obtida pelas fórmulas	56
4.4 Evaporação obtida no TCA	58
4.5 Comparação entre os métodos	58
5. CONCLUSÕES	68
6. LITERATURA CONSULTADA	69
APÊNDICES	69

RESUMO

CRUZ, Francisco Alves da. **Instalação e calibração de lisímetro de pesagem e determinação da evapotranspiração de referência para a região de Seropédica-RJ.** Seropédica: UFRRJ, 2005. 65p. (Dissertação, Mestrado em Fitotecnia)

Este trabalho teve como objetivo construir, instalar e calibrar um lisímetro de pesagem com célula de carga, a fim de estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) para a região de Seropédica-RJ (Lat.: 22^o48'00'' S; Long.: 43^o41'00'' W; e 30m de altitude); e correlacionar as medidas de evapotranspiração obtidas pelo lisímetro com aquelas obtidas pelos métodos Penman-Monteith (P-M) e Hargreaves-Samani (H-S). O lisímetro, com as seguintes dimensões: 1,0m x 1,0m e 0,7m de profundidade, foi construído com chapas de aço galvanizado e instalado sobre uma estrutura metálica montada sobre barras transversais, a fim de concentrar a massa do conjunto sobre uma célula de carga localizada no centro do sistema. Após devidamente instalado no centro de uma área de 15m x 15m, em um fosso escavado e revestido de alvenaria, o lisímetro foi preenchido com camadas de 0,10m, sendo a primeira delas de brita contendo em seu interior um tubo de PVC perfurado, no intuito de facilitar a drenagem da caixa. As demais camadas foram preenchidas com solo mantendo a disposição original das mesmas no perfil. Após o preenchimento do lisímetro, foi realizada a calibração do mesmo e toda a área foi plantada com grama batatais. Além disso, nesta mesma área, foi instalada uma estação meteorológica automática acoplada a um dispositivo de armazenamento de dados (datalogger) e um tanque classe A. Para a realização deste trabalho, foram considerados os registros dos elementos meteorológicos bem como as leituras da célula de carga no período de 24 de dezembro de 2004 a 1^o de fevereiro de 2005. As medidas diárias de ET_o obtidas pelo lisímetro melhor se correlacionaram com aquelas estimadas por P-M ($r^2 = 0,59$) quando comparadas com as estimadas por H-S ($r^2 = 0,46$). Desconsiderando as leituras realizadas em dias com chuvas intensas, com alta velocidade média do vento e/ou com manutenção do sistema (valores anormais), o coeficiente de determinação aumentou para 0,72, quando se ajustou a equação de regressão linear entre os dados medidos no lisímetro e os estimados por P-M. Considerando o descarte de alguns dados de evaporação no tanque a equação de regressão obtida entre a evaporação do tanque Classe A (TCA) e ET_o obtida pelo lisímetro alcançou um r^2 igual a 0,81. Os resultados obtidos permitiram as seguintes conclusões: o conjunto lisimétrico instalado se mostrou adequado para a estimativa da evapotranspiração de referência, exigindo cuidados operacionais simples quanto à sua drenagem e à manutenção da grama na altura adequada; apesar do pequeno período de dados analisado e ainda coincidindo com o período chuvoso, as leituras obtidas no lisímetro se mostraram bem correlacionadas com o modelo de Penman-Monteith, proposto como padrão pela FAO; e com um ajuste adequado do coeficiente do tanque (K_p), o método do tanque Classe A constitui uma boa alternativa para o manejo da água de irrigação na região.

Palavras-chave:

ABSTRACT

CRUZ, Francisco Alves da. **Installation and calibration of a weight lysimeter and determination of reference evapotranspiration for Seropédica-RJ region.** Seropédica: UFRRJ, 2005. 65p. (Dissertation, Master Degree in Plant Sciences)

The objective of this work is to describe the construction, installation and calibration of a weight lysimeter with a charge cell, in order to estimate reference evapotranspiration (E_{to}) for the region of Seropédica-RJ (Lat.: 22°48'00" S; Long.: 43°41'00" W; and 30m of altitude); and to correlate the evapotranspiration measurements of the lysimeter with those obtained with the methods of Penman-Monteith (P-M) and Hargreaves-Samani (H-S). The lysimeter, with the following dimensions: 1.0m x 1.0m and 0.7m of depth, was constructed with galvanized steel and installed over a metallic structure mounted over transversal bars, to concentrate the mass of the assembly over a charge cell localized in the center of the system. After installed in the center of an area of 15m x15m, in a ditch covered with brickwork, the lysimeter was filled with layers 0.10m, being the first of broken stones with a PVC pipe with holes in it, in order to facilitate the drainage of the box. The other layers were filled with soil maintaining the same position they had in the soil profile. After filling the lysimeter, it was calibrated, and the entire area was planted with Bahia grass. Besides, in this same area, it was installed an automated meteorological station with a datalogger and a class A tank. In this work the meteorological data as well as the charge cell readings were from December 24th 2004 through February 1st 2005. Daily measurements of E_{to} obtained by the lysimeter best correlated with those estimated by the P-M ($r^2 = 0.59$) as compared with those estimated by the H-S ($r^2 = 0.46$). When the readings from days with heavy rain, with high average wind speed and/or with maintenance of the system (abnormal values) were not considered, the determination coefficient increased to 0.72, for the linear regression equation between the lysimeter measurements and those estimated by the P-M. Considering the correlation between these two methods, when the E_{to} values were averaged over a 3 days period, the r^2 was 0.77, even considering the abnormal readings. The results allowed the following conclusions: the lysimeter assembly installed was shown to be suitable for the reference evapotranspiration estimates, needing simple operational care as regarding to its drainage and maintenance of the correct height of the grass; in spite of the small period of data analyzed and the coincidence with the raining season, the readings obtained with the lysimeter were well correlated with the Penman-Monteith model, proposed as a standard by the FAO.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos usos consuntivos, o uso da água na agricultura tem se caracterizado como aquele de maior expressão, em virtude da grande quantidade de água normalmente utilizada na agricultura irrigada. A literatura apresenta valores da ordem de 65%, no entanto, RODRIGUEZ (2004) comenta que na bacia do rio São Francisco, a irrigação demanda 71,4% de toda a água utilizada na região. Estudos recentes realizados por SATTI et al. (2004) apontam que, nos Estados Unidos, o setor agrícola tem sido responsável por mais de 81% do total de água consumida.

No Brasil, a técnica da irrigação tem crescido a uma taxa de 80 mil ha ano⁻¹. Já se irriga 3,17 milhões de ha, e esta área é considerada apenas 10% do potencial irrigável no Brasil. Assim, existe uma perspectiva de crescimento da ordem de 26 milhões de ha, número que representa 10% da área irrigada no mundo (CHRISTOFIDIS, 2002). Esses números, que aparentemente representam motivos de satisfação, impõem a todos os profissionais da área, certos desafios como, por exemplo, a adoção de metodologias que promovam cada vez mais o uso racional deste recurso, além de políticas de irrigação firmes e valorizadas pelos demais setores envolvidos na produção agrícola.

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

Diversos são os métodos utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência. Esses tem sido apresentados em diversas publicações, inclusive nos boletins 24 e 56, organizados e difundidos pela FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura).

Os métodos mais empregados são considerados indiretos e se baseiam em dados meteorológicos, muitas vezes não disponíveis na propriedade ou na região de interesse. Em contra-partida, apesar de exigir a implantação de uma estrutura física muitas vezes onerosa, a obtenção de dados de evapotranspiração por meio de lisímetros permite um planejamento mais confiável da agricultura irrigada, possibilitando o uso mais racional deste recurso.

Tendo em vista a importância de se determinar corretamente a evapotranspiração de referência na agricultura irrigada, desenvolveu-se este trabalho com os seguintes objetivos:

- construir, instalar e calibrar um lisímetro de pesagem com célula de carga;
- estimar a evapotranspiração de referência para Seropédica; e
- correlacionar as medidas de evapotranspiração obtidas pelo lisímetro com aquelas obtidas por meio da evaporação da água no tanque Classe A e pelos métodos Penman-Monteith e Hargreaves-Samani.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração: conceitos e terminologia

Dos componentes do ciclo hidrológico, a evapotranspiração é um dos principais e se refere ao total de perda de água para a atmosfera, da superfície do solo e das plantas pela combinação simultânea da evaporação com a transpiração (SEDIYAMA, 1998). Também denominados uso consuntivo (JENSEN et al., 1990), dados de evapotranspiração são essenciais para estimativas da necessidade de água para irrigação, uso industrial e municipal, dimensionamento de sistemas de reutilização de águas residuárias, estimativas de produção de água em bacias hidrográficas, depleção de cursos d'água nas bacias fluviais etc. SILVA et al. (2003) comentam ainda que informações quantitativas da evapotranspiração são necessárias em vários campos das ciências que tratam do manejo da água, como planejamento, construção e operação de reservatórios. Além disso, LECINA et al. (2003) afirmam que estimativas precisas da evapotranspiração podem resultar em menores gastos com água e recursos financeiros, tanto no planejamento quanto no manejo de áreas irrigadas.

A mudança de fase da água consome ou libera grande quantidade de energia. A passagem do gelo para líquido e vice-versa, envolve aproximadamente 335 Jg^{-1} e de líquido para vapor e vice-versa, envolve cerca de 2470 Jg^{-1} . Como o vapor é transportado na atmosfera, podendo condensar e precipitar a grande distância da sua origem, a mudança de fase de líquido para vapor e vapor para líquido representa o principal mecanismo para a redistribuição da energia em todo o globo terrestre (PEREIRA et al., 1997).

A evaporação é um processo no qual a água, no estado líquido, é convertida em vapor e removida das superfícies evaporantes, tais como rios, lagos, superfícies do terreno e vegetação úmida, entre outras. Para que as moléculas de água passem para o estado de vapor, uma quantidade de energia é necessária, a qual provém basicamente da radiação solar, que é considerado o principal elemento climático que controla a evapotranspiração quando a água não é fator limitante. Além disso, a evaporação é dependente da diferença entre a pressão de vapor da água na superfície evaporante e na atmosfera, provocada pela constante movimentação das massas de ar que envolve a superfície, dificultando, desta forma, a saturação desta camada (PEREIRA et al., 1997).

Quando a superfície evaporante é a própria superfície do terreno, o grau de recobrimento pela planta e a quantidade de água disponível para evaporação são fatores que também afetam o processo. De acordo com ALLEN et al. (1998), quando a quantidade de água no solo é suficiente para atender a demanda evaporimétrica, a evaporação é dependente basicamente de parâmetros meteorológicos. No entanto, nas situações em que a camada superficial do solo seca rapidamente em virtude de um grande intervalo entre os eventos de chuva ou irrigação, a evaporação decresce podendo cessar completamente em poucos dias.

O processo de transpiração é definido como sendo a vaporização da água na fase líquida contida no vegetal e utilizada nos diferentes processos metabólicos necessários ao crescimento e desenvolvimento das plantas e sua remoção para a atmosfera. Segundo ALLEN et al. (1998), a vaporização ocorre no interior da folha, em espaços intercelulares, e é controlada pela abertura estomática. Da mesma forma que a evaporação, a transpiração depende do gradiente de pressão de vapor entre o vegetal e a

atmosfera e também do vento. Além disso, fatores como a capacidade do solo de conduzir água, favorecendo a absorção desta pelas raízes, características da planta e seu estágio de desenvolvimento e práticas de cultivo também influenciam o processo.

Em uma superfície vegetada, os processos da evaporação e a transpiração ocorrem simultaneamente e a união desses processos é denominada evapotranspiração (VIANA, 2000), tornando-se muitas vezes difícil a separação dos dois processos físicos. Na fase de pós-plantio, quando a superfície vegetada ainda é muito pequena e conseqüentemente a área foliar, a evaporação é a componente mais importante. A partir daí, com o aumento da cobertura do solo pela planta, a transpiração se torna a componente principal, podendo ser responsável por até 90% do processo de evapotranspiração.

Apesar de bastante conhecida, diferentes conceitos de evapotranspiração são largamente empregados na literatura. Além do termo evapotranspiração (ET) conceituado anteriormente, são comuns os termos evapotranspiração potencial ou de referência (ETp ou ETo) e ainda evapotranspiração de cultura sob condições padrões (ETc) e sob condições não preconizadas (ETc adj).

O primeiro conceito de evapotranspiração potencial foi apresentado por THORNTHWAITE (1948) que definiu o fenômeno como sendo a perda máxima de água em uma superfície de solo bem umedecida, completamente coberta com vegetação em fase com desenvolvimento ativo e com dimensões suficientemente grandes, de modo a minimizar os efeitos de energia advectiva local.

Na forma original apresentada pelo boletim FAO-24 (DOORENBOS & PRUITT, 1977), a ETo refere-se a evapotranspiração de uma área com vegetação rasteira, na qual são feitas as medições meteorológicas, para a obtenção de um conjunto consistente de dados de coeficiente de cultura, para serem utilizados na determinação da evapotranspiração de outras culturas agrícolas. Desta forma, o conceito de ETo está correlacionado com a grama, em crescimento ativo e mantida a uma altura uniforme de 8 a 12 cm de altura, cobrindo plenamente a superfície e sem limitação de água no solo. JENSEN et al. (1990) definem ETo como sendo a taxa com que a água, se disponível, seria removida da superfície do solo e de uma planta específica, arbitrariamente chamada de cultura de referência. É normalmente expressa como a taxa de troca de calor latente por unidade de área ou lâmina de água evaporada. Definição semelhante é apresentada por SENTELHAS (2001), na qual a ETo é a taxa de evapotranspiração que ocorre em uma superfície de referência (padrão), definida como sendo uma extensa superfície vegetada com grama, com altura entre 8 e 15 cm, em crescimento ativo (índice de área foliar igual a 2,88), cobrindo totalmente a superfície do solo e bem suprida de água. Nessas condições, a ETo constitui um parâmetro climático que expressa o poder evaporante da atmosfera em um determinado local, em cada época do ano, sem levar em consideração fatores do solo e da planta.

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

A Figura 1, apresentada por SENTELHAS (2001) e adaptada de ALLEN et al. (1998), ilustra os diferentes conceitos da evapotranspiração. De acordo com ALLEN et al. (1998) e observando a Figura 1, pode-se dividir os fatores que influenciam a evapotranspiração em três categorias:

- fatores climáticos: radiação, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento;
- fatores da cultura: tipo, variedade e estágio de desenvolvimento, além de altura, rugosidade, capacidade de reflexão, capacidade de cobertura do solo e características das raízes;
- fatores ambientais e de manejo: nível de salinidade no solo, fertilidade, presença de camadas impermeáveis no perfil, incidência de pragas e doenças, além de cobertura, densidade de plantio e conteúdo de água no solo.

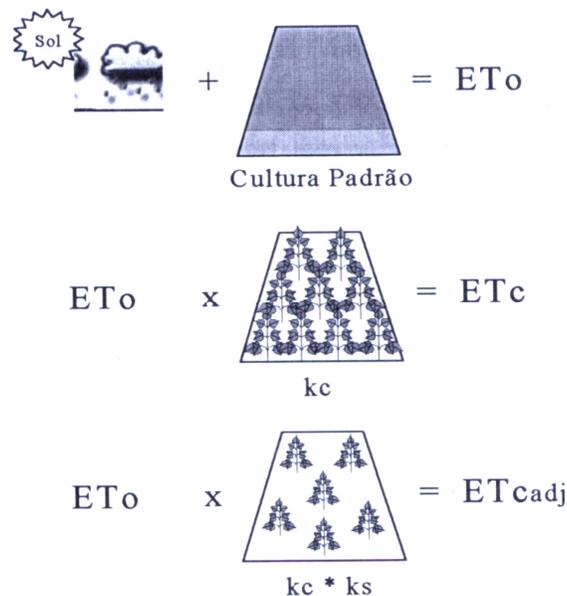


Figura 1 – Ilustração dos diferentes conceitos de evapotranspiração.

2.2 Métodos de determinação e estimativa

OLIVEIRA & CARVALHO (1998) comentam que a estimativa da E_{T_o} de uma localidade constitui-se numa dificuldade ao planejamento correto da irrigação, pois para a maior parte dos métodos utilizados são necessários dados climatológicos e/ou coeficientes de ajuste normalmente não disponíveis ao irrigante; além disso, existem problemas de sub ou superestimativas da lâmina evapotranspirada.

Estudos sobre evapotranspiração têm-se desenvolvido muito rapidamente nos últimos anos em função do progresso na coleta de dados, em decorrência da informática como ferramenta útil nesse campo. Entretanto, CARVALHO et al. (2002) comentam que embora haja essa facilidade, a aquisição de instrumentação elaborada é ainda onerosa e envolve metodologia geralmente sofisticada e laboriosa.

2.2.1 Método direto

Ao contrário das medidas de evaporação, para as quais são utilizados tanques de diferentes dimensões e que apresentam boa correlação com evaporação que ocorre em lagos e em superfícies vegetadas, medidas da evapotranspiração são complexas e de difícil determinação a nível de campo. De acordo com PEREIRA et al. (1997), essa

complexidade se baseia nas incertezas da representatividade das medidas, nas dificuldades operacionais e também na variabilidade espacial da superfície. MELLO (1998) comenta que quando bem manejados, os métodos diretos apresentam maior confiabilidade na obtenção da ETo, uma vez que a resposta obtida integra a interferência dos elementos climáticos predominantes no local da determinação, sem contudo possibilitar uma análise da interferência isolada de cada elemento.

SENTELHAS (2001) apresenta três métodos utilizados na determinação direta da evapotranspiração: os métodos micrometeorológicos, o método do balanço de água no solo e os lisímetros. Esses últimos são estruturas especiais onde um volume de solo vegetado é devidamente isolado, a fim de que todas as entradas e saídas de água deste sistema sejam controladas. O mesmo autor afirma que para se obter medidas precisas da ET, a vegetação no interior do lisímetro deve apresentar a mesmas condições (altura e área foliar semelhantes) da área de contorno. Podem ainda apresentar diversas formas e tamanhos, os quais são definidos em função do sistema radicular das culturas que serão instaladas (SILVA, 2003).

Os lisímetros tem sido utilizados por mais de três séculos para estudos das relações entre água, solo e plantas. Segundo KIRKHAN et al. (1984), os lisímetros são estruturas destinadas a medir, de maneira precisa, eventos de precipitação, evaporação e drenagem. CAMPECHE (2002) comenta que, inicialmente, os lisímetros foram desenvolvidos para quantificação e qualificação da água do solo percolada em estudos hidrológicos.

MEDEIROS (2002) define lisímetros como sendo grandes “containers”, localizado no campo e preenchidos com solo, a fim de representar o ambiente local, com superfície vegetada ou em solo nu, para determinação da evapotranspiração de uma cultura em crescimento ou de uma cobertura vegetal de referência ou ainda da evaporação a partir de um solo não vegetado. Os lisímetros devem ser preenchidos com solo, mantendo a mesma sequência de horizontes do solo original. SILVA (2003) comenta que, os lisímetros quando bem instalados, possibilitam medidas precisas da ET, principalmente quando os mesmos são preenchidos corretamente, pois desta forma, o perfil de solo no seu interior assemelha o máximo possível das camadas de solo da área externa.

PEREIRA et al. (2002a) comentam que tais estruturas se justificam apenas em condições experimentais com observações rigorosas das condições de contorno que visam minimizar os efeitos advectivos principalmente em época de deficiência hídrica. Neste sentido, os lisímetros devem ser locados de tal forma que obstáculos não alterem a radiação incidente e/ou o padrão do vento (VIANA, 2000).

SEDIYAMA (1996) já alertava das dificuldades em se manter as condições internas e externas dos lisímetros com as mesmas características, pois normalmente as plantas tendem a crescer mais no interior do mesmo (efeito buquê) ou além dos limites de sua borda. Assim, visualmente a presença do lisímetro deve ser pouco perceptível para que tais efeitos se minimizem. Segundo o autor, 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 maior no movimento horizontal do ar e aumenta o grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura provocando um aumento da transpiração do vegetal e uma maior interceptação da radiação solar incidente.

MIRANDA et al. (1999) comentam que dentre os principais fatores ambientais e de projeto que podem afetar as medições da ET nos lisímetros, destacam-se os efeitos da advecção, as dimensões do lisímetro, o regime de umidade do solo no seu interior, a espessura das paredes do lisímetro e a distância entre elas, a altura de suas bordas, além

das diferenças de densidade entre a vegetação dentro e fora do lisímetro. Para minimizar os efeitos das paredes do lisímetro sobre a evapotranspiração medida, os autores afirmam que as paredes devem ser construídas com a menor espessura possível e reduzir ao máximo a abertura existente entre as paredes interna e externa (HOWELL et al., 1985).

MACHADO & MATOS (2001) dividem os lisímetros em duas categorias: os lisímetros de pesagem (mecânica, eletrônica, hidráulica e de flutuação) e os não pesáveis, também chamados de volumétricos (drenagem e lençol freático). Os lisímetros de drenagem são tradicionalmente os mais conhecidos em virtude de suas simplicidades, mas em função de sua própria metodologia de funcionamento, apresentam grandes restrições para obtenção da ET em períodos diários (SILVA et al., 1999a). Os lisímetros com lençol freático constante apresentam facilidade de operação e possibilitam medidas com boa precisão e, por isso, têm sido utilizados com frequência. Ao contrário dos lisímetros volumétricos, os sistemas de pesagem fornecem resultados mais confiáveis (ALLEN et al., 1991). Os lisímetros equipados com mecanismos de pesagem por células de carga são os mais modernos (SILVA et al., 1999b) e permitem a realização de medidas automatizadas com células instaladas sob a caixa impermeável e são geralmente acopladas a um sistema de aquisição de dados. De acordo com PEREIRA et al. (2002a), as células de carga medem uma corrente elétrica que se altera continuamente em função de deformações causadas pela variação da massa sustentada.

Com o desenvolvimento de novas técnicas construtivas e a queda nos custos das células de carga e dos sistemas de aquisição de dados, os lisímetros de pesagem se tornaram de fácil construção e de baixo custo. Segundo SILVA et al. (1999b), além da exatidão, os sistemas de pesagem geralmente apresentam distribuição homogênea da massa do sistema e podem apresentar sensibilidade de até 0,1kg ou 0,1mm.

A exatidão de um lisímetro de pesagem depende da resolução (número de casas decimais da mensuração), da precisão, que é a estabilidade da mensuração, e da acurácia, que é a diferença entre o valor mensurado e o valor verdadeiro. Dependendo da sensibilidade da balança, pode-se medir a ET em intervalos inferiores a um dia. SILVA et al. (1999b) afirmaram que o lisímetro de pesagem possui capacidade de realizar mensurações num espaço de tempo inferior a uma hora, se tornando um equipamento de grande importância quando se pretende trabalhar com medidas de evapotranspiração em tempo real.

MIRANDA et al. (1999) descreveram os procedimentos de construção, instalação e calibração de um lisímetro de pesagem constituído de uma caixa metálica e construído sobre balança eletrônica de precisão, com a finalidade de determinar a evapotranspiração potencial de referência da região e ajustar modelos de estimativa da evapotranspiração. Os resultados de sua calibração mostraram que a correlação entre massas-padrão aplicadas e as leituras da balança foi linear ($r^2 = 0,9994$) com erro inferior a 1% em uma faixa de 176 kg, equivalente a cerca de 80 mm de evapotranspiração. O lisímetro se mostrou sensível às variações de massa, da ordem de 400 g, correspondente a uma lâmina d'água de 0,18 mm.

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

Apesar de preciso, os lisímetros de pesagem apresentam alguns problemas que dificultam sua operação em escalas de tempo muito reduzidas. PEREIRA et al. (2002a) comentam que dificuldades operacionais são verificadas em dias com chuvas intensas, em seqüência de dias com chuvas intermitentes e também em dias sem chuvas, mas com ventos intermitentes. Os autores concluíram que medidas de ET em intervalos inferiores

a 60 min nem sempre são tão exatas quanto se espera de um sistema admitido como padrão.

2.2.2 Métodos indiretos

Os métodos indiretos se caracterizam pelo uso de equações empíricas ou modelos matemáticos, que necessitam de dados climático-fisiológicos para a sua aplicação. De acordo com MELLO (1998), estes métodos por se tratarem de estimativa, apresentam inúmeros problemas de precisão, principalmente pelo fato de terem sido desenvolvidos para condições climáticas diferentes daquelas onde normalmente são aplicados.

SEDIYAMA (1996) comenta que desde a introdução da equação de Blaney e Criddle, em 1950, e outras fórmulas empíricas baseadas em simples correlação entre a ET e algum elemento climático, diferentes métodos tem sido adaptados e propostos. No Brasil, os dados de evapotranspiração (ET) utilizados no dimensionamento e no manejo de projetos de irrigação, quase sempre são obtidos utilizando-se equações que estimam a ET a partir de dados meteorológicos que, por sua simplicidade, estão entre as mais utilizadas na região Nordeste (MIRANDA et al., 1999). Poucas equações, no entanto, são aplicáveis para uma grande diversidade de condições climáticas, necessitando de adaptações (SENTELHAS & CAMARGO, 1996).

Além do método citado por SEDIYAMA (1996), DOORENBOS & PRUITT (1977) apresentam detalhadamente os métodos da Radiação, Penman modificado e tanque de evaporação.

JENSEN et al. (1990) apresentam diversos métodos utilizados para a estimativa da ET, os quais foram agrupados em métodos combinados (Penman-Monteith, FAO Penman, Priestley-Taylor, Radiação, Jensen-Haise e Hargreaves), métodos de temperatura (Thornthwaite e Blaney-Criddle) e métodos de evaporação (Tanque Classe A e Christiassen).

SENTELHAS (2001) apresenta como métodos mais empregados, quer pela simplicidade ou pelo grau de confiabilidade, os de Thornthwaite, Camargo, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor e Penman-Monteith. Além desses, muitos outros métodos são apresentados na literatura, mas em virtude de suas condições empíricas ou semi-empíricas, não são tão utilizados como a maioria dos que foram citados, exatamente por terem sido desenvolvidos para condições climáticas e agronômicas específicas, não tendo assim, validade para condições distintas.

Apesar de ser um dos mais antigos e tradicionais métodos para estimativa da evapotranspiração potencial, o método de Thornthwaite funciona adequadamente em climas úmidos, mas subestima bastante a ETp em climas secos, por não considerar a energia advectiva recebida de áreas secas distantes (CAMARGO & CAMARGO, 2000).

ALLEN et al. (1998) comentam que, em maio de 1990, a FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) reuniu diversos pesquisadores da Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem e da Organização Mundial de Meteorologia, a fim de rever as metodologias empregadas na estimativa das necessidades hídricas dos cultivos. Como resultado, os maiores especialistas no assunto recomendaram o método de Penman-Monteith como padrão na estimativa da ETo. Este método, denominado PM-FAO 56, foi selecionado por apresentar resultados que muito se aproximam da evapotranspiração da grama em diferentes localidades, por representar as condições físicas presentes no processo e por incorporar tanto parâmetros fisiológicos como aerodinâmicos. Para a estimativa da ETo por este método, são necessários dados

de temperatura do ar, umidade relativa, radiação e velocidade do vento para estimativas diárias, semanais, decendiais ou mensais.

ALEXANDRIS & KERKIDES (2003) comentam que a equação de Penman-Monteith modificada é aceita universalmente para estimativas horárias e diárias da ETo. Segundo os autores, além da mesma ser usada pelos agrônomos, engenheiros de irrigação e demais profissionais tanto para fins práticos quanto de pesquisa, diversos pesquisadores a recomendam, em relação a outras equações empíricas, especialmente para curtos períodos de tempo e sob diversas condições climáticas.

De acordo com MEDEIROS (2002), diversos trabalhos científicos tem mostrado que o desempenho do método de PM na estimativa da ETo é satisfatório, quando comparado com medidas lisimétricas. No entanto, muitas vezes o emprego deste método torna-se restrito em virtude da disponibilidade de dados meteorológicos, favorecendo o uso de métodos mais simples. Apesar disto, diversos autores apresentam alternativas para o uso da equação PM-FAO 56 em situações de não disponibilidade de alguns desses dados. Por exemplo, dados de radiação podem ser estimados a partir da diferença de temperatura do ar, e a umidade relativa pode ser estimada a partir da temperatura mínima do ar. Esses procedimentos devem ser validados para as diferentes condições locais, ou seja, a estimativa de ETo obtida com dados incompletos devem ser comparada com outras estimativas obtidas quando existe disponibilidade de todas as variáveis necessárias. PEREIRA et al. (2002b) compararam medidas lisimétricas com estimativas de ETo obtidas a partir de dois conjuntos independentes de dados meteorológicos: um automatizado, contendo todas as variáveis exigidas pelo modelo PM-FAO 56, e outro convencional, sem medida direta do saldo de radiação e da velocidade do vento a 2m acima da superfície. Os autores concluíram que os dados fornecidos pelas duas estações meteorológicas comprovam a adequação no modelo proposto pela FAO e que este deve ser utilizado mesmo em situações de dados incompletos.

CAMARGO & SENTELHAS (1997) comentam que muitos desses métodos apresentados tem grande aceitação enquanto outros são criticados e até desprezados, embora os critérios de rejeição não sejam claros ou dizem respeito à má interpretação do conceito de evapotranspiração de referência ou do mau uso de evaporímetros.

Segundo LOVELLI et al. (2004), estimativa de ETo pode ser realizada com base na equação de Penman-Monteith, utilizando parâmetros de resistência da grama ou, na ausência de dados meteorológicos, a padronização da FAO recomenda o método de Hargreaves-Samani.

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

A evaporação diária no tanque é obtida pela diferença de leituras em dois dias consecutivos. Tradicionalmente, a leitura é feita utilizando um parafuso micrométrico acoplado a um gancho, a fim de se obter melhor precisão do nível d'água no tanque. No entanto, VILLA NOVA & SENTELHAS (1999) apresentaram um sistema alternativo de medida, que acoplado ao tanque Classe A, possibilita efetuar um balanço entre a água evaporada do tanque e a precipitação. Os autores concluíram que, dada a facilidade oferecida na obtenção das leituras, não exigindo a presença de pessoal treinado, o

tanque medidor também é um pluviômetro, permitindo a leitura em condições de dias com chuvas leves sem a necessidade de dados pluviométricos.

No método do Tanque Classe A, a ETo é obtida pela multiplicação da evaporação por um coeficiente (kp) tabelado (sempre menor do que 1), que é função da umidade relativa média do local, velocidade do vento e do tamanho e do tipo da bordadura que circunda o tanque (DOORENBOS & PRUITT, 1977). No entanto, a fim de facilitar a interpolação e o uso de sistemas informatizados, ALLEN et al. (1998) apresentaram as equações 1 e 2 para a obtenção de kp, para bordadura vegetada e sem vegetação, respectivamente:

$$kp = 0,108 - 0,0286 u_2 + 0,0422 \ln(B) + 0,1434 \ln(UR_{med}) - 0,00063 [\ln(B)]^2 \ln(UR_{med}) \quad (1)$$

$$kp = 0,61 + 0,00341 UR_{med} - 0,000162 u_2 UR_{med} - 0,00000959 u_2 B + 0,00327 u_2 \ln(B) - 0,00289 u_2 \ln(86,4 u_2) - 0,0106 \ln(86,4 u_2) \ln(B) + 0,00063 [\ln(B)]^2 \ln(86,4 u_2) \quad (2)$$

em que

u_2 = velocidade média do vento a 2m de altura, ms^{-1} ;

B = extensão da bordadura, m; e

UR_{med} = umidade relativa média diária, %.

Dentre todos esses métodos citados para a estimativa da ETo, o método de Hargreaves-Samani tem sido bastante empregado em razão da sua simplicidade e à exigência de um número mínimo de variáveis climáticas (HARGREAVES & SAMANI, 1982; SENTELHAS & CAMARGO, 1996).

2.2.3 Critérios para escolha do método

Segundo MELLO (1998), antes de se eleger o modelo a ser utilizado na estimativa da ETo é necessário saber quais são os elementos climáticos que estão disponíveis. Basicamente existem três fatores que influenciam na escolha adequada do método de estimativa e/ou determinação da ETo (SENTELHAS, 2001):

- disponibilidade de dados meteorológicos, fazendo com que métodos como o Penman-Monteith FAO 56 não possam ser empregados em locais que disponham de apenas dados de temperatura;
- a escala de tempo requerida;
- adaptabilidade dos métodos empíricos à região de estudo.

2.3 Correlação apresentada entre os métodos

Diversos trabalhos em diferentes regiões do mundo tem sido desenvolvidos com o objetivo de avaliar o desempenho dos diferentes métodos de estimativa da ETo.

JENSEN et al. (1990) selecionaram dezenove métodos de estimação da ETo em bases mensais e treze métodos foram comparados em base diária. Os dados de ETo foram obtidos em diferentes países onde dados obtidos de lisímetros e dados climáticos com bases apropriadas estavam disponíveis. Os autores concluíram que em média, os métodos combinados correlacionaram bem com as medidas dos lisímetros e, em geral,

tendem a subestimar a evapotranspiração de referência. Os métodos baseados na radiação solar produziram estimativas razoavelmente boas da ETo nos lisímetros em locais úmidos, com exceção do método de Jensen-Haise que tendeu a subestimar e o radiação FAO-24, que superestimou a evapotranspiração. Os métodos Blaney-Criddle e Thornthwaite (baseados em temperatura) foram, geralmente, os mais deficientes na estimativa da ETo entre todos os métodos avaliados, em virtude do retardamento das estimativas da ET máxima. Por fim, os métodos do tanque de evaporação de Christianssen e FAO-24 foram severamente afetados por medidas não representativas sendo considerada uma grande desvantagem, no qual o desempenho é estritamente controlado e afetado pela permanência e cuidados na operação e manutenção das condições do local.

Vários outros exemplos podem ser citados inclusive para o Brasil. SENTELHAS & CAMARGO (1996) avaliaram os métodos de Hargreaves 1974 e Hargreaves-Samani na estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, comparando-se com dados obtidos em evapotranspirômetros nas localidades de Campinas, Pindamonhagaba e Ribeirão Preto. Os autores mostram que tanto para escala decenal quanto mensal, os métodos superestimaram a ET em relação aos dados observados.

SENTELHAS (2001) apresenta resultados experimentais mostrando que dentre os três tipos de lisímetros, o de pesagem é o que mais se aproxima das estimativas diárias de ETo, obtida pelo método de Penman-Monteith, indicando sua grande acurácia. Resultados semelhantes foram obtidos por SILVA et al. (1999a) que também avaliaram três diferentes lisímetros (de pesagem - padrão, de drenagem e de nível freático constante) e compararam os resultados com os obtidos pelo Tanque Classe A e pelo método de PM-FAO 56. Segundo os autores, os lisímetros de drenagem e o de nível constante mostraram-se inviáveis para a determinação da ETo diária, superestimando em 18% e 11%, respectivamente, os valores obtidos pelo lisímetro de pesagem. O tanque classe A apresentou subestimativa de 36% e o método matemático utilizado foi o que melhor correlacionou com os dados medidos com o método considerado padrão.

MACHADO & MATTOS (2000), avaliando o desempenho de três métodos de estimativa da ETo com os dados obtidos em lisímetro de lençol freático constante, concluíram que o método de Penman apresentou a melhor concordância com os dados lisimétricos.

MEDEIROS (2002) mostrou que os dados medidos em lisímetro de pesagem em Paraíba-CE, se ajustaram de forma regular aos valores de ETo estimados por PM, tanto nas escalas diária, quintadial e pentadial, indicando a possibilidade de ocorrência problemas na operação e na manutenção deste equipamento. O autor comenta ainda que o método de estimativa que melhor se ajustou aos dados obtidos por PM foi o de Priestley-Taylor, para as escalas diária e decenal.

Com o objetivo de se avaliar a correlação entre diferentes métodos utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) e seu efeito na demanda de irrigação suplementar para a cultura do milho, nos municípios de Seropédica e Campos, RJ, OLIVEIRA & CARVALHO (1998), determinaram a ETo diária pelos métodos de FAO-Penman, FAO-Radiação e Hargreaves e compararam com o método de Penman-Monteith, considerado padrão. Para as duas localidades, houve superestimativas dos métodos em relação ao padrão. Além disso, foram ajustadas equações de regressão linear, tendo como variável dependente, a ETo obtida pelo método de Penman-Monteith, considerado padrão e, como variável independente, a ETo obtida pelos outros métodos estudados, obtendo-se coeficientes de correlação iguais ou maiores que 95%.

Também em Campos, Estado do Rio de Janeiro, foi realizado um estudo na estação evapotranspirométrica da Universidade Estadual Norte Fluminense, com o objetivo de propor coeficientes de ajuste regional entre o método lisimétrico e os métodos de Penman-Monteith-FAO, Makking, Linacre, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Radiação Solar, Tanque Classe A e Atmômetro SEEI modificado para os períodos de 1, 3, 7 e 10 dias. Os resultados obtidos indicam que, com exceção do Atmômetro, todos os métodos avaliados atendem satisfatoriamente a estimativa da ETo na região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro, apresentando bons ajustamentos para períodos maiores que sete dias (MENDONÇA et al., 2003). Os autores concluíram ainda que quando se dispõe somente de dados de temperatura máxima e mínima, o método de Hargreaves-Samani apresenta adequada precisão para se estimar a ETo na região, sobretudo para períodos superiores a 7 e 10 dias.

Para o Estado do Rio de Janeiro, CARVALHO et al. (2002) trabalhando com dados de 25 estações meteorológicas, estimaram a ETo por diferentes métodos e correlacionaram com as informações obtidas com o uso do método de Penman-Monteith, obtendo equações lineares, que apresentaram R^2 acima de 90%. Os autores concluíram que o uso de métodos que demandam menos dados climáticos pode ser implementado de posse de equações ajustadas relacionando a ETo obtida por meio de métodos mais precisos, sem comprometer a qualidade dos dados a serem utilizados na estimativa da demanda de irrigação.

Na estimativa da ETo a partir da evaporação do tanque classe A (ECA), SENTELHAS (2003) utilizou diferentes métodos apresentados na literatura para a estimativa do coeficiente K_p . Utilizando dados de Piracicaba-SP, o autor concluiu que o uso de um K_p arbitrário e constante (0,71) na estimativa da ETo resultou na mesma precisão e exatidão das estimativas feitas com os valores de K_p determinados pelos métodos de Pereira e de Cuenca. Concluiu ainda que o uso de um valor constante de K_p é uma opção simples e prática para se estimar ETo a partir da ECA, porém este valor necessita ser calibrado para cada local, sob diferentes condições climáticas.

KASHYAP & PANDA (2001) trabalhando na Índia, em uma região de clima sub-úmido, correlacionaram medidas de ETo obtidas em um lisímetro de pesagem com 0,75m de diâmetro, instalado em uma área gramada com 10m de bordadura, com estimativas obtidas a partir de 10 métodos climatológicos. Segundo os autores, todos os métodos empregados correlacionaram bem com as medidas do lisímetro, embora o método de Penman-Monteith foi o que melhor se ajustou.

Recentemente, SILVA et al. (2003) apresentaram resultados de evapotranspiração obtidos por lisímetro de pesagem hidráulica na região de Petrolina-PE. Constataram que o método de Penman-Monteith estimou de forma consistente a ETo diária e teve boa correlação com os dados obtidos no lisímetro.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área

O presente estudo foi realizado no SIPA – Sistema integrado de produção agroecológica, denominado Fazendinha Agroecológica, que é uma área experimental da EMBRAPA-Agrobiologia em parceria com a UFRRJ e PESAGRO, localizada no município de Seropédica-RJ.

As coordenadas geográficas do local são 22°48'00'' de latitude Sul e 43°41'00'' de longitude Oeste. Apresenta altitude de aproximadamente 33m e o solo da área classificado como Argissolo Vermelho-amarelo. Segundo a classificação de Köppen, o clima é Aw (chuvas concentradas no período novembro a março; precipitação média anual de 1213mm; temperatura média anual de 24,5 °C).

A Figura 2 apresenta uma vista da área, com declividade de 0,027m m⁻¹. Nesta área recém cultivada foi realizada uma limpeza com roçadeira e, em uma parcela de 15m x 15m, foi plantada grama batatais, em março de 2004, para que a evapotranspiração de referência pudesse ser medida em um lisímetro de pesagem, instalado no centro da mesma.



Figura 2 – Vista da área antes do início do experimento.

3.2 Construção do lisímetro

A concepção da estrutura do lisímetro se baseou na Figura 3, ou seja, foi construída uma caixa metálica com dimensões 1,0m x 1,0m de base e 0,7m de altura, que seria montada sobre barras transversais, a fim de concentrar toda a massa do conjunto sobre uma célula de carga localizada no centro do sistema.

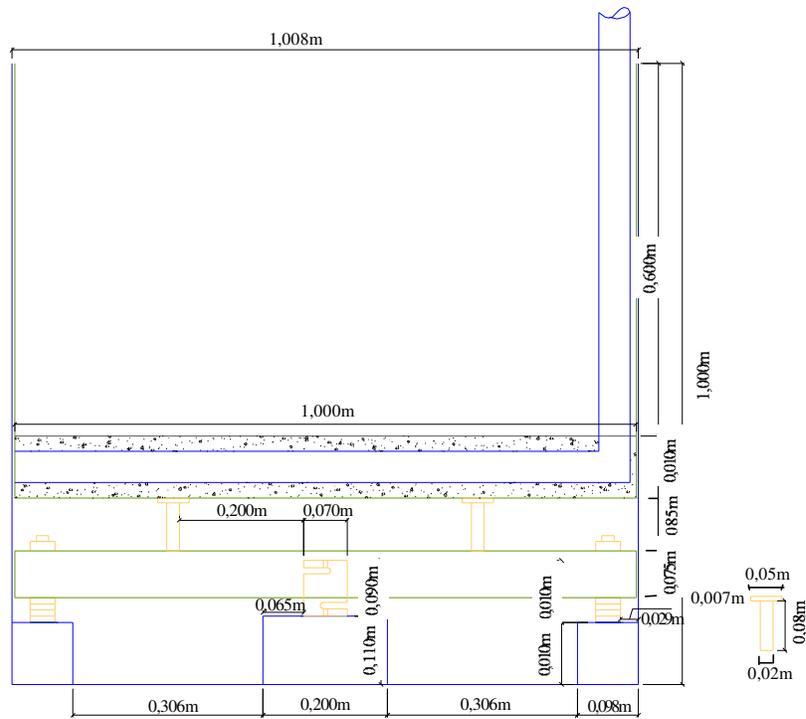


Figura 3 - Corte transversal do esquema de instalação do lisímetro de pesagem.

As Figuras 4a e 4b apresentam outras perspectivas do sistema de apoio da caixa.

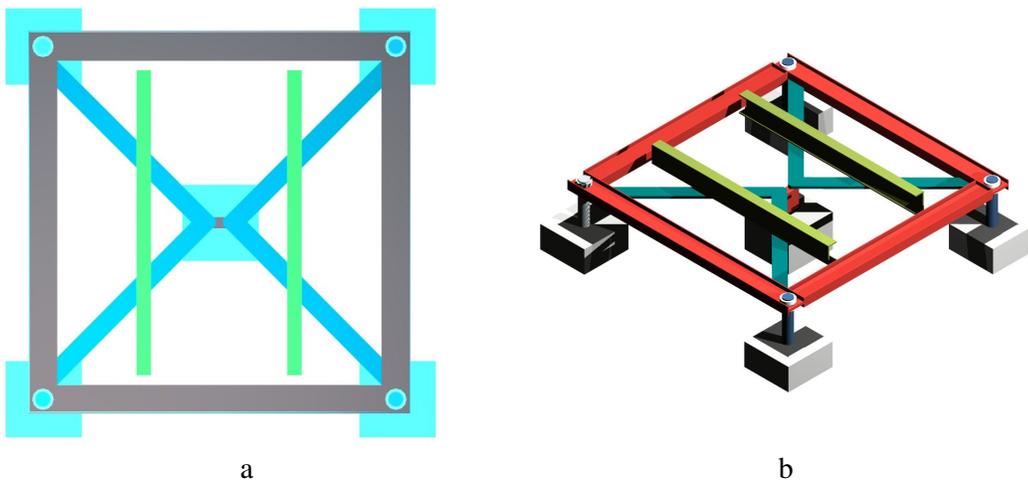


Figura 4 - Base de fixação do lisímetro, com a célula de carga no centro da estrutura: (a) vista superior e (b) vista tridimensional.

Nos quatro cantos, barras rosqueadas de 0,0254m de diâmetro e 0,25m de comprimento foram chumbadas em base de concreto de 0,30m x 0,30m de área para suportar a estrutura de apoio da caixa. O mesmo procedimento foi adotado no centro, a fim de servir de suporte ao parafuso de fixação da célula de carga. Uma visão tridimensional do conjunto completo (caixa sobre o sistema de apoio) é apresentada na Figura 5.

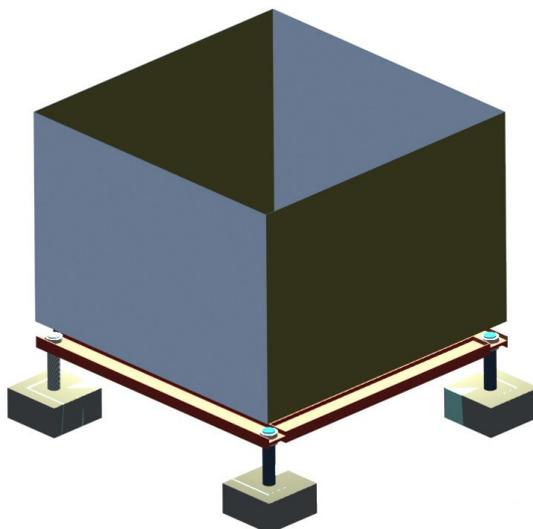


Figura 5 – Conjunto caixa – sistema de apoio.

A Figura 6 apresenta a estrutura de sustentação do lisímetro, que foi construída com perfil I com dimensões de 0,0762m, na parte externa, e com perfil U (0,003m) formando dois braços em diagonal, fixados no quadro externo sob forma de dobradiça. Assim, a massa da caixa era transmitida para o centro da estrutura, onde se localizava o sensor ou célula de carga. Essa etapa de construção foi realizada na Oficina da Central de Apoio do Instituto de Tecnologia da UFRRJ, no período de março a agosto de 2004.

Quanto à caixa que iria receber o solo, esta foi construída a partir de uma armação feita com cantoneiras 0,022m (7/8" x 1/8") soldadas e reforçadas com barras de 0,0254m (1") no sentido transversal nas quatro faces verticais. Em seguida, chapas nº 20 foram arrebidadas na armação montando definitivamente a caixa que serviria de lisímetro (Figura 7).



Figura 6 – Vista da montagem do quadro de apoio.

Antes de ser levado ao campo, o sistema foi montado na própria oficina para verificar o funcionamento e sensibilidade da célula de carga. Foi utilizada a célula da

marca ALPHA, modelo Z com capacidade de medida de até 2 ton, com sensibilidade de aproximadamente 6.000 divisões, ou 0,3kg. Segundo o fabricante, a sensibilidade deste produto é de $2 \pm 0,1\%$ mV/V.



Figura 7 – Armação da caixa lisimétrica (a) e vista parcial da caixa após fixação das chapas (b).

3.3 Instalação e calibração do lisímetro

Após a construção da estrutura mostrada nas Figuras 3, 4 e 5, a área foi preparada, primeiramente, com a construção de um fosso, com dimensões de 1,20m x 1,20m e 1,0m de profundidade (Figura 8a). Durante a escavação, camadas de 0,10m eram separadas a fim de que a caixa fosse posteriormente preenchida com o solo, mantendo a mesma sequência do perfil original (Figura 8b). Além disso, eram retiradas amostras indeformadas, a cada 0,10m, para a estimativa da densidade do solo e confecção da curva de retenção, em cada camada.



Figura 8 – Escavação do terreno para receber a caixa lisimétrica (a) e separação do solo por camadas (b).

Depois de completada a escavação, paredes de blocos de concreto foram levantadas para que fosse evitado qualquer tipo de desmoronamento futuro das paredes do fosso, conforme Figura 9. Percebe-se que a parte superior desta parede ficou abaixo

da superfície do solo para que a mesma não viesse a influenciar na determinação da evapotranspiração.



Figura 9 – Caixa de blocos de concreto para receber o lisímetro.

A caixa de bloco foi construída deixando uma área livre de 1,01m x 1,01m, permitindo, assim, livre movimentação do lisímetro e evitando erros de leitura. Após a construção deste revestimento, foi construída no fundo do fosso a estrutura de sustentação.

Após a construção da parede de alvenaria, a base de sustentação da estrutura foi colocada no fundo do fosso e foi realizada com auxílio de um nível de pedreiro (Figura 10).



Figura 10 – Estrutura de apoio instalada no fundo do fosso (a), devidamente nivelada (b).

Antes que a caixa fosse colocada no local para preenchimento das camadas de solo, foi realizado um teste para verificar a estaqueidade da mesma. Conforme Figura 7b, inicialmente se imaginou que apenas uma camada de silicone por sobre os arrebites seria suficiente para impedir possíveis vazamentos. No entanto, para total vedação, foi necessária a colocação de uma massa de calefação, sendo a mesma aplicada após raspagem da camada de silicone. A Figura 11 apresenta detalhes da vedação realizada na caixa.



Figura 11 – Detalhe da vedação realizada na caixa lisimétrica.

Apesar de verificada a total vedação da caixa, decidiu-se ainda por revestir a mesma com uma camada de plástico utilizado para cobertura de casa de vegetação (espessura de 150 μm).

Antes do preenchimento com o solo, foi instalado um dreno de PVC no fundo da caixa, com diâmetro de 40mm, perfurado no trecho horizontal, a fim de permitir a drenagem do excesso de água dentro do lisímetro. Esse dreno foi envolvido numa camada de 0,10m de brita (Figura 12).



Figura 12 – Vista do revestimento da caixa e montagem dos drenos.

Na Figura anterior percebe-se que na parte externa da caixa de alvenaria foi também instalado um dreno com o objetivo de drenar a água que pudesse se acumular no fundo do fosso.

O preenchimento do solo no lisímetro foi realizado em 6 camadas, as quais foram assentadas conforme sua posição original no perfil, totalizando a profundidade da caixa (0,7m). Este procedimento foi realizado com base na densidade do solo (Tabela 1) e da umidade atual de cada camada a fim de que fosse possível promover a correção da massa do solo.

Tabela 1 – Valores de densidade do solo ($\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$) por camada

Camada	Densidade do solo
0 – 10cm	1,497
10 – 20cm	1,580
20 – 30cm	1,663
30 – 40cm	1,763
40 – 50cm	1,693
50 – 60cm	1,760
60 – 70cm	1,653

Com auxílio de uma balança, a massa de solo, necessária para o preenchimento de cada camada, era determinada (Figura 13a) e, em seguida, uma leve compactação era realizada até que toda a massa de solo fosse distribuída na altura de 0,10m pré-definida (Figura 13b). Desta maneira, procurou-se preencher a caixa com o mesmo tipo de solo e com as mesmas densidades do perfil original.



Figura 13 – Pesagem do solo (a) e preenchimento do lisímetro (b).

A Figura 14a apresenta o lisímetro totalmente preenchido com o solo. Sobre a parte superior da parede de bloco de concreto, foram fixadas chapas galvanizadas (Figura 14b), para que o solo não caísse pelo espaço entre o lisímetro e caixa de bloco, acumulando-se no fosso.



Figura 14 – Vista do lisímetro totalmente preenchido com solo (a) e detalhe das chapas laterais utilizadas como acabamento (b).

A colocação da chapa permitiu o plantio da grama de maneira uniforme, não deixando espaços na cultura dentro e fora do lisímetro (Figura 15). Com o objetivo de se manter a grama na altura adequada, durante o período de execução das leituras, apenas um corte foi realizado no dia 12 de janeiro de 2005.



Figura 15 – Lisímetro com plantio de grama.

Completada esta fase, foi realizada a calibração do lisímetro, conforme metodologia apresentada por CAMPECHE (2002). Em balança eletrônica, foram preparados cinquenta sacos plásticos com areia representando as massas-padrão, sendo 5 com 0,1kg, 5 com 0,25kg, 20 com 0,5kg e 20 com 1,0kg. O teste consistiu em colocar os sacos plásticos sobre o lisímetro, começando pelos de menor massa, em intervalos de 2min. A cada saco plástico colocado, era registrada no datalogger, em mV, a massa do conjunto, e também anotada em planilha. Após a colocação de todos os sacos plásticos, o procedimento inverso foi realizado, ou seja, foi-se retirando, no mesmo intervalo de tempo, os sacos começando pelos de 1,0kg.

Os dados referentes às massas-padrão aplicadas e as respectivas leituras da balança do lisímetro foram submetidos à análise estatística de regressão.

3.4 Coleta de dados meteorológicos

Conforme apresentado na descrição, o lisímetro com grama foi instalado em uma área de aproximadamente de 250m², que foi devidamente cercada com tela de segurança com 1,80m de altura. Em um dos cantos da área, foi instalada uma estação meteorológica contendo sensores de radiação solar incidente, velocidade e direção do vento, e temperatura de bulbo seco e úmido, além de um pluviógrafo (Figura 16).



Figura 16 – Estação meteorológica na área do lisímetro.

Dentro de uma caixa construída com chapa de aço galvanizado (Figura 17), foi instalado um sistema de armazenamento de dados (datalogger – modelo 23X da Campbell Scientific), que era alimentado por uma bateria de 12V e carregada com um painel solar e programado para armazenar informações médias dos sensores a cada 30 min. Os dados armazenados eram transferidos por meio de um módulo de memória, que permitia a gravação e a manipulação dos mesmos em computador. No Apêndice A está apresentada a cópia do programa desenvolvido para o datalogger.



Figura 17 – Montagem da caixa central (a) e datalogger (b) para armazenamento de dados meteorológicos.

Além dos sensores citados, também foi instalado junto ao lisímetro um tanque Classe A, a fim de que valores de E_{To} pudessem ser correlacionadas com a evaporação no tanque (Figura 18). Vale dizer que, a evaporação da água no tanque não foi obtida nos dias em que a precipitação superou a evaporação. A adoção deste procedimento foi necessária, pois a leitura do tanque ocorria uma vez por dia (às 8:00 h), e com a ocorrência de uma precipitação neste intervalo, que ocasionasse uma leitura inferior à anterior, a medida de evaporação, não poderia ser realizada. Este fato ocorreu em alguns dias durante o período analisado. É importante ressaltar que, se o tanque tivesse o registro contínuo, o descarte dos dados teria uma menor amplitude.

O registro de dados teve início no dia 01 de dezembro de 2004, com a execução de alguns testes preliminares. No entanto, somente a partir de 24 de dezembro foi

realizada a leitura completa dos sensores, incluindo o registro da célula de carga e o acompanhamento da evaporação no tanque.



Figura 18 – Tanque Classe A instalado ao lado do lisímetro.

3.5 Manejo da área do lisímetro

No intuito de manter o gramado em condições ótimas de umidade, foi instalado um sistema de irrigação por aspersão, composto de 4 mini aspersores setoriais da marca FABRIMAR, modelo Pingo (bocal 3,2 mm).

Para se proceder a drenagem do lisímetro, em virtude da ocorrência de precipitação elevada, uma bomba de pistão foi instalada sobre uma estrutura de apoio, construída com madeira, e acoplada a um tubo flexível de 0,020m de diâmetro (3/4”) (Figura 19).



Figura 19 – Bomba de pistão utilizada na drenagem da caixa.

Após plantada a grama batatais, a mesma foi mantida na altura especificada e, para isso, era utilizada uma roçadeira a fim de permitir o corte uniforme de todo o gramado.

3.6 Determinação da ETo

3.6.1 Lisímetro

De acordo com a metodologia apresentada por MEDEIROS et al. (2003), para efeito do cálculo da evapotranspiração, os dados do lisímetro devem ser tomados a partir da diferença de massa do conjunto solo-caixa no início do dia (0h) e massa obtida no final do dia (24h). No entanto, a metodologia utilizada neste trabalho foi a mesma recomendada por SILVA (2003). Segundo o autor, todas as leituras do lisímetro devem ser analisadas diariamente para que ocorrências de chuva, irrigação ou drenagem da caixa sejam identificadas e desconsideradas do cálculo da ETo. Além disso, foi adotado o período de 6:00h a 19:30h como sendo aquele em que ocorre a maior percentagem diária de brilho solar e, praticamente, toda a lâmina é evapotranspirada no dia.

Uma vez realizado este procedimento para cada dia, a massa era obtida da transformação do sinal elétrico, utilizando a equação de calibração. Finalmente, a lâmina evapotranspirada foi obtida dividindo-se a diferença de massa pela área da caixa (1,0m²).

3.6.2 Fórmulas matemáticas

Com o objetivo de se estabelecer correlação das medidas de ETo com estimativas, foram adotados os modelos de Hargreaves-Samani e Penman-Monteith, por serem de uso consagrado na literatura. Os modelos foram utilizados tanto para os dados diários coletados quanto para dados extraídos de uma série histórica da estação Ecologia Agrícola (código INMET: 83741), correspondente ao período de 1961 a 1993.

3.6.2.1 Hargreaves-Samani

O método de Hargreaves-Samani, para estimativa da ETo diária, em mm dia⁻¹, pode ser apresentada por (PEREIRA et al., 1997):

$$ETo = 0,0023 R_a (T + 17,8) \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (3)$$

em que

ETo = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;

R_a = radiação extraterrestre, MJ m⁻² d⁻¹;

T = temperatura média diária, °C;

T_{max} = temperatura máxima, °C;

T_{min} = temperatura mínima, °C;

A determinação de R_a é feita pela equação 4.

$$R_a = 37,586 d_r (\omega_s \text{ sen } \varphi \text{ sen } \delta_s + \cos \varphi \cos \delta_s \sin \omega_s) \quad (4)$$

em que

- d_r = distância relativa Terra-Sol [rad];
- ω_s = ângulo horário do pôr-do-sol [rad];
- φ = latitude do lugar [rad]; e
- δ_s = declinação solar [rad].

A determinação de d_r é feita de acordo com a equação 5:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (5)$$

em que J é o número do dia do ano.

Para valores mensais, J pode ser determinado como:

$$J = \text{inteiro}(30,42 M - 15,23) \quad (6)$$

em que M é o número do mês (1 a 12).

A equação 7 estima o ângulo horário do pôr-do-sol.

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta_s) \quad (7)$$

OBS: Na equação 7, para o Hemisfério Norte a latitude tem sinal positivo e, para o Hemisfério Sul, tem sinal negativo.

A declinação solar é determinada pela equação 8.

$$\delta_s = 0,4093 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,405\right) \quad (8)$$

3.6.2.2 Penman – Monteith

O modelo de Penman – Monteith (ALLEN et al., 1998), pode ser descrito como:

$$ET_o = \frac{\delta}{\delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \frac{(R_n - G)}{\lambda} + \frac{\gamma}{\delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \frac{900}{T + 273,15} U_2 DPV \quad (9)$$

em que

- ET_o = evapotranspiração da cultura de referência, mm d^{-1} ;
- δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- λ = calor latente de evaporação, MJ kg^{-1} .
- r_c = resistência do dossel da planta, s m^{-1} ;
- r_a = resistência aerodinâmica, s m^{-1} ;
- R_n = saldo de radiação à superfície, $\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$;
- G = fluxo de calor no solo, $\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$;
- γ = constante psicrométrica, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- T = temperatura média do ar, $^\circ\text{C}$;
- U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, m s^{-1} ;

DPV = déficit de pressão de vapor, kPa; e
 900 = fator de transformação de unidades, kJ⁻¹ kg K.

Os componentes da equação 9, de acordo com SMITH (1991), podem ser obtidos conforme descrito a seguir.

- Pressão de saturação de vapor (e_s)

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{\max}) + e^{\circ}(T_{\min})}{2} \quad (10)$$

em que

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

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

$e^{\circ}(T)$ = pressão de saturação de vapor média, kPa; (Equação 11)

$$e^{\circ}(T) = 0,6108 \exp \frac{17,27 T}{T + 237,3} \quad (11)$$

- Declividade da curva de pressão de vapor (δ)

$$\delta = \frac{4098 e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (12)$$

- Calor latente de evaporação (λ)

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} T \quad (13)$$

- Constante psicrométrica (γ)

$$\gamma = 0,0016286 \frac{P}{\lambda} \quad (14)$$

em que P [kPa] é pressão atmosférica à altitude Z [m], calculada pela equação 15.

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 Z}{293} \right)^{5,25} \quad (15)$$

- Pressão atual de vapor (e_a)

$$e_a = e^{\circ}(T_w) - 0,0008(T_d - T_w) \quad (16)$$

em que

T_w = temperatura média do bulbo úmido, °C;

T_d = temperatura média do bulbo seco, °C;

- Umidade relativa média do ar (UR)

$$UR = 100 \frac{e_a}{e^o(T)} \quad (17)$$

- Déficit de pressão de vapor (DPV)

$$DPV = e_s - e_a \quad (18)$$

- Saldo de radiação (Rn)

A determinação do saldo de radiação é feita pela equação 19.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (19)$$

em que

R_{ns} = saldo de radiação de ondas curtas, $MJ m^{-2} d^{-1}$; e
 R_{nl} = saldo de radiação de ondas longas, $MJ m^{-2} d^{-1}$.

- Saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns})

O saldo de radiação de ondas curtas é a radiação efetivamente recebida pelo dossel da cultura, levando-se em consideração as perdas por reflexão. A equação 20 é a que representa a determinação desse componente.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (20)$$

em que

α = coeficiente de reflexão da superfície do dossel para a radiação solar de ondas curtas (albedo). O valor médio para grama é de 0,23; e
 R_s = radiação solar incidente [$MJ m^{-2} d^{-1}$], determinada pelo radiômetro.

- Saldo de radiação de ondas longas (R_{nl})

A radiação térmica da vegetação e do solo para a atmosfera, bem como a refletida da atmosfera e da nuvem, pode ser representada pela equação 21.

$$R_{nl} = 0,9 \frac{n}{N} + 0,1 \left(0,34 \quad 0,14 \sqrt{e_a} \right) \sigma \left(T_{kx}^4 + T_{kn}^4 \right) \frac{1}{2} \quad (21)$$

em que

σ = constante de Stefan Boltzmann, $4,903 \times 10^{-9} MJ m^2 K^{-4} d^{-1}$;
 T_{kx} = temperatura máxima diária, K; e,
 T_{kn} = temperatura mínima diária, K.

- Fluxo de calor no solo (G)

Como consequência do calor armazenado no solo, pode haver a ocorrência de algum fluxo de calor. Para estimar esse fluxo, para um dado período, a equação 22 pode ser usada.

$$G = 0,38 (T_n - T_{n-1}) \quad (22)$$

em que

$$\begin{aligned} G &= \text{fluxo de calor no solo [MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{]}; \\ T_n &= \text{temperatura média do dia n [}^{\circ}\text{C]}; e, \\ T_{n-1} &= \text{temperatura média do dia n - 1 [}^{\circ}\text{C]}. \end{aligned}$$

OBS: se a estimativa for mensal, T_n será a temperatura média do mês em questão; T_{n-1} a temperatura média do mês anterior.

- Resistência do dossel da planta

Considerando a grama como cultura de referência, o valor de r_c foi parametrizado para uma altura da cultura de 0,12 m. Dessa forma, seu valor é 69 s m^{-1} .

- Resistência aerodinâmica

$$r_a = \frac{208}{U_2} \quad (23)$$

3.6.3 Tanque Classe A

As leituras diárias da evaporação obtidas no tanque Classe A também foram correlacionadas com medidas diárias de E_{To} obtidas no lisímetro e no método de Penman-Monteith.

3.7 Correlação entre os métodos

Todos os métodos apresentados na determinação e estimativa da E_{To} foram avaliados segundo regressões lineares simples, erro-padrão da estimativa (SEE), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c), esse último definido pelo produto entre o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância.

O erro-padrão da estimativa foi calculado segundo a equação 24:

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{n - 1}} \quad (24)$$

em que:

$$\begin{aligned} SEE &= \text{erro-padrão da estimativa, mmdia}^{-1}\text{;} \\ Y &= E_{To} \text{ medida, mmdia}^{-1}\text{;} \\ \hat{Y} &= E_{To} \text{ estimada pelo modelo, mmdia}^{-1}\text{;} \\ n &= \text{número de observações.} \end{aligned}$$

O índice de concordância, proposto por WILLMOTT et al. (1985), é dado pela equação:

$$d = 1 - \frac{\sum (\hat{Y} - Y)^2}{\sum (|\hat{Y}'| + |Y'|)^2} \quad (25)$$

em que, $\hat{Y}' = \hat{Y} - \bar{Y}$ e $Y' = Y - \bar{Y}$
sendo:

d = adimensional, variando de 0 a 1;

\bar{Y} = média dos valores observados, mmdia^{-1} .

O desempenho dos métodos utilizando o índice c foi avaliado conforme a Tabela 2, apresentada por CAMARGO & SENTELHAS (1997):

Tabela 2 – Desempenho do método de estimativa da ETo, pelo índice “c”

Desempenho	Valor “c”
Ótimo	> 0,85
Muito bom	0,76 – 0,85
Bom	0,66 – 0,75
Mediano	0,61 – 0,65
Sofrível	0,51 – 0,60
Mau	0,41 – 0,50
Péssimo	≤ 0,40

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração do lisímetro

Conforme metodologia apresentada, procedeu-se a calibração do lisímetro sendo obtida alta correlação entre leituras da célula de carga (mV) e massa do conjunto (kg). Como a área do lisímetro é de $1,0\text{m}^2$ e considerando a densidade da água igual à unidade, a variação da massa do conjunto representa a própria evapotranspiração de referência, em mm.

A Figura 20 apresenta o resultado da análise de regressão. A equação apresentada nessa Figura foi obtida a partir dos dados de descarregamento, uma vez que a evapotranspiração representa uma diminuição da massa do conjunto. Apesar disto, os coeficientes de determinação para as duas curvas (carregamento e descarregamento) apresentaram valores semelhantes. O erro-padrão de estimativa da regressão linear foi de 0,278kg ou 0,278mm.

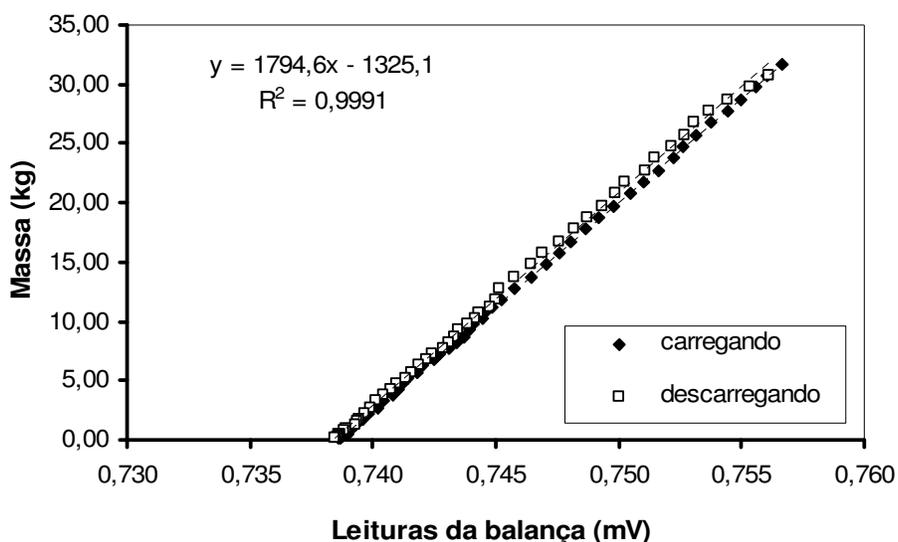


Figura 20 – Gráfico de ajuste dos dados a partir das leituras da célula de carga e massas do conjunto.

Pode-se verificar também que a utilização dos sacos plásticos com massa de 0,1kg e 0,25kg no processo de calibração não comprometeu a tendência linear do ajuste tanto no carregamento quanto no descarregamento.

No Apêndice B são apresentados os dados obtidos na calibração e utilizados para a obtenção do ajuste apresentado na Figura 20.

4.2 ETo obtida pelo lisímetro

Conforme item 3.6.1, para o cálculo da ETo as leituras provenientes da célula de carga eram transformadas em massa e analisadas no período de 6:00 às 19:30h. As Figuras 21 e 22 apresentam duas situações distintas: a primeira representando um

determinado dia sem ocorrência de chuva, irrigação ou drenagem do lisímetro; e a segunda, representando uma descontinuidade das leituras da célula entre 8:30 e 9:30h, aproximadamente, devido à drenagem do equipamento.

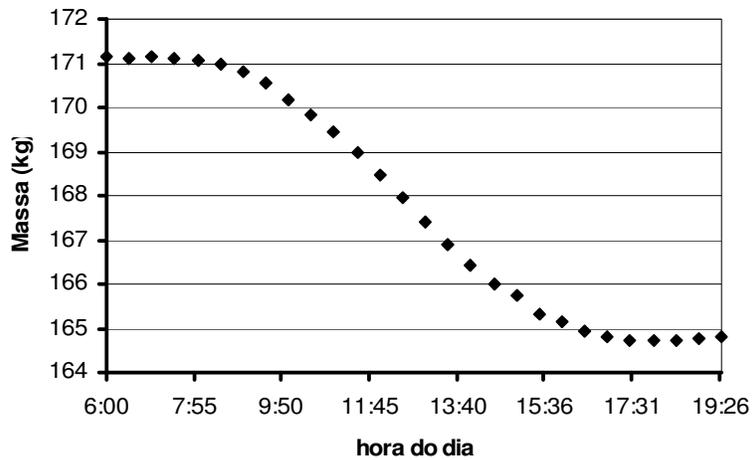


Figura 21 – Variação da massa do conjunto no período de análise, em um dia sem drenagem da caixa.

No primeiro caso, o cálculo da ETo foi realizado subtraindo diretamente a leitura correspondente à 6:00h daquela das 19:30h. No segundo caso, Figura 22, se fosse feita a subtração das leituras correspondentes a esses horários, seria computada uma lâmina evapotranspirométrica de 14,5 mm. No entanto, a linha mais clara representa a variação das leituras da célula, descontando a drenagem realizada, obtendo-se assim um valor de evapotranspiração bem inferior ao citado anteriormente (aproximadamente 3,5 mm).

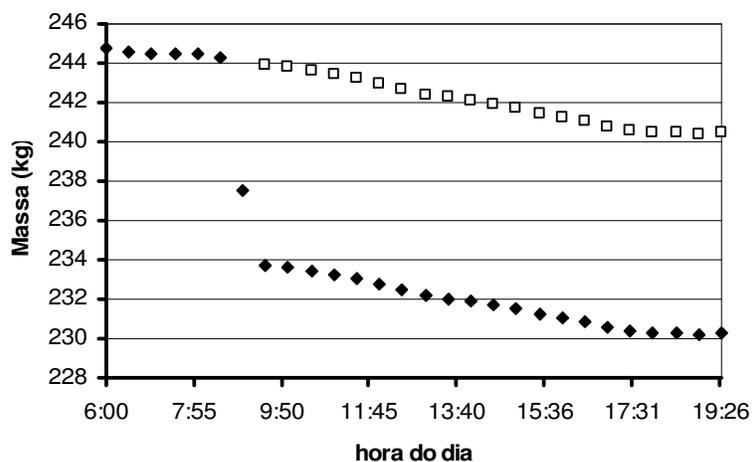


Figura 22 – Variação da massa do conjunto no período de análise, em um dia com drenagem da caixa.

A Figura 23 apresenta os valores de evapotranspiração, no período de 24/12/2004 a 01/02/2005. Analisando esses dados, percebe-se que, no período analisado, ocorreu uma expressiva variação da ETo, sendo obtidos valores entre 0,31 e

7,32 mmdia⁻¹. Essa expressiva variação pode ser explicada ao se analisar as Figuras 24, 25 e 26, que ilustram a variação da radiação solar global, umidade relativa e velocidade do vento no mesmo período.

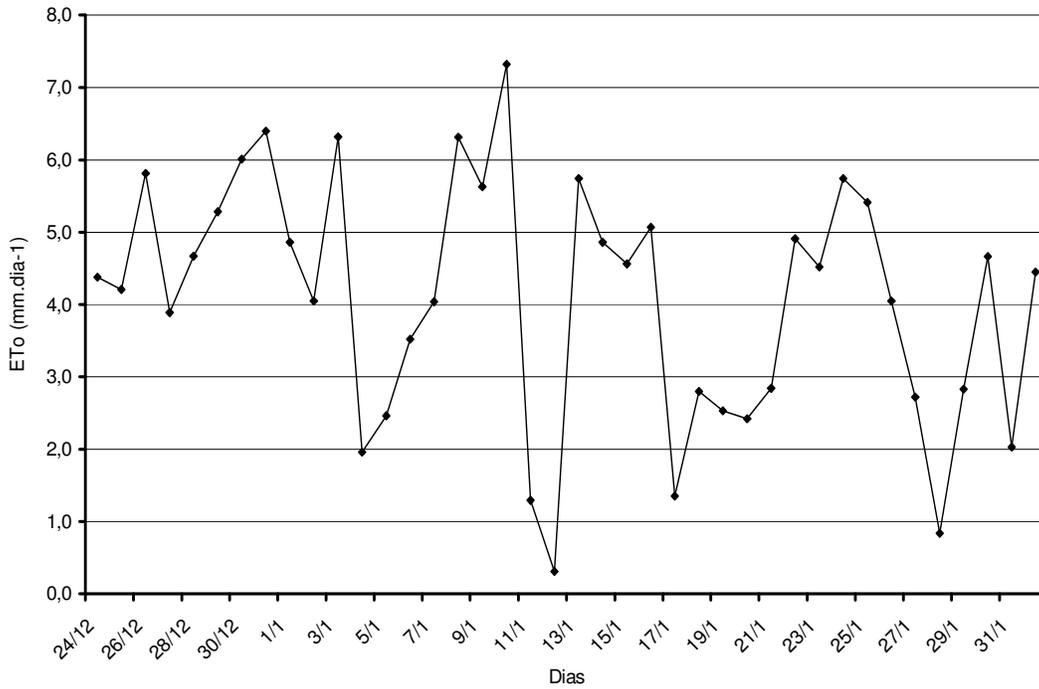


Figura 23 – Evapotranspiração de referência medida no período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ.

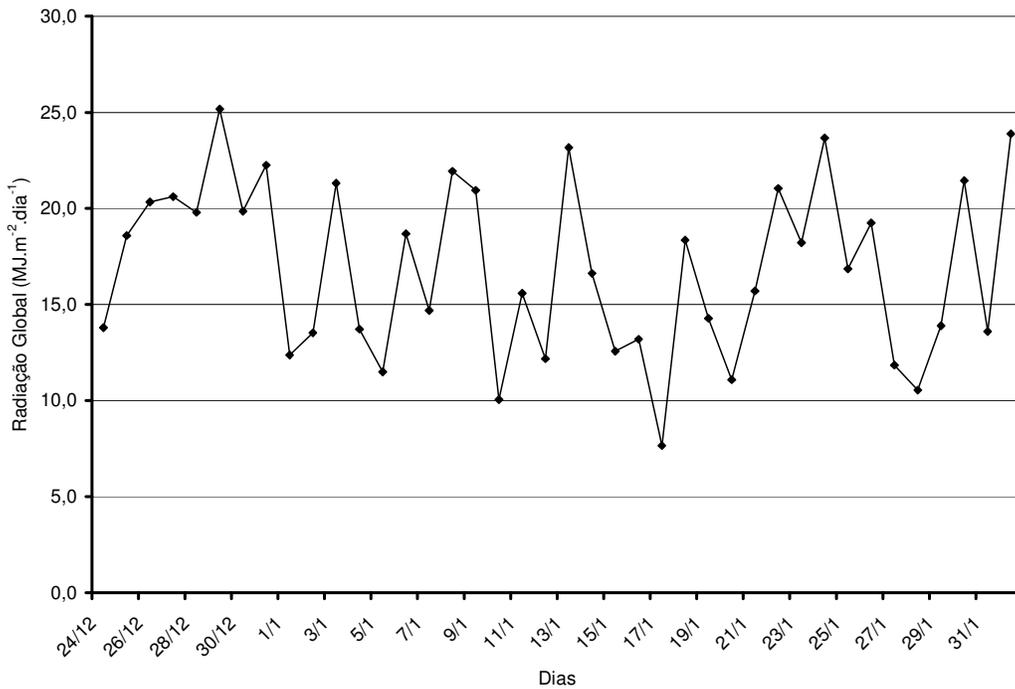


Figura 24 – Radiação solar global medida no período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ.

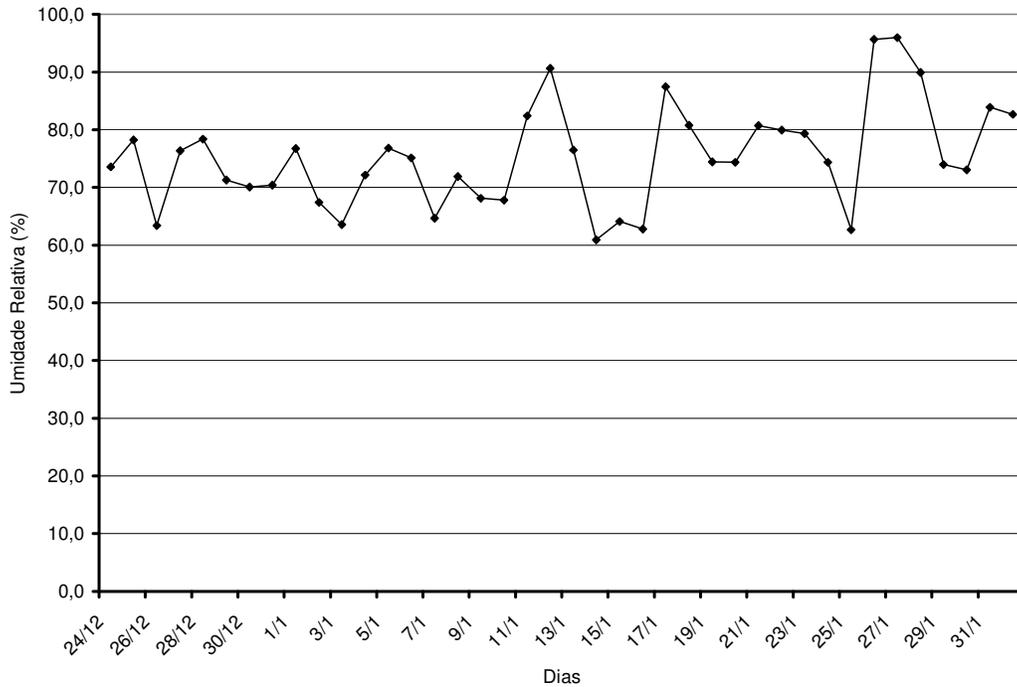


Figura 25 – Umidade relativa média do ar determinada no período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ.

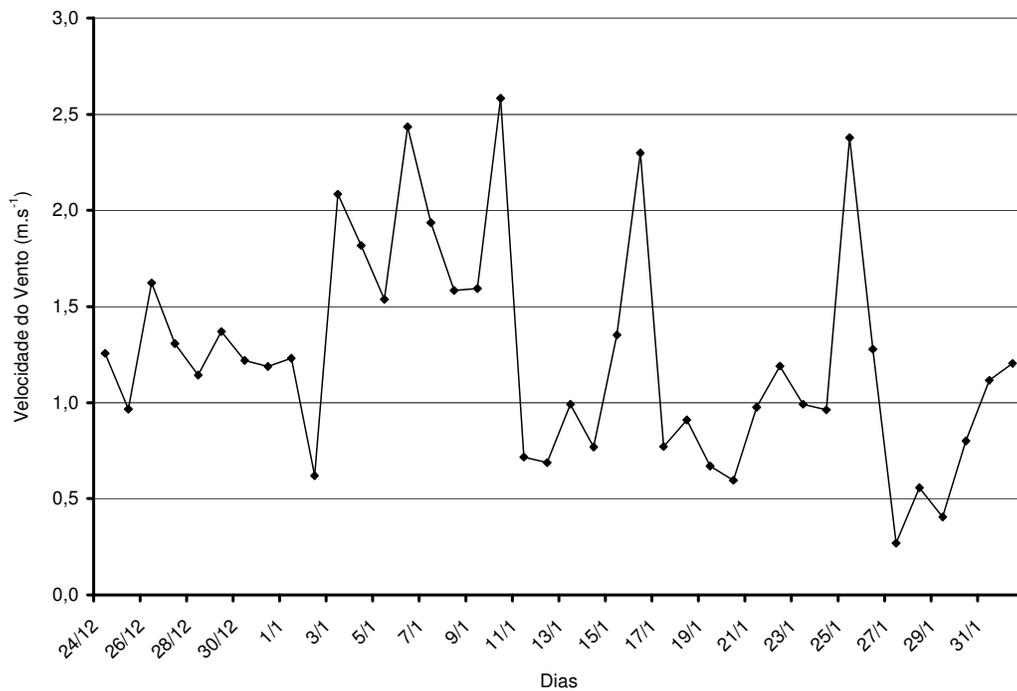


Figura 26 – Velocidade do vento a 2m de altura, medida no período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ.

O maior valor de ETo determinado (7,32 mm dia^{-1}) ocorreu no dia 10 de janeiro e foi bem superior aos demais observados. A ocorrência de um valor com essa magnitude

pode ser analisada juntamente com os elementos meteorológicos envolvidos no processo físico de evapotranspiração. Nas Figuras anteriores, é possível observar que neste dia, a umidade relativa média estava abaixo de 70% (valor normalmente baixo para o mês de janeiro na região) e a velocidade do vento foi a mais alta observada no período ($\approx 2,6\text{ms}^{-1}$). Apesar da radiação incidente ter sido relativamente baixa (Figura 23), a combinação destes elementos favoreceu um maior efeito evapotranspirométrico. Além disso, por não ter ocorrido chuva nos dias anteriores, nota-se uma ligeira queda de umidade relativa a partir do dia 8 de janeiro (Figura 24), favorecendo o aumento do déficit de pressão de vapor e, conseqüentemente, a ocorrência de uma maior taxa evapotranspirométrica.

Com base nos valores armazenados no datalogger (de 30 em 30min), verificou-se, que neste dia 10 de janeiro, a amplitude de variação da velocidade média do vento foi a mais acentuada dentre os dias analisados. Considerando o mesmo período utilizado para o cálculo da ETo (6:00 às 19:30h), o valor médio da velocidade do vento seria de $3,29\text{ms}^{-1}$, com um valor máximo de $5,13\text{ms}^{-1}$, ocorrido às 11:00h (horário de verão). Resultado como esse é também abordado por PEREIRA et al. (2002a). Segundo os autores, problemas operacionais em lisímetro de pesagem são comumente observados durante a estação chuvosa e com ocorrência de ventos fortes.

Em contrapartida, o menor valor de ETo foi determinado no dia 12/01 ($0,31\text{mmdia}^{-1}$), quando foi realizado o único corte da grama no período. Somado a este fato e analisando as lâminas precipitadas (Figura 27), observa-se que a maior precipitação ocorreu no dia 11/01 e, a partir do pluviograma obtido com os dados registrados no datalogger, pode-se constatar que a precipitação de 48mm foi concentrada no período de 16:00 às 18:00 h. Especificamente no dia 12/01, ocorreu novamente um evento de precipitação, mas com menor intensidade. Neste dia, a precipitação foi distribuída no período de 8:00 às 18:00h, dificultando o acesso à área do lisímetro para que fosse realizada uma drenagem do mesmo. Associado a isso, nota-se nas Figuras 23 a 25 que, em virtude da precipitação ocorrida nos dias 11 e 12/01, a radiação solar incidente e a velocidade do vento permaneceram com baixos valores, enquanto que a umidade relativa atingiu 91,0%, limitando, desta forma, a taxa evapotranspirométrica.

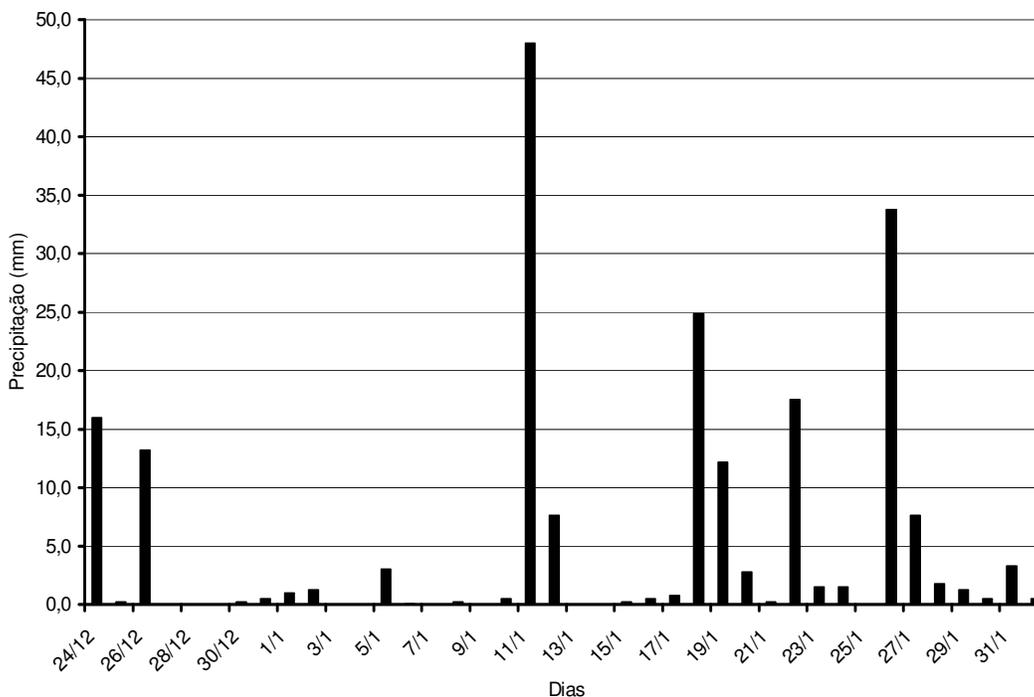


Figura 27 – Lâmina precipitada no período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ.

Não considerando estes valores extremos apresentados na Figura 23, quando da ocorrência de precipitação intensa e/ou ventos fortes, pode-se observar que as leituras de evapotranspiração obtidas no lisímetro variaram conforme a própria variação dos elementos meteorológicos. Assim, analisando o período de 27/12 a 31/12, quando não houve precipitação, observa-se um aumento gradativo da ETo, atingindo o valor de 6,40 mm dia^{-1} . Neste mesmo período, observa-se na Figura 24 que a radiação solar global alcançou o maior valor no dia 29 de dezembro (25,2 $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), permanecendo alta nos dois dias consecutivos. Além disso, pode-se verificar na Figura 25 que nesses mesmos dias, a umidade relativa permaneceu em torno de 70,0%, bem abaixo do valor máximo observado no período (96,0%). Quanto à velocidade do vento, pode-se notar na Figura 26 que a mesma variou no intervalo de 1,0 a 1,5 ms^{-1} , considerado um valor médio no período analisado. Verifica-se, com isso, que os elementos meteorológicos radiação e umidade relativa foram determinantes para a ocorrência de lâminas evapotranspirométricas elevadas, sendo o efeito da velocidade do vento menos expressivo nestes dias.

Ao contrário do período de 27 a 31/12, uma taxa decrescente de ETo foi observada entre os dias 25 e 28/01, quando a lâmina diária de evapotranspiração diminuiu de 5,41 a 0,84 mm dia^{-1} . Apesar de ter havido precipitação (Figura 27), o lisímetro se comportou satisfatoriamente, seguindo a variação esperada de acordo com os elementos meteorológicos. Analisando as Figuras 24 a 26, percebe-se que neste período, a radiação solar diminuiu, em virtude da nebulosidade, a umidade relativa atingiu 96,0% e a velocidade do vento média diária chegou a 0,27 ms^{-1} , a menor magnitude verificada para esse elemento meteorológico no período.

Cabe ressaltar que os elementos meteorológicos apresentados foram determinados considerando todos os valores armazenados ao longo das 24h, ao contrário da determinação da ETo, que foi obtida considerando apenas o período diurno (6:00 às 19:30h).

4.3 ETo obtida pelas fórmulas

Os valores de ETo estimados pelas equações de Penman-Monteith (P-M) e Hargreaves-Samanai (H-S), bem como de temperaturas máxima, mínima e média (T_{max} , T_{min} e $T_{média}$, respectivamente), da radiação extraterrestre (Ra) e da evaporação do tanque classe A (EV) são apresentadas na Tabela 3, para o período de 24/12/2004 a 01/02/2005.

Pode-se observar que a radiação solar que chega no topo da atmosfera (Ra) (Eq. 4) pouco influencia nas variações da ETo, principalmente pelo método de Penman-Monteith (P-M). Neste método, conforme Eq. 9, é realizado o cálculo do saldo de radiação na superfície, o qual é muito influenciado pelas condições atmosféricas locais. Já para o método de Hargreaves-Samani (Eq. 3), o valor de Ra é explícito na fórmula, influenciando mais decisivamente o valor obtido para a ETo.

Por ser considerado um modelo físico, o método P-M apresenta um comportamento semelhante aos valores de ETo medidos pelo lisímetro (Figura 23), sendo influenciado pelos mesmos elementos meteorológicos analisados anteriormente.

Pelo fato do período analisado ter sido curto e todo ele concentrado no verão, quando as temperaturas em média permanecem altas, não foram observadas grandes variações nos valores da ETo pelo método de Hargreaves-Samani, uma vez que, conforme Tabela 3, a radiação no topo da atmosfera pouco variou no período. O maior valor estimado por esse método foi de $8,7\text{mm dia}^{-1}$ no dia 26/12, quando foi observado maior valor de temperatura máxima diária ($41,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), o que contribuiu para uma alta temperatura média. Pela equação 3, pode-se verificar que quanto maior a amplitude térmica, maior o valor da evapotranspiração. Em contrapartida, nos dias 25, 26 e 27/01 foi observada a maior queda nos valores estimados de ETo, em virtude, basicamente da diminuição brusca da temperatura.

4.4 Evaporação obtida no TCA

Tendo em vista a ocorrência de precipitação em vários dias no período analisado (Figura 27), foi necessário o descarte de alguns dados de evaporação no tanque. Em virtude disso, não foi aplicada a metodologia para a obtenção dos coeficientes do tanque (equações 1 e 2). No entanto, a Figura 28 apresenta o gráfico de dispersão dos valores de evaporação do tanque classe A com a evapotranspiração de referência do lisímetro. Da mesma forma que SENTELHAS & FOLEGATTI (2003), optou-se por ajustar os dados a uma equação linear passando pela origem. Pode-se constatar que a correlação dos dados de evaporação e da ETo foi satisfatória, evidenciando o potencial desta metodologia para manejo de água na região.

4.5 Comparação entre os métodos

A Figura 29 apresenta o comportamento da evapotranspiração de referência obtida pelo lisímetro de pesagem, bem como as estimativas segundo os modelos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani, considerando leituras diárias obtidas da estação meteorológica instalada próxima ao lisímetro, no período de 24 de dezembro de 2004 a 01 de fevereiro de 2005.

Tabela 3 – Valores de temperatura média diária, Ra e EV, e estimativas de ETo no período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ

Data	T _{max}	T _{min}	T _{média}	Ra	ETo P-M	ETo H-S	EV tanque
24/dez	35,3	20,8	28,0	42,558	2,7	7,0	2,9
25/dez	32,5	20,7	26,6	42,557	3,6	6,1	4,3
26/dez	41,3	22,2	31,8	42,555	4,9	8,7	5,2
27/dez	34,4	23,0	28,7	42,551	4,4	6,3	3,5
28/dez	33,2	22,4	27,8	42,546	4,0	6,0	4,4
29/dez	37,0	22,9	30,0	42,539	5,5	7,1	8,7
30/dez	38,5	23,9	31,2	42,531	4,4	7,5	6,6
31/dez	37,5	23,1	30,3	42,521	5,1	7,3	7,7
01/jan	33,5	21,9	27,7	42,510	2,5	6,2	6,1
02/jan	37,9	21,8	29,8	42,497	2,5	7,6	4,0
03/jan	37,4	21,1	29,2	42,483	5,3	7,6	9,8
04/jan	32,7	22,7	27,7	42,467	3,0	5,7	1,8
05/jan	31,9	22,9	27,4	42,449	2,1	5,4	1,5
06/jan	33,5	23,1	28,3	42,430	4,1	5,9	4,7
07/jan	39,9	24,5	32,2	42,409	3,8	7,8	5,7
08/jan	39,5	24,5	29,2	42,387	5,3	7,2	7,2
09/jan	38,5	23,2	30,9	42,362	5,1	7,6	5,0
10/jan	38,6	24,5	31,5	42,337	3,2	7,3	1,4
11/jan	33,5	22,7	28,1	42,309	3,0	6,0	2,3
12/jan	27,9	21,4	24,6	42,280	1,9	4,3	2,5
13/jan	31,7	19,9	25,8	42,249	4,4	5,9	6,6
14/jan	35,8	20,0	27,9	42,217	3,5	7,2	5,5
15/jan	40,1	21,0	30,6	42,182	2,4	8,4	4,2
16/jan	41,1	25,3	33,2	42,146	3,9	8,0	7,8
17/jan	28,5	23,8	26,2	42,108	1,2	3,8	0,3
18/jan	32,8	23,6	28,2	42,068	3,4	5,5	2,9
19/jan	36,0	23,6	29,8	42,026	2,6	6,6	2,4
20/jan	36,0	23,6	29,8	41,983	1,9	6,6	3,0
21/jan	33,7	24,4	29,0	41,937	3,0	5,6	3,4
22/jan	34,9	24,0	29,4	41,890	4,4	6,1	5,3
23/jan	34,7	24,0	29,4	41,840	3,7	6,1	4,8
24/jan	38,2	23,7	31,0	41,789	5,2	7,3	6,0
25/jan	40,5	24,1	32,3	41,736	5,0	7,9	5,9
26/jan	25,8	19,8	22,8	41,680	3,4	3,9	3,8
27/jan	22,4	19,0	20,7	41,623	1,5	2,8	3,3
28/jan	25,5	19,3	22,4	41,563	1,0	3,9	1,6
29/jan	34,6	20,6	27,6	41,502	1,9	6,6	3,6
30/jan	36,5	22,3	29,4	41,438	4,3	6,9	4,9
31/jan	31,5	22,3	26,9	41,372	2,5	5,3	3,0
01/fev	31,4	22,1	26,7	41,304	4,6	5,3	5,5

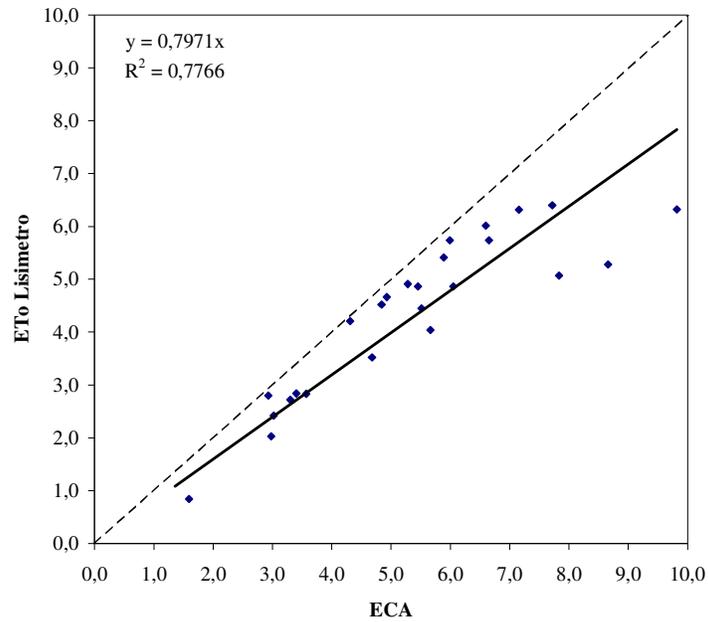


Figura 28 – Correlação entre os valores da ETo medidos pelo lisímetro e os de evaporação no tanque classe A, para o período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ.

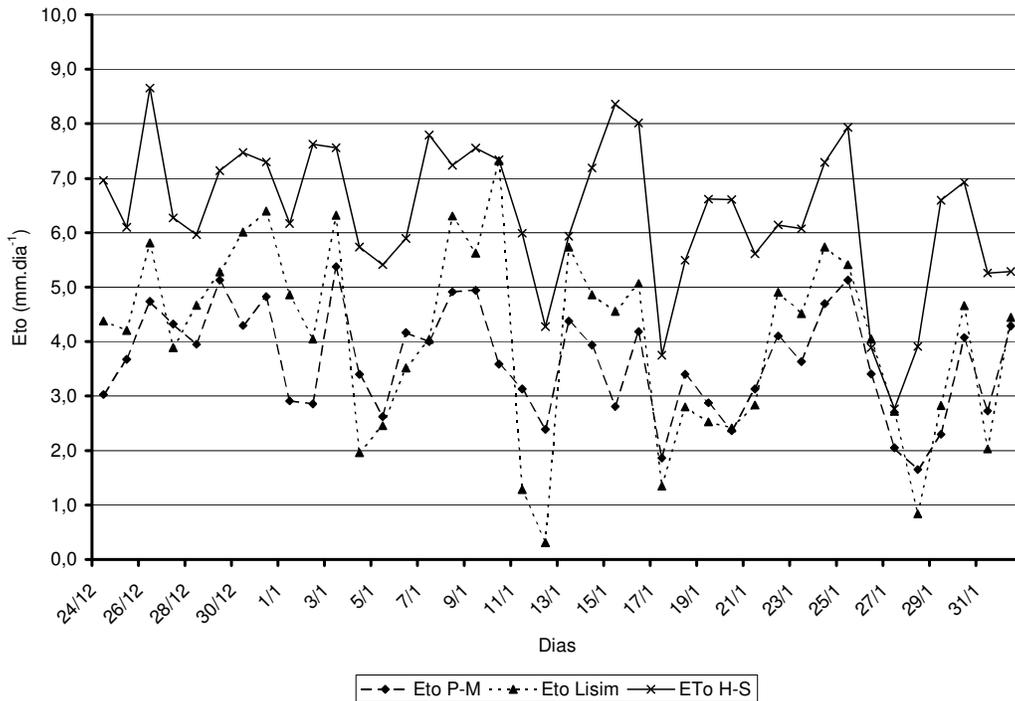


Figura 29 – Evapotranspiração de referência, obtida no lisímetro e pelos métodos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani, para o período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ.

De um modo geral, nota-se que os períodos nos quais a ETo teve seus valores mais elevados bem como os de queda foram, de certa forma, coincidentes. Pode-se

verificar que, ao longo do período estudado, o método de Penman-Monteith melhor se adequou às medidas lisimétricas, ao contrário do método de Hargreaves-Samani que apresentou superestimativa praticamente ao longo de todo período, corroborando com OLIVERIA & CARVALHO (1998) e MENDONÇA et al. (2003). Na Figura, pode-se verificar ainda os valores extremos citados anteriormente, correspondentes aos dias 10/01 ($7,32 \text{ mmdia}^{-1}$) e 12/01 ($0,31 \text{ mmdia}^{-1}$), que foram obtidos pelo lisímetro.

Os valores de ETo obtidos a partir das medidas lisimétricas tiveram o mesmo comportamento daquelas obtidas com o modelo Penman-Monteith, conforme diversos trabalhos citados na literatura.

As estimativa obtidas a partir das séries históricas apresentaram o mesmo comportamento, com o método de Hargreaves-Samani apresentando valores superiores ao método de Penman-Monteith. No entanto, os valores se apresentam menos variáveis em virtude de terem sido obtidos a partir da média de 18 anos das variáveis climatológicas envolvidas. Na Figura 30 são apresentados os valores de evapotranspiração obtidos pelos métodos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani, tanto com base nas leituras obtidas na estação (ETo P-M e ETo H-S), quanto para os dados da série histórica, no período de 1961 a 1993 (P-M série e H-S série).

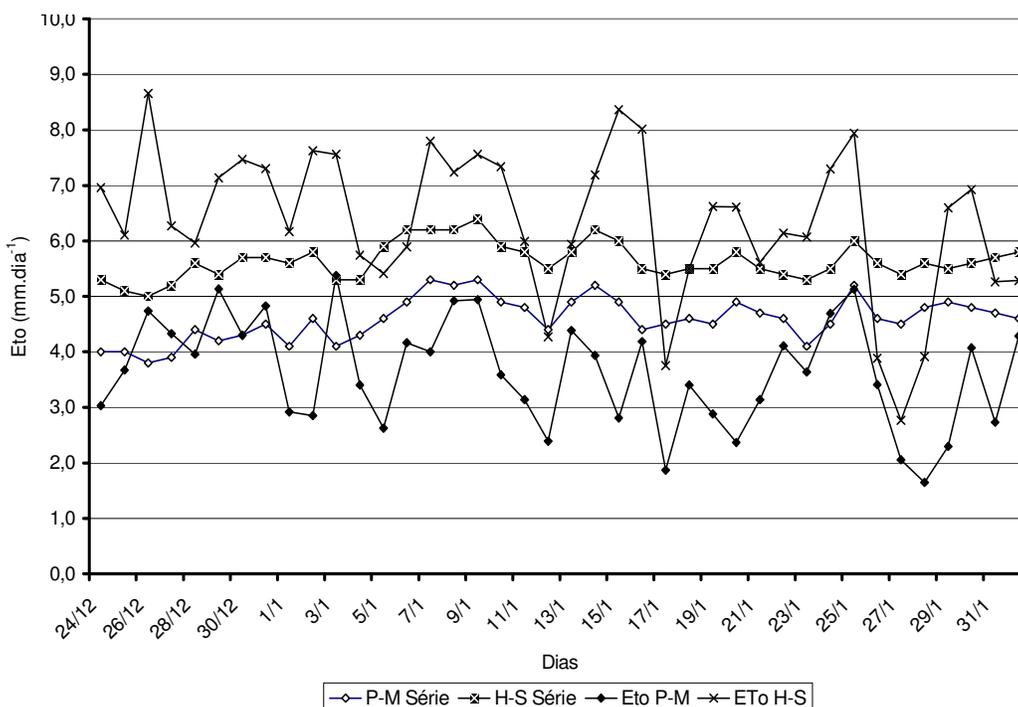


Figura 30 – Evapotranspiração de referência, obtida por diferentes metodologias, para o período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ

As estimativas obtidas pelo método de H-S superestimaram aquelas obtidas por P-M, tanto para a série histórica quanto para os dados da estação. Além disso, em virtude de se considerar valores médios diários dos elementos meteorológicos envolvidos, o comportamento das curvas correspondentes às séries se apresentam com menores variações no período analisado.

As Figuras 31 e 32 representam os gráficos resultantes da regressão linear considerando os métodos utilizados na análise, tendo o método do lisímetro como padrão e considerando todos os valores apresentados na Tabela 3.

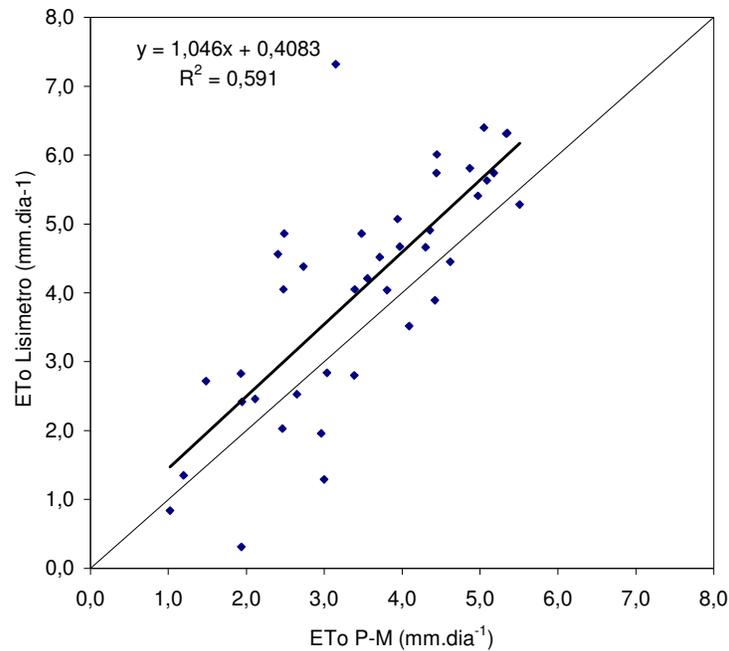


Figura 31 – Correlação entre os valores diários da ETo medidos pelo lisímetro e estimados por Penman-Monteith, para o período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ.

Mesmo com os valores extremos observados no lisímetro, constata-se na Figura 31, que a correlação obtida com P-M foi adequada quando comparadas com aquelas comumente obtidas para períodos diários. MEDEIROS (2002), trabalhando em Paraipaba-CE, encontrou coeficiente de determinação de 0,56 entre os dois métodos e, para o norte Fluminense-RJ, MENDONÇA et al. (2003), encontraram coeficiente de determinação de 0,58. No entanto, trabalhando com períodos diários, SILVA et al. (1999a), em Piracicaba-SP, encontraram $r^2 = 0,79$. Resultado semelhante também foi encontrado por SILVA et al. (2003), em Petrolina-PE, trabalhando com um lisímetro de pesagem hidráulica. Deve ser considerado que o período analisado bem como o número de observações foram diferentes com relação a este trabalho. SILVA et al. (1999a) estudou a correlação dos métodos citados no período entre 21 de fevereiro e 1º de abril, quando a ocorrência de precipitação é bem menor e, conseqüentemente, menos problemas operacionais estão associados a um desempenho satisfatório do lisímetro (SANTIAGO et al., 2002). Já o trabalho realizado em Petrolina-PE, considerou 119 observações, o que favorece a obtenção de melhores coeficientes de determinação, em situações de ajustes adequados.

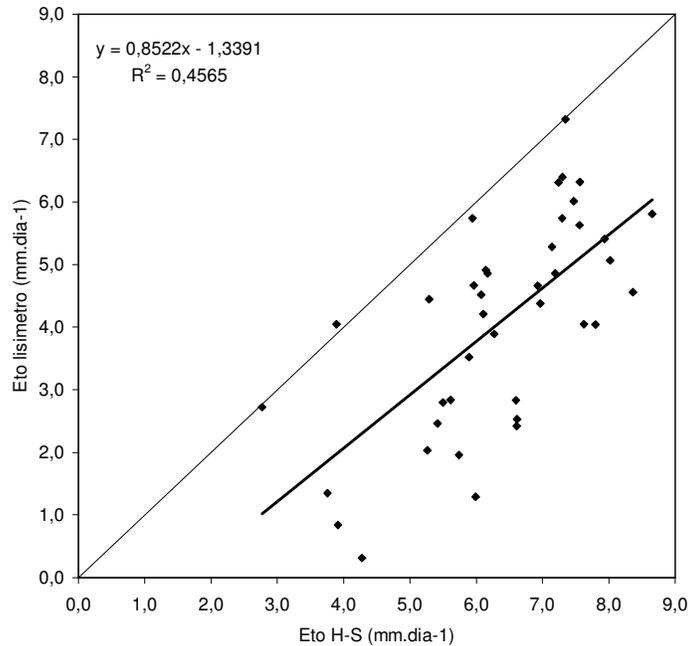


Figura 32 – Correlação entre os valores diários da ETo medidos pelo lisímetro e estimados por Hargreaves-Samani, para o período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ.

Uma análise adicional foi também realizada no intuito de verificar o desempenho da correlação entre os dois métodos, a partir da eliminação dos valores de ETo considerados anormais. Assim, uma nova correlação foi efetuada sem os dados correspondentes aos dias 24/12/2004 e 10, 11 e 12/01/2005. Após análise, foi obtido um coeficiente de determinação de 0,73, valor semelhante ao encontrado por MENDONÇA et al. (2003) para períodos de 3 dias. Assim, pode-se constatar que, apesar dos poucos pares de dados utilizados e a ocorrência de chuvas e rajadas de vento no período, o lisímetro apresentou desempenho satisfatório com relação ao método considerado padrão pela FAO (ALLEN et al., 1998). Vale lembrar que as análises realizadas com relação aos dois métodos foram significativas ao nível de 1% de probabilidade.

Como já observado na Figura 32, a correlação obtida entre os métodos do lisímetro e de H-S não apresentou resultados satisfatórios, em virtude da grande dispersão dos dados estimados, com tendência de superestimativa em relação aos medidos. Mesmo desconsiderando os valores correspondentes aos dias em que observações extremas foram detectadas no lisímetro, o coeficiente de determinação não foi alterado.

A Figura 33 apresenta as diferenças percentuais entre os valores estimados com os métodos de P-M e H-S em relação às leituras obtidas com o lisímetro. A descontinuidade nas linhas representa a ausência dos valores correspondentes aos dias 10 a 12 de janeiro.

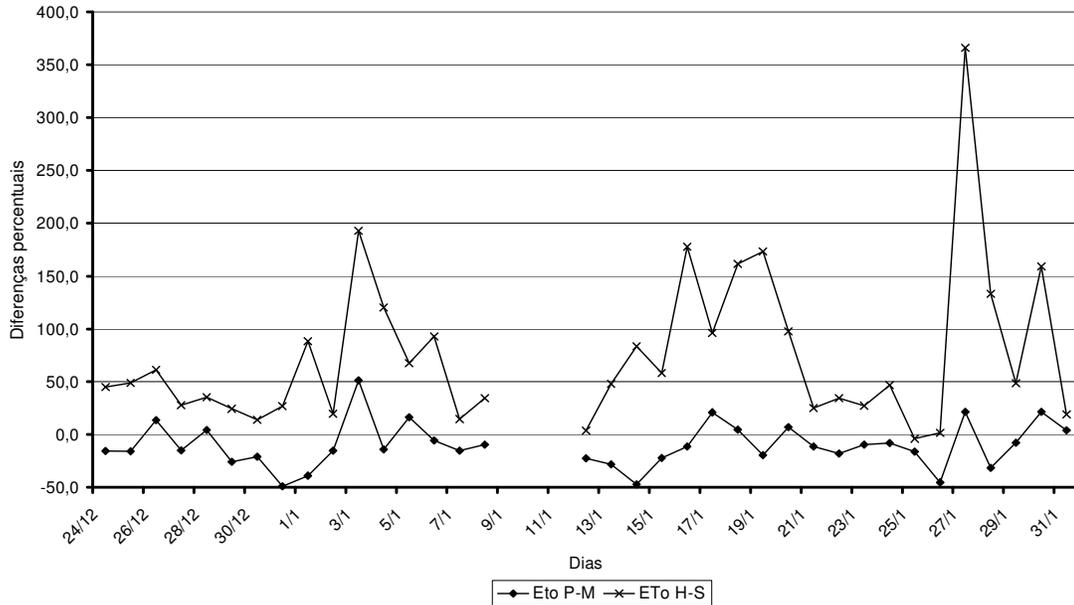


Figura 33 – Diferenças percentuais entre os valores estimados com os métodos de P-M e H-S em relação às leituras obtidas com o lisímetro no período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ.

Conforme discutido, percebe-se claramente uma melhor adequação dos dados estimados com P-M em relação aos medidos no lisímetro, quando a curva oscila mais próxima de uma diferença percentual nula. Em contrapartida, o método H-S chegou a superestimar a evapotranspiração em mais de 350% em relação aos dados do lisímetro. Apesar disso, diversos autores recomendam esse método, tendo em vista a sua simplicidade de cálculo e fácil aplicação por necessitar apenas de dados de temperatura máxima e mínima. Para a região norte Fluminense, MENDONÇA et al. (2003) concluíram que, apesar da correlação dos dados obtidos com esse método em relação aos dados lisimétricos não ter sido adequada para período diário, o mesmo pode ser aplicado para períodos superiores a 7 e 10 dias.

Em complemento à Figura 33, na Tabela 4 encontram-se as lâminas de evapotranspiração média e acumulada no período analisado, para as metodologias abordadas no trabalho e as diferenças percentuais em relação às medidas obtidas no lisímetro.

Tabela 4 – Valores de evapotranspiração de referência (ETo) medidos e estimados no período de 24/12/2004 a 01/02/2005 em Seropédica-RJ

Dispositivo e métodos	ETo média (mm dia ⁻¹)	ETo acumulada (mm)	Diferenças percentuais
Lisímetro	3,98	159,33	---
P-M	3,51	140,27	-13,9
P-M série	4,59	183,5	12,6
H-S	6,35	254,2	55,9
H-S série	5,64	225,7	38,4

Apesar do método de Penman-Monteith tender a superestimar os valores de ETo quando comparados com medidas lisimétricas (SILVA et al.,1999a; MENDONÇA et al., 2003; PERES, 1994), no período analisado neste trabalho, as estimativas obtidas por Penman-Monteith subestimaram as medidas lisimétricas em 13,9%. No entanto, analisando os resultados obtidos pela série histórica, nota-se uma superestimativa de 12,6%, conforme dados da literatura. Analisando a utilização do modelo de H-S tanto para as leituras do período como para a série histórica (Figura 33), a diferença percentual se mostrou bastante elevada.

A Figura 34 apresenta o modelo ajustado entre os valores medidos de ETo e os estimados pelo tanque Classe A, a partir do modelo apresentado na Figura 28. Apesar de um menor número de dados utilizados na análise de regressão, em virtude de chuvas ocorridas no período, pode-se notar um ajuste aparentemente mais adequado que os anteriores. De maneira semelhante à Figura 28, para o ajuste considerando a reta passando pela origem (coordenada 0,0;0,0), o coeficiente de determinação foi de 0,81. SENTELHAS & FOLEGATTI (2003), correlacionando dados do tanque Classe A com medidas obtidas no lisímetro para Piracicaba-SP, obtiveram um coeficiente de determinação de 0,73. Esse resultado indica que o uso da metodologia do tanque Classe, associada a uma boa estimativa do Kp, constitui uma alternativa adequada para o manejo da irrigação na região.

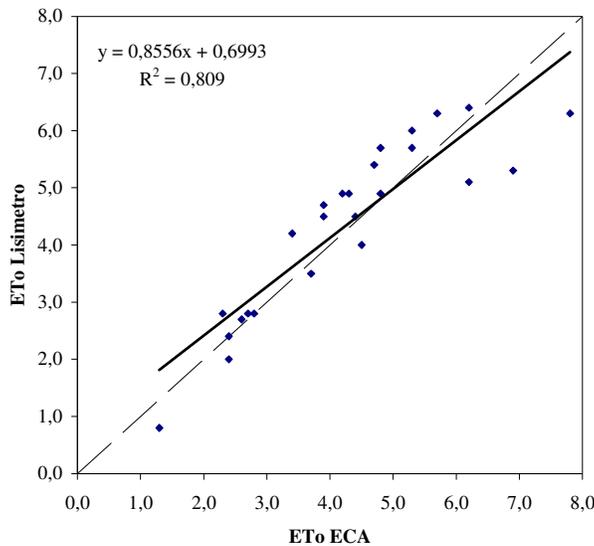


Figura 34 – Correlação entre os valores diários da ETo medidos pelo lisímetro e estimados pelo tanque Classe A, para a região de Seropédica-RJ.

A Tabela 5 apresenta os demais parâmetros estatísticos relativos às equações de regressão linear simples e o desempenho dos modelos segundo critério apresentado por CAMARGO & SENTELHAS (1997). Conforme comentários anteriores, a correlação dos dados de ETo determinados pelo lisímetro com o método P-M resultou em um melhor ajuste quando comparado com o método H-S. Constata-se também que, ao desconsiderar os valores anormais obtidos no lisímetro, devido a ocorrência de chuva ou rajadas de vento, melhores parâmetros estatísticos foram obtidos, como um menor erro padrão de estimativa e um melhor desempenho do modelo. Para o método H-S, a

desconsideração desses valores anormais não causou variação expressiva nos resultados. Tendo em vista as condições satisfatórias de funcionamento do conjunto lisimétrico, espera-se um melhor índice de desempenho com o aumento do número de observações diárias.

Tabela 5 – Parâmetros estatísticos calculados para as equações de regressão entre valores de ETo medidos pelo lisímetro e estimados pelos métodos.

Método	SEE mmdia ⁻¹	r ¹	d ²	c ³	Desempenho
Penman-Monteith	1,08	0,77	0,86	0,66	Bom
Penman-Monteith *	0,79	0,85	0,92	0,82	Muito Bom
Hargreaves-Samani	1,25	0,68	0,78	0,53	Sofrível
Hargreaves-Samani *	1,13	0,67	0,83	0,60	Sofrível
Tanque Classe A	0,66	0,90	1,00	0,90	Ótimo

* série de dados não considerando valores anormais

1 coeficiente de correlação; 2 índice de concordância; 3 índice de desempenho

Em virtude de diversos trabalhos evidenciarem melhores correlações entre medidas de ETo estimadas por diferentes métodos com relação às medidas lisimétricas para períodos maiores que 1 dia, procedeu-se uma análise totalizando a evapotranspiração medida e estimada a cada 3 dias. Os resultados dessa análise de regressão são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros estatísticos calculados para as equações de regressão entre valores de ETo medidos pelo lisímetro e estimados pelos métodos, considerando período de 3 dias.

Método	Y = a + bX		SEE Mmdia ⁻¹	r	d	c	Desempenho
	a	b					
Penman-Monteith	0,4586	1,1267	1,72	0,88	0,97	0,85	Muito bom
Hargreaves-Samani	1,3043	0,5739	2,19	0,79	0,88	0,69	Bom

Ao se analisar os dados agrupados em períodos de 3 dias, constata-se uma sensível melhora no ajuste tanto para o método de Penman-Monteith quanto para o Hargreaves-Samani. Em virtude da disponibilidade de apenas 13 pares de dados, verifica-se um aumento no erro padrão da estimativa da regressão em relação à análise diária. Porém, foi obtido um maior coeficiente de determinação, influenciando na melhoria do índice de desempenho, para a correlação das medidas estimadas por P-M em relação àquelas medidas pelo lisímetro. Resultados semelhantes foram obtidos por SILVA et al. (1999a), SANTIAGO et al. (2002) e MENDONÇA (2003), ao procederem a mesma análise para períodos superiores a um dia.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram as seguintes conclusões:

- o conjunto lisimétrico instalado se mostrou adequado para a estimativa da evapotranspiração de referência, mesmo com pequena bordadura com grama, exigindo cuidados operacionais simples quanto a sua drenagem;
- apesar do pequeno período de dados analisado e ainda coincidindo com o período chuvoso, as leituras obtidas no lisímetro se mostraram bem correlacionadas com o modelo de Penman-Monteith, proposto como padrão pela FAO;
- mesmo com o descarte de alguns valores de evaporação do tanque classe A (TCA), a estimativa da ETo a partir do modelo obtido na análise de correlação entre os valores de evaporação do TCA e os de ETo medidos pelo lisímetro foi satisfatória, evidenciando o potencial desta metodologia para o manejo da irrigação na região;
- o método de Hargreaves-Samani, apesar de não ter apresentado coeficiente de determinação satisfatório na correlação realizada com os valores de ETo determinados pelo lisímetro, pode ser recomendado como uma alternativa para estimativa da ETo na região, em virtude da menor necessidade de elementos meteorológicos.

6. LITERATURA CONSULTADA

ALEXANDRIS, S. & KERKIDES, P. New empirical formula for hourly estimations of reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**. n.60. p.157-180. 2003.

ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration** – Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper 56).

ALLEN, R.G. et al. (Ed.) **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. 444p.

CAMARGO, A.P. & CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, SP, v.59, n.2.p.125-137, 2000.

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**, Santa Maria, RS, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMPECHE, L.F.S.M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da cultura da lima ácida “Tahiti” (*Citrus Latifolia* Tan.)**. Piracicaba, SP, 2002. 67p. Tese (Doutorado) - Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

CARVALHO, D.F.; FERNANDES, J.M.; CRUZ, E.S.; SILVA, W.A.; OLIVEIRA, L.F.C. Comparação entre diferentes metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência e sua influência da demanda máxima suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Agronomia**, Seropédica, RJ, v.36, n.1/2, p.48-55, 2002.

CHRISTOFIDIS, D. Agricultura irrigada em números. **Revista ITEM**, Brasília,DF, n.52/53, p.76-77, 2002.

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 204p. (Irrigation and Drainage Paper 24).

HARGREAVES, G.H. & SAMANI, Z.A. Estimating potencial evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.108, n.3, p.223-230, 1982.

HOWELL, T.A.; McCORMICK, R.L.; PHENE, C.J. Design and instalation of large weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.28, n.117, p.106-112, 1985.

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

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

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

LECINA, S.; MARTINES-COB, A.; PEREZ, P.J.; VILLALOBOS, F.J.; BASELGA, J.J. Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman-Monteith equation under semiarid conditions. **Agricultural Water Management**. n.60. p.181-198. 2003.

LOVELLI, S.; PIZZA, S.; CAPONIO, T.; RIVELLI, A.R.; PERNIOLA, M. Lysimetric determination of muskmelon crop coefficients cultivated under plastic mulches. **Agricultural Water Management**. n.66. p.xxx-xxx. 2004.

MACHADO, R.E. & MATTOS, A. Avaliação do desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v.8, n.2, p.193-197, 2000.

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

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

MEDEIROS, A.T.; SENTELHAS, P.C.; LIMA, R.N. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba-CE. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v.23, n.1, p.21-30, 2003.

MELLO, J.L.P. **Análise de sensibilidade dos componentes da equação de Penman-Monteith-FAO**. Viçosa, MG, 1998. 79p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

MENDONÇA, J.C.; SOUZA, E.F.; 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, PB, v.7, n.2, p.275-279, 2003.

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

- OLIVEIRA, M.A.A. & CARVALHO, D.F. Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) em Seropédica e Campos, Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.2, n.2, p.132-135, 1998.
- PEREIRA, A.R., VILLA NOVA, N.A.; SEDYIAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba, SP: FEALQ, 1997. 183p.
- PEREIRA, A.R.; SANTIAGO, A.V.; MAGGIOTO, S.R.; FOLEGATTI, M.V. Problemas operacionais com lisímetros de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v.10, n.1, p.51-56, 2002a.
- PEREIRA, A.R.; SENTELHAS, P.C.; FOLEGATTI, M.V.; VILLA NOVA, N.A.; MAGGIOTO, S.R.; PEREIRA, F.A.C. Substantion of the daily FAO-56 reference evapotranspiration with data from automatic and convencional weather stations. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v.10, n.2, p.251-257, 2002b.
- PERES, J.G. **Avaliação do modelo de Penman-Monteith, padrão FAO , para a estimar a evapotranspiração de referência nas condições do estado de São Paulo**. Piracicaba, SP, 1994. 116p. Tese (Doutorado) - Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- RODRIGUEZ, R.D.G. **Metodologia para a estimativa das demandas e disponibilidades hídricas: estudo de caso da bacia do Paracatu**. Viçosa, MG, 2004. 111p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
- SANTIAGO,A.V. et al. Evapotranspiração de referência medida por lisímetros de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal de decendial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v.10, n.1, p.57-66, 2002.
- SATTI, S.R.; JACOBS, J.M.; IRMAK, S. Agricultural water management in a humid region: sensitivity to climate, soil and crop parameters. **Agricultural Water Management**. n.70. p.51-65. 2004.
- SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v.4, n.1, p.i-xii, 1996.
- SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração: necessidade de água para as plantas cultivadas**. Brasília, DF: ABEAS, 1998, 181 p. (Curso de especialização por tutoria à distância).
- SENTELHAS, P.C. Agrometeorologia aplicada à irrigação. In: MIRANDA, J.H. & PIRES, R.C.M. **Irrigação – Série Engenharia Agrícola**. Piracicaba, SP: FUNEP, 2001. 410 p.
- SENTELHAS, P.C. Class A pan coefficients (Kp) to etimate daily reference evapotranspiration (ETo). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.7, n.1, p.111-115, 2003.

SENTELHAS, P.C. & CAMARGO, A.P. Equações par a estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, baseada no método de Hargreaves-1974. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v.4, n.1, p.77-81, 1996.

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 Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v.7, n.1, p.19-23, 1999a.

SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGGIOTTO, S.R. Análise de funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v.7, n.1, p.53-58, 1999b.

SILVA, L.D.B. **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, 2003. 93p. Tese (Doutorado) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

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

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

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

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

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, p.55-94, 1948.

WILLMOTT, C.J.; CKLESON, S.G.; DAVIS, R.E. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n.5, p.8995-9005, 1985.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Programa do datalogger

;{CR23X}

;30 DE Novembro de 2004

;Estação Meteorológica da Fazendinha Agroecológica (SIPA)

*Table 1 Program

01: 3 Execution Interval (seconds)

;Bateria

1: Batt Voltage (P10)

1: 1 Loc [Bateria]

;Temperatura do painel

2: panel Temperature (P17)

1: 2 Loc [PaineL_T]

;Celulas de Carga

;Lisimetro com Grama

;Eto

3: Full Bridge (P6)

1: 1 Reps

2: 11 10 mV, Fast Range

3: 1 DFF Channel

4: 1 Excite all reps w/Exchan 1

5: 5000 mV Excitation

6: 3 Loc [Eto]

7: 1.0 Mult

8: 0.0 Offset

;Velocidade do Vento e Direção do vento – 2 m

4: Pulse (P3)

1: 1 Reps

2: 1 Pulse Channel 1

3: 21 Low Level AC, Output Hz

4: 8 Loc [Vel_Vento]

5: 0.750 Mult

6: 0.2 Offset

5: Excite-Delay (SE) (P4)

1: 1 Reps

2: 15 5000 mV, Fast Range

3: 24 SE Channel

4: 3 Excite all reps w/Exchan 3

5: 2 Delay (units 0.01 sec)
6: 5000 mV Excitation
7: 9 Loc [Dir_Vento]
8: 0.071 Mult
9: 0.0 Offset

6: Wind Vector (P69)

1: 1 Reps
2: 0 Samples per Sub-Interval
3: 0 S, é1, & â(é1) Polar
4: 8 Wind Speed/East Loc [Vel_Vento]
5: 9 Wind Direction/North Loc [Dir_Vento]

;Psicrometro

;Temperatura do Bulbo Seco

;TBs

7: Thermocouple Temp (DIFF) (P14)

1: 1 Reps
2: 11 10 mV, Fast Channel
3: 10 DIFF Chanel
4: 1 Type T (Copper-Constantan)
5: 2 Ref Temp (Deg. C) Loc [Paine1_T]
6: 10 Loc [TBs]
7: 1.0 Mult
8: 0.0 Offset

;Temperatura Bulbo Umido

;Tbu

8: Thermocouple Temp (DIFF) (P14)

1: 1 Reps
2: 11 10 mV, Fst Range
3: 11 DIFF Chanel
4: 1 Type T (Copper-Constantan)
5: 2 Ref Temp (Deg. C) Loc [Paine1_T]
6: 11 Loc [TBu]
7: 1.0 Mult
8: 0.0 Offset

;Rdiaco Global

;Rg

9: Volt (Diff) (P2)

1: 1 Reps
2: 12 50 mV, Fast Range

3: 5 DIFF Chanel
4: 7 Loc [Rg]
5: 10.14 Mult
6: 0.0 Offset

10: If (X <=> F) (P89)

1: 7 X Loc [Rg]
2: 4 <
3: 0 F
4: 30 Then Do

11: Z=F (P30)

1: 0 F
2: 0 Exponent of 10
3: 7 Z Loc [Rg]

12: End (P95)

;Umidade do Solo

13: AC Half Bridge (P95)

1: 1 Reps
2: 14 1000 mV, Fast Range
3: 23 SE Channel
4: 4 Excite all reps w/Exchan 4
5: 500 mV Excitation
6: 25 Loc [kOhms]
7: 1.0 Mult
8: 0.0 Offset

14: BR Transform Rf[X/(1-X)] (P59)

1: 1 Reps
2: 25 Loc [kOhms]
3: 1 Multiplier (Rf)

15: Z=X+F (P34)

1: 10 X Loc [TBs]
2: -21 F
3: 26 Z Loc [CorrFactr]

16: Z=X*F (P37)

1: 26 X Loc [CorrFactr]
2: 0.018 F
3: 26 Z Loc [CorrFactr]

17: Z=X+F (P34)

1: 26 X Loc [CorrFactr]
2: -1 F
3: 26 Z Loc [CorrFactr]

18: $Z=X \cdot F$ (P37)
1: 26 X Loc [CorrFactr]
2: -1 F
3: 26 Z Loc [CorrFactr]

19: $Z=X/Y$ (P38)
1: 25 X Loc [kOhms]
2: 26 Y Loc [CorrFactr]
3: 12 Z Loc [Bars]

20: $Z=X \cdot Y$ (P37)
1: 12 X Loc [Bars]
2: 0.07407 F
3: 12 Z Loc [Bars]

21: $Z=X+F$ (P34)
1: 12 X Loc [Bars]
2: -0.03704 F
3: 12 Z Loc [Bars]

;Saídas

22: If time is (P92)
1: 0 Minutes (seconds --) into a
2: 30 Interval (same units as above)
3: 10 Set Output Flag High (Flag 0)

23: Real Time (P77)
1: 1221 Year,Day,Hour/Minute,Seconds (midnight = 2400)

24: Resolution (P78)
1: 1 High Resolution

25: Avarage (P71)
1: 1 Reps
2: 1 Loc [Bateria]

26: Avarage (P71)
1: 1 Reps
2: 2 Loc [Painel_T]

27: Avarage (P71)
1: 1 Reps
2: 3 Loc [ETo]

28: Avarage (P71)
1: 1 Reps
2: 4 Loc [Etc_1]

29: Avarage (P71)

1: 1 Reps
2: 5 Loc [Etc_2]

30: Avarage (P71)

1: 1 Reps
2: 6 Loc [Etc_3]

31: Avarage (P71)

1: 1 Reps
2: 7 Loc [Rg]

32: Avarage (P71)

1: 1 Reps
2: 8 Loc [Vel_Vento]

33: Avarage (P71)

1: 1 Reps
2: 9 Loc [Dir_Vento]

34: Avarage (P71)

1: 1 Reps
2: 10 Loc [TBs]

35: Avarage (P71)

1: 1 Reps
2: 11 Loc [TBu]

36: Avarage (P71)

1: 1 Reps
2: 12 Loc [Bars]

*Table 2 Program

02: 0 Execution Interval (Seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

APÊNDICE B

Tabela 1B – Valores obtidos na calibração do lisímetro, no momento de carga

Ordem	Massa (kg)	Leitura (mV)
1	0,10	0,73857
2	0,20	0,73866
3	0,30	0,73879
4	0,40	0,73889
5	0,50	0,73899
6	0,75	0,73902
7	1,00	0,73912
8	1,25	0,73928
9	1,50	0,73942
10	1,75	0,73958
11	2,25	0,7398
12	2,75	0,74023
13	3,25	0,74046
14	3,75	0,74083
15	4,25	0,74106
16	4,75	0,74119
17	5,25	0,74145
18	5,75	0,74182
19	6,25	0,74205
20	6,75	0,74251
21	7,25	0,74274
22	7,75	0,74307
23	8,25	0,7434
24	8,75	0,7437
25	9,25	0,7439
26	9,75	0,7441
27	10,25	0,74445
28	10,75	0,74455
29	11,25	0,74481
30	11,75	0,74522
31	12,75	0,74575
32	13,75	0,74647
33	14,75	0,74707
34	15,75	0,7476
35	16,75	0,74803
36	17,75	0,74865
37	18,75	0,74922
38	19,75	0,74977
39	20,75	0,7505
40	21,75	0,75099
41	22,75	0,75162
42	23,75	0,75221
43	24,75	0,75264
44	25,75	0,75314
45	26,75	0,75377
46	27,75	0,75444
47	28,75	0,75494
48	29,75	0,75556
49	30,75	0,75603
50	31,75	0,75662

Tabela 2B – Valores obtidos na calibração do lisímetro, no momento de descarga

Ordem	Massa (kg)	Leitura (mV)
1	30,75	0,75613
2	29,75	0,75537
3	28,75	0,75441
4	27,75	0,75368
5	26,75	0,75309
6	25,75	0,75266
7	24,75	0,75217
8	23,75	0,75147
9	22,75	0,75111
10	21,75	0,75028
11	20,75	0,74984
12	19,75	0,74933
13	18,75	0,7487
14	17,75	0,74823
15	16,75	0,74757
16	15,75	0,74688
17	14,75	0,74648
18	13,75	0,74579
19	12,75	0,74518
20	11,75	0,74501
21	11,25	0,74478
22	10,75	0,74429
23	10,25	0,74419
24	9,75	0,74389
25	9,25	0,74349
26	8,75	0,74336
27	8,25	0,7431
28	7,75	0,74283
29	7,25	0,74243
30	6,75	0,7422
31	6,25	0,74187
32	5,75	0,74158
33	5,25	0,74132
34	4,75	0,74096
35	4,25	0,74073
36	3,75	0,7404
37	3,25	0,7401
38	2,75	0,7399
39	2,25	0,7397
40	1,75	0,73947
41	1,50	0,73934
42	1,25	0,73927
43	1,00	0,73891
44	0,75	0,7388
45	0,50	0,7387
46	0,40	0,7386
47	0,30	0,73857
48	0,20	0,73851
49	0,10	0,73847

APÊNDICE C

Tabela 1C – Valores de ETo determinados no lisímetro no período de 24/12/2004 a 01/02/2005

Data	ETo
24/dez	4,38
25/dez	4,21
26/dez	5,81
27/dez	3,89
28/dez	4,67
29/dez	5,28
30/dez	6,01
31/dez	6,40
01/jan	4,86
02/jan	4,05
03/jan	6,32
04/jan	1,96
05/jan	2,46
06/jan	3,52
07/jan	4,04
08/jan	6,31
09/jan	5,63
10/jan	7,32
11/jan	1,29
12/jan	0,31
13/jan	5,74
14/jan	4,86
15/jan	4,56
16/jan	5,07
17/jan	1,35
18/jan	2,80
19/jan	2,53
20/jan	2,42
21/jan	2,84
22/jan	4,91
23/jan	4,52
24/jan	5,74
25/jan	5,41
26/jan	4,05
27/jan	2,72
28/jan	0,84
29/jan	2,83
30/jan	4,66
31/jan	2,03
01/fev	4,45