**USO DE DISPOSITIVOS LISIMÉTRICOS PARA
MEDIDA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

FABIANO CHAVES DA SILVA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinicius Folegatti

Dissertação apresentada à Escola Superior
de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da
Universidade de São Paulo, para obtenção
do título de Mestre em Agronomia, área de
concentração: Irrigação e Drenagem.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Maio - 1996

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Silva, Fabiano Chaves da

Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração
de referência / Fabiano Chaves da Silva. - - Piracicaba, 1996.
68p. : il.

Dissertação (mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de
Queiroz, 1996.
Bibliografia.

1. Evapotranspiração - Medida 2. Irrigação - Manejo 3. Lisímetro
I. Título

CDD 551.572
551.572028
631.7

USO DE DISPOSITIVOS LISIMÉTRICOS PARA
MEDIDA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

FABIANO CHAVES DA SILVA

Aprovada em 24 de junho de 1996

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Marcos Vinicius Folegatti
Prof. Dr. Antonio Roberto Pereira
Dr. Marcelo Bento Paes de Camargo

ESALQ/USP

ESALQ/USP

IAC

Prof. Dr. Marcos Vinicius Folegatti
Orientador

Aos meus pais Antonio Caetano da
Silva Filho, Josefa Odete Chaves da
Silva, por todo o amor

OFEREÇO

A minha amada esposa Marina e filha querida Ana Flávia

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcos Vinicius Folegatti, pela orientação e pelo apoio e confiança depositada em meu trabalho;

Aos professores do Departamento de Engenharia Rural, pelos ensinamentos proferidos;

Ao curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem da ESALQ/USP, pela oportunidade a mim concedida;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, Antonio Cesar Souza Rocha, Gilmar Batista Grigolon, Hélio Toledo Gomes, Renato Benedito Nicolau, e em especial a Jose Figueiredo, cuja colaboração e amizade muito contribuiu para a realização deste trabalho;

A coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo concedida;

Aos professores do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP pelos ensinamentos e amizade;

Aos professores(as) Ruth Exalta da Silva e Jorge Antonio Gonzaga Santos da Escola de Agronomia da UFBA, pelo exemplo de vida e conhecimentos proferidos;

Aos colegas de curso, em especial a Selma Regina Maggiotto e Antonio Carlos Andrade Gonçalves, pelas valiosas discussões, pelo apoio e amizade;

Aos colegas da Vila Estudantil da ESALQ, pela presença amiga nos momentos felizes e nas adversidades e,

A todos aqueles que contribuíram em qualquer etapa para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xii
SUMMARY.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Evapotranspiração.....	3
2.2. Lisimetria.....	9
2.3. Estação meteorológica automática.....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1. Caracterização da área experimental.....	15
3.2. Caracterização física do solo.....	17
3.3. Caracterização da cobertura vegetal.....	17
3.4. Descrição dos tipos de lisímetros.....	17
3.4.1. Lisímetros de drenagem.....	17
3.4.2. Lisímetros com lençol freático de nível constante.....	18
3.4.3. Lisímetro de pesagem baseado em célula de carga.....	21
3.5. Teste do sistema de pesagem em laboratório.....	24
3.6. Calibração do sistema de pesagem em campo.....	25
3.7. Monitoramento da umidade do solo.....	26
3.8. Obtenção dos dados meteorológicos.....	27
3.9. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.....	28
3.9.1. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith padronizado pela FAO.....	28

3.9.2. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método do tanque classe A (EtoCA)	33
3.10. Instalação do experimento	33
3.11. Condução do experimento	34
3.12. Análise dos dados	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1. Montagem, operação e funcionamento dos lisímetros	37
4.1.1. Montagem dos lisímetros	37
4.1.2. Operação e funcionamento dos dispositivos	38
4.2. Referente aos valores de evapotranspiração medida pelos lisímetros de drenagem, lisímetro com lençol freático de nível constante, e estimada pelo modelo de Penman-Monteith e pelo método de tanque classe "A" (EtoCa)	41
4.3. Efeito das variáveis meteorológicas na evapotranspiração	50
5. CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
APÊNDICE	62

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 01 - Vista geral da área da estação agrometeorológica contendo uma estação meteorológica automática, lisímetros e equipamentos convencionais.	16
Figura 02 - Esquema de montagem do lisímetro de drenagem e do lisímetro com lençol freático de nível constante.....	20
Figura 03 - Detalhe do local de coleta do lisímetro de drenagem e abastecimento do lisímetro com lençol freático de nível constante.....	21
Figura 04 - Layout do lisímetro de pesagem baseado em célula de carga	22
Figura 05 - Peso mensurado versus peso padrão (teste em laboratório)	24
Figura 06 - Peso mensurado versus peso padrão (teste de campo)	25
Figura 07 - Linearidade do sistema de pesagem (Acréscimo X Decréscimo)	25
Figura 08 - Variação da tensão da água no solo medida durante o teste de capacidade de campo.....	27
Figura 09 - Variação da massa do lisímetro de pesagem em condições típicas de funcionamento, comparando-se sua medida com o modelo Penman-Monteith.....	40
Figura 10 - Evapotranspiração de referência (Eto) estimada pelo modelo Penman-Monteith para um período de integração de 30 (trinta) minutos versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO).....	41
Figura 11 - Evapotranspiração de referência diária (Eto) estimada pelo modelo Penman-Monteith versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1.....	45
Figura 12 - Evapotranspiração de referência diária (Eto) medida pelo lisímetro de drenagem versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1	45
Figura 13 - Evapotranspiração de referência diária (Eto) medida pelo lisímetro com lençol versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1	46
Figura 14 - Evapotranspiração de referência diária (Eto) estimada pelo tanque classe "A" versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1	46

Figura 15 - Evapotranspiração de referência quinquidiária (Eto) estimada pelo modelo Penman-Monteith versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1	48
Figura 16 - Evapotranspiração de referência quinquidiária (Eto) medida pelo lisímetro de drenagem versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1	48
Figura 17 - Evapotranspiração de referência quinquidiária (Eto) medida pelo lisímetro com lençol versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1	49
Figura 18 - Evapotranspiração de referência quinquidiária (Eto) estimada pelo tanque classe "A" versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1	49

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 01 - Resultados das análises físicas do solo	17
Tabela 02 - Condutividade hidráulica do solo	17
Tabela 03 - Coeficientes linear (a), angular (b), r^2 e t calculado para as regressões lineares simples entre os valores diários de evapotranspiração medido pelo lisímetro de pesagem (variável dependente) contra os valores diários medidos pelo lisímetro de drenagem, lisímetro com lençol freático, e estimados pelo modelo (Penman-Monteith) e pelo método do tanque classe "A" (EtoCA); Índice D, erro sistemático (Es), erro não sistemático (Eu), raiz quadrada do erro médio (RQEM) e a média do erro absoluto (MAE).....	42
Tabela 4 - Valores de evapotranspiração de referência acumulada (Eto) medida e estimada durante o período de observação (21/02/96 a 01/04/96).....	44
Tabela 5 - Coeficientes linear (a), angular (b), r^2 e t calculado para as regressões lineares simples entre os valores quinquidiários de evapotranspiração medido pelo lisímetro de pesagem(variável dependente) contra os valores quinquidiários medidos pelo lisímetro de drenagem, lisímetro com lençol freático, e estimados pelo modelo (Penman-Monteith) e pelo método do tanque classe "A" (EtoCA); Índice D, erro sistemático (Es), erro não sistemático (Eu), raiz quadrada do erro médio (RQEM) e a média do erro absoluto (MAE)	47
Tabela 6 - Resultados das regressões lineares múltiplas entre os valores diários de Eto medidos pelos lisímetros e estimados pelo modelo de Penman-Monteith e pelo método do tanque classe "A" contra as três variáveis meteorológicas (Umidade relativa do ar (%) = X1, Velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) = X2 e Radiação líquida ($KJ.m^{-2}.d^{-1}$) = X3), medidas durante o período de 21/02/96 a 01/04/1996.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
Eto	Evapotranspiração de referência grama	mm
Eta	Evapotranspiração real	mm
Etc	Evapotranspiração da cultura	mm
ET	Evapotranspiração	mm
Kc	Coefficiente de cultura	
Etr	Evapotranspiração de referência alfafa	mm
IAF	Índice de área foliar	
°C	Grau centigrado	
I	Irrigação	l
D	Drenagem	l
Δs	Variação de armazenamento	
λEto	Fluxo de calor latente de evaporação	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Rn	Radiação líquida	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
G	Fluxo de calor no solo	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
ρ	Densidade atmosférica	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
cp	Calor específico do ar	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
es	Pressão de saturação de vapor à temperatura do ar	kPa
ea	Pressão atual de vapor	kPa
rc	resistência da cobertura vegetal	$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
ra	resistência aerodinâmica à difusão de calor sensível e de calor latente	$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
γ	Constante psicrométrica	$\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
s	Inclinação da curva de pressão de saturação à temperatura do ar	$\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
λ	Calor latente de vaporização	$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
T	Temperatura do ar	°C
P	Pressão atmosférica	kPa
P ₀	Pressão atmosférica ao nível do mar	kPa
Z	Altitude local	m
g	Aceleração da gravidade	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
R	Constante universal dos gases	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$
To	Temperatura absoluta do ar	°C
α	Gradiente adiabático do ar saturado	
ϵ	Razão entre o peso molecular do vapor d'água e do ar atmosférico seco	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Tv	Temperatura virtual do ar	°C
UR	Umidade relativa do ar	%
Zm	Altura de medição da velocidade do vento	m

Zh	Altura de medição da temperatura e da umidade relativa do ar	m
d	Deslocamento do plano zero do perfil do vento	m
Zom	Comprimento de rugosidade equivalente para transferência de momento	m
Zoh	Comprimento de rugosidade equivalente para transferência de calor sensível	m
k	Constante de Von Karman	
Uz	Velocidade do vento média	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
RI	Média diária da resistência estomática de uma folha	$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
hc	altura da cultura	m
Kp	Coefficiente do tanque	
ECA	Evaporação do tanque classe A	mm
EtoCA	Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método do tanque classe A	mm
Es	Erro sistemático	mm
Eu	Erro não sistemático	mm
RQEM	Raiz quadrada do erro média	mm
MAE	Média do erro absoluto	mm
a	Coefficiente linear	
b	Coefficiente angular	
ρ	Massa específica do ar atmosférico	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Id	Índice d de concordância	
N	Número de pares dados analisados	
O	Valor médio observado (estimado pelo modelo) da evapotranspiração	mm
Oi	Valor observado (estimado pelo modelo) da evapotranspiração	mm
Pi	Valor previsto (medido) da evapotranspiração	mm
Pri	Valor da evapotranspiração calculado a partir dos coeficientes da equação de regressão entre valores medidos e estimados	mm

---

USO DE DISPOSITIVOS LISIMÉTRICOS PARA MEDIDA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Autor : FABIANO CHAVES DA SILVA

Orientador : MARCOS VINICIUS FOLEGATTI

RESUMO

A quantificação da evapotranspiração é fundamental para a solução de um grande número de problemas agrícolas como o dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação, balanço hídrico, simulação do desenvolvimento de culturas e estudos hidrológicos. A evapotranspiração pode ser medida de diferentes formas, por meio de medidas diretas ou estimada a partir de fórmulas teóricas.

O presente trabalho teve como finalidade avaliar diferentes dispositivos lisimétricos para a determinação da evapotranspiração de referência (Eto). Utilizou-se três diferentes tipos de lisímetros (lisímetro de pesagem, lisímetro de drenagem, e lisímetro com lençol freático de nível constante). Utilizou-se também do modelo de Penman-Monteith, e o método do tanque classe "A", para se estimar a evapotranspiração no período.

Os valores de Eto obtidos pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) foram correlacionados com os valores medidos pelos outros dispositivos, e com os estimados. O lisímetro de pesagem apresentou boa correlação com os valores estimados pelo modelo de Penman-Monteith, sendo viável a determinação da evapotranspiração para um período de integração inferior a 1 (uma) hora ($r^2 = 0,80$).

Tanto o lisímetro de drenagem como lisímetro com lençol freático de nível constante, mostraram-se inviáveis para a determinação de valores diários de evapotranspiração de referência. Esses mesmos dispositivos apresentaram um melhor funcionamento para uma base de cálculo de 05 (cinco) dias.

A evapotranspiração total no período foi superestimada em 18% pelo lisímetro de drenagem e em 11% pelo lisímetro com lençol freático de nível constante; o método do tanque classe "A" a subestimou em 36%, apresentando baixa correlação com o padrão ($r^2 = 0,005$).

USAGE OF LYSIMETER DEVICES FOR THE DETERMINATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION

Author : FABIANO CHAVES DA SILVA

Adviser : MARCOS VINICIUS FOLEGATTI

SUMMARY

The evapotranspiration rate quantification is essential to solve a great number of agricultural problems like the design and management of irrigation systems, water balance, simulations of cultural development and hydrologic studies. The evapotranspiration can be obtained through different ways: direct measurements or estimated by using theoretical formulas.

This work has the intention of evaluating different lysimeter devices to determine the evapotranspiration (Eto). Three kinds of lysimeter were used (weighing lysimeter, drainage lysimeter and water-table lysimeter). The model of Penman-Monteith and the pan class "A" were also used to obtain the estimation of the evapotranspiration in the period.

Eto values obtained by the weighing lysimeter (pattern) were correlated with estimated values and the other lysimeters values. The weighing lysimeter presented a good correlation with the values estimated by the model of Penman-Monteith. The weighing lysimeter proved to be feasible to determine the evapotranspiration for a integration period less than 1 hour ($r^2 = 0,80$).

Both the drainage lysimeter and water-table lysimeter showed to be unfeasible to determine daily values of Eto. These devices also presented better function for a calculus period of 5 days.

The total evapotranspiration were overestimated in 18% by the drainage lysimeter and in 11% by the water-table lysimeter during the period considered. The pan class "A" method underestimated in 36% the total evapotranspiration, showing low correlation with the weighing lysimeter ($r^2 = 0,005$).

1. INTRODUÇÃO

Os principais elementos do ciclo hidrológico são a evapotranspiração e a precipitação, sendo de grande importância a estimativa e medida destes dois componentes para o planejamento da utilização racional dos recursos hídricos disponíveis na natureza.

A irrigação destaca-se pela sua importância, dentre os diversos usos dos recursos hídricos. Para a sua realização, a quantificação precisa da água evapotranspirada é fundamental. A acurácia da medida de evapotranspiração é importante no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação, no balanço hídrico, nos modelos de simulação do desenvolvimento de culturas e nos estudos hidrológicos.

A evapotranspiração pode ser obtida de diferentes formas, por meio de medidas diretas ou de forma indireta, a partir de fórmulas teóricas baseadas na utilização de dados do solo, baseadas em dados meteorológicos ou baseadas nas plantas.

Os métodos indiretos que se baseiam no solo, consideram-no como um reservatório, capaz de conter certa quantidade de água. Os métodos meteorológicos utilizam basicamente informações meteorológicas, como entradas para modelos que calculam a quantidade de água evapotranspirada pela cultura durante um certo período. Medidas diretas de alguns parâmetros da planta com o objetivo de caracterizar sua necessidade de água, podem ser métodos mais adequados, uma vez que a planta responde às condições atmosféricas e do solo. Parâmetros como temperatura da cobertura vegetal, potencial de água na folha, variação do diâmetros de caules e frutos estão sendo estudados. A utilização de modelos baseados no clima ou na comunidade vegetal, implica em sua calibração e adequação para as condições específicas do local onde será empregado. Portanto, a estimativa da evapotranspiração através de medidas diretas, ou seja, pelo uso de lisímetros é necessário. As medidas diretas são mais precisas, porém são

de uso restrito da pesquisa devido ao seu maior custo e às difíceis condições de manejo. Com o avanço da tecnologia em sistemas de pesagem e armazenamento de dados, tornou-se mais fácil a construção de lisímetros capazes de mensurar a evapotranspiração, com uma boa precisão e um baixo custo.

A utilização de dados de evapotranspiração fornecidos por lisímetros é diretamente comprometida pelo tipo de equipamento, montagem em campo, operação e manutenção das condições de contorno do sistema.

Um procedimento padrão para o cálculo da evapotranspiração de uma cultura, é fazer uma estimativa primária da evapotranspiração de referência sobre uma superfície padrão e aplicar os coeficientes de cultura apropriados como os propostos por Doorenbos & Pruitt (1977). A Food and Agriculture Organization (FAO) através de Smith (1991), propôs mudanças na atual sistemática de determinação da evapotranspiração da cultura a partir da evapotranspiração de referência e coeficiente de cultura. Numa primeira fase, seria mantida a atual sistemática de estimativa da evapotranspiração da cultura a partir da evapotranspiração de referência e coeficiente de cultura, porém utilizando o modelo de Penman-Monteith como método padrão de estimativa da evapotranspiração de referência. Numa segunda fase seria estimado diretamente a evapotranspiração da cultura pelo modelo de Penman-Monteith, através da incorporação de valores adequados para a resistência aerodinâmica e resistência da cobertura vegetal, específicos para cada cultura.

A utilização de equações para determinação da evapotranspiração, mais complexas como a do modelo Penman-Monteith, necessitam de um número diverso de dados meteorológicos, medidas diretas em períodos, muitas vezes, inferior a 1 (uma) hora. O uso de sensores de alta precisão e sistemas automáticos de coleta de dados muito contribuiu para obtenção de dados meteorológicos.

Este trabalho tem o objetivo de avaliar a resposta de três diferentes dispositivos lisimétricos (lisímetro de drenagem, lisímetro com lençol freático de nível constante e lisímetro de pesagem), observando as dificuldades e facilidades da construção, operação e manutenção dos diferentes sistemas e o efeito das condições meteorológicas sobre a estimativa da evapotranspiração de referência.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Evapotranspiração

A água é o elemento essencial ao metabolismo vegetal, pois participa principalmente de sua constituição e do processo de fotossíntese. A planta, todavia, transfere para atmosfera cerca de 98% da água retirada do solo. Por isto, o consumo de água das plantas normalmente se refere a água perdida pela evaporação da superfície do solo e pela transpiração.

A evapotranspiração é uma função dos fatores meteorológicos, do solo e da planta (Lemon et al, 1957). Penman (1956) argumenta que quando a cobertura do solo é completa, a Eto é determinada principalmente pelos elementos meteorológicos. A radiação líquida é o principal fator meteorológico, que influencia a evapotranspiração (Pelton et al, 1960; Tanner & Lemon, 1962; Villa Nova et al, 1976), quando disponível a uma dada superfície vegetada é dividida em três componentes básicos: aquecimento do ar, do solo, e evapotranspiração (Ometto, 1981). A importância relativa da radiação líquida, umidade relativa do ar e velocidade do vento na Eto é da ordem de 80:6:14 respectivamente (Mukammal & Bruce¹, citado em Berlato & Molion, 1981). Villa Nova (1987) ressalta que é difícil separar a ação de cada um destes elementos, pois os mesmos agem simultaneamente, podendo dizer, de uma maneira geral, que em dada região, quanto maior for a disponibilidade de energia solar, temperatura do ar, velocidade do vento, e quanto menor for a umidade relativa, maior deverá ser a taxa de evaporação/evapotranspiração. Entretanto, em regiões onde ocorrem advecções fortes, condição que comumente ocorre quando uma área úmida é circundada por uma área

---

¹ MUKAMAL, E. I.; BRUCE, J. P. Evaporation measurements by pan and atmometer. International Union of Geodesy and geophysics. Association of Scientific hydrology, 53: 408-20 apud CHANG, JEN-HU. 1968. Climate and agriculture: an ecological survey. Chicago, Aldine.

seca, a importância relativa da radiação líquida decresce, e em adição a radiação líquida, a advecção ou transferência de calor sensível das áreas secas circunvizinhas, poderá contribuir no processo evapotranspirativo com energia até maior que aquela disponível à área úmida, aumentando desta forma a importância da velocidade do vento e umidade relativa do ar na evapotranspiração.

A advecção foi definida como a troca de energia, umidade ou “momentum” devido à heterogeneidade horizontal. Millar (1964) trabalhando com um campo irrigado de *Trifolium repens* L. concluiu que a advecção ocasiona um consumo de calor latente superior ao suprimento de radiação local para uma considerável faixa após a interface seco/úmido e que houve um decréscimo da evaporação à medida que nos afastamos da interface seco/úmido. Assim a evapotranspiração que ocorre na interface é muito superior a evapotranspiração potencial, sendo denominada de evapotranspiração de oásis. Pelton et al. (1960) denominou-a “efeito varal”. A medida que nos afastamos da interface, dependendo do tamanho da área tampão, a evapotranspiração decresce e pode - se atingir a evapotranspiração potencial. O tamanho da área tampão dependerá das condições locais. Resultados de Goltz & Pruitt² (1970), citados por Pereira (1990), trabalhando em condições semi-áridas de Davis, Califórnia, concluem que o tamanho adequado para minimizar-se o efeito advectivo seria maior que 100 metros, para um campo cultivado com grama rasteira. Para condições áridas de Israel, Stanhill (1961) mostra que para um campo de alfafa o tamanho passaria a 300 m.

Segundo Rosenberg & Verma (1978), em regiões úmidas, a energia consumida pela evaporação raramente excede a radiação líquida. No entanto em condições semi-áridas e áridas o fluxo de calor latente excede o da radiação líquida. O calor sensível que é consumido é trazido por advecção de locais secos. Os autores mostraram que para a região, em dias limpos as taxas de evapotranspiração foram de 8 a 12 mm, sendo que a energia líquida era suficiente para 6 ou 7 mm de evapotranspiração, confirmando a influência da advecção local, no período considerado.

---

² GOLTZ, S. M.; PRUITT, W. O. Spatial and temporal variations of evapotranspiration downwind from a trailing of a dry fallow field. In : MORGAN, D. L.; PRUITT, W. O.; LOURENCE, F. J. **Evaporation from an irrigated turf under advection of dry air at Davis, California.** Davis: University of California, 1970. 70p.

É necessário um conhecimento minucioso de certas definições, quando se trata da quantificação da evapotranspiração e do requerimento de água das culturas. Mensurações históricas, têm sido realizadas sob diferentes condições, e os dados resultantes assumem diferentes conceitos. Comparações e interpretação de dados de evapotranspiração, dependem sobretudo de um uso acurado das definições. Por exemplo, um incorreto conhecimento das definições, pode levar a um intercâmbio de dados e métodos de estimativa não compatíveis (Jensen, 1991).

A evaporação é um conjunto de fenômenos físicos, que propicia a mudança de estado da água da fase líquida para a gasosa, diretamente da superfície do solo. Quando esta mudança se dá através das plantas, recebe o nome de transpiração. No caso de solos parcialmente vegetados estes processos ocorrem simultânea e interdependentemente, daí a utilização do termo evapotranspiração (Berlato e Molion, 1981).

Thornthwaite (1948) introduziu na literatura especializada o termo evapotranspiração potencial (Etp), definindo-a como sendo a quantidade de água utilizada por uma extensa área vegetada, em crescimento ativo, sob condições ótimas de umidade do solo.

Penman (1956), definiu evapotranspiração potencial como “a quantidade de água transpirada na unidade de tempo por uma cultura de porte baixo e verde, cobrindo totalmente a superfície, com altura uniforme, e sem deficiência hídrica”. Culturas de porte baixo estão implicadas nesta definição, no entanto Penman aplicou esse conceito as gramas de porte baixo. A evapotranspiração de culturas irrigadas pode ser de 10 a 30 por cento maior do que ocorrido em grama.

Quando as condições de contorno acima não forem verificadas, tem-se a evapotranspiração real (Eta), que é aquela que ocorre em uma superfície vegetada, independente de sua área e das condições de umidade do solo (Thornthwaite, 1948; Camargo, 1961; Sedyama, 1987; Villa Nova & Reichardt, 1989; Pereira, 1992).

O conceito de evapotranspiração da cultura (Etc) foi introduzido por Doorenbos & Pruitt (1977), caracterizando-a como sendo a evapotranspiração de uma cultura agrônômica, livre de doenças, desenvolvendo-se em uma área cultivada de um ou mais hectares, sob condições otimizadas de solo, incluindo água e fertilidade.

Jensen et al (1990) afirma que na prática, a estimativa da evapotranspiração (ET) de uma cultura específica envolve, primeiro o cálculo da evapotranspiração potencial (Etp) de uma cultura de referência, aplicando-se posteriormente coeficientes de cultivo (K_c) para se estimar a evapotranspiração (ET) da cultura. Outras formas de se estimar a evapotranspiração potencial (Etp), são possíveis. Por exemplo, o uso da evaporação de uma superfície livre de água. Contudo, a taxa de evaporação de tanques varia com o tamanho do tanque e com as condições de contorno.

O mesmo autor sugere que a evapotranspiração de uma cultura de referência ou a evapotranspiração de referência pode ser definida como “a taxa com que a água, se disponível, é removida da superfície do solo e das plantas, de uma cultura específica, arbitrariamente chamada de cultura de referência”. A evapotranspiração de referência é normalmente expressa como taxa de calor latente por unidade de área ou lâmina de água evaporada. A evapotranspiração de referência, é equivalente a evapotranspiração potencial, com uma especificação adicional de que ela representa a evapotranspiração de uma cultura com umidade ideal e cobertura total da área.

Encontram-se na literatura duas definições mais comuns para evapotranspiração de referência: uma relacionada com a cultura de referência grama (Eto) e outra com a cultura de referência alfafa (Etr). Doorenbos & Pruitt (1977) definiram Eto como sendo a evapotranspiração que ocorre em uma extensa superfície de grama, com porte de 8 a 15 cm, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem restrição de água. Por sua vez, Jensen (1973) definiu Etr como sendo a evapotranspiração que se verifica em uma cultura de alfafa, com 30 a 50 cm de altura, e bordadura mínima de 100 m, cultivada sem deficiência hídrica. Embora se reconheça que a alfafa possua características aerodinâmicas mais representativas da maioria das culturas agronômicas do que a grama, esta última é mais utilizada pelo simples fato de a grande maioria das estações agrometeorológicas serem gramadas (Jensen, 1973; Smith 1991). Outro ponto favorável à grama é que ela se adapta mais facilmente à diferentes condições climáticas do que a alfafa. Beard³ citado por (Jensen et al., 1990), discutiu os efeitos da estrutura e densidade

---

³ BEARD, J. R. An assesment of water use by turfgrass. IN GIBEAULT, V. A.; COCKERHAM, S. T. **Turfgrass water conservation**. Davis, Univ. of Calif. , Div. of Agric. and Nat. Resour., 1985, 155p.

do dossel de diversas variedades de grama, e da orientação foliar nas taxas de evapotranspiração. O mesmo encontrou baixas taxas de evapotranspiração, relacionadas com uma relação baixa de folha/brotos, orientação foliar horizontal, altura de corte baixa e um “stand” uniforme e denso. Estes efeitos estão relacionados com uma redução da área foliar (incremento da resistência do dossel) e uma baixa rugosidade da superfície (incremento da resistência aerodinâmica).

Smith (1991) propôs que se adote uma definição padronizada para a evapotranspiração de referência, com vistas, principalmente, à utilização do modelo de Penman-Monteith. A evapotranspiração de referência seria aquela que ocorre em uma cultura hipotética, apresentando as seguintes características fixas: altura de 12 cm, resistência do dossel de 69 s.m^{-1} e poder refletor (albedo) de 23%.

A evapotranspiração de referência pode ser determinada de diferentes maneiras. De acordo com Burman et al. (1983), ela pode ser estimada a partir de medidas diretas ou de informações climáticas. No primeiro grupo, entre outros, estão incluídos os diferentes tipos de lisímetros e o balanço de água no solo: enquanto no segundo, estão enquadrados os modelos teóricos e empíricos, como os de Penman (1948), Thornthwaite (1948), Blaney & Criddle (1950), Jensen & Haise (1963), Priestley & Taylor (1972), Hargreaves (1977) entre outros e, também, evaporímetros como o tanque Classe A.

O modelo de Penman é amplamente utilizado porque facilita o entendimento dos processos físicos da evaporação de superfícies naturais e, também, porque se utiliza de informações meteorológicas coletadas em um único nível acima da superfície evaporante (Thom & Oliver, 1977; Brutsaert, 1982; Luchiari Jr., 1988).

Porém verifica-se que o modelo original de Penman não é um caso geral para estimativa da evapotranspiração, mas sim um caso muito particular aplicado a superfícies de água livre, como um lago ou tanque Classe A, ou a superfícies molhadas, como uma vegetação após a chuva ou irrigação por aspersão (Monteith, 1965; Thom, 1975; Monteith, 1980; Brutsaert, 1982; Monteith, 1985; Oke, 1992).

Muitos pesquisadores procuraram superar esta falta de generalidade da fórmula de Penman, cabendo a Monteith (1965) a obtenção de uma equação geral válida para qualquer tipo de vegetação, sob qualquer condição de estresse hídrico. Ele generalizou o

modelo de Penman através de uma analogia com a lei de Ohm para os circuitos elétricos, introduzindo no termo aerodinâmico duas resistências à transferência do vapor de água: a resistência do dossel e a resistência aerodinâmica. A primeira, como descritora das características fisiológicas da planta, e a segunda, do papel da turbulência atmosférica no processo de transporte do vapor de água (Oke, 1992).

O modelo de Penman-Monteith, embora tenha uma formulação teórica rigorosamente física, ser de fácil entendimento e demandar para a sua utilização de informações climatológicas padronizadas, tem sua aplicação prática limitada pelas dificuldades de se obter valores confiáveis e representativos para resistência do dossel (Norman & Campbell, 1983; Monteith, 1985; Luchiarri Jr., 1988; Hatfield, 1988; Villa Nova & Reichardt, 1989; Luchiarri Jr. & Riha, 1991 e Oke, 1992).

As dificuldades para se estimar a resistência do dossel decorrem do fato dela ser uma função composta de muitos fatores ambientais e biológicos, tais como radiação solar, déficit de saturação de vapor de água, disponibilidade de água no solo, índice de área foliar (IAF), idade da planta, entre outros, cujos efeitos individuais não são fáceis de serem isolados (Monteith, 1985).

A estimativa da resistência do dossel pode ser feita a partir de medidas diretas da resistência estomática média, através de porômetros de difusão, e do índice de área foliar da planta, estimado por amostragem. No entanto, esta é uma tarefa árdua e trabalhosa.

Os valores conhecidos de r_c para as diferentes culturas estão ao redor de 20 s.m^{-1} para solos próximos à capacidade de campo, aumentando à medida que a umidade do solo diminui. Este fato evidencia a necessidade de se pesquisar o comportamento desta resistência em função da disponibilidade de água no solo. Esta parametrização de r_c , para condições ótimas e de restrição de água no solo, permitirá que se estime a evapotranspiração real a partir do modelo Penman-Monteith (Hatfield, 1988).

Monteith (1985) sugere que se adote $r_c=50 \text{ s.m}^{-1}$ para a determinação da evapotranspiração potencial das plantas cultivadas. Este valor concorda com os valores apresentados por Oke (1992), listados a seguir: grama, 70 s.m^{-1} ; culturas agrícolas, 50 s.m^{-1} ; florestas, 80 a 150 s.m^{-1} .

Apesar desta dificuldade, SMITH (1991) propõe que, a princípio, a evapotranspiração de referência seja estimada pelo modelo de Penman-Monteith, considerado superior aos demais.

2.2. Lisimetria

A palavra lisímetro é derivada do grego, *lysis* significa dissolução ou movimento e *metron*, significa mensurar. Lisímetros são dispositivos construídos cheios de solo, localizado no campo com a função de representar um ambiente específico. Podendo apresentar uma superfície nua ou coberta por vegetação, pode ser utilizado para determinar evaporação do solo nu, desenvolvimento de culturas e evapotranspiração (ET), (Aboukhaled et al., 1982). O uso da água (evaporação, transpiração ou evapotranspiração) pode ser determinado pelo balanço de água dentro do dispositivo. Lisímetros de pesagem determinam diretamente a ET pelo balanço de massa de água, ao contrário, dos lisímetros não-pesáveis que determinam indiretamente, pelo balanço de volume. Existem vários tipos de lisímetros, sendo que o tamanho e o “design” de cada um é baseado no requerimento específico do estudo e das condições de construção e custos envolvidos.

A seleção do tipo de perfil de solo do lisímetro (monolítico ou reconstruído), muitas vezes determina a representatividade dos dados. Muitos lisímetros de pesagem têm sido montados com perfis reconstruídos, apresentando um desenvolvimento da cultura uniforme. Quando cuidadosamente reconstruídos, os lisímetros apresentam dados de ET representativos (Pruitt & Angus, 1960).

A forma e a área do lisímetro, não apresenta nenhum efeito crítico na mensuração de culturas como grama, alfafa ou pequenos grãos. Sendo que a forma e a área do lisímetro devem ser baseadas no tipo de cultura e no desenvolvimento radicular (Howell et al., 1991). O “design” do lisímetro procura minimizar os distúrbios no regime térmico do solo para evitar acréscimos significantes no processo de evapotranspiração (Black et al., 1968; Pruitt & Angus, 1960; Van Bavel, 1961). Os efeitos térmicos do solo podem ser minimizados pelo “design”, as paredes de separação entre a parte externa e

interna devem ser o menos espessas possível, além disso, estas paredes devem ter o mínimo de elevação na superfície.

A localização do lisímetro no campo deve ser considerada, com o intuito de representar as condições de solo e planta de um ambiente natural. De forma a evitar obstáculos, que possam obstruir a radiação incidente e o padrão de vento. A área tampão deve ser grande o suficiente para manter um micro-ambiente, evitando problemas com a advecção (Pruitt & Angus, 1960; Ritchie & Burnett, 1968; Van Bavel, 1961).

A profundidade do lisímetro e sua drenagem são pontos críticos em relação a extração de água do solo. Quando o lençol freático não é desejável, é necessário um sistema de vácuo para manutenção de uma condição não saturada na parte inferior do lisímetro. Quando não ocorre limitação no fornecimento de água, a profundidade de 1 m é razoável (Pruitt & Angus, 1960).

Os tratos culturais (fertilização, replantio, manutenção da altura, etc), devem ser realizados de forma similar e simultânea à área de contorno. São comuns os problemas com tráfico de pessoas e animais no local de instalação.

Gangopadhyaya et al. (1966) estabeleceram os principais cuidados na instalação dos lisímetros: a) o lisímetro deve ser suficientemente grande para assegurar a sua representatividade no que diz respeito a cobertura vegetal e ao efeito de sua presença; b) as condições físicas no interior do equipamento devem ser as mesmas da área vizinha; c) devem ser instalados em locais onde o efeito da advecção seja minimizada.

Os lisímetros utilizados em pesquisas de (ET), usualmente podem ser agrupados em três categorias: (1) Não-pesáveis com lençol freático de nível constante, mais utilizados em áreas onde o lençol freático é elevado; (2) Não-pesáveis com drenagem livre são mais utilizados em áreas de alta precipitação; e (3) Lisímetros pesáveis, onde a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem. Além disso são também classificados, quanto ao tipo de perfil (reconstruído ou monolítico), e ao sistema de drenagem: a vácuo ou gravidade.

O modelo de lisímetro de drenagem é o mais simples e o de uso mais difundido devido sua simplicidade, porém apresenta impedimentos no fornecimento de dados

diários. Um tipo de lisímetro foi proposto por Thornthwaite em 1945 (Assis, 1978), denominado evapotranspirômetro. Consiste de um tanque de quatro metros quadrados com 70 centímetros de profundidade, dotado de dispositivos de suprimento e percolação de água com o nível de água mantido constante por meio de um sistema de válvula e bóia. Gangopadhyaya et al. (1966) & Marques (1972) relataram e discutiram as sucessivas modificações introduzidas no modelo original de Thornthwaite. O evapotranspirômetro, basicamente, é um instrumento para medida da evapotranspiração potencial, embora seja também utilizado em estudos de evaporação do solo.

Camargo (1966), em três localidades do estado de São Paulo, comparou evapotranspiração medida em um tipo de evapotranspirômetro de Thornthwaite modificado e estimada segundo as fórmulas de Thornthwaite, Penman-Bavel, Blaney e Criddle adaptada para as suas condições, encontrando boas correlações entre os valores medidos e estimados.

Segundo Howell et al. (1985), lisímetros de pesagem são os mais utilizados em pesquisas para mensurar de forma direta a evapotranspiração em períodos menores do que um dia. Outros métodos como a razão de Bowen e o método de correlação dos turbilhões apresentam bons resultados na mensuração da evapotranspiração a curto prazo. Contudo, estes métodos não podem realizar medidas para um tempo superior a um ou dois dias. Existem vários mecanismos de pesagem, os mais modernos são as células de carga. A acurácia desse sistema vai depender das características da célula de carga e do sistema de armazenamento e processamento de dados. Embora, os lisímetros de pesagem estejam sendo usados extensivamente, a mais de vinte e cinco anos nos Estados Unidos e em outros países, o desenho estrutural destes apresenta-se o mais variado possível. A variabilidade do “design” está relacionada com os objetivos da pesquisa e melhorias e refinamentos dos sistemas de pesagem.

Três distintos tipos de acurácia são usados em estudos com lisímetros e, muitas vezes confundidos. Resolução é o número de casas decimais do incremento da mensuração; precisão é o nível de estabilidade da mensuração (variabilidade entre as numerosas mensurações); e a acurácia é a verificação entre o estado mensurado e o valor

verdadeiro (Howell et al. , 1991). A sensibilidade da evapotranspiração medida em lisímetros de pesagem está diretamente relacionada com o período de tempo no qual será feita a integração da evapotranspiração. Evapotranspiração com intervalos de integração menores do que 10-15 min são geralmente impraticáveis. Muitos lisímetros possuem precisão com aproximações de 0,01 mm. Contudo, interferência do vento limitam essa sensibilidade em cerca de 0,02 mm (Ritchie & Burnett, 1968). A precisão para um intervalo de integração diário (24 h) é de 0,1 mm. A sensibilidade desejada para o lisímetro pode ser obtida contrabalançando o peso “morto”, ou seja, o peso do dispositivo e o solo seco, mensurando o peso “vivo”, a água contida no solo com escalas de sensibilidade. Podendo-se aumentar sua sensibilidade aumentando a área da superfície em relação a uma profundidade média (Pruitt & Angus, 1960; Black et al. 1968).

Allen et al. (1991), discute o efeito de fatores ambientais (altura da vegetação, efeito oásis, desenvolvimento de raízes, perfil de umidade do solo, nível do lençol freático, etc) na utilização de lisímetros.

2.3. Estação meteorológica automática

Nos últimos anos, verificou-se um desenvolvimento dos recursos computacionais e de instrumentação na agrometeorologia tornando-se possível uma manipulação de dados climáticos mais simples e eficiente.

Um método de estimativa da evapotranspiração é a coleta e armazenamento de dados provenientes de estações meteorológicas automáticas, calculando-se posteriormente qualquer parâmetro necessário para utilização de equações que estimam a evapotranspiração.

Howell et al. (1984) descreveram a instalação e operação de estações automáticas nos propósitos de controle de irrigação. Nesse trabalho, os autores descrevem todas as etapas do processo de utilização de dados de estações automáticas para controle da irrigação. Em cada estação instalada, foram medidos os seguintes parâmetros, com a respectiva instrumentação: a) radiação solar (piranômetro); b) radiação líquida (Fritschen MNR); c) temperatura do ar a 1,5m de altura (termistor Fenwal, aspiração natural); d) umidade relativa a 1,5m de altura (sensor de umidade relativa); e) velocidade

do vento a 2,0m de altura (anemômetro); f) direção do vento a 2,0m de altura (cata-vento); g) precipitação (pluviômetro); h) temperatura do solo a 0,02 e 0,15m de profundidade (termistor Fenwal). Os autores concluíram que a performance global dos sistemas automáticos de aquisição de dados tem sido bastante satisfatória para os propósitos desejados.

Hubbard et al. (1982) afirmaram que as estações automáticas consistem em vários instrumentos meteorológicos montados numa torre de 3m . Um anemômetro (canecas) e um cata-vento são utilizados para medir a velocidade e direção do vento, respectivamente, e são montados no alto da torre. Temperatura do ar, umidade e radiação solar são medidos a 1,5m. A temperatura do ar é medida com um termistor enquanto que o sensor de umidade é um higrômetro eletrônico. Esses sensores são instalados num pequeno abrigo meteorológico. A radiação global é medida com um piranômetro de silicone montado numa superfície horizontal. Uma sonda de temperatura do solo (termistor protegido) é instalado a uma profundidade de 10 cm abaixo da superfície do solo. Cada estação é também equipada com um pluviômetro de caçamba, para medir a precipitação. O mecanismo de medida registra mudanças de precipitação a cada 1 mm de chuva.

Segundo Hubbard & Klocke (1986), estações automáticas podem ser usadas para fornecer medidas em tempo quase real necessárias para estimar a evapotranspiração, que é utilizada então, junto com informações de armazenamento da água no solo para monitorar a irrigação. A obtenção de dados de clima com o uso dessas estações tem proporcionado grandes progressos no processo de tomada de decisões relacionada ao tempo e quantidade de água a ser aplicada.

Campbell & Tanner (1981) discutiram aspectos operacionais das estações automáticas, principalmente no que se refere ao “design” estrutural das mesmas. Segundo o autor, o avanço tecnológico nessa área tem proporcionado muitas alternativas para satisfazer as necessidades das estações meteorológicas automáticas. Alguns dos critérios mais utilizados para selecionar os elementos a serem empregados numa estação são: facilidade de interface, custo, consumo de energia e durabilidade em condições ambientais adversas. Tendo em vista a grande diversidade de elementos passíveis de

utilização na montagem de uma estação dessa natureza, a maior preocupação do autor é com a padronização dos equipamentos utilizados, para que as medições provenientes desses sistemas sejam confiáveis e exatas.

Meyer & Hubbard (1992), realizaram uma revisão sobre o desenvolvimento das estações meteorológicas automáticas nos Estados Unidos e Canadá, apresentando sua importância no monitoramento ambiental e na meteorologia agrícola. Os autores apresentaram uma padronização no que diz respeito a manutenção dos equipamentos, coleta das informações meteorológicas. Os autores também apresentam as principais recomendações no que diz respeito a altura e exposição dos sensores de uma estação meteorológica automática.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

O presente trabalho foi realizado na área experimental (fazenda areão) do Departamento de Engenharia Rural, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", situada no município de Piracicaba, Estado de São Paulo, cujas coordenadas geográficas são: Latitude 22°42'00" S, Longitude 47°38'00" W e altitude 520 metros.

Segundo a classificação climática de Köppen, Piracicaba possui clima Cwa, ou seja, subtropical úmido, com estiagem no inverno, com temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C e no mês mais quente superior a 22 °C.

O solo do local do experimento é classificado como Terra Roxa Estruturada (Alfisol), série Luiz de Queiroz, com uma declividade média de 2,3 %. A área consiste de uma faixa de 35 x 90 m, com uma área de 3.150 m², detalhes da localização e do formato da área podem ser observados na figura 1.

No local do experimento foi montada uma estação agrometeorológica, que consiste de (1) uma estação automática para coleta de dados climáticos, (1) um Tanque Classe A, (2) dois lisímetros de drenagem, (2) dois lisímetros com lençol freático de nível constante e (1) um lisímetro de pesagem baseado em célula de carga.

Tantos os lisímetros como a área vizinha foram vegetados com grama batatais (*Paspalum notatum* Flugge). A área possui uma bordadura mínima de aproximadamente 12 m em relação o ponto central da estação. Um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial foi instalado, procedendo-se irrigações frequentes, a fim de, manter uma umidade do solo ideal, para se obter a evapotranspiração potencial.

- 1) Lisímetro de drenagem;
- 2) Lisímetro de drenagem;
- 3) Lisímetro de lençol freático constante;
- 4) Lisímetro de lençol freático constante;
- 5) Caixa de observação;
- 6) Lisímetro de pesagem;
- 7) Adutora;
- 8) Cabeçal de controle;
- 9) Linha secundária de gotejadores;
- 10) Estação meteorológica automática;
- 11) Tanque Classe A.

Figura 1 - Vista geral da área da estação agrometeorológica contendo uma estação meteorológica automática, lisímetros e equipamentos convencionais.

3.2. Caracterização física do solo

Amostras de solo foram coletadas para caracterização das propriedades físico-hídricas nas profundidades de 0-15 e 15-30 cm, utilizando-se três repetições. Os resultados são apresentados nas tabela 1 e 2

Tabela 1 - Resultados das análises físicas do solo

Camada (cm)	Granulometria (%)			Densidade (g/cm ³)	
	Areia	Silte	Argila	Partículas	do solo
0-15	24.11	24.70	51.18	2,49	1,31
15-30	15.56	16.76	67.67	2,58	1.47

Tabela 2 - Condutividade hidráulica do solo

Camada (cm)	Ks (cm/h)
0-15	7,92
15-30	0,94

3.3. Caracterização da cobertura vegetal

A cultura padrão utilizada foi a grama Batatais (*Paspalum notatum* Flugge). A grama batatais adaptou-se as condições locais apresentando uma altura média entre 12-15 cm, variando entre os cortes de manutenção. A profundidade das raízes está em torno de 20 a 30 cm.

3.4. Descrição dos tipos de lisímetros

3.4.1. Lisímetros de drenagem

O conjunto utilizado é constituído por 2 lisímetros. Estes dispositivos consistem de tanques enterrados (1,20 x 0,85 x 0,65 m) apresentando uma área exposta evaporante de 0,92 m², devido ao formato da borda irregular. Cada tanque encontra-se acoplado a

um reservatório de coleta de drenagem (0,20 x 0,20 x 0,15 m) através de uma tubulação de PVC de 32 mm de diâmetro. Os tanques de coleta da drenagem encontram-se em um fosso de observação.

Os lisímetros foram irrigados diariamente pela superfície, utilizando-se um volume de água suficiente para promover uma pequena drenagem. Durante os períodos de provável precipitação ou durante a noite cobriu-se os tanques, com a finalidade de evitar variações no armazenamento de água. O cálculo da ET foi feito através da equação da conservação de massa:

$$ET = I + P - D \pm \Delta S \quad (1)$$

onde: I = irrigação; P = precipitação; D = drenagem; e ΔS = variação do armazenamento de água. Como a irrigação era frequente e o solo foi mantido praticamente na capacidade de campo, a variação do armazenamento pode ser considerada desprezível, ou seja, $\Delta S \cong 0$. Como a precipitação natural foi controlada, este termo também não foi considerado no cálculo da evapotranspiração. As irrigações aplicadas e as percolações coletadas obtidas em cada tanque, foram tabulados em base diária. O nível do lençol freático permaneceu constante, abaixo da camada de brita

3.4.2. Lisímetros com lençol freático de nível constante

O conjunto utilizado é constituído por 2 lisímetros. Estes dispositivos consistem de tanques enterrados (1,20 x 0,85 x 0,65 m) apresentando uma área exposta evaporante de 0,92 m², devido ao formato da borda irregular. Cada tanque encontra-se acoplado a um reservatório intermediário (0,30 x 0,30 x 0,25 m) através de uma tubulação de PVC de 32 mm de diâmetro. O reservatório intermediário é munido de um sistema de bóia e regulagem de nível, sendo ligado ao reservatório de alimentação (0,30 m de diâmetro x 0,65 m de altura). As ligações entre os reservatórios e a saída da tubulação são feitas através de uma mangueira não transparente flexível de 13 mm de diâmetro. Os reservatórios intermediários e de alimentação encontram-se protegidos em um abrigo coberto com telhas de alumínio.

Durante a noite, dado ao difícil deslocamento em tempo hábil e durante o dia, quando havia condições de cobertura do céu por nuvens de chuva, foram utilizadas coberturas removíveis de madeira revestidas de plástico transparente, visando evitar a entrada de água nos lisímetros ocasionando uma variação no seu armazenamento.

A água era fornecida aos reservatórios de alimentação, que permitiam estimar o consumo diário. Estes reservatórios possuem uma escala com divisão em milímetros, sendo que a leitura era convertida em lâmina de água evapotranspirada, multiplicando-se pelo fator 0,07679, este fator é a relação de áreas do reservatório de alimentação e o tanque do lisímetro.

Para que o sistema entrasse em operação, foi necessário abastecer o reservatório de alimentação várias vezes até que por ascensão capilar o solo estivesse umedecido. Após a estabilização, a água foi fornecida ao reservatório de alimentação até que a marcação indicasse o nível zero. Na ausência da evapotranspiração o nível permanecia constante. Quando esta ocorria, o nível do lençol freático baixava, acionando a abertura do sistema válvula-bóia nos reservatórios intermediários, possibilitando assim, a entrada de água dos reservatórios de alimentação.

O nível do lençol freático em relação à superfície do solo foi mantido à 0,35 m, esta profundidade foi considerada ideal, por manter uma umidade alta e não afetar o desenvolvimento das raízes.

Para a montagem do conjunto de lisímetros de drenagem e lisímetros de lençol freático com nível constante foi necessário a construção de um local para a coleta e alimentação dos sistemas. Um fosso revestido de tijolos (0,80 x 1,20 x 1,50 m), distante 12 metros do local de instalação dos tanques, no sentido do declive da área (figura 2). Dentro do fosso era feita a coleta do percolado do lisímetro de drenagem. Na parte superior foi montada o sistema de alimentação do lisímetro com lençol freático de nível constante (figura 3).

- 1 - Lisímetro
- 2 - Tubulação de alimentação do lisímetro com lençol freático
- 3 - Tubulação de saída do lisímetro de drenagem
- 4 - Reservatório de alimentação
- 5 - Reservatório intermediário
- 6 - Reservatório de coleta da drenagem

Figura 2 - Esquema de montagem do lisímetro de drenagem e do lisímetro com lençol freático de nível constante

- 1 - Reservatório de alimentação
- 2 - Reservatório intermediário
- 3 - Reservatório de coleta da drenagem

Figura 3 - Detalhe do local de coleta do lisímetro de drenagem e abastecimento do lisímetro com lençol freático de nível constante

3.4.3. Lisímetro de Pesagem Baseado em Célula de Carga

O esquema de montagem do lisímetro de pesagem pode ser observado na figura 4, o sistema de pesagem consiste de um tanque interno, aonde foi utilizado um tanque de cimento amianto ($1,20 \times 0,85 \times 0,65 \text{ m}$), sobre uma placa de compensado naval ($1,25 \times 0,90 \times 0,03 \text{ m}$). A placa de compensado naval, por si, está apoiada sobre três células de carga em disposição triangular. A disposição das células de carga, sob a placa de compensado naval foi calculada, com o objetivo de se obter uma distribuição homogênea da massa.

- 1 - Caixa interna
- 2 - Piezômetro
- 3 - Pilar (Ponto de apoio)
- 4 - Sistema de drenagem
- 5 - Célula de carga
- 6 - Placa de apoio

Figura 4 - Layout do lisímetro de pesagem baseado em célula de carga

As células de carga são fixas em pontos de apoio, pilares (0,30 x 0,15 m), sob estes pilares existe uma placa de cimento armado (1,20 x 0,90 m). Este sistema de apoio das células, visa evitar um deslocamento do sistema de pesagem devido as deformações do solo. As paredes do solo, são contidas por placas de compensado naval com (0,015 mm) de espessura. A utilização do compensado naval, é devido ao fato de ser, o mesmo um material de alta resistência mecânica, e resistente à condições de umidade e variação de temperatura ambiente, além do seu baixo custo. No espaço inferior entre o

tanque interno e o externo, existe uma camada de brita para favorecer a drenagem da chuva que pudesse vir se acomodar entre os dois tanques. Foi mantido um espaço entre o tanque interno e externo, para permitir inspeções visuais e evitar impedimentos mecânicos ao funcionamento do sistema.

As células de carga foram escolhidas de acordo com a massa total do sistema a ser mensurada (solo, tanque e água do solo). Cada célula possui uma capacidade de pesagem de 910 kg. As células são resistentes a corrosão e hermeticamente seladas, para uso em ambiente aberto. As células possuem um extensômetro elétrico (Strain gage) interno, ao longo do seu eixo longitudinal. As células de carga possuem também, compensação automática, para reduzir a zero os erros devido a variação de temperatura. A célula de carga utilizada é fabricada pela Omega Engineering⁴, modelo LCCA-2K, com uma precisão de 0,037% da sua capacidade total.

O sistema de drenagem do lisímetro de pesagem constituiu-se de um tubo de acesso de 0,05m de diâmetro localizado na parte inferior do tanque, sob uma camada de pedra britada. O sistema de drenagem possui uma saída vertical, o que permite a regulação do lençol freático, pela remoção ou adição de água. Este sistema permitiu que o sistema de pesagem, não tivesse nenhum impedimento mecânico ao seu funcionamento.

Um coletor de dados “datalogger” (modelo: CR10) fabricado pela empresa Campbell Scientific, foi utilizado com o propósito de mensurar o e armazenar o sinal das células de carga e dos instrumentos micrometeorológicos instalados no local. O programa de operação e armazenamento do sinal da célula de carga é apresentado em apêndice (quadro 1).

A evapotranspiração ocorrida foi calculada através das informações de peso obtidas pelas três células de carga, coletadas por um “datalogger”. Sendo armazenados valores de média da somatória do peso das três células de carga, calculados a cada 30 (trinta) minutos.

---

⁴ A apresentação do nome do fabricante é para benefício do leitor, não tendo a finalidade de divulgação comercial.

3.5. Teste do sistema de pesagem em laboratório

Inicialmente o sistema de pesagem foi montado em laboratório, onde foi preenchido com água. Numa primeira etapa, procedeu-se a determinação do multiplicador que converte o sinal elétrico da célula em massa, de acordo com instruções do fabricante. A célula de carga utilizada possui uma escala nominal de “output” no máximo de 3,007 mVolts/Volt de excitação. Utilizou-se 1000 mVolts de voltagem de excitação para que a faixa de leitura do sinal fosse em torno de 2,5 mVolts dando uma melhor performance com maior sensibilidade. Assim teremos um output de 3,007 mVolts / 907,18 kg (capacidade total), ou seja, 0,0015035 mVolt / 0,4536 kg. Invertendo esse sinal teremos 301, 691 kg / mVolt, que é o multiplicador. A variação de massa do sistema posteriormente é transformada em milímetros de lâmina evapotranspirada, multiplicando-se a mesma pela área do lisímetro, considerando massa específica da água igual a 1 g/cm³.

Em uma segunda etapa procedeu-se a testes para verificar a acurácia do sistema de pesagem. Utilizando uma série de pesos conhecidos, com duas faixas de pesos de 0,01 kg a 0,1 kg (faixa 01), e de 0,1 kg a 1 kg (faixa 02). Os valores de r^2 das regressões, foram 0,909 para faixa 01 e 0,997 para faixa 02 (figura 5).

Figura 5 - Peso mensurado versus peso padrão (teste em laboratório)

3.6. Calibração do sistema de pesagem em campo

A linearidade e a acurácia do sistema de pesagem foi testada em campo, pelo acréscimo e decréscimo de uma série de pesos (1 kg). A variação da massa do sistema foi armazenada pelo “datalogger”. O teste foi realizado antes do amanhecer, para evitar variação da massa do sistema devido à evapotranspiração. A massa do lisímetro no início do teste foi a mesma no final do teste. Os valores para o coeficiente de determinação r^2 foram 0,9987 para o acréscimo de peso e 0,9997 para o decréscimo de peso (figura 6).

Figura 6 - Peso mensurado versus peso padrão (teste de campo)

Procurando-se observar a linearidade do sistema de pesagem plotou-se os valores de variação da massa do sistema devido o acréscimo e o decréscimo dos pesos. O resultado pode ser observado na figura 7.

Figura 7 - Linearidade do sistema de pesagem (Acréscimo X Decréscimo)

A descrição dos materiais necessários para a montagem dos três tipos de lisímetro encontra-se em apêndice (tabela 1).

3.7. Monitoramento da umidade do solo

A umidade dentro do lisímetros foi monitorada através de tensiômetros com câmara de ar instalados em duas profundidades (15 e 30 cm). Utilizou-se um aparelho especial (tensiometro), que através de um transdutor de tensão, obtinha-se leituras pontuais de tensão em mbar. A observação de que a condição de umidade dentro dos tanques é diferente da condição de umidade fora dos tanques, levou a consideração de que a estimativa indireta da umidade utilizando valores de potencial mátrico estimados com tensiômetros e a curva de retenção de água no solo, caracterizada para uma condição de perfil do solo natural, não é representativa da estrutura do solo encontrada dentro do lisímetro.

Procurando-se utilizar valores valores de tensão da água no solo à capacidade de campo representativos da condição de solo dentro do lisímetro. Procedeu-se um teste de capacidade de campo, utilizando-se os lisímetros de drenagem, com os drenos das caixas abertos, os lisímetros foram irrigados com o objetivo de saturar o solo, iniciando a observação da taxa de drenagem. Durante o período entre o início da drenagem e o seu término foram feitas leituras dos tensiômetros instalados. Determinou-se que a tensão da água do solo no ponto de capacidade de campo (fim da drenagem), está localizada entre - 60 a -70 mbar. A variação dos valores de tensão da água no solo durante o teste de campo podem ser observados na figura 8.

A umidade do solo fora dos lisímetros também foi monitorada utilizando-se tensiômetros nas profundidades 15 e 30 cm. Utilizando-se nesse caso a curva de retenção de água no solo estimada em laboratório.

Figura 8 - Variação da tensão da água no solo medida durante o teste de capacidade de campo

3.8. Obtenção dos dados meteorológicos

As informações meteorológicas para o cálculo da evapotranspiração de referência foram obtidas na estação meteorológica automática instalada na área, que possui sensores de:

- temperatura do ar e umidade relativa do ar a 2m de altura (modelo: HMP35C Temperature/RH Probe - Campbell; acurácia: temperatura = $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$; umidade relativa = $\pm 3\%$).
- radiação solar global a 3m de altura (modelo: LI200X Pyranometer - Li-cor Inc.).
- velocidade do vento a 2m de altura (modelo: 014A Wind Speed Sensor - Met One Instruments; threshold = 0,45m/s).
- direção do vento a 2m de altura (modelo: 024A Wind Direction Sensor - Met One Instruments; acurácia = $\pm 5^{\circ}$).

- precipitação a 1,5m de altura (modelo: TE525 Tipping Bucket Rain Gage - Weather Bureau; precisão = 0,1mm).
- radiação solar líquida a 1m da cobertura vegetal (modelo: Q7.1 Net Radiometer - REBS; espectro: 0,25 a 60µm).

Todos os sensores estão conectados a um “datalogger” (modelo: CR10 Campbell), que armazena informações de média a cada 30 minutos.

3.9. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

3.9.1. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith padronizado pela FAO

A equação original de Penman-Monteith pode ser escrita como:

$$\lambda E_{To} = \frac{s (R_n - G) + \rho c_p (e_s - e_a) / r_a}{s + \gamma (1 + r_c / r_a)} \dots\dots\dots (2)$$

onde: λE_{To} = fluxo de calor latente de evaporação ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

R_n = radiação líquida ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

G = fluxo de calor no solo ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

ρ = densidade atmosférica (kg m^{-3})

c_p = calor específico do ar ($\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$)

e_s = pressão de saturação de vapor à temperatura do ar (kPa)

e_a = pressão atual de vapor (kPa)

r_c = resistência da cobertura vegetal (s m^{-1})

r_a = resistência aerodinâmica (s m^{-1})

γ = constante psicrométrica (kPa °C^{-1})

s = inclinação da curva de pressão de saturação à temperatura do ar (kPa °C^{-1})

λ = calor latente de vaporização (MJ kg^{-1})

Para o uso do modelo de Penman-Monteith, Smith (1991) padroniza alguns parâmetros para períodos de um dia, com base em sua validade global. A seguir apresentam-se as equações de cálculo e os valores utilizados para os diferentes parâmetros da equação, segundo tal padronização:

- calor latente de vaporização

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

onde: λ = calor latente de vaporização (MJ kg^{-1})

T = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)

- tangente a curva de pressão de saturação de vapor

$$S = \frac{4098 \text{ es}}{(T + 237,3)^2} \dots\dots\dots (4)$$

onde: S = tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água no ponto dado pela temperatura média do ar ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

T = temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$)

e_a = pressão de saturação do vapor d'água à temperatura média diária do ar (kPa)

- pressão atmosférica

$$P = P_0 \left(\frac{T_0 - \alpha Z}{T_0} \right)^{\frac{g}{\alpha R}} \dots\dots\dots (5)$$

onde: P = pressão atmosférica na altitude Z (kPa)

P_0 = pressão atmosférica ao nível do mar - Z_0 (P_0)

Z = altitude local (m)

g = aceleração da gravidade terrestre ($g=9,81\text{m s}^{-2}$)

R = constante universal dos gases ($R=287\text{J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$)

T_0 = temperatura absoluta do ar em Z_0 (K). Utilizando-se a expressão

$T_0=273,16+T$, onde T é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) e assumindo-se que

$T=20^{\circ}\text{C}$, obtém-se que $T_0=293,16\text{K}$

α = gradiente adiabático do ar saturado ($\alpha=0,0065\text{K m}^{-1}$)

- constante psicrométrica

$$\gamma = 10^{-3} \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \dots\dots\dots (6)$$

onde: γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}$)

c_p = calor específico do ar à pressão constante ($c_p=1,013\text{kJ kg}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

P = pressão atmosférica (kPa)

ε = razão entre o peso molecular do vapor d'água e do ar atmosférico seco

($\varepsilon=0,622$)

λ = calor latente de vaporização (MJ kg^{-1})

- massa específica do ar

$$\rho = \frac{P}{T_v R} \dots\dots\dots (7)$$

onde: ρ = massa específica do ar (kg m^{-3})

P = pressão atmosférica

R = constante universal dos gases ($R=0,287\text{kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$)

T_v = temperatura virtual do ar (K). Segundo Smith (1991), T_v pode ser estimada por $T_v=T+275$

- pressão de saturação do vapor d'água

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) \dots\dots\dots (8)$$

onde: e_s = pressão de saturação do vapor d'água (kPa)

T = temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$)

- pressão atual de vapor d'água

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \dots\dots\dots (9)$$

onde: e_a = pressão atual do vapor d'água (kPa)

e_s = pressão de saturação do vapor d'água (kPa)

UR = umidade relativa média do ar (%)

- resistência aerodinâmica

Allen et al. (1989) apresentam as equações que serão utilizadas para cálculo de r_c e r_a . Os autores salientam que o período considerado deve ser de 1 dia ou maior:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right)}{K^2 U_z} \dots\dots\dots (10)$$

onde: r_a = resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível e vapor d'água (sm^{-1})

z_m = altura de medição da velocidade do vento (m)

z_h = altura de medição da temperatura e da umidade do ar (m)

d = deslocamento do plano zero do perfil do vento (m)

z_{om} = comprimento de rugosidade equivalente para transferência de momento (m)

z_{oh} = comprimento de rugosidade equivalente para transferência de calor sensível latente (m)

k = constante de Von Karman ($K=0,41$)

U_z = velocidade do vento medida à altura z ($m\ s^{-1}$)

$$d = \frac{2}{3} hc \dots\dots\dots (11)$$

onde: hc = altura média da vegetação (m)

$$z_{om} = 0,123 hc \dots\dots\dots (12)$$

$$z_{oh} = 0,1 z_{om} \text{ ou } z_{oh} = 0,0123hc \dots\dots\dots (13)$$

- resistência da cobertura vegetal

$$r_c = \frac{RI}{0,5 IAF} = \frac{200}{IAF} \quad IAF = 24 hc \dots\dots\dots (14)$$

onde: RI = média diária da resistência estomática de uma folha ($s\ m^{-1}$) = $100s\ m^{-1}$

IAF = índice de área foliar

hc = altura da cultura (no caso, grama)

Temos então, para a cultura de referência, $hc = 0.12m$, e $IAF = 24 \times 0.12 = 2.88$, e portanto, o valor sugerido em Smith (1991) para ser utilizado é fixado em:

$$r_c = \frac{200}{2,88} = 69\ sm^{-1} \dots\dots\dots (15)$$

3.9.2. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método do tanque classe A (EtoCA).

De acordo com o trabalho de Doorenbos & Kassan (1979) estimou-se a evapotranspiração de referência através da relação:

$$Eto = ECA * Kp \dots\dots\dots (16)$$

sendo ECA a evaporação do tanque Classe A (mm/dia) e Kp um coeficiente de conversão da evaporação do tanque Classe A em evapotranspiração de referência, que é função da umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (km/dia) e das condições de exposição do tanque (apêndice, tabela 2).

3.10.Instalação do experimento

A instalação da estação agrometeorológica procedeu-se em várias etapas. Inicialmente toda a área foi trabalhada com uma grade niveladora, homogeneizando a superfície do local. Em seguida foram instalados os lisímetros e o sistema de irrigação da área. A etapa seguinte compreendeu a instalação da estação meteorológica automática e o plantio da grama. Levou-se aproximadamente seis meses entre o início dos trabalhos de instalação e o momento de perfeito funcionamento de todos os equipamentos. Este tempo foi fundamental para calibração dos sensores da estação e dos lisímetros, e também para que toda a área tornasse representativa de um ambiente favorável a evapotranspiração potencial.

Os tanques foram enterrados de forma a manter uma borda acima do nível do solo de 5 cm, evitando-se, assim, a entrada de água oriunda de escoamento superficial, seja de chuva e/ou irrigações. Os tanques foram enchidos com a mesma terra das covas onde foram enterrados, mantendo-se a mesma ordem do perfil local. Utilizou-se o método de reconstrução do perfil, sendo que a terra de preenchimento foi peneirada, visando a sua homogeneização e retirada do material grosseiro. Para facilitar o processo de drenagem, foi colocado em cada caixa uma camada de 10 cm de pedra britada e sobre esta uma fina camada de areia grossa. Um sistema de drenagem em forma de “U”, foi instalado sob a camada de brita utilizando tubo de PVC de 32 mm de diâmetro, revestidos com uma manta filtrante, nos lisímetros de drenagem e nos lisímetros com lençol freático de nível

constante. O procedimento de preenchimento dos tanques foram os mesmos para todos os três tipos de lisímetros.

Inicialmente, os lisímetros foram irrigados diariamente pela superfície, mantendo-se uma drenagem livre, para uma melhor acomodação do solo após a instalação dos mesmos, sendo que posteriormente ao período de adaptação, a alimentação dos lisímetros foi de acordo com seu princípio de funcionamento.

Tanto os lisímetros quanto as áreas circunvizinhas foram vegetadas com grama batatais (*Paspalum notatum flügge*), mantida com uma altura adequada através de cortes periódicos. Foram feitas adubações de cobertura, aplicando-se 20 kg de N/ha, iniciando-se 30 dias após a emergência e , depois de dois em dois meses. De acordo com recomendações de RAIJ (1985, p. 84).

3.11. Condução do experimento

Diariamente as leituras serão feitas à partir das 7:30 h, sendo coletadas as leituras do tanque medidor do lisímetro com lençol freático de nível constante, da água percolada dos lisímetros de drenagem, irrigação dos lisímetros de drenagem, verificação do nível do lençol no evapotranspirômetros, leituras da evaporação do Tanque Classe A, leituras dos tensiômetros e coleta dos dados acumulados no “datalogger” do lisímetro de pesagem e da estação automática.

3.12. Análise dos dados

Os valores evapotranspiração de referência (Eto) medidos utilizando-se os lisímetros de pesagem, de drenagem e com lençol freático de nível constante, e estimados pelo modelo de Penman-Monteith e pelo método do tanque classe “A” (EtoCA), foram obtidos em base diária para um período de 41 (quarenta e um) dias, entre 22 de fevereiro a 01 de abril de 1996 (apêndice, tabela 3).

A avaliação da resposta dos lisímetros de drenagem, com lençol freático de nível constante, do modelo de Penman-Monteith e do método do tanque classe “A” (EtoCA), foi realizado através de regressões lineares simples, tomando-se como padrão o lisímetro de pesagem. Um modelo de regressão que reproduz exatamente a magnitude das

observações, pode produzir uma distribuição dos pontos sobre uma reta, de forma que a declividade (b) é 1 (um) e o intercepto (a) é 0 (zero). Utilizou-se também outros indicadores estatísticos (teste t , índice d, erro sistemático (Es), erro não-sistemático (Eu), raiz quadrada do erro médio (RQEM), e média do erro absoluto (MAE)).

O coeficiente de determinação r^2 obtido através da análise de regressão, descreve a proporção da variação total explicada pelo modelo de regressão. O valor de r^2 varia entre 0 (zero) e 1 (um), quanto mais próximo de 1(um) melhor a performance do modelo de regressão.

Para testar hipóteses a respeito dos valores dos parâmetros das regressões lineares foi utilizado a estatística t . A fim de que o modelo de regressão seja estatisticamente significativo um valor crítico de t deve ser determinado. O valor crítico do t é obtido através de tabelas estatísticas, isto é, $t_{\alpha/2}$, e depende do nível de significância (α) e do grau de liberdade ($N-p$), onde N é o número de observações e p o número de parâmetros estimados. Para que o modelo de regressão seja estatisticamente significativo a um nível de confiança ($1 - \alpha$), o t calculado deve ser maior que o valor tabelado. O nível de confiança (α) pode variar entre 0 - 1, porém é comumente utilizado 5% e 1%.

A hipótese testada foi:

$$H_0 : \beta = 0 \quad \text{contra} \quad H_a : \beta \neq 0$$

Assim, quando o valor do t calculado é superior ao valor do t crítico rejeita-se H_0 e aceita-se H_a .

O coeficiente de determinação r^2 têm sido largamente utilizado como índice de correlação. No entanto, o r^2 não deve ser utilizado individualmente em uma análise de performance, devido ao fato que o r^2 , muitas vezes, não estar relacionado com o tamanho da diferença entre um valor padrão e um valor previsto por modelos de estimativa ou outros mecanismos de medida diferentes do padrão (Willmott & Wicks, 1980).

Willmott (1981), elaborou o seguinte índice D de concordância,

$$= 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right]$$

para avaliação da performance de modelos de estimativas, podendo ser utilizado também na análise de funcionamento de dispositivos de mensuração. Onde O_i e P_i são valores observados (padrão) e previstos (modelos de estimativa ou outros dispositivos), respectivamente. E $\bar{O}$ é a média dos valores observados (padrão). O índice D é mais sensível ao erro sistemático do que o r^2 . A faixa de valores do índice D varia entre 0 (zero) para uma completa dispersão entre os valores e 1 (um) para uma perfeita concordância. O autor ainda propõe Outros indicadores da performance das medidas: E_s , E_u , RQEM e MAE, que podem ser calculados utilizando as seguintes equações:

$$E_s = (N^{-1} * \sum (P_i - O_i)^2)^{0.5}$$

$$E_u = (N^{-1} * \sum (P_i - \bar{O})^2)^{0.5}$$

$$RQEM = (E_s^2 + E_u^2)^{0.5}$$

$$MAE = N^{-1} * \sum |P_i - O_i|$$

onde N representa o número de observações. O valor de P_i é calculado, de acordo com a declividade (b) e o intercepto (a), parâmetros da regressão entre o valor padrão (observado) e o valor medido e/ou estimado(previsto), $P_i = a + b * O_i$.

Aos valores de E_{to} medidos através dos lisímetros de pesagem, de drenagem e com lençol freático de nível constante, e aos valores estimados pelo modelo de Penman-Monteith e pelo método do tanque classe “A” (E_{toCA}), foram aplicadas regressões lineares múltiplas com a finalidade de avaliar a influência de fatores meteorológicos como umidade relativa do ar, velocidade média do vento e radiação líquida (apêndice, tabela 4). Visto que, para condições de Evapotranspiração potencial (E_{to}), a evapotranspiração é função de fatores meteorológicos, principalmente a radiação líquida. O comportamento das principais variáveis meteorológicas durante o período de observação pode ser visualizado em apêndice (figura 1).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Montagem, operação e funcionamento dos lisímetros

4.1.1. Montagem dos lisímetros

Na montagem dos lisímetros, a importância dos fatores de mão-de-obra, custos, e detalhes técnicos é crescente, respectivamente, nos lisímetros de drenagem, com lençol freático de nível constante, e no lisímetro de pesagem baseado em célula de carga. Isto está relacionado com o princípio de funcionamento específico para cada dispositivo. Aboukhaled et al. (1982), descrevem os diversos tipos de lisímetros correlacionando-os com as condições de montagem, específicas para cada dispositivo. A montagem de um lisímetro é um dos pontos mais importantes para se obter valores corretos de evapotranspiração. É necessário pesquisa criteriosa dos diversos esquemas de construção de lisímetros existentes, com o objetivo de adequar o melhor dispositivo as condições locais, de acordo com a finalidade e das condições de construção.

Quanto ao desenvolvimento da grama na área da estação agrometeorológica, verificou-se no início da implantação da mesma, algumas dificuldades no que diz respeito a plantas invasoras que dificultaram a melhor cobertura vegetal. Porém, com irrigações frequentes e adubação nitrogenada de cobertura, toda a superfície da área foi vegetada.

A necessidade de manutenção diária dos lisímetros de drenagem e lisímetro com lençol freático, prejudicou o desenvolvimento da grama próxima aos mesmos. Não houve diferenças visuais no desenvolvimento da grama no interior dos tanques em relação a área circundante. Allen & Fisher (1990), apresentaram exemplos de que diferenças de altura do gramado do lisímetro em relação a parte externa, pode afetar severamente as mensurações do lisímetro.

4.1.2. Operação e funcionamento dos dispositivos

No que tange ao princípio de funcionamento, o lisímetro de pesagem é o mais preciso em relação ao lisímetro de drenagem e ao lisímetro com lençol freático de nível constante. O lisímetro de pesagem determina a evapotranspiração diretamente através de um balanço de massa, ao contrário dos outros dois dispositivos que determinam a evapotranspiração através de um balanço volumétrico.

O lisímetro de drenagem e o lisímetro com lençol requerem manutenção diária, não havendo dispositivos de leitura automática, ocorrendo também problemas relacionados com a variação de armazenamento de água no sistema. Devido ao princípio de funcionamento destes dispositivos, ocorre a necessidade de se controlar a entrada de água (chuva e irrigação) adicional no sistema. Todavia muitos trabalhos tem sido desenvolvidos utilizando estes dispositivos. Autores como Camargo (1966), Assis (1978), Barbieri (1981), Costa (1989) e Moura (1990) concordam com a viabilidade de utilização destes dispositivos na determinação da evapotranspiração, por apresentarem bom desempenho e simplicidade operacional.

O nível da água do lisímetro com lençol freático, foi mantido à 0,35m de profundidade, causando um aumento da umidade do solo nestes dispositivos, em relação aos outros dispositivos nos quais foi mantida próximo a capacidade de campo. Este fato pode ocasionar deficiência da aeração do solo dentro do dispositivo, influenciando negativamente no desenvolvimento da cultura. No entanto, Assis & Villa Nova (1980) utilizando um equipamento deste tipo, concluíram que o mesmo representa melhor a evapotranspiração potencial, pois ao mínimo valor de tensão de água no solo na zona radicular, aliou-se um máximo em condições de aeração.

O lisímetro de drenagem possui algumas restrições no seu funcionamento quanto à determinação da lâmina de irrigação, necessária para manter a umidade do solo próximo à capacidade de campo. A lâmina de irrigação deve ser calculada de forma a atender a demanda do sistema (ET) e manter um pequeno volume de água percolado. Deve-se

atentar à provável lixiviação dos nutrientes do solo, sendo recomendado fertirrigações para suprir estes nutrientes. Pode ser recomendado a utilização do lisímetro de drenagem, sem haver a necessidade de coberturas artificiais contra chuvas, com o intuito de se evitar a variação de armazenamento, visto que o mesmo é recomendado para regiões chuvosas. Porém deve-se tomar o cuidado de processar os dados em bases decendiais e/ou mensais.

O sistema de armazenamento e processamento de dados do lisímetro de pesagem, utilizando um “datalogger”, permitiu mensurar com precisão todas as variações de massa existentes. Não sendo necessário inspeções diárias do dispositivo, pois o “datalogger” armazena convenientemente os dados coletados. Na figura 9, podem ser observadas três variações típicas da massa do lisímetro de pesagem, onde são verificadas os componentes (evapotranspiração, chuva e drenagem) utilizados no balanço de massa do sistema. O dia 62 (figura 9a) apresenta uma variação decrescente da massa do lisímetro, no caso do lisímetro de pesagem variações negativas são consideradas como evapotranspiração (figura 9b). No dia 64 (figura 9c) ocorreu uma chuva, o que aumenta a massa do lisímetro, neste caso ocorre uma variação positiva, sendo da mesma forma registrada. No dia seguinte 65 (figura 9e), devido ao fato da chuva do dia anterior ter causado uma elevação do lençol freático, tornou-se necessário realizar a drenagem do sistema, sendo este componente considerado uma variação negativa, não obstante não deve ser considerada como evapotranspiração (figura 9f).

Figura 9 - Variação da massa do lisímetro de pesagem em condições típicas de funcionamento, comparando-se sua medida com o modelo Penman-Monteith.

Mensurações do lisímetro de pesagem para um período de integração de 30 min ao longo de um dia foram comparadas com os valores estimados pelo modelo Penman-Monteith (Figura 10). A estimativa da evapotranspiração seguiu a padronização proposta por Smith (1991), não tendo sido feitas tentativas de variar os valores de resistência da cobertura no decorrer do período. Os resultados são apresentados para dois dias distintos, 23/02/96 e 02/03/96. As medidas de evapotranspiração para um período de integração de 30 min apresentaram uma boa concordância com os valores estimados pelo modelo de Penman-Monteith. Os coeficientes de determinação (r^2), foram de 0,69 e 0,80 para os dias 23/02/96 e 02/03/96, respectivamente.

Figura 10 - Evapotranspiração de referência (Eto) estimada pelo modelo Penman-Monteith para um período de integração de 30 min versus a medida pelo lisímetro de pesagem.

4.2. Referente aos valores de evapotranspiração medida pelos lisímetros de drenagem, lisímetro com lençol freático de nível constante, e estimada pelo modelo de Penman-Monteith e pelo método de tanque classe "A" (EtoCA).

Os resultados das regressões lineares simples do lisímetro de pesagem (variável independente) contra o modelo de Penman-Monteith, lisímetro de drenagem, lisímetro com lençol freático e EtoCA, tomando-se os valores em base diária, são apresentados na tabela 3, onde foram colocados os termos constantes, os coeficientes da regressão com os respectivos resultados do teste t , e os coeficientes de determinação (r^2). Nesta tabela constam também o índice D, os componentes sistemáticos (E_s), não

sistemático (Eu), da Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM), e a Média do Erro Absoluto (MAE).

O valor para o coeficiente de determinação foi estatisticamente significativo somente para a primeira regressão, indicando que as estimativas da evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith ajustaram-se com razoável precisão aos valores medidos pelo lisímetro de pesagem.

Os baixos coeficientes de determinação para o lisímetro de drenagem (0,098) e para o lisímetro com lençol freático (0,030), pode ser explicado pelo fato destes dispositivos não possuírem sensibilidade para obtenção de valores diários. Contudo Assis (1978), trabalhando com lisímetros com lençol freático de nível constante, concluiu que este dispositivo apresenta características suficientes para ser utilizado em estudos de evapotranspiração para uma escala diária.

Na primeira regressão, tendo como variável dependente o modelo de Penman-Monteith, o valor do teste t rejeitou a hipótese de nulidade do parâmetro da regressão, ao nível de 1%, comprovando-se assim, que o modelo de Penman-Monteith constitui uma boa expressão teórica do processo da evapotranspiração.

Tabela 3 - Coeficientes linear (a), angular (b), r^2 e t calculado para as regressões lineares simples entre os valores diários de evapotranspiração medido pelo lisímetro de pesagem (variável dependente) contra os valores diários medidos pelo lisímetro de drenagem, lisímetro com lençol freático, e estimados pelo modelo (Penman-Monteith) e pelo método do tanque classe "A" (EtoCA); Índice D, erro sistemático (Es), erro não sistemático (Eu), raiz quadrada do erro médio (RQEM) e a média do erro absoluto (MAE).

Var. dependente	a	b	r^2	t	índice D	Es (mm)	Eu (mm)	RQEM (mm)	MAE (mm)
Penman-Monteith	1,243	0,705	0,794	12,26**	0,90	0,479	0,40	0,624	0,442
Lis. de drenagem	2,520	0,353	0,098	2,056*	0,55	0,907	1,19	1,500	1,216
lis. com lençol	2,799	0,192	0,030	1,097	0,46	0,963	1,22	1,550	1,245
EtoCA	1,582	0,124	0,005	0,474	0,39	1,460	1,82	2,340	2,00

* Significativo a 5% de probabilidade

** Significativo a 1% de probabilidade

Utilizando-se a variável dependente, lisímetro de drenagem, o valor do teste t rejeitou a hipótese de nulidade do parâmetro, apenas para o nível de 5%. No entanto, o coeficiente de determinação ($r^2 = 0,098$), não foi significativo, indicando não ter havido uma relação linear entre as variáveis relacionadas.

Por fim, utilizando-se como variáveis dependentes o lisímetro com lençol freático e EtoCA, os valores para os correspondentes testes t rejeitaram a hipótese da nulidade dos parâmetros à níveis de significância estatística altos, respectivamente, 27% e 63%. Isto pode ser explicado devido ao fato do período de observação, ter sido um período com frequentes chuvas, o que afeta o princípio de funcionamento destes mecanismos.

O índice D, confirmou os resultados apresentados para os coeficientes de determinação das regressões lineares simples. O modelo de Penman-Monteith apresentou o maior valor para este índice (0,90), confirmando uma melhor concordância entre os valores de Eto medidos e previstos. Os demais dispositivos (lisímetro de drenagem e o lisímetro com lençol) obtiveram valores inferiores à 0,55. Sendo que o tanque classe “A” apresentou o valor de índice D mais baixo e igual a 0,39.

Para o modelo Penman-Monteith os índices de erro sistemático (Es), erro não-sistemático (Eu), raiz quadrada do erro médio (RQEM), e a média do erro absoluto (MAE), foram 0,479 mm/dia, 0,401 mm/dia, 0,624 mm/dia e 0,422 mm/dia, respectivamente. Para os lisímetros de drenagem, com lençol freático e o tanque classe “A” os índices de erro (Es, Eu, RQEM e MAE), variaram numa faixa entre 1,00 mm/dia a 2,00 mm/dia.

Na tabela 4 encontram-se a evapotranspiração acumulada no período para o lisímetro de pesagem (124,87 mm), lisímetro de drenagem (147,42 mm), lisímetro com lençol freático (138,76 mm), e para o modelo de Penman-Monteith (139,14 mm), e o tanque classe “A” (80,33mm). Observa-se que em relação ao lisímetro de pesagem, os lisímetros de drenagem, com lençol freático, e o modelo de Penman-Monteith superestimaram os valores de evapotranspiração em 18%, 11%, 11,4 %, respectivamente, e o tanque classe “A” subestimou 36 %. A subestimativa da evapotranspiração obtida pelo tanque classe “A”, pode ser explicada pelo uso de coeficientes de tanque (K_p), não representativos para as condições locais. Pereira et al. (1995), apontam que a estimativa do K_p , seguindo as recomendações de Doorenbos & Pruitt (1975), pode ocasionar estimativas incorretas de evapotranspiração, e recomendam um modelo de estimativa de K_p .

Tabela 4 - Valores de evapotranspiração de referência acumulada (Eto) medidos e estimados durante o período de 21/02/96 a 01/04/96.

Dispositivo e/ou método	Eto média (mm/dia)	Eto acumulada (mm)
Lis. de pesagem	3,04	124,87
Penman-Monteith	3,39	139,14
Lis. de drenagem	3,59	147,42
Lis. com lençol	3,38	138,76
EtoCA	1,95	80,33

Nas figuras 11 a 14 estão as representações gráficas das correlações entre os valores diários medidos pelo lisímetro de pesagem (variável independente) contra as variáveis dependentes (Penman-Monteith, lisímetro de drenagem, lisímetro com lençol e EtoCA).

Verificou-se a melhor concordância entre os valores para a evapotranspiração estimada pelo modelo de Penman-Monteith. A linha representativa da equação de regressão para esta variável, foi a que mais se aproximou da respectiva linha 1:1. O parâmetro *a* (intercepto) da equação de regressão, foi o mais baixo, e o termo *b* (declividade), o que mais se aproximou da unidade. Entretanto o modelo superestimou a evapotranspiração de referência, principalmente nos períodos com baixos valores de evapotranspiração. Este fato pode ser explicado pela utilização nos cálculos de estimativa, coeficientes de resistência à transferência do vapor de água (resistência do dossel e resistência aerodinâmica), não apropriados para as condições locais. Peres (1994) avaliando o modelo de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Campinas, Ribeirão Preto e Pindamonhangaba no estado de São Paulo, verificou que o modelo superestimou a evapotranspiração de referência para as condições de Campinas. Nas outras duas localidades o modelo apresentou uma alta dispersão em relação aos valores medidos em lisímetro.

As figuras 12, 13 e 14 mostram a grande dispersão dos valores para os lisímetros de drenagem e com lençol freático e para o tanque classe "A", traduzindo-se em coeficientes de determinação baixos (0,098, 0,030, e 0,005, respectivamente).

Figura 11 - Evapotranspiração de referência diária (Eto) estimada pelo modelo Penman-Monteith versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1.

Figura 12 - Evapotranspiração de referência diária (Eto) medida pelo lisímetro de drenagem versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1

Figura 13 - Evapotranspiração de referência diária (E_{to}) medida pelo lisímetro com lençol versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1

Figura 14 - Evapotranspiração de referência diária (E_{to}) estimada pelo tanque classe "A" versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1

Utilizando-se uma periodicidade quinquidiária (05 dias), como base de cálculo para valores acumulados, obteve-se uma melhora do coeficiente de determinação (r^2) e do índice D (tabela 5) para todos os dispositivos e estimativas. No entanto, os coeficientes de concordância (r^2 e o índice D), continuaram não significativos para os dispositivos: lisímetro de drenagem e lisímetro com lençol, com base nisso supõem-se que a base de cálculo para estes dispositivos deva ser superior a 05 (cinco) dias.

Pode ser destacado, também, uma sensível redução do nível de significância do teste t , para os parâmetros das regressões, entre 13% e 19%, no entanto não atingindo o nível inferior a 5% de significância.

Tabela 5 - Coeficientes linear (a), angular (b), r^2 e t calculado para as regressões lineares simples entre os valores quinquidiários de evapotranspiração medido pelo lisímetro de pesagem (variável dependente) contra os valores quinquidiários medidos pelo lisímetro de drenagem, lisímetro com lençol freático, e estimados pelo modelo (Penman-Monteith) e pelo método do tanque classe "A" (EtoCA); Índice D, erro sistemático (Es), erro não sistemático (Eu), raiz quadrada do erro médio (RQEM) e a média do erro absoluto (MAE)

Var. dependente	a	b	r^2	t	índice D (mm)	Es (mm)	Eu (mm)	RQEM (mm)	MAE (mm)
Penman-Monteith	2,979	0,923	0,85	5,86**	0,87	1,79	1,08	2,09	1,783
Lis. de drenagem	3,632	0,947	0,33	1,74	0,60	2,82	3,75	4,69	3,594
Lis. com lençol	3,704	0,873	0,27	1,51	0,63	1,77	3,99	4,36	3,338
EtoCA	11,248	1,363	0,38	1,94	0,47	5,66	4,85	7,45	7,190

* Significativo a 5% de probabilidade

** Significativo a 1% de probabilidade

Nas figuras 15, 16, 17 e 18, estão as representações gráficas das correlações entre os valores medidos pelo lisímetro de pesagem (variável independente) contra as variáveis dependentes (Penman-Monteith, lisímetro de drenagem, lisímetro com lençol e EtoCA), tomando-se uma base de cálculo de 05 (cinco) dias. O número reduzido de pontos disponíveis não permite inferências mais detalhadas ficando, no entanto, fica evidente o amaciamento das flutuações diárias.

Figura 15 - Evapotranspiração de referência quinquidiária (Eto) estimada pelo modelo Penman-Monteith versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1

Figura 16 - Evapotranspiração de referência quinquidiária (Eto) medida pelo lisímetro de drenagem versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1

Figura 17 - Evapotranspiração de referência quinquidiária (Eto) medida pelo lisímetro com lençol versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1

Figura 18 - Evapotranspiração de referência quinquidiária (Eto) estimada pelo tanque classe "A" versus a medida pelo lisímetro de pesagem (PADRÃO) em relação à reta 1:1

4.3. Efeito das variáveis meteorológicas na evapotranspiração

Os resultados das regressões lineares múltiplas entre as variáveis (valores de Eto diários medidos e estimados) contra as variáveis meteorológicas (valores observados no período), são apresentados na tabela (06).

Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) são significativos somente para as duas primeiras regressões. Ou seja, estas explicam uma proporção alta na variação da variável independente.

Tabela 6 - Resultados das regressões lineares múltiplas entre os valores diários de Eto medidos pelos lisímetros e estimados pelo modelo de Penman-Monteith e pelo método do tanque classe "A" contra as três variáveis meteorológicas (Umidade relativa do ar (%) = X1, Velocidade média do vento (m.s^{-1}) = X2, e Radiação líquida ($\text{kJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) = X3), medidas durante o período de 21/02/96 a 01/04/1996.

Var. independente	Termo constante	Coeficientes de regressão			R^2
		X1(UR)	X2(U)	X3(Rn)	
Lis. de pesagem	2.48728	-0.0356 (-1.709)	0.0807 (0.334)	0.0003 (7.466)**	0.79
Penman-Monteith	3.771341	-0.0390 (-23.782)**	-0.0053 (0.208)	0.0002 (80.567)**	0.99
Lis. de drenagem	5.7397	-0.0234 (-0.502)	-1.0456 (-1.926)	0.0001 (1.410)	0.19
Lis. com lençol	11.699	-0.0796 (-1.732)	-1.0745 (-2.013)*	0.00001 (0.196)	0.19
EtoCA	19.934	-0.16352 (-2.332)	-1.0448 (-1.284)	-0.000208 (-1.450)	0.13

^A Os valores entre parênteses são os testes t . Os valores significativos destes testes a 5% e 1% estão representados com 1 e 2 asteriscos, respectivamente.

Os valores de R^2 para o lisímetro de drenagem, lisímetro com lençol e tanque classe “A”, não foram significativos. Isto deve-se ao fato da pouca sensibilidade destes dispositivos em medir e estimar a evapotranspiração ao nível diário, principalmente se ocorrer chuvas durante o período.

Como pode ser observado na Tabela 6, na primeira regressão, tendo como variável independente o lisímetro de pesagem, os correspondentes testes t , rejeitam a hipótese de nulidade apenas para a radiação líquida, a um nível de significância de 1%. Indicando neste caso, a importância da radiação líquida como um dos fatores meteorológicos que mais afetam o processo físico da evapotranspiração.

Na segunda regressão, apresentando como variável independente o modelo de Penman-Monteith, os valores dos correspondentes testes t rejeitam a hipótese da nulidade dos parâmetros, para as variáveis independentes (umidade relativa e radiação líquida), ao nível de significância de 1%. Isto pode ser explicado pelo fato, de que o modelo de Penman-Monteith representa muito bem o processo físico da evapotranspiração, utilizando essas variáveis meteorológicas em sua equação de estimativa.

Para as três últimas regressões não foram observados resultados estatísticos satisfatórios. Com exceção da quarta regressão, onde rejeitou-se a hipótese da nulidade apenas para a velocidade do vento média, ao nível de 5%. Não obstante, esta variável contribui muito pouco ($R^2 = 0.19$), para a variação total do modelo de regressão múltipla.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho, suportam as seguintes conclusões:

1 - As mensurações diárias de evapotranspiração de referência (E_{to}) medida pelo lisímetro de pesagem, apresentou uma boa concordância com os valores diários estimados pelo modelo de Penman-Monteith. O lisímetro de pesagem possui capacidade de realizar mensurações num espaço de tempo inferior a 1 (uma) hora, informação esta de grande importância, quando pretende-se trabalhar com medidas de evapotranspiração em tempo real.

2 - As estimativas de evapotranspiração utilizando o lisímetro de drenagem, lisímetro com lençol freático, e o tanque classe "A" apresentaram resultados inconsistentes em base diária e quinquidiária de cálculo.

4 - O modelo de Penman-Monteith, apresentou alta correlação com o lisímetro de pesagem. Podendo ser utilizado como método de avaliação da performance de outros modelos de estimativa de evapotranspiração, ou mesmo de dispositivos de determinação direta da mesma.

5 - Os valores diários de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de drenagem e pelo lisímetro com lençol freático, e estimados pelo tanque classe "A", não apresentaram correlação significativa com as variáveis meteorológicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALLEN, R. G.; FISHER, D. K. Low-cost electronic weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, v.33, n.6, p. 1823-33, 1990.

ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; JENSEN, M.E. Environments requeriments of lysimeters. In: ALLEN, R.G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W.O.; WALTER, I. A.; JENSEN, M. E. **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: ASCE, 1991. p. 170-81.

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E. ; WRIGTH, J. L. ; BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**., v. 81, p. 650-62, 1989.

ASSIS, F. N. O uso do evapotranspirômetro no estudo de algumas relações entre a evapotranspiração medida e estimada. Piracicaba, 1978. 73p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

ASSIS, F. N.; VILLA NOVA, N. A. Adaptação do evapotranspirômetro de Thorntwaite para registro da evapotranspiração. **Agros**, v.15, n. 1, p. 1-7, 1980.

- BARBIERI, V. Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar. Piracicaba, 1981. 82p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. 95p. (IPAGRO. Boletim Técnico, 7).
- BLACK, T. A.; THURTELL, G.W.; TANNER, C. B. Hydraulic load-cell lysimeter, construction, calibration and tests. **Soil Science Society of American Proceedings**, n.32, p. 623-9, 1968.
- BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. D. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data**. Washington: USDA, 1950. 48p.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1982. 299p. (Environmental Fluid Mechanics, 1).
- BURMAN, R. D. ; NIXON, P. R. ; WRIGTH, J. L. ; PRUIT, W. O. Water requirements. In: JENSEN, M. E., ed. **Design and operation of farm irrigation system**. St. Joseph: ASAE, 1983. cap. 6, p. 189-232.
- CAMARGO, A.P. **Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial do estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1966. 56p. (IAC. Circular Técnica, 161).

- CAMPBELL, E. C.; TANNER, B. D. Structered design in automated weather stations. In: WEISS, A. Computer Techniques and Meteorological Data Applied to Problems of Agriculture and Forestry: a workshop. Anaheim. p.5-18, 1981.
- COSTA, M. B. Determinação do consumo de água na cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) através de lisímetro e suas interrelações climáticas. Piracicaba, 1989. 79p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).
- DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Guidlines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1975. 179p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).
- GANGOPADHYAYA, M.; HARBECK, G. E.; NORDENSON, T. J.; OMAR, M. H.; ORYVAEV, V. A. **Measurements and estimation of evaporation and evapotranspiration**. Genova: World Meteorological Organization, 1966. 121p. (WMO. Technical Note, 83).
- HARGREAVES, G. H. **Water requirements manual for irrigated crop, and rainfed agriculture**. Logan: Utah State University, 1977. 41p.
- HATFIELD, J. L. Research priorities in ET: evolving methods. **Transactions of the ASAE**, v.31, n.2, p. 491-5, 1988.

- HOWELL, T. A.; McCORMICK, R. L.; PHENE, C. J. Design and installation of large weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, v.35, n.4, p. 106-17, 1985.
- HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M.E. History of lysimeter desing and use for evapotranspiration. In: ALLEN, R.G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W.O.; WALTER, I. A.; JENSEN, M. E. **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: ASCE, 1991. p. 1-9.
- HOWELL, T. A.; MEEK, D. W.; PHENE, C. J.; DAVIS, K. R.; McCORMICK, R. L. Automated weather data collection for research on irrigation scheduling. **Transactions of the ASAE**, v.27, n.2, p. 386-91, 1984.
- HUBBARD, K. G.; KLOCKE, N. L. Climate and Irrigation in Nebraska. In: CONFERENCE ON CLIMATE AND WATER MANEGEMENT: A CRITICAL ERA AND CONFERENCE ON THE HUMAN CONSEQUENCES OF 1985'S CLIMATE, Asheville, 1985. **Technical note**. Boston: American Meteoroligical Society, 1986. p. 4-7.
- HUBBARD, K. G.; ROSENBERG, N. J.; NIELSEN, D. C. Automated weather data network for Agriculture. **Journal of Water Resource Planning Management**, v.109, n.3, p.213-22, 1982.
- JENSEN, M. E. **Consumptive of water and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1973. 215p.
- JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of Irrigation an Drainage Engineering**, v. 89, p. 15-41, 1963.

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

LEMON, E. R.; GLASER, A. H.; SATTERWHITE, L. E. Some aspects of the relationship of soil, plant and meteorological factors to evapotranspiration. **Soil Science Society of American Proceedings**. v.21, n.5, p. 464-8, 1957.

LUCHIARI Jr., A. Measurements and predictions of evapotranspiration rates from irrigated wheat in the Cerrado region of central Brazil. Ithaca, 1988. 171p. Tese (Phd) - Cornell University.

LUCHIARI Jr., A.; RIHA, S. J. Bulk surface resistance and its effect on evapotranspiration rates in irrigated wheat. **Agronomy Journal**, v. 83, p. 888 - 95, 1991.

MARQUES, V. S. Sobre as limitações dos evapotranspirômetros. São Carlos, 1972. 56p. Dissertação(Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MILLAR, B. D. Effect of local advection on evaporation and plant water status. **Australian Journal of Agriculture**, v. 25, p. 97-106, 1964.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In: SYMPOSIUM OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, London, 19. ,Swansea, 1964. Cambridge: Cambridge University Press, 1965. p. 205-34.

MONTEITH, J. L. The development and extension of Penman's evaporation formula. In: HILLEL, D., ed. **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. cap. 10, p. 247-53.

MONTEITH, J. L. Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, Chicago, 1985. **Proceedings**. St. Joseph: ASAE, 1985. p. 4-12.

MOURA, M. C. F. L. Determinação do consumo de água para a cultura do milho (*Zea mays L.*) pelo método lisimétrico. Piracicaba, 1990. 94p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

NORMAN, J. M.; CAMPBELL, G. Application of a plant-environment model to problems in irrigation. In: HILLEL, D. **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, 1983. v. 2, p. 155-88.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2. ed. London: Routledge, 1992. 435p.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.

PELTON, W. L.; KING, K. M.; TANNER, C. B. An evaluation of the Thornthwaite and mean temperature methods for determining potential evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v.52, n.7, p. 387-95, 1960.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings Royal Society of London. Serie A**, v. 193, p. 120-45, 1948.

PENMAN, H. L. Evaporation: Introduction survey. **Netherlands Journal of Agricultural Science**. v.4, n. 1, p.9- 29, 1956.

- PEREIRA, A. R. Análise do modelo de Priestley e Taylor para estimativa da evapotranspiração potencial. Piracicaba, 1990. 68p. Tese (Livre-docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- PEREIRA, A. R. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1992. 51p.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; PEREIRA, A. S.; BARBIERI, V. A model for the class A pan coefficient. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 76, p. 75-88, 1995.
- PERES, J. G. Avaliação do modelo de Penman-Monteith, padrão FAO, para estimar a evapotranspiração de referência nas condições do estado de São Paulo. Piracicaba, 1994. 116p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, p. 81-2, 1972.
- PRUITT, W. O.; ANGUS, D. E. Large weighing lysimeter for measuring evapotranspiration. **Transactions of the ASAE**, v.3, n.2, p. 13-5, 1960.
- RAIJ, B. van.; SILVA, N.M. da; BATAGLIA, O. C. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1985. 170p. (IAC. Boletim Técnico, 100).
- RITCHIE, J. T.; BURNETT, E. A precision weighing lysimeter for row crop water use studies. **Agronomy Journal**, v. 60, p. 545-9, 1968.

- ROSENBERG, N. J.; VERMA, S. B. Extreme evapotranspiration by irrigated alfafa: A consequence of the 1976 Midwestern Drought. **Journal of Applied Meteorology**, v.17, p. 934-41, 1978.
- SEDIYMA, G. C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1987. 143p.
- SMITH, M., ed. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for predictions of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45p.
- STANHILL, G. A comparasion of methods of calculatiing potential evapotranspiration from climatic data. **Israel Journal Agriculture Resource**, v.11, p. 159-71, 1961.
- TANNER, C. B.; LEMON, E. R. Radiant energy utilized in evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v. 54, n.3, p. 207-12, 1962.
- THOM, A. S. Momentum, mass and heat exchange pf plant communités. In: MONTEITH, J. L. , ed. **Vegetation and the atmosphere**. London: Academic Press, 1975. v. 1, cap. 3, p. 57-109.
- THOM, A. S.; OLIVER, H. R. On Penman's equation for estimating regional evaporation. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, p. 345-57, 1977.
- THORNTHWAITE, G. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographycal Review.**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

VAN BAVEL, C. H. M. Lysimetric measurements of evapotranspiration in the Eastern United States. **Soil Science Society of American Proceedings**, v. 25, p. 138-41, 1961.

VILLA NOVA, N. A. **Principais métodos de estimativa de aplicação de água de irrigação**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1987. 22p.

VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K. Evaporação e evapotranspiração. In: RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P. C.; CLEARY, R. W. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH, 1989. cap. 3, p. 145-97. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 2)

VILLA NOVA, N. A.; SALATI, E.; MATSUI, E. Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica. **Acta Amazonica**, v. 6, n. 2, p. 215-58, 1976.

WILLMOTT, C. J. ; WICKS, D. E. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. **Physical geography**, v. 1, p. 59-73, 1980.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical geography**, v. 2, n. 2, p. 184-94, 1981

APÊNDICE

Tabela 1 - Planilha de custos da construção dos dispositivos lisimétricos.⁵**LISÍMETRO DE DRENAGEM**

DESCRIÇÃO	UNIDADE	PREÇO	QUANTIDADE
Caixa de água (500 l)	Peça	62,00	01
Caixa de água (10 l)	Peça	18,00	01
Mangueira plástica	Metro	1,00	10
Registro de gaveta	Peça	9,50	01
Tubo PVC (32mm)	Metro	1,80	15
Adaptador (3 /4"x 32mm)	Peça	0,38	10
Braçadeira de rosca sem fim	Peça	0,93	05
Cotovelo (32mm)	Peça	0,52	05
Adapt. mang. (3 /4"x1 /2")	Peça	0,30	05
TÊ (32mm)	Peça	0,68	01
Caps (32mm)	Peça	0,42	03
Tinta esmalte (1 litro)	Peça	7,50	01
Tinta Epoxi(1 litro)	Peça	16,00	01
TOTAL			164,49

LISÍMETRO COM LENÇOL FREÁTICO DE NÍVEL CONSTANTE

DESCRIÇÃO	UNIDADE	PREÇO	QUANTIDADE
Tanque de aço(60 l)	Peça	45,00	01
Caixa de água (500 l)	Peça	62,00	01
Caixa galvanizada(15 l)	Peça	25,00	01
Mangueira cristal	Metro	1,00	05
Mangueira plástica	Metro	1,00	15
Bóia para caixa de água	Peça	2,34	01
Registro de gaveta	Peça	9,50	02
Tubo PVC (32mm)	Metro	1,80	15
Adaptador (3 /4"x 32mm)	Peça	0,38	10
Braçadeira de rosca sem fim	Peça	0,93	10
Cotovelo (32mm)	Peça	0,52	05
Adapt. mang. (3 /4"x1 /2")	Peça	0,30	10
TÊ (32mm)	Peça	0,68	01
Caps (32mm)	Peça	0,42	03
Tinta esmalte (1 litro)	Peça	7,50	01
Tinta Epoxi(1 litro)	Peça	16,00	01
TOTAL			244,48

LISÍMETRO DE PESAGEM

DESCRIÇÃO	UNIDADE	PREÇO	QUANTIDADE
Caixa de água (500 l)	Peça	62,00	01
Datalogger (CR-10)	Peça	2.800,00	01
Célula de carga	Peça	445,00	03
Caixa externa/compens. naval	Peça	115,00	01
Placa de compens. naval	Peça	80,00	01
Tubo PVC (50mm)	Peça	4,20	
Tinta esmalte (1 litro)	Peça	7,50	02
Tinta Epoxi(1 litro)	Peça	16,00	02
TOTAL			4502,20

⁵ Valores em Reais - Fevereiro/1996

Tabela 2 - Valores do coeficiente de conversão da evaporação do tanque classe A (K_p), para a estimativa da evapotranspiração de referência (E_{to}) (DOORENBOS & KASSAN, 1979).

VENTO (km/dia)	TANQUE CULTIVADO EM ÁREA CULTIVADA COM VEGETAÇÃO BAIXA			
	Tamanho da bordadura (grama)m	Umidade Relativa Média (%)		
		Baixa < 40	Média 40-70	Alta >70
Leve < 175	1	0.55	0.65	0.75
	10	0.65	0.75	0.85
	100	0.70	0.80	0.85
	1000	0.75	0.85	0.85
Moderado 175 -425	1	0.50	0.60	0.65
	10	0.60	0.70	0.75
	100	0.65	0.75	0.80
	1000	0.70	0.75	0.80
Forte 425 -700	1	0.45	0.50	0.60
	10	0.55	0.60	0.65
	100	0.60	0.65	0.70
	1000	0.65	0.70	0.75
Muito forte > 700	1	0.40	0.45	0.50
	10	0.45	0.55	0.60
	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.55	0.60	0.85

Quadro 1 - Programa de leitura do sinal da célula de carga e armazenamento de dados do lisímetro de pesagem (DATALOGGER - CR10).

P6	FULL BRIDGE
01:1	REP
02:2	7.5 mV SLOW RANGE
03:1	IN CHAN
04:1	EXCITE ALL REPS W/EXCHAN
05:1000	mV EXCITATION
06:1	LOC [CEL. 1]
07: 301.69	MULT
08: 0	OFFSET
P6	FULL BRIDGE
01:1	REP
02:2	7.5 mV SLOW RANGE
03:2	IN CHAN
04:1	EXCITE ALL REPS W/EXCHAN
05:1000	mV EXCITATION
06:2	LOC [CEL. 2]
07: 301.69	MULT
08: 0	OFFSET
P6	FULL BRIDGE
01:1	REP
02:2	7.5 mV SLOW RANGE
03:3	IN CHAN
04:1	EXCITE ALL REPS W/EXCHAN
05:1000	mV EXCITATION
06:3	LOC [CEL. 3]
07: 301.69	MULT
08: 0	OFFSET
SOMA DOS VALORES DAS CÉLULAS DE CARGA	
06: P33	$Z = X + Y$
01:1	X LOC CEL. 1
02:2	Y LOC CEL 2
03:4	Z LOC [SOMA]
07: P33	Z: X + Y
01:4	X LOC SOMA
02:3	Y LOC CEL 3
03:4	Z LOC [SOMA]

Tabela 3 - Valores de evapotranspiração de referência (Eto) medidos e estimados durante o período de observação (21/02/96 a 01/04/96)

Data	Dia	Lis. pesagem (mm)	PMFAO (mm)	LIS.drenagem (mm)	Lis. com Lençol (mm)	EtoCA (mm)
21-Feb-96	52	3.07	4.59	5.43	6.07	4.10
22-Feb-96	53	3.83	4.55	5.32	5.30	4.11
23-Feb-96	54	3.41	4.16	5.92	5.68	5.55
24-Feb-96	55	2.25	2.52	5.27	4.49	6.08
25-Feb-96	56	3.23	3.32	4.08	3.19	2.45
26-Feb-96	57	6.58	5.32	5.02	4.11	0.77
27-Feb-96	58	2.61	2.98	5.62	5.91	0.36
28-Feb-96	59	1.62	2.98	4.44	3.80	0.11
29-Feb-96	60	0.11	2.28	1.54	3.76	0.00
01-Mar-96	61	1.17	2.14	0.17	0.65	0.02
02-Mar-96	62	3.03	3.38	0.49	1.57	0.05
03-Mar-96	63	2.72	2.83	2.30	1.34	0.25
04-Mar-96	64	2.34	2.17	3.77	2.88	4.07
05-Mar-96	65	4.71	4.80	2.81	2.42	2.22
06-Mar-96	66	3.70	3.84	4.24	4.38	0.83
07-Mar-96	67	0.81	1.17	4.19	3.65	2.20
08-Mar-96	68	1.68	2.11	3.03	1.54	1.25
09-Mar-96	69	1.97	2.51	2.27	2.07	0.92
10-Mar-96	70	4.25	3.96	2.65	2.46	0.57
11-Mar-96	71	3.57	3.90	3.92	3.95	1.04
12-Mar-96	72	1.98	2.30	3.72	3.30	4.37
13-Mar-96	73	3.82	3.86	2.85	2.15	0.32
14-Mar-96	74	2.80	3.12	2.18	3.38	0.43
15-Mar-96	75	2.32	2.46	3.21	3.49	0.43
16-Mar-96	76	3.65	4.12	3.79	1.54	0.54
17-Mar-96	77	2.49	2.63	2.72	3.46	0.12
18-Mar-96	78	3.95	3.99	3.08	2.88	0.48
19-Mar-96	79	2.80	3.02	3.66	2.73	0.42
20-Mar-96	80	2.65	2.45	3.45	3.30	2.99
21-Mar-96	81	2.87	3.09	2.66	2.23	4.71
22-Mar-96	82	3.17	3.34	3.12	2.92	4.76
23-Mar-96	83	2.49	3.35	3.28	2.88	2.38
24-Mar-96	84	3.42	3.94	4.39	2.80	0.18
25-Mar-96	85	4.20	4.44	2.54	3.31	1.77
26-Mar-96	86	4.17	4.54	3.90	3.92	4.09
27-Mar-96	87	3.71	3.86	4.66	4.65	3.11
28-Mar-96	88	3.08	3.44	4.48	4.38	0.90
29-Mar-96	89	3.67	3.81	3.80	2.76	1.99
30-Mar-96	90	3.91	4.13	4.08	4.15	2.81
31-Mar-96	91	3.67	3.99	5.02	4.80	0.87
01-Apr-96	92	3.41	3.77	4.35	4.53	5.75
TOTAL		124.87	139.14	147.42	138.76	80.33

Tabela 4 - Valores das variáveis meteorológicas (temperatura média, umidade relativa do ar, velocidade média do vento, radiação líquida e precipitação no período de observação (21/02/96 a 01/04/96))

Data	Dia do ano	temp. med graus °C	UR med %	Vento med m/s	Rad. líq. (kJ m-2 d-1)	Precip. mm
21-Feb-96	52	25,05	82,10	1,57	14736,15	0,20
22-Feb-96	53	25,57	77,10	1,71	13760,93	0,00
23-Feb-96	54	25,38	78,60	1,41	12729,86	0,00
24-Feb-96	55	24,66	88,80	1,34	8040,07	5,10
25-Feb-96	56	24,08	89,40	1,28	11129,43	16,80
26-Feb-96	57	25,24	84,80	1,58	17696,59	15,40
27-Feb-96	58	23,29	92,60	1,56	10441,18	18,60
28-Feb-96	59	23,68	90,30	1,66	10104,12	18,60
29-Feb-96	60	23,48	93,90	1,71	7942,43	33,10
01-Mar-96	61	24,03	89,70	1,50	6797,09	0,80
02-Mar-96	62	24,44	82,00	2,06	10177,92	0,10
03-Mar-96	63	22,41	90,90	1,46	9831,46	4,00
04-Mar-96	64	21,77	94,80	1,24	7807,10	12,60
05-Mar-96	65	24,12	83,50	1,70	16010,78	0,10
06-Mar-96	66	24,38	85,00	1,60	12493,44	11,40
07-Mar-96	67	22,36	98,70	1,63	4386,62	19,60
08-Mar-96	68	22,56	96,60	1,48	7727,88	22,80
09-Mar-96	69	23,13	91,30	1,89	8582,55	4,60
10-Mar-96	70	22,49	76,90	2,98	11719,30	0,00
11-Mar-96	71	22,80	75,00	1,99	11643,26	0,00
12-Mar-96	72	21,82	89,70	1,53	7788,10	24,40
13-Mar-96	73	23,12	87,20	1,61	13230,43	0,10
14-Mar-96	74	23,59	88,40	1,37	10428,48	0,10
15-Mar-96	75	23,49	90,70	1,19	8220,96	16,30
16-Mar-96	76	23,67	86,90	1,86	14052,96	13,20
17-Mar-96	77	23,22	89,70	1,31	8779,97	0,30
18-Mar-96	78	2,49	82,70	1,14	12750,05	0,90
19-Mar-96	79	23,00	91,40	1,00	10399,97	3,10
20-Mar-96	80	23,54	87,90	1,64	7798,46	1,50
21-Mar-96	81	23,53	84,40	2,20	9620,64	0,00
22-Mar-96	82	23,57	81,70	1,82	10306,66	0,00
23-Mar-96	83	23,42	89,40	1,10	11382,34	7,10
24-Mar-96	84	24,30	85,00	1,40	12934,94	0,00
25-Mar-96	85	24,42	81,30	1,60	14265,50	0,00
26-Mar-96	86	25,37	79,20	1,40	14183,42	0,00
27-Mar-96	87	25,28	83,50	1,91	12092,54	4,60
28-Mar-96	88	24,54	84,90	1,21	11057,47	0,00
29-Mar-96	89	25,06	83,30	1,44	12035,52	2,40
30-Mar-96	90	25,97	78,30	1,30	12514,18	0,00
31-Mar-96	91	25,97	77,90	1,11	12111,55	0,00
01-Apr-96	92	25,45	81,90	0,96	11842,85	0,30
Valores máximos		25,97	98,70	2,98		33,10
Valores médios		23,95	86,03	1,55		6,30
Valores mínimos		21,77	75,00	0,96		0,00

Figura 1 - Comportamento das variáveis meteorológicas (a: Radiação líquida, b: precipitação, c: Umidade relativa do ar e d: velocidade média do vento) no período de observação (21/02/96 a 01/04/96)