

## SISTEMAS AUTOMÁTICOS NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA<sup>1</sup>

**Benito Moreira de AZEVEDO<sup>2</sup>**  
**Marcos Vinícius FOLEGATTI<sup>3</sup>**  
**Thales Vinícius de Araújo VIANA<sup>2</sup>**  
**Luiz Roberto ANGELOCCI<sup>3</sup>**  
**Nilson Augusto VILLA NOVA<sup>3</sup>**

**RESUMO:** Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de comparar as estimativas da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) realizada com o emprego de um lisímetro de pesagem e com as metodologias de Penman-Monteith, parametrizada pela FAO/1991 e da razão de Bowen. Os dados analisados foram obtidos do dia 1<sup>o</sup> de novembro ao dia 10 de dezembro de 1996, em Piracicaba (SP). Os valores de ET<sub>o</sub> estimados pelas três metodologias adotadas foram comparados com finalidade de estudar a aderência dos resultados alcançados. Analisando-se os resultados alcançados para ET<sub>o</sub> na escala horária, as maiores correlações foram obtidas quando se comparou a ET<sub>o</sub> estimada pela metodologia FAO/1991 com a estimativa realizada com o método da razão de Bowen, obtendo-se valores de r<sup>2</sup> no intervalo de 0,94 a 0,97, a média alcançada foi de 0,96. O id, também, apresentou excelentes resultados, sendo seu valor médio igual a 0,98, aproximadamente.

**TERMOS PARA INDEXAÇÃO:** Lisímetro, Razão de Bowen, Penman-Monteith.

### REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATED BY AUTOMATICS SYSTEMS

**ABSTRACT:** The objective of this work was to compare the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) determined by a weighing lysimeter, Penman-Monteith model suggested by FAO/1991 and the Bowen ratio. Data analyzed were collected in the period from November 1 to December 10 of 1996 at Piracicaba, Sao Paulo, Brazil, using an automatic Bowen ratio system, weather station and a weighing lysimeter. The values estimated by these three systems were compared at hourly basis in order to find their correlation at the scale proposed. The higher coefficient of determination were observed when the ET<sub>o</sub> estimated by the FAO/1991 methodology was compared with the Bowen ratio measurements (r<sup>2</sup> = 0,96). The average id value was 0,98.

**INDEX TERMS:** Lysimeter, Bowen Ratio, Penman-Monteith.

<sup>1</sup> Aprovado para publicação em 17.08.2004

<sup>2</sup> Engenheiro Agrônomo, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará – DENA/UFC, Dr. em Irrigação e Drenagem, Bolsista CAPES/PICDT durante a pesquisa. Av. Mister Hull, Campus do Pici, Fortaleza (CE), 60.356-000.

<sup>3</sup> Engenheiro Agrônomo, Professor Livre Docente da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo – ESALQ/USP, Dr. em Irrigação e Drenagem. Piracicaba (SP), 13400-000.

## 1 INTRODUÇÃO

A estimativa diária do consumo de água pelas culturas pode ser obtida baseando-se em mensurações relativamente simples e realizáveis em campo, e as estimativas meteorológicas do fluxo de água na atmosfera podem prover facilmente valores representativos da evapotranspiração.

Bowen (1926) assumiu que os transportes de calor sensível e de vapor d'água são similares, concluindo que a razão entre os coeficientes de difusividade turbulenta de calor sensível ( $K_h$ ) e latente ( $K_e$ ) é igual à unidade. Ele relacionou os fluxos de calor sensível ( $H$ ) e calor latente ( $LE$ ) da maneira como pode ser visto na equação (01). Esta relação tornou-se conhecida como razão de Bowen ( $\beta$ ), e tem sido largamente utilizada na estimativa da evapotranspiração.

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (01)$$

A estimativa dos fluxos turbulentos de calor latente ( $LE$ ,  $W.m^{-2}$ ) e de calor sensível ( $H$ ,  $W.m^{-2}$ ), sobre uma superfície pode ser realizada, caso se conheça  $R_n$ =saldo de radiação ( $W.m^{-2}$ );  $G$ =fluxo de calor sensível no solo ( $W.m^{-2}$ );  $\Delta T'$  = diferença entre as temperaturas ( $C$ ) indicadas nos termômetros de bulbos úmidos de dois níveis ( $T'_2 - T'_1$ );  $\Delta T$  = diferença entre as leituras dos termômetros ( $C$ ) de dois níveis ( $T_2 - T_1$ );  $S$  = tangente à curva de tensão de saturação de vapor d'água no ponto de temperatura média úmida, i.e., o valor médio de  $T'_2$  e  $T'_1$ ;  $\gamma = (c_p.P/0,622.\lambda)$ , é o coeficiente

psicrométrico ( $kPa .^{\circ}C^{-1}$ )  $P$  = pressão atmosférica local ( $kPa$ );  $c_p$  = calor específico do ar seco a pressão constante ( $1.005 J.kg^{-1}.K^{-1}$ );  $\lambda$  = calor latente de evaporação ( $2,45 MJ.kg^{-1}$ );  $\rho$  = massa específica do ar seco ( $1,26 kg.m^{-3}$ ). É comum e aceito admitir-se que, durante o tempo de medida,  $\lambda$  e  $\rho$  permanecem constantes numa pequena camada de ar estudada.

Villa Nova (1973) e Pereira, Villa Nova e Sedyama (1997) apresentam a equação (02) que permite a estimativa direta de  $\beta$  com base no gradiente vertical da depressão psicrométrica ( $T'/\Delta T$ ), corrigida pelo fator de ponderação  $((S+\gamma)/\gamma)$ . Isto permite, de forma segura e rápida, estimar o fluxo de calor latente com base no balanço de energia, como apresentada na equação (03).

$$\beta = [((S + \gamma) / \gamma) . (\Delta T' / \Delta T) - 1]^{-1} \quad (02)$$

$$LE = (R_n - G) / (1 + \beta) \quad (03)$$

Os métodos de estimativa da evapotranspiração que se baseiam no balanço de energia são os mais confiáveis. A metodologia consiste em determinar o balanço de energia sobre a superfície, depois se procura avaliar a fração da energia que é utilizada no processo de evapotranspiração. Villa Nova (1973) e Pereira (1996) consideram que eles podem ser calculados em função dos gradientes médios da temperatura do ar ( $T$ ), umidade específica do ar ( $q$ ) e velocidade de vento ( $u$ ). O valor de  $\beta$  pode ser obtido, considerando o coeficiente de transporte turbulento de calor latente igual ao coeficiente de transporte turbulento de calor sensível:

$$\beta = c_p \frac{\frac{\delta T}{\delta z}}{\lambda \cdot \frac{\delta q}{\delta z}} \quad (04)$$

Considerando a umidade específica ( $q$ ) igual a  $0,622 \cdot e_a / P$ , a equação (04) resulta na seguinte equação:

$$\beta = \gamma \cdot \frac{\delta T}{\delta e_a} \quad (05)$$

Em que:  $T$  = temperatura do ar;  $e_a$  = pressão parcial ou atual de vapor d'água.

Em situações de campo, é comum se medir a temperatura do ar e a pressão de vapor d'água em apenas duas alturas acima da superfície estudada. Desta maneira,  $\delta T$  e  $\delta e_a$  são igualados as diferenças  $\Delta T$  e  $\Delta e_a$ , respectivamente.

Smith (1991) apresenta os objetivos e procedimentos propostos após ampla revisão realizada pela FAO. É uma proposta que demandará tempo e trabalho para ser alcançada, devendo ser implementada em duas etapas. Na primeira, a grande inovação será a utilização do modelo de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) como padrão na estimativa da evapotranspiração de referência ( $E_{To}$ ), mas a evapotranspiração das culturas continuaria sendo estimada por meio de coeficientes de cultura e da  $E_{To}$ . Na segunda etapa, a evapotranspiração das culturas passaria a ser estimada diretamente pelo método de Penman-Monteith, com o emprego de valores adequados para a

resistência aerodinâmica e do dossel de cada cultura estudada. Alguns autores, como Ben-Asher et al. (1989), consideram que o modelo de Penman-Monteith apresentará pouco valor prático, caso a resistência da cobertura vegetal não venha a ser parametrizada a partir de propriedades conhecidas e de fácil mensuração da planta, do solo e da atmosfera.

Devido às dificuldades operacionais, este modelo tem sido utilizado como uma ferramenta para estimar a resistência da cobertura vegetal, quando a evapotranspiração é conhecida. O proposto pelo autor seria o caminho inverso do que vem sendo realizado por diversos pesquisadores (MONTEITH, 1985).

Quando são estabelecidos valores adequados para a resistência da cobertura vegetal, o modelo de Penman-Monteith tem se mostrado superior aos demais métodos combinados na estimativa da evapotranspiração, para uma ampla variedade de climas, localidades e culturas (ALLEN et al., 1989).

Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982) consideram que o lisímetro permite realizar a estimativa, tanto da evaporação de água em solo nu como da evapotranspiração das culturas em seus diversos estágios de desenvolvimento. As estimativas lisimétricas apresentam algumas imperfeições, causadas, em parte, pelas condições artificiais do solo no lisímetro. Outros fatores, também, podem influir significativamente, como: a descontinuidade entre a vegetação

do lisímetro e a da área circundante, a representatividade das medidas obtidas, devido à reduzida dimensão do lisímetro comumente utilizado e o regime hídrico diferenciado, muitas vezes encontrado, entre o lisímetro e a área tampão.

A estimativa da evapotranspiração, tanto potencial, como real ou da cultura, quanto de referência, pode ser extremamente complexa. O evapotranspirômetro quando operado adequadamente é um instrumento que fornece valores seguros de evapotranspiração. Grande cuidado deve ser tomado na operação do instrumento, reconstituição do solo no tanque, a vegetação, manejo e práticas culturais. As irrigações devem ser mantidas nos tanques, de forma que se garanta observações que possibilitem comparações entre diferentes instalações (THORNTHWAITE; MATHER, 1955).

O índice de concordância ( $id$ ) proposto por Willmott (1981) pode ser utilizado na avaliação da concordância de estudos. O valor de  $id$  pode variar de 0, para uma discordância total dos métodos avaliados, até 1, nesse caso para uma concordância plena. No cálculo de  $id$ , foi utilizada a equação (06), apresentada a seguir:

$$id = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (06)$$

Em que:  $P_i$  = evapotranspiração estimada (mm);  $O_i$  = evapotranspiração observada (mm);  $O$  = evapotranspiração média observada (mm).

Este trabalho tem como objetivos estimar a evapotranspiração de referência ( $ETo$ ), em superfície vegetada com grama (*Paspalum notatum flügge*), fazendo-se uso de três metodologias: a da razão de Bowen ( $\beta$ ); a de Penman-Monteith, parametrizado pela Food and Agriculture Organization (FAO/1991), e a do lisímetro de pesagem, comparando estatisticamente os resultados obtidos, com finalidade de se aferir a aderência entre as metodologias.

Viana (2000) não encontrou boa correlação, empregando o coeficiente de determinação da regressão linear, quando comparou a metodologia da razão de Bowen com a de Penman-Monteith parametrizada pela FAO, em ambiente protegido. O autor acredita que o funcionamento do equipamento da razão de Bowen não funcionou adequadamente em ambiente protegido devido à baixa turbulência apresentada nesse tipo de ambiente.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em uma área experimental pertencente à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-USP, situada no município de Piracicaba, estado de São Paulo, com latitude de 22° 42' S, longitude 47° 38' W e altitude de 530 metros, aproximadamente, (SÃO PAULO, 1979).

Segundo a classificação climática de Köppen, Piracicaba possui clima do tipo Cwa, ou seja, subtropical úmido, com estiagem no inverno, temperatura média no

mês mais frio inferior a 18°C e no mês mais quente superior a 22°C. A temperatura média anual é de 21,1°C e a precipitação média anual é de, aproximadamente, 1250 mm (OMETTO, 1989).

Os dados processados e analisados neste trabalho foram os obtidos do dia 1º de novembro ao dia 10 de dezembro de 1996, utilizando-se de uma estação meteorológica automática para coleta de dados climáticos, de um lisímetro de pesagem com princípio de célula de carga e de um sistema automático para estimar a razão de Bowen. A área experimental foi vegetada com grama batatais (*Paspalum notatum flügge*).

Os equipamentos da área experimental foram dispostos sobre uma área gramada, com, aproximadamente, 35 m de largura por 90 m de comprimento, com objetivo de minimizar as decorrências do efeito oásis. A área cultivada recebeu o mesmo manejo, exceto no que se referiu ao método de aplicação de água, ou seja, o lisímetro recebeu água através de um recipiente de volume aferido e a área tampão através de um sistema de gotejamento enterrado. Durante todo o período de coleta de dados, a grama foi mantida com altura de 0,12m  $\pm$  0,03m e isenta de competição com plantas daninhas e pragas.

O equipamento da razão de Bowen foi calibrado para fornecer valores médios em intervalos de 20 minutos, de leituras realizadas a cada segundo, armazenados em um sistema de aquisição de dados

CR-21X(L) fabricado pela Campbell Scientific. Os principais dados obtidos com o equipamento são: saldo de radiação ( $R_n$ ); fluxo de calor no solo ( $G$ ); gradientes de temperatura ( $\Delta T$ ) e de tensão de vapor d'água do ar ( $\Delta e_a$ ) acima superfície. No cálculo do balanço de energia, os fluxos que chegam ao sistema são considerados positivos e os fluxos que saem do sistema, negativos.

Os braços metálicos, com as entradas de ar e termopares, foram instalados de maneira que o local de sucção do ar e os termopares permanecessem a uma distância vertical de 0,10 m e 1,50 m da superfície gramada. De posse dos valores de gradientes de temperatura ( $\Delta T$ ), de gradientes de tensão do vapor d'água do ar ( $\Delta e_a$ ) e do coeficiente psicrométrico para equipamento com ventilação forçada, efetuaram-se os cálculos para estimar o valor da razão de Bowen ( $\beta$ ), com o emprego da equação 05, para intervalos de tempo de 20 minutos.

Após a estimativa da razão de Bowen, e de posse dos valores do saldo de radiação ( $R_n$ ) e do fluxo de calor sensível no solo ( $G$ ), foi possível realizar a estimativa do calor latente de evaporação ( $LE$ ), através da equação (03) do balanço de energia. Finalmente, utilizando-se o valor de  $\beta$  e  $LE$ , calculou-se o fluxo de calor sensível ( $H$ ) com a equação 01. Então, com o valor de  $LE$  foi possível calcular o valor da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) para cada intervalo de tempo avaliado, em todo o período estudado.

O sistema de lisimetria de pesagem foi montado em laboratório, onde se testou o funcionamento do equipamento. Os procedimentos, explicações com maior riqueza de detalhes e a calibração do sistema em campo podem ser obtidos em Silva (1989), responsável pela construção e instalação do equipamento. Os testes indicaram que o equipamento estava funcionando adequadamente, tanto para decréscimos como para acréscimos de peso no sistema.

O lisímetro de pesagem foi constituído de um tanque de cimento amianto com profundidade de 0,65 m, comprimento de 1,20 m e largura de 0,85 m. No seu preenchimento foi utilizado solo de cada camada do perfil original, de tal forma que as condições naturais fossem obtidas com maior semelhança possível. Embora a estrutura do solo tenha sido deformada, a seqüência e profundidade dos horizontes originais foram mantidas. Tensiômetros, em número de dois, instalados a 0,15 e 0,30 m de profundidade, tinham finalidade de permitir o monitoramento da tensão da água no solo.

As informações climáticas foram obtidas com uma estação agrometeorológica automática. Com um sistema de aquisição de dados (modelo CR 10- Campbell Scientific). Registraram-se os dados de forma contínua, permitindo armazenar valores médios das informações a cada 30 minutos de leituras realizadas a cada segundo. Outro equipamento semelhante permitiu mensurar e armazenar o sinal das

células de carga do lisímetro, nos mesmos intervalos de tempo.

Como os dados da estação agrometeorológica e do lisímetro foram armazenados em períodos de 30 minutos e os do sistema da razão de Bowen, de 20 minutos, foram realizados cálculos de média e de integração de períodos para que os intervalos se igualassem, permitindo comparações entre as estimativas dos diferentes equipamentos. Então, procederam-se os cálculos para uniformizar os intervalos em 1 hora.

Para emprego do método de Penman-Monteith, pode-se utilizar a equação proposta por Monteith (1965), que pode ser expressa da seguinte maneira:

$$LE = \frac{S \cdot (R_n - G) + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \Delta e}{ra}}{S + \gamma \cdot \left(1 + \frac{rc}{ra}\right)} \quad (07)$$

Em que: LE=fluxo de calor latente de evaporação ( $W \cdot m^{-2}$ );  $R_n$ =saldo de radiação ( $W \cdot m^{-2}$ );  $G$ =fluxo de calor sensível no solo ( $W \cdot m^{-2}$ );  $\rho$ =massa específica do ar atmosférico  $\cong 1,26 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ ;  $c_p$ =calor específico do ar a pressão constante ( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ );  $e$ =déficit de vapor d'água a temperatura do ar, ou seja,  $e_s - e_a$ , (kPa);  $rc$ = resistência da cobertura vegetal ( $s \cdot m^{-1}$ );  $ra$ =resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível e calor latente de evaporação ( $s \cdot m^{-1}$ );  $\gamma$ =coeficiente psicrométrico  $\cong 0,0626 \text{ kPa} \cdot ^\circ C^{-1}$ ;  $S$ =inclinação da tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água, no ponto dado pela temperatura do ar ( $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ ).

Os parâmetros climáticos foram calculados de acordo com a padronização proposta pela FAO/1991 (SMITH, 1991; PEREIRA; VILLA NOVA; SEDYIAMA, 1997), devido sua grande aceitação e facilidade de manipulação. O calor latente de evaporação da água ( $\lambda$ ) foi considerado igual a 2 450 000 J.kg<sup>-1</sup>.

Para calcular a pressão de saturação do vapor d'água em função da temperatura do ar, utilizou-se a equação a seguir:

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27.T}{T+237,3}\right) \quad (08)$$

Em que:  $e_s$  = pressão de saturação do vapor de água (kPa);  $T$  = temperatura do ar (°C).

A equação (09) pode ser empregada no cálculo da pressão atual de vapor d'água.

$$e_a = e_s \cdot \frac{UR}{100} \quad (09)$$

Em que:  $e_a$  = pressão do vapor d'água do ar (kPa);  $UR$  = umidade relativa do ar (%).

O valor da tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água foi calculado pela equação (10):

$$S = \frac{4098.e_s}{(T+237,3)^2} \quad (10)$$

A resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível e vapor d'água pode ser estimada pela equação (11), utilizada por Allen (1989).

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m-d}{z_{om}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z_h-d}{z_{oh}}\right)}{K^2 \cdot u_z} \quad (11)$$

Em que:  $r_a$  = resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível e de vapor d'água (s.m<sup>-1</sup>);  $z_m$  = altura de medida da velocidade do vento (m);  $d$  = deslocamento do plano zero do perfil do vento (m);  $z_{om}$  = comprimento de rugosidade equivalente da cultura para transferência de momento (m);  $z_h$  = altura de medida da temperatura e da umidade relativa do ar (m);  $z_{oh}$  = comprimento da rugosidade equivalente da cultura para transferência de calor sensível e de calor latente (m);  $K$  = constante de von Karman (0,41);  $u_z$  = velocidade do vento medida na altura  $z$  (m.s<sup>-1</sup>).

O valor do deslocamento do plano zero do perfil do vento ( $d$ ) foi estimado através da equação (11), segundo recomendação de Brutsaert (1982).

$$d = (2/3) \cdot hc \quad (12)$$

Em que:  $hc$  = altura média da vegetação (m).

O comprimento de rugosidade equivalente para transferência de momento ( $z_{om}$ ) foi obtido com a equação (13).

$$z_{om} = 0,123 \cdot hc \quad (13)$$

Ele propôs, também, que o valor do comprimento da rugosidade equivalente para transferência de calor sensível e calor latente ( $z_{oh}$ ) fosse obtido por meio de uma das relações a seguir:

$$z_{oh} = 0,1 \cdot z_{om} \quad (14)$$

$$z_{oh} = 0,0123 \cdot hc \quad (15)$$

A proposta da FAO de utilizar a equação de Penman-Monteith para estimar

a evapotranspiração diária requer algumas parametrizações, com o intuito de representar uma cultura hipotética. Sendo, então, uma metodologia recomendada para estimar a evapotranspiração na escala diária, diferentemente da proposta original de Monteith (1965). Para a escala recomendada pela FAO, Allen et al. (1989) sugerem que  $rc$  seja calculada pela equação:

$$rc = \frac{RF}{0,5.IAF} \quad (16)$$

Em que: RF = resistência estomática média diária de uma folha ( $s.m^{-1}$ ); IAF = índice de área foliar (superfície de folhas,  $m^2$  / superfície do terreno,  $m^2$ ).

Para um gramado, ao se utilizar a equação (16), pode-se adotar  $RF = 100 s.m^{-1}$ . E, se a altura média do gramado ( $hc$ ) se encontrar no intervalo de 0,10 a 0,15 m, pode-se assumir que:

$$IAF = 24 \cdot hc \quad (17)$$

Considerando uma cultura hipotética com  $hc = 0,12$  m, obtém-se com a equação 17 um valor de  $IAF = 2,88$ . Com a equação (16), um  $rc$  igual a  $69 s.m^{-1}$ , para uma cultura hipotética. Como a altura média do gramado ( $hc$ ), no período da coleta de dados, foi de, aproximadamente, 0,12 m; com a equação 11 obteve-se  $d = 0,08$  m; com a equação 13 obteve-se  $zom = 0,01476$  m; com a equação 15 obteve-se  $zoh = 0,001476$  m. Substituindo-se estes valores obtidos para  $d$ ,  $zom$  e  $zoh$  na equação (11), obtém-se:

$$ra = \frac{208}{uz} \quad (18)$$

Verifica-se que a relação  $rc/ra$  representa uma função linear da velocidade do vento medido a 2 m de altura da superfície do solo, com relação de, aproximadamente:

$$\frac{rc}{ra} \cong 0,3317 \cdot uz \quad (19)$$

Nesse trabalho, estudou-se a correlação entre os métodos na estimativa de ETo em períodos menores que um dia. Foram selecionados os dias do período de 1º a 10 de dezembro, onde os equipamentos trabalharam com a menor interferência possível de fatores externos, principalmente de precipitações. Foram selecionados os dias 02, 05, 06, 08 e 09 de dezembro, divididos em intervalos de 1 hora.

A resposta apresentada pelo lisímetro é a diferença de peso entre um intervalo e o anterior. Estes valores foram analisados cuidadosamente, com a finalidade de eliminar todos os valores ocasionados devido às precipitações, irrigações e drenagens. Então, para efeito de ETo foram considerados apenas os valores negativos dos intervalos de 30 minutos, exceto os ocasionados pelas drenagens.

Os três métodos de estimativa de ETo foram comparados estatisticamente entre si pelo coeficiente de determinação ( $r^2$ ) da regressão linear simples. A análise isolada de  $r^2$  pode conduzir a interpretações impróprias. Então, avaliou-se, também, o índice de concordância ( $id$ ) obtido com a proposta por Willmott (1981).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evapotranspiração de referência foi estimada pelo balanço de energia com os dados obtidos com o equipamento da razão de Bowen ( $ET_{BR}$ ), pela metodologia de Penman-Monteith ( $ET_{PM}$ ) padronizada pela FAO/1991 e com o lisímetro de pesagem ( $ET_L$ ), selecionando-se dados de um período de 10 dias, de 1º a 10 de dezembro de 1996.

Observou-se que ao se obter valores positivos como resposta do lisímetro, também se obtinha, de maneira similar, valores positivos como resposta do equipamento da razão de Bowen e da estimativa pela metodologia FAO/1991. Então, foram selecionados os dias sem ocorrência de precipitação e os dias com baixa intensidade de precipitação (inferior a 1 mm). Um cuidado muito especial deve ser adotado na eliminação dos dados positivos dos lisímetros. Caso este procedimento se torne necessário, deve-se realizar uma análise minuciosa e criteriosa, pois, foi observado que os valores positivos obtidos como resposta do lisímetro foram superiores aos valores correspondentes às lâminas de precipitação.

As análises estatísticas, regressão linear simples e índice de concordância de Willmott, entre os três métodos de estimativa de  $ET$  estudados, demonstraram que todos os métodos foram muito eficientes na estimativa horária de  $ET$ , pois os valores calculados para  $r^2$  e  $id$  foram bastante significativos (Tabela 1). Na comparação entre  $ET_L$  e  $ET_{PM}$ , o menor valor alcançado para  $r^2$  foi de, aproximadamente,

0,83 e atingiu um valor máximo de, aproximadamente, 0,93, com média de 0,89 para os 5 dias analisados. O valor de  $id$  apresentou-se no intervalo de 0,95 a 0,98, com a média 0,97. Já, na comparação entre os valores de  $ET_L$  e  $ET_{BR}$ , os valores de  $r^2$  e de  $id$  foram um pouco inferiores aos obtidos na análise anterior, embora eles possam ser considerados muito bons, considerando que a estimativa foi realizada a cada hora do dia,  $r^2$  variou de 0,70 a 0,89, e teve média de 0,83, aproximadamente. O  $id$  teve 0,97 como valor médio.

Os resultados mais significativos foram obtidos com a comparação entre os valores de  $ET_{PM}$  e  $ET_{BR}$ , demonstrando grande aderência dos processos de estimativas proposto pela FAO/1991 e do equipamento da razão de Bowen, obtendo-se valores de  $r^2$  no intervalo de 0,94 a 0,97, a média alcançada foi de 0,96. O  $id$ , também, apresentou excelentes resultados, sendo seu valor médio igual a 0,98, aproximadamente.

Como foi mencionado, os três métodos se apresentaram eficientes na estimativa horária de  $ET$ , mas vale salientar que os dias foram selecionados de forma a evitar, ao máximo, as influências externas. Quando esta mesma comparação foi realizada para os dias onde ocorreram precipitações, no mesmo período de 1º a 10 de dezembro, foi observado que os valores de  $r^2$  e de  $id$  (Tabela 2) foram inferiores aos dos dias com baixa influência pluviométrica, embora não tenham sido suficientemente baixos para invalidar as estimativas propostas. Nesse caso, foram analisados os dias 1º, 3, 7 e 10 de dezembro.

Tabela 1 – Valores de  $id$  e de  $r^2$  calculados com a comparação de valores horários de  $ETo_L$  versus  $ETo_{PM}$ ,  $ETo_L$  versus  $ETo_{BR}$  e  $ETo_{PM}$  versus  $ETo_{BR}$ , nos dias sem chuva, 02, 05, 06, 08 e 09 de dezembro de 1996.

Dia	$ETo_L$ x $ETo_{PM}$		$ETo_L$ x $ETo_{BR}$		$ETo_{PM}$ x $ETo_{BR}$	
	$r^2$	$id$	$R^2$	$id$	$r^2$	$id$
02/dez	0,93	0,98	0,86	0,95	0,95	0,98
05/dez	0,93	0,98	0,86	0,95	0,96	0,99
06/dez	0,90	0,97	0,89	0,97	0,97	0,99
08/dez	0,83	0,95	0,70	0,90	0,96	0,98
09/dez	0,88	0,97	0,83	0,95	0,94	0,98
Média	0,89	0,97	0,83	0,94	0,96	0,98

Tabela 2 – Valores de  $id$  e de  $r^2$  calculados com a comparação de  $ETo_L$  versus  $ETo_{PM}$ ,  $ETo_L$  versus  $ETo_{BR}$  e  $ETo_{PM}$  versus  $ETo_{BR}$ , nos dias com chuva, 1º, 03, 07 e 10 de dezembro de 1996.

Dia	$ETo_L$ x $ETo_{PM}$		$ETo_L$ x $ETo_{BR}$		$ETo_{PM}$ x $ETo_{BR}$	
	$r^2$	$id$	$R^2$	$id$	$r^2$	$id$
1º/dez	0,78	0,94	0,62	0,88	0,93	0,98
03/dez	0,71	0,91	0,43	0,81	0,69	0,90
07/dez	0,71	0,91	0,59	0,87	0,88	0,97
10/dez	0,87	0,96	0,71	0,92	0,92	0,98
Média	0,77	0,93	0,59	0,87	0,86	0,96

Quando da análise dos valores médios de  $r^2$  e de  $id$ , nos dias com precipitação, observou-se que os menores valores de  $r^2$  e de  $id$  foram obtidos com a comparação entre  $ETo_L$  x  $ETo_{BR}$ , apresentando média de 0,59 e 0,93, respectivamente. A comparação entre  $ETo_L$  e  $ETo_{PM}$  apresentou comportamento central, apresentando 0,59 como valor médio para  $r^2$  e 0,87 para  $id$ .

A maior aderência, novamente, foi obtida comparando-se  $ETo_{PM}$  com  $ETo_{BR}$ , que apresentou valores de  $r^2$  no intervalo de 0,69 a 0,93, alcançando média igual a 0,86,

maior que a média de  $r^2$  (0,83) obtida com a comparação de  $ETo_L$  x  $ETo_{BR}$  nos dias sem chuva. Tendência semelhante foi observada para  $id$ , que apresentou valor médio igual a 0,96, demonstrando que a metodologia FAO/1991 e o equipamento da razão de Bowen, desde que manuseado adequadamente, apresentaram excelente eficiência na estimativa da evapotranspiração em intervalos de tempo de 1 hora.

É possível verificar, na Figura 1, que os valores estimados para  $ETo$  pelos três métodos, para o dia 05 de dezembro de 1996,

foram bastante similares. Nas três estimativas, verificou-se o mesmo comportamento de variação da ETo ao longo do dia, com baixíssimas distorções em um ou outro ponto, mas sem afetar o contexto geral, como já foi demonstrado nas análises previamente apresentadas e discutidas.

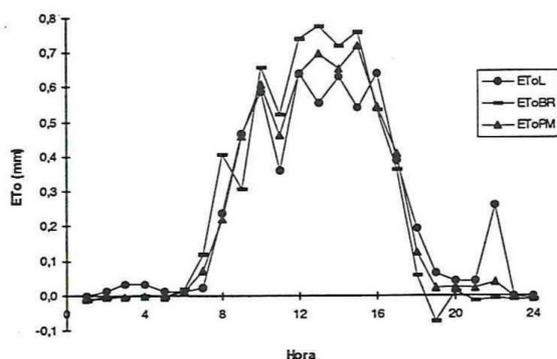


Figura 1 – Variação horária de  $ETo_L$ ,  $ETo_{BR}$  e  $ETo_{PM}$  no dia 05 de dezembro de 1996.

#### 4 CONCLUSÃO

No período estudado, com a parametrização proposta pela FAO/1991 para a equação de Penman-Monteith e com o equipamento automático razão de Bowen, foi observada uma ligeira subestimativa da ETo, em relação aos valores medidos com o lisímetro de pesagem.

O equipamento da razão de Bowen pode ser recomendado para diversos estudos em substituição aos lisímetros, graças à sua mobilidade em campo. Podendo ser útil na estimativa da resistência da cobertura vegetal ( $r_c$ ) para muitas espécies vegetais agricultáveis.

Na escala horária, as maiores correlações foram obtidas quando se comparou a ETo estimada pela metodologia FAO/1991 com a estimativa realizada com o equipamento da razão de Bowen, demonstrando elevada correlação entre essas metodologias.

Avaliando-se os resultados obtidos e discutidos ao longo do trabalho, pode-se concluir que as três metodologias adotadas na estimativa de ETo, metodologia FAO/1991 (Penman-Monteith), lisímetro de célula de carga e o equipamento da razão de Bowen, podem ser consideradas e adotados no estudo da evapotranspiração como padrões nas escalas diária e horária.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. *Lysimeters*. Rome: FAO, 1982. 68 p. (Irrigation and Drainage, Paper nº 39)
- ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, July/Aug. 1989.
- BEN-ASHER, J.; MEEK, D. W.; HUTMACHER, R. B.; PHENE, C. J. Computational approach to assess actual transpiration from aerodynamic and canopy resistance. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, n. 5, p. 776-782, Sept./Oct. 1989.
- BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev. Ser.*, v. 2, n. 27, p.779-787, 1926.

BRUTSAERT, W. *Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1982. 299 p. (Environmental Fluid Mechanics, nº 1)

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. *Symposium of the Society for Experimental Biology*, v. 19, p. 205-234, 1965.

———. Evaporation from lands surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, 1985, Chicago. *Proceedings...* Saint Joseph: ASAE, 1985. p. 4-12.

OMETTO, J. C. *Registros e estimativas de parâmetros meteorológicos da região de Piracicaba, SP*. Piracicaba: FEALQ/USP, 1989. 76 p.

PEREIRA, A. R. *Introdução a micrometeorologia*. Piracicaba: ESALQ/USP, 1996. 70 p.

———; VILLA NOVA, N. A.; SEDYIAMA, G. C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ / USP, 1997. 183 p.

SÃO PAULO (Estado). Coordenadoria de Ação Regional. Divisão de Geografia. *Plano Cartográfico do Estado de São Paulo*. Reambulação de campo 1978/79, foto de 1978. São Paulo, 1979. Escala 1:10.000.

SILVA, A. A. G. da *Avaliação da eficiência dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Parnaíba-PI*. 1989. 81p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, Piracicaba, 1981.

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

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. *The water balance*. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

VIANA, T. V. de A. *Estimativa da evapotranspiração de cultivo, em estufa, utilizando o sistema automático da razão de Bowen*. 2000. 128p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, Piracicaba, 2000.

VILLA NOVA, N. A. *Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz*. 1973. 78p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, Piracicaba, 1973.

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