

# DESEMPENHO DO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH PARA ESTIMATIVA DO FLUXO DE VAPOR, EM BASE HORÁRIA, PARA A FASE REPRODUTIVA EM UMA CULTURA DE MILHO

Marcos Antonio Vanderlei Silva<sup>1</sup>, José Maria Nogueira da Costa<sup>2</sup>, Vanda Maria Sales de Andrade<sup>3</sup>, Williams Pinto Marques Ferreira<sup>4</sup>, Luiz Marcelo Aguiar Sans<sup>5</sup> Evandro Chaves de Oliveira<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Prof. MSc. UNEB, Doutorando em Met. Agrícola-UFV, Viçosa – MG, email: [maavsilva@uneb.br](mailto:maavsilva@uneb.br). <sup>2</sup>Prof. PhD, UFRV, Viçosa – MG, email: [jmncosta@ufv.br](mailto:jmncosta@ufv.br). <sup>3</sup>Doutorando em Met. Agrícola-UFV, Viçosa - MG. Email: [vanda007@yahoo.com](mailto:vanda007@yahoo.com). <sup>4</sup>Pesquisador III, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas – MG, email: [williams@cnpmc.embrapa.br](mailto:williams@cnpmc.embrapa.br). <sup>5</sup>Pesquisador III, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG, email: [luizmarcelo25@gmail.com](mailto:luizmarcelo25@gmail.com). <sup>6</sup>Doutorando em Met. Agrícola-UFV, Viçosa – MG, email: [echoliveira@yahoo.com.br](mailto:echoliveira@yahoo.com.br)

**RESUMO:** O presente trabalho estimou o fluxo de vapor d'água (evapotranspiração) em uma cultura de milho (BR 106) utilizando o método de *Penman-Monteith*. O desempenho do modelo de *Penman-Monteith* foi avaliado comparando-se os valores horários do fluxo de vapor d'água determinados experimentalmente pelo método das covariâncias. Os dados de fluxo de vapor d'água medidos pelo método das covariâncias e estimados pelo método de *Penman-Monteith*, quando relacionados por regressão apresentaram alta precisão, e, ao serem avaliados pelo modelo de concordância de WILLMOTT mostraram exatidão, indicando assim boa consistência entre os dados estimados e os medidos.

**ABSTRACT:** PERFORMANCE OF THE PENMAN-MONTEITH APPROACH FOR ESTIMATE OF WATER VAPOR FLUX, IN HOURLY BASE, FOR THE REPRODUCTIVE PHASE IN MAIZE CROP.

In this work, hourly water vapor flux (evapotranspiration) measured over a maize crop (BR 106) were performed by the use of Penman-Monteith approach. The performance of Penman-Monteith approach was evaluated using hourly values of evapotranspiration obtained from the Eddy Covariance method. The data of water vapor flux measured by the Eddy Covariance method and estimated when evaluated by WILLMOTT model by Penman-Monteith approach, when related by the regression analysis presented high precision, and, showed high accuracy, indicating a good consistence between the estimated data and measured ones.

**Palavras-Chave:** evapotranspiração, calor latente, milho, evapotranspiration, latent heat, maize.

## 1. INTRODUÇÃO

As atividades agrícolas são as que mais demandam por água, necessitando por isso de um empenho especial dos pesquisadores no desenvolvimento de pesquisas que possibilitem a economia de água. Uma vez que esse recurso torna-se cada vez mais escasso, a adoção de um método adequado para estimativa de evapotranspiração poderá contribuir para o uso racional da água em agricultura irrigada. Além disso, a estimativa da evapotranspiração (ET) é de fundamental importância para aplicação em modelos de predição de crescimento e produção de culturas, bem como para propósitos ecofisiológicos (RANA *et al.*, 2001). Na cultura do milho o conhecimento da demanda de água na fase reprodutiva tem uma importância fundamental pois representa o início da transformação dos açúcares em amido, contribuindo, assim, para o incremento de matéria seca. Tal incremento ocorre devido à translocação dos fotoassimilados presentes nas folhas e no colmo para a espiga e grãos em formação. A eficiência dessa translocação, além de ser importante para a produção, é extremamente dependente de água (MAGALHÃES e DURÃES, 2006).

O processo de evapotranspiração é determinado pela quantidade de energia disponível para vaporizar a água. Os métodos micrometeorológicos mais comuns para determinação dos fluxos de calor latente são: o método das covariâncias (correlação de turbilhões), o método aerodinâmico e o método do balanço de energia – razão de Bowen (MONTEITH e UNSWORTH, 1990; PEREIRA *et al.*, 1997). Desses, o método de correlação de turbilhões é o único capaz de medir diretamente os fluxos na atmosfera, enquanto que os demais produzem estimativas a partir dos gradientes verticais das propriedades.

Penman estabeleceu uma equação para estimativa da evapotranspiração, a qual foi modificada por Monteith que introduziu as funções de resistência aerodinâmica e resistência do dossel vegetal, eliminando a função do vento  $f(u)$  da equação original (MONTEITH, 1981). Tal equação, denominada atualmente de *Penman-Monteith*, vem sendo utilizada por vários pesquisadores e foi adotada pela FAO (*Food and*

*Agriculture Organization*) como a equação padrão para estimativa da evapotranspiração real ALLEN et al. (1998). O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo de *Penman-Monteith* na estimativa do fluxo de vapor d'água (evapotranspiração) comparando com os fluxos medidos pelo método da covariância na fase reprodutiva da variedade de milho BR 106.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em um *pivot* de 37 ha no CNPMS (Embrapa), Sete Lagoas-MG (19° 28' S, 44° 39' W e 785m). Utilizou-se a variedade de milho BR 106. A semeadura, foi realizada no dia 29 de setembro de 2007, com um espaçamento de 0,20m entre plantas e 0,70m entre linhas, com uma densidade final de aproximadamente 55.000 plantas por hectare. A irrigação foi realizada sempre que necessária para manter a umidade do solo. No meio do quadrante sul, foi instalada uma torre micrometeorológica de 4 m. Os elementos meteorológicos (temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e radiação solar) foram coletados por um *datalogger* (Campbell, modelo CR1010) a partir de uma estação meteorológica automática, instalada no topo da torre.

Os fluxos de vapor d'água ( $\lambda E_{EC}$ ) foram medidos acima do dossel por meio de um sistema de covariância de vórtices (MONCRIEFF et al., 1997) composto de um anemômetro sônico tridimensional. A obtenção do fluxo de vapor d'água, baseou-se na covariância das flutuações da componente vertical da velocidade do vento, velocidade vertical do vento e da umidade específica, conforme a equação abaixo:

$$\lambda E_{EC} = L_v \overline{w'q'} \quad (1)$$

em que  $w'$  = componente vertical das flutuações da velocidade do vento,  $q'$  = desvio instantâneo a partir da média da umidade específica,  $L_v$  = calor latente de vaporização da água.

Para a estimativa do fluxo de vapor d'água foi utilizado o método de Penman-Monteith, segundo a seguinte equação:

$$\lambda E_{PM} = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \Delta e / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \quad (2)$$

em que  $\lambda$  = calor latente de evaporação (MJ.kg<sup>-1</sup>);  $R_n$  = saldo de radiação (W.m<sup>-2</sup>);  $G$  = fluxo de calor no solo (W.m<sup>-2</sup>);  $\rho_a$  = densidade média do ar (1,2 kg.m<sup>-3</sup>);  $C_p$  = calor específico do ar à pressão constante (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>);  $\Delta$  = declividade da curva de pressão de saturação do ar a temperatura (kPa.°C<sup>-1</sup>);  $\Delta e$  = déficit de pressão de vapor (kPa);  $r_a$  = resistência aerodinâmica da cultura ao transporte de vapor (s.m<sup>-1</sup>);  $r_s$  = resistência da cobertura vegetal (s.m<sup>-1</sup>);  $\gamma$  = constante psicrométrica (0,062 kPa.°C<sup>-1</sup>). A resistência aerodinâmica foi estimada por:

$$r_a = \frac{\ln[(Z_m - d) / Z_{om}] \ln[(Z_e - d) / Z_{oe}]}{K^2 U_z} \quad (3)$$

em que,  $Z_m$  = altura da medida da velocidade do vento (m),  $Z_e$  = altura da medida da umidade do ar (m),  $Z_{om}$  = comprimento da rugosidade para o transporte de momentum: 0,123\*h (m);  $Z_{oe}$  = comprimento de rugosidade para o transporte de vapor e calor sensível: 0,1\* $Z_{om}$  (m);  $d$  = deslocamento do plano zero:  $\frac{3}{4}$ \*h (m),  $U_z$  = velocidade do vento na altura "z" (m.s<sup>-1</sup>);  $K$  = constante de *Von Karmann* (0,41).

Para a estimativa da resistência da cobertura do dossel, utilizou-se:

$$r_c = \frac{r_{st}}{2IAF}$$

em que  $r_{st}$  é a resistência estomática (s.m<sup>-1</sup>) e IAF é o índice de área foliar da cultura. A determinação da área foliar foi feita com um planímetro ótico modelo LI 3000A. Os dados de área foliar, representativos de 0,70 m<sup>2</sup>, foram convertidos para valores correspondentes à área de 1,0 m<sup>2</sup> de terreno, equivalendo, então, ao índice de área foliar (IAF= área foliar/área explorada de solo).

Para a avaliação do desempenho dos modelos, utilizaram-se o erro padrão da estimativa, a análise de regressão, envolvendo coeficientes de determinação ( $R^2$ ), e o índice d (de concordância), proposto por WILLMOTT et al. (1985).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a fase reprodutiva a cultura utiliza determinada quantidade de água bem maior nos seus processos fisiológicos do que nas fases anteriores. Dessa forma, foram selecionados os dados médios horários do período de 16 a 19/01/2008, representando o estágio reprodutivo referente ao grão leitoso, com a cultura apresentando um IAF de 2,95.

A variação horária dos dados de fluxos de vapor d'água, medidos e estimada durante essa fase é apresentada na Figura 1, na qual se observa tendência de os valores de  $\lambda E_{PM}$  serem superiores aos de  $\lambda E_{EC}$  na parte da manhã (10:30h às 13:00h), invertendo tal tendência a partir do meio da tarde (15:30h às 18:30h), em que a  $\lambda E_{PM}$  passou a subestimar o fluxo de vapor. Não obstante esse comportamento, de uma maneira geral os valores de  $\lambda E_{PM}$  e  $\lambda E_{EC}$  foram muito próximos corroborados pela alta exatidão entre eles, a qual foi expressa pelo valor "d" (índice de concordância) na ordem de 0,978.

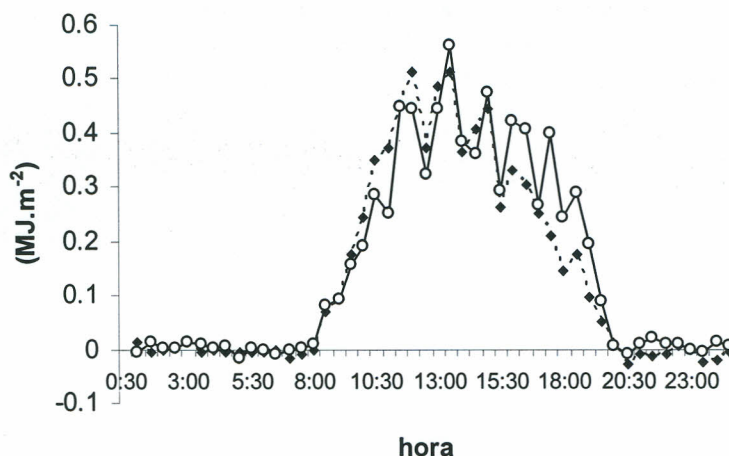


Figura 1. Valores médios horários dos fluxos de vapor d'água observados,  $\lambda E_{EC}$  (—○—) e estimados pelo modelo Penman-Monteith,  $\lambda E_{PM}$  (----♦----) (16 a 19/01/2008).

A regressão linear entre  $\lambda E_{EC}$  e  $\lambda E_{PM}$ , Figura 2, evidencia um bom ajuste de correlação apresentando coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,91. Nesta relação observou-se um coeficiente angular de 1,01 denotando que os dados estão próximos da reta 1:1, e refletindo boa concordância entre eles. Tais resultados podem ser fundamentados por meio do baixo erro-padrão de estimativa, com um valor de 5,3%, indicando um bom desempenho do modelo utilizado na estimativa.

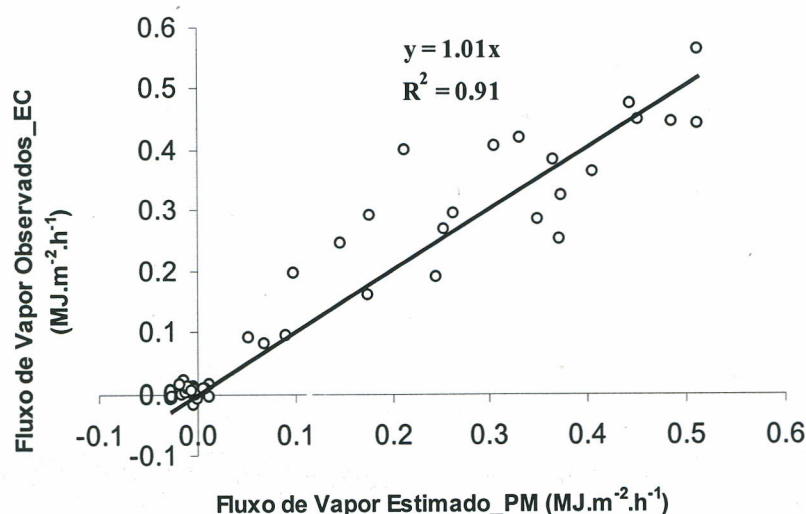


Figura 2. Regressão linear entre os fluxos de vapor observados,  $\lambda E_{EC}$ , e os estimados pelo método Penman-Monteith,  $\lambda E_{PM}$ , (16 a 19/08/2008)

#### 4. CONCLUSÕES

Os dados de fluxo de calor medidos pelo método das covariâncias e estimados pelo método de *Penman-Monteith*, quando relacionados via regressão apresentaram alta precisão, e, ao serem avaliados pelo modelo de concordância de WILLMOTT mostraram elevada exatidão, indicando assim boa consistência dos dados estimados com os medidos.

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem à EMBRAPA Milho e Sorgo (Sete Lagoas-MG) pelo apoio técnico e logístico na condução do presente trabalho.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56). 1998, 297p

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. Fisiologia da Produção de Milho. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2006. 10p. (EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 76).

MONCRIEFF, J.B., MASSHEDER, J.M., DE BRUIN, H., ELBERS, J., FRIBORG, T., HEUSINKVELD, B., KABAT, P., SCOTT, S., SOEGAARD, H AND VERHOEF, A., (1997). A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. **J. Hydrol.** p. 589-611

MONTEITH, J. L. Evaporation and surface temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London. V.107, p.1-27, 1981.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics**. 2.ed. London: Edward Arnold, 1990. 291p.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

RANA, G.; KATERJI, N.; PERNIOLA, M. Evapotranspiration of sweet sorghum: A general model and multilocal validity in semiarid environmental conditions. **Water Resources Research**, Washington, v.37, n.12, p.3237-3246, 2001.

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