

ISSN 0104-1347

Avaliação do desempenho do método aerodinâmico simplificado para estimativa do fluxo de vapor numa cultura de feijão

Evaluation of the performance of a simplified aerodynamic method to estimate water vapor flux in a bean crop

Romisio Geraldo Bouhid André¹, Anice Garcia²

Resumo: Este trabalho teve por finalidade estimar o fluxo de vapor (evapotranspiração) sobre uma cultura de feijão, utilizando-se do Método Aerodinâmico Simplificado(MAS). Foram utilizados dados de saldo de radiação e fluxo de calor no solo. A temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram medidas em dois níveis tomados sobre o dossel da cultura. Os valores da evapotranspiração obtidos, com base no MAS, foram comparados com aqueles obtidos pelos métodos do balanço de energia baseado na razão de Bowen (BERB) e ao de Penman-Monteith (PM), nos quatro estádios de desenvolvimento da cultura, em termos da variação diária e totais diários. Uma boa correlação entre os valores obtidos pelo MAS, o BERB e PM foi obtida. A advecção esteve presente nos três últimos estádios de desenvolvimento vegetativo. O erro médio relativo, em termos de totais diários, entre o MAS e BERB foi de 4% e entre o MAS e PM foi de 6%.

Palavras-chave: evapotranspiração, advecção de calor sensível, *Phaseolus vulgaris* L.

Abstract: This study deals with water vapour flux (evapotranspiration) over a bean crop by using a Simplified Aerodynamic Method. Net radiation and soil heat flux were measured. Temperature, relative humidity and wind speed were taken in two levels over the experimental field. The results were compared with de Bowen Ratio Energy Balance and Penman-Monteith approaches for four different crop stages, in terms of daily variation and total daily values of water vapour flux. Advection of sensible heat was present in three of the four stages considered. The results showed a good correlation between Simplified Aerodynamic Method and the others ones with mean relative error for daily total vapour flux ranging from 4 to 6% in different crop stages.

Key-words: evapotranspiration, advection of sensible heat, *Phaseolus vulgaris* L.

¹ Laboratório de Meteorologia-LAMET/ UENF-Rodovia Amaral Peixoto, km163-Av. Brenand s/n. Imboassica - 27.973 - 070 - Macaé - RJ (romisio@lenep.uenf.br)

² Faculdade de Agronomia Dr. Francisco Maeda - FAFRAM- Rodovia Jerônimo Nunes Macedo, km 01, Ituverava - SP (anice@feituverava.com.br)

Introdução

A importância das trocas de propriedades conservativas entre a comunidade vegetal e o meio que a envolve, como *momentum*, calor latente, calor sensível e outros é evidenciada pela influência que desempenham nos processos fisiológicos das plantas, bem como a ocorrência de pragas e doenças, o que condiciona o potencial produtivo das espécies vegetais exploradas economicamente (FROTA, 1978). Assim, o conhecimento dessas propriedades, através do balanço de energia, permite uma aplicabilidade direta em práticas agrícolas, principalmente no planejamento racional da irrigação, no uso adequado do solo, no zoneamento agrícola regional, impacto das variações meteorológicas sobre os cultivos agrícolas e proteção de plantas.

O aumento das pesquisas neste setor tem sido propiciado graças ao avanço dos conhecimentos meteorológicos em microescala, bem como a evolução da tecnologia de instrumental meteorológico.

Os estudos do balanço de energia de uma superfície natural baseiam-se no princípio de conservação da energia. Através desse balanço, pode-se avaliar as parcelas do saldo de radiação utilizadas para os fluxos de calor sensível e de vapor d'água, respectivamente. A razão de Bowen (β) tem sido bastante utilizada para resolver a equação do balanço de energia, para diversas culturas, tais como arroz (VILLA NOVA, 1973), soja (PEDRO JUNIOR, 1977; VISWANADHAM & ANDRÉ, 1983), para a Floresta Amazônica (SÁ et al., 1988), para milho (ANDRÉ, 1996) e pastagens (SILVA et al., 2005).

Outros autores, tais como ALFONSI et al. (1986), BERGAMASCHI et al. (1988), CUNHA et al. (1989), FONTANA et al. (1991), e CUNHA & BERGAMASCHI (1994), PRUEGER et al. (1997) também utilizaram a razão de Bowen na partição do saldo de radiação.

A utilização da razão de Bowen (β) deve levar em conta as suas limitações. Essas limitações ocorrem geralmente por causa de pequenos gradientes de temperatura e pressão de vapor, cobertura vegetal heterogênea e sob condições de

advecção (PRUEGER et al., 1997). Para evitar problemas na estimativa de β , as medidas dos gradientes, menores do que os erros instrumentais, devem ser excluídas.

Por exemplo, para os casos em que os valores de β estão próximo a -1, alguns autores eliminam os valores abaixo de -0,75 ou valores entre -1,3 e -0,7 (ORTEGAS-FARIAS et al., 1996; UNLAND et al., 1996), mas o intervalo deve depender da acurácia de medidas dos sensores utilizados (PEREZ et al., 1999).

Portanto, β negativo significa que está havendo transporte de calor sensível do ar mais quente para a superfície mais fria, condição de advecção ou de inversão térmica. Nesses casos, o fluxo de vapor d'água (λE) pode até suplantiar o saldo de radiação (Q^*), pois o fluxo de calor sensível (H) representa um adicional de energia disponível à superfície evaporante.

O método aerodinâmico consiste em se determinar o fluxo de calor sensível por meio de medidas de velocidade do vento e temperatura em diferentes alturas acima da cobertura vegetal. Esta técnica, utilizada de maneira clássica, tem a vantagem de considerar a estabilidade atmosférica indispensável à acurácia do método mas, tem uma desvantagem, pois há que se considerar vários níveis na atmosfera próxima ao solo. Uma vez determinado o fluxo de calor sensível, a evapotranspiração é obtida através do método do balanço de energia.

O método aerodinâmico simplificado foi descrito por ITIER (1980 e 1981) e consiste em se determinar o fluxo de calor sensível a partir de medidas da velocidade do vento e da temperatura do ar em dois níveis acima da vegetação. O método compreende quatro casos distintos de estabilidade atmosférica (ITIER et al., 1985). A escolha dos níveis é muito importante para a obtenção dos dados para aplicação do método. O primeiro nível deve ser fixado a uma altura tal que o produto $(z_1 \cdot z_2)^{1/2}$ fique fora da camada rugosa e o segundo nível dentro da camada de fluxos constante. Além disso, a diferença entre os níveis deve ser suficiente grande para que as diferenças de temperatura e vento sejam medidas com suficiente acurácia. ITIER (1980) comparou resultados obtidos pelo método aerodinâmico simplificado com o método aerodinâmico clássico

(MAC) e ITIER et al. (1981) comparou o método aerodinâmico com o método da razão de Bowen, tanto em escala horária quanto diária e valores acumulados por períodos.

FERNANDES (2001), determinou a evapotranspiração real pelos métodos do balanço de energia e aerodinâmico simplificado, para uma cultura de soja, comparando-os com o método de Penman-Monteith com relação a variação diária, valores médios diários e valores acumulados.

Penman estabeleceu uma equação para a estimativa da evapotranspiração potencial. Durante os anos de 1963 e 1964, Monteith modificou a equação de Penman introduzindo, as funções "resistência aerodinâmica" e "resistência do dossel vegetal", eliminando, desta forma a função do vento $f(u)$ da equação original (MONTEITH, 1981). A equação de Penman-Monteith, como é chamada atualmente vem sendo utilizada por diversos pesquisadores, tendo sido adotada pela Food and Agriculture Organization-FAO como a equação padrão para estimativa da Evapotranspiração Real (ALLEN et al., 1998).

Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho e a aplicabilidade do método aerodinâmico simplificado para uma cultura anual na região de Jaboticabal, comparando-se as estimativas do fluxo de vapor d'água por esse método com as estimativas pelos métodos de balanço de energia e de Penman-Monteith.

Material e Métodos

Área experimental e cultura utilizada

O experimento foi conduzido durante a estação outono-inverno de 1999, na área experimental do Departamento de Horticultura da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias -UNESP - Campus de Jaboticabal, com latitude de $21^{\circ}14'05''$ S, longitude de $48^{\circ}17'09''$ O e altitude de 615 m. O solo do local foi classificado como Latossolo Roxo eutrófico. O clima (classificação de Köppen) é do tipo subtropical com inverno seco (Cwa), com precipitação média anual de 1400 mm, temperatura média anual 22°C e umidade relativa média do ar 70%.

A cultura estudada foi o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar IAC-Carioca. A semeadura foi realizada no dia 24/05/99. A parcela compreendeu

uma área de 27 x 25 m, constituindo-se de 42 linhas, de 25 m de comprimento e espaçadas de 0,60 m entre linhas e 0,10 m entre plantas. Nessa parcela a cultura foi mantida sem restrição de umidade. O sistema de irrigação adotado foi o de aspersão, sendo utilizados aspersores do tipo ZE-30, da Asbrasil, com bocais de 40 mm de diâmetro, em um espaçamento de 12 x 12 metros, operados com 2,5 atmosferas de pressão, resultando uma precipitação de 7 mm/h. A homogeneidade na irrigação na parcela foi testada, durante as primeiras irrigações, utilizando-se 24 pluviômetros de PVC distribuídos aleatoriamente.

As taxas de irrigação foram baseadas no cálculo da evapotranspiração máxima (ETM), com dados de evaporação do tanque Classe A. Os valores de K_c utilizados foram os obtidos por SANTOS & ANDRÉ (1992), para os diversos estádios fenológicos da cultura do feijoeiro, variando de 0,68 a 1,42. A temperatura e umidade relativa do ar foram obtidas com sistemas Vaisala modelo HMP35E, com sensibilidade de 0,01 para a temperatura e 0,1 para a umidade relativa do ar. Os instrumentos foram montados em dois níveis, um junto do dossel vegetativo a aproximadamente 20 cm e, outro a um metro acima do primeiro permitindo-se, dessa maneira, a obtenção dos gradientes de temperatura e umidade relativa. Para medida da velocidade do vento foram utilizados dois anemômetros modelo Casela London MKIII, também montados nos mesmos níveis já citados.

O saldo de radiação foi obtido com um saldo-radiômetro modelo Q-7 (REBS), montado a 1 m do dossel vegetativo e o fluxo de calor para o interior do solo foi medido utilizando-se de três placas de fluxo, modelos FX67, 68 e 69, fabricação da Engespaço Indústria e Comércio Ltda, instaladas a 1 cm de profundidade no solo.

Todos os sensores foram previamente calibrados no Laboratório de Agrometeorologia da FCAV-UNESP antes de serem instalados.

Para aquisição dos dados foi utilizado um Coletor da Campbell Sci. Modelo 21X. O programa utilizado permite a interrogação a cada 1 segundo e armazenamento de médias a cada 10 minutos. Os dados foram recuperados semanalmente através de um Módulo de Armazenamento - SM - 192 da

Campbell. Em seguida o módulo era conectado ao computador onde os dados foram descarregados na forma de arquivos ASCII.

Todos os instrumentos foram montados no interior da parcela procurando-se, dessa forma, minimizar os efeitos de bordadura.

O ciclo fenológico do feijoeiro, em dias após a emergência (DAE), é apresentado na Figura 1.

b) Balanço de Energia

Desde que cuidados sejam tomados, para minimizar os efeitos da advecção de calor sensível e de calor latente, também, para as variações no armazenamento de energia, bem como para a energia utilizada na fotossíntese, as densidades de fluxos dos componentes do balanço de energia na superfície podem ser dados por (ARYA, 2001).

$$Q^* - G = H + \lambda E \quad (1)$$

sendo Q^* o saldo de radiação, G o fluxo de calor no solo, λE o fluxo de vapor d'água e H o fluxo de calor sensível. As densidades de fluxos, por unidade de área, ao lado esquerdo de (1) são considerados como energia disponível, e do lado direito, energia turbulenta. A maneira clássica de resolver a equação é através da razão de Bowen, entre os fluxos turbulentos de calor sensível e de vapor d'água, respectivamente.

Utilizando as equações de definições de cada um dos parâmetros acima, e admitindo-se a similaridade nos transportes de calor e vapor d'água, a razão pode ser especificada em termos dos gradientes de temperatura e pressão de vapor, ou seja:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (2)$$

sendo γ a constante psicrométrica ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$) e e a pressão parcial de vapor (kPa) e T a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$). Assim a equação (1), para o fluxo de vapor d'água, pode ser escrita:

$$\lambda E = \frac{Q^* - G}{1 + \beta} \quad (3)$$

Método aerodinâmico simplificado

Este método foi proposto originalmente por ITIER (1980,1981) e, posteriormente aprimorado por ITIER et al. (1985). Neste caso o fluxo de calor sensível é expresso em função das diferenças de temperatura e velocidade do vento, entre dois níveis na baixa atmosfera. Neste trabalho o método de Itier foi modificado considerando-se o número de Richardson, na sua forma original, para especificar os casos de estabilidade atmosférica.

O grau de instabilidade atmosférica é dado pelo número de Richardson, definido por:

$$Ri = \frac{g \Delta T / \Delta z}{T (\Delta u / \Delta z)^2} \quad (4)$$

sendo g a aceleração da gravidade (m/s^2), $\bar{\theta}$ a temperatura média absoluta (K), Δu a diferença de velocidade do vento (m/s), ΔT a diferença de temperatura ($^\circ\text{C}$) entre os dois níveis considerados. Desta maneira, distinguem-se quatro casos:

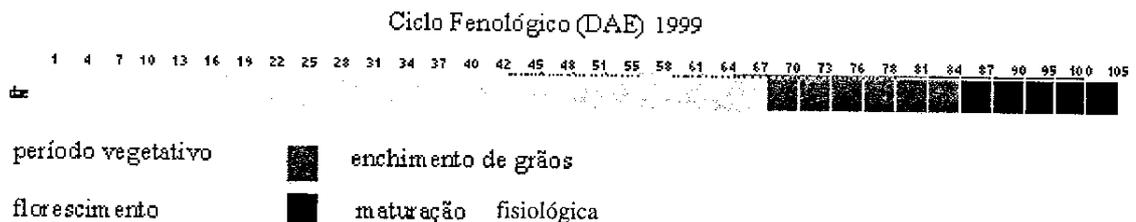


Figura 1. Caracterização fenológica do feijoeiro cv. IAC – Carioca.

1º Caso:

$$Ri > 0,15 \quad (5)$$

É o caso que corresponde a uma forte estabilidade noturna. Neste caso o fluxo de calor é representado por uma fração do fluxo calculado em condições de neutralidade (H_o).

$$H = H_o / 10 \quad (6)$$

$$H_o = K \Delta u \Delta T \quad (7)$$

em que,

$$K = \frac{\rho c_p k^2}{\ln^2(z_1 / z_2)} \quad (8)$$

em que, ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), k é a constante de Von Karman, z_1 e z_2 os níveis considerados.

2º Caso

$$0 < Ri \leq 0,15 \quad (9)$$

É o caso de estabilidade pela qual as forças da gravidade ainda não inibiram completamente a turbulência. H é dado por:

$$H = H_o \left[1 + \frac{\Delta T \Delta z}{\Delta u^2} \right]^2 \quad (10)$$

3º Caso:

$$-0,30 \geq Ri \geq 0 \quad (11)$$

É o caso de instabilidade moderada, com convecção mista. O cálculo de H é feito através de um coeficiente K_R (RIOU, 1982).

$$K_R = 16 * \left[\frac{gz}{\theta} \ln(z_1 / z_2) \right] \quad (12)$$

em que, θ é a temperatura potencial (K) e $z = (z_1 z_2)^{1/2}$

$$H = H_o \left[1 - K_R \frac{\Delta T}{(\Delta u)^2} \right]^{3/4} \quad (13)$$

4º Caso:

$$Ri < -0,30 \quad (14)$$

É o caso de uma forte instabilidade térmica, encontrada no meio dia solar, em períodos de verão com ventos calmos. Tem-se, então, um modo de convecção livre.

$$H = \alpha (-\Delta T)^{3/2} \quad (15)$$

em que,

$$\alpha = \frac{1,3 c_p \sqrt{g/\theta}}{5,2 (z_1^{-1/3} - z_2^{-1/3})^{3/2}} \quad (16)$$

Uma vez estimado o fluxo de calor sensível, recorre-se ao balanço de energia para se obter o fluxo de vapor d'água.

Método de Penman-Monteith

A equação, conhecida como de Penman-Monteith, estima o fluxo de vapor d'água (MONTEITH, 1965), a qual tem a forma:

$$\lambda E = \frac{s(Q^* - G) + \rho c_p \Delta e / r_a}{s + \gamma(1 + r_c / r_a)} \quad (17)$$

em que, λ é o calor latente de evaporação (MJ kg^{-1}), Q^* é o saldo de radiação (W m^{-2}), s é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), Δe é o déficit de pressão de vapor (kPa), r_a é a resistência aerodinâmica da cultura ao transporte de vapor (s m^{-1}), r_c a resistência da cobertura vegetal (s m^{-1}), γ é a constante psicrométrica ($0,062 \text{ kPa}^\circ\text{C}^{-1}$). A resistência aerodinâmica (ALLEN, 1986; ALLEN et al., 1989 e JENSEN et al., 1990), pode ser estimada por:

$$r_a = \frac{\left\{ \ln[(z-d)/z_{om}] \ln[(z-d)/z_{oh}] \right\}}{k^2 u} \quad (18)$$

em que d é o deslocamento do plano zero ($=3/4 h$), em que, h é a altura da cultura, z_{om} o parâmetro de rugosidade da superfície, para o transporte de momentum ($=0,123 h$), z_{oh} o parâmetro de rugosidade da superfície para o transporte de calor sensível e vapor d'água ($=0,1 z_{om}$), k a constante de Von Karman e u a velocidade média do vento (m/s) obtida no nível z acima da superfície do solo.

Para estimativa da resistência da cobertura do dossel, utiliza-se:

$$r_s = \frac{r_{st}}{0,5 IAF} \quad (19)$$

em que r_{st} é a resistência estomática ($s m^{-1}$) e IAF o índice de área foliar da cultura. Para cultura de porte baixo $r_{st} = 100$ (ALLEN et al., 1998).

As avaliações de determinação da área foliar foram realizadas com um medidor portátil de área foliar modelo 3000 da Li-COR. Com os valores de área foliar calculou-se o Índice de Área Foliar (IAF), que é definido como sendo o valor da área foliar (AF) (cm^2) por unidade de área disponível para o desenvolvimento das plantas (AS) (cm^2).

Resultados e Discussão

Os dias 14 a 18/07/99 foram escolhidos para representar o primeiro período e é caracterizado por uma radiação solar global média diária $14,47 MJ m^{-2} dia^{-1}$, com 9,0 horas de insolação média. Neste período o saldo de radiação foi de $8,85 MJ m^{-2} dia^{-1}$, temperatura máxima de $28,29^\circ C$, temperatura mínima de $11,21^\circ C$, albedo médio de 0,09 e fluxo médio de vapor d'água de $7,96 MJ m^{-2} dia^{-1}$. A cultura se encontrava no estágio de desenvolvimento vegetativo (40 a 44 dias após a emergência -DAE), com altura média de 0,42 m e IAF=2,0. Os sensores foram colocados a 0,55 m e 1,55 m, respectivamente acima do dossel vegetativo.

A Figura 2 exibe a comparação entre a evapotranspiração estimada pelos métodos do balanço de energia (BERB), aerodinâmico simplificado (MAS) e Penman-Monteith (PM) no estágio de desenvolvimento vegetativo.

As curvas obtidas pelos três métodos são muito parecidas, sendo praticamente superpostas, com a evapotranspiração obtida pelo MAS suplantando as demais, no período da manhã e ficando abaixo destas no período da tarde. Como o fluxo de vapor d'água

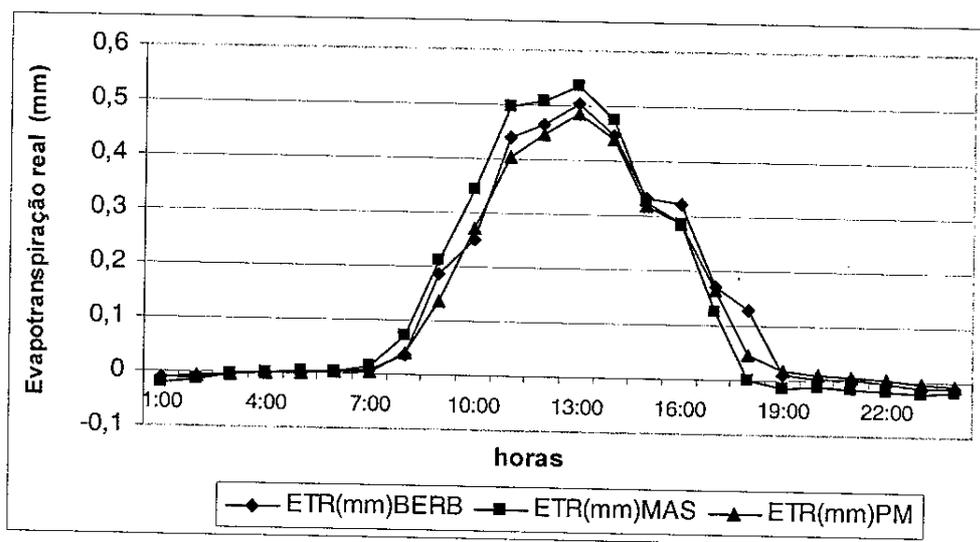


Figura 2. Curso diário da evapotranspiração média horária obtida pelos métodos BERB, MAS e PM, para o estágio de desenvolvimento vegetativo (14 a 18/07/99).

foi inferior ao saldo de radiação pode-se dizer que nos dias selecionados (14 a 18/07/99) para representar este estágio não houve advecção de calor sensível.

A regressão linear (Fig. 3), entre os métodos BERB e MAS mostra um ajuste muito bom ($R^2=0,96$), com coeficiente angular de 0,92. Entre PM e MAS também esta apresentou um ajuste excelente ($R^2=0,98$), com coeficiente angular de 0,88. Os resultados sugerem que o MAS superestimou os valores em relação aos métodos do BERB e PM.

Os dias 27/07 a 02/08/99 foram escolhidos para representar o segundo período e é caracterizado por uma radiação solar global de média diária 15,8 MJ m⁻² dia⁻¹, com média de 9,1 horas de insolação. Neste

período o saldo médio de radiação foi de 8,8 MJ m⁻² dia⁻¹, temperatura máxima de 29,81 °C, temperatura mínima de 11,30 °C, albedo médio de 0,13 e o fluxo de vapor d'água de 11,8 MJ m⁻² dia⁻¹. A cultura se encontrava no estágio de florescimento (53 a 60 DAE), com uma altura média de 0,55 m e IAF= 5,0. Os sensores foram colocados a 0,75 m e 1,75 m acima do dossel vegetativo.

Na Figura 4 tem-se a comparação entre a evapotranspiração estimada pelos métodos do balanço de energia, aerodinâmico e Penman-Monteith, no estágio de florescimento.

Essa figura sugere que o MAS superestima ligeiramente os valores, em relação aos demais métodos, em vários horários da parte da manhã e da

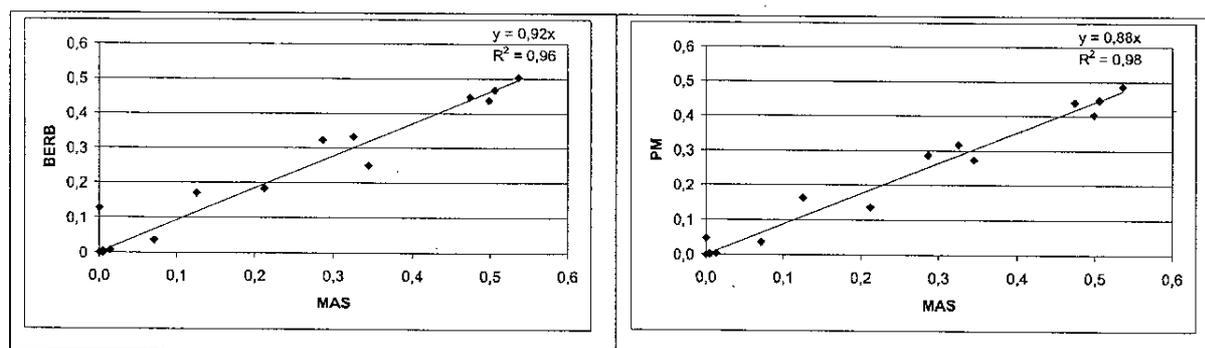


Figura 3. Regressão linear entre a evapotranspiração média horária, obtida pelos métodos BERB–MAS e PM–MAS (14 a 18/07/99).

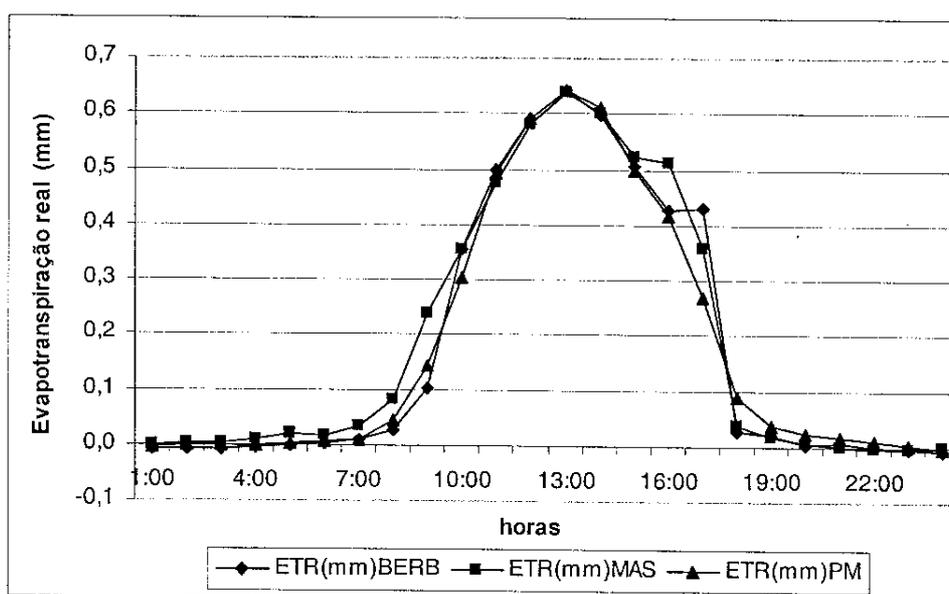


Figura 4. Curso diário da evapotranspiração real média horária obtida pelos métodos BERB, MAS e PM, para o estágio de florescimento (27/07 a 02/08/99).

parte da tarde. Há advecção de calor sensível, conforme pode-se depreender dos valores dos fluxos diários de vapor d'água e do saldo de radiação.

O coeficiente angular foi de 0,98, com coeficiente de determinação de 0,97, entre o BERB e o MAS. O método apresentou, também, boa correlação com PM com coeficiente angular de 0,95 e $R^2 = 0,98$ (Fig. 5).

Os dias 16 a 20/08/99 foram escolhidos para representar o terceiro período e é caracterizado por uma radiação solar global média diária de $19,11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com 9,7 horas de insolação média. Neste período o saldo de radiação foi de $9,19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, temperatura máxima de $26,07^\circ\text{C}$, temperatura mínima

de $9,54^\circ\text{C}$, e albedo médio de 0,15 e fluxo de vapor d'água de $10,48 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A cultura se encontrava no estágio de enchimento de grãos (73 a 77 DAE), com uma altura média de 0,75 m e $\text{IAF} = 5,5$. Os sensores foram colocados a 0,95 m e 1,95 m respectivamente, acima do dossel vegetativo.

Na Figura 6 tem-se a comparação entre a evapotranspiração estimada pelos métodos do balanço de energia, aerodinâmico e Penman-Monteith. A Figura 7 exibe a regressão linear entre o MAS e os outros dois métodos utilizados.

Neste estágio o MAS ora superestima, ora subestima os valores em relação aos demais métodos mas apresenta um boa concordância entre eles. Aqui

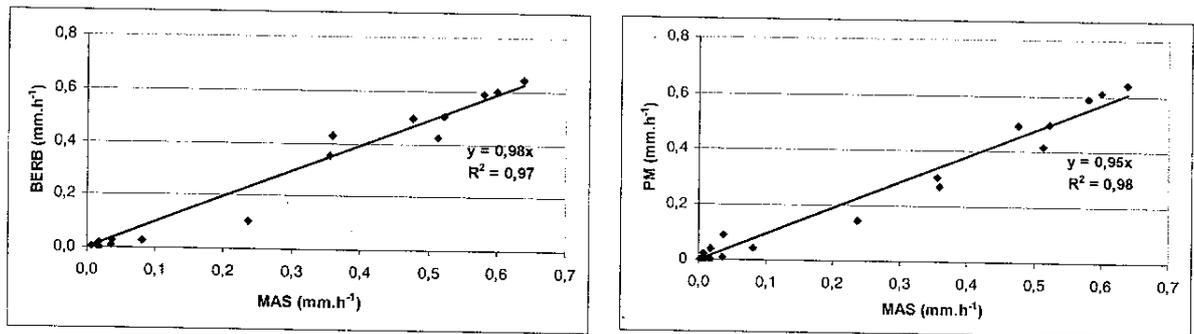


Figura 5. Regressão linear entre a evapotranspiração real obtida pelos métodos BERB – MAS e PM -MAS (27/07 a 02/08/99).

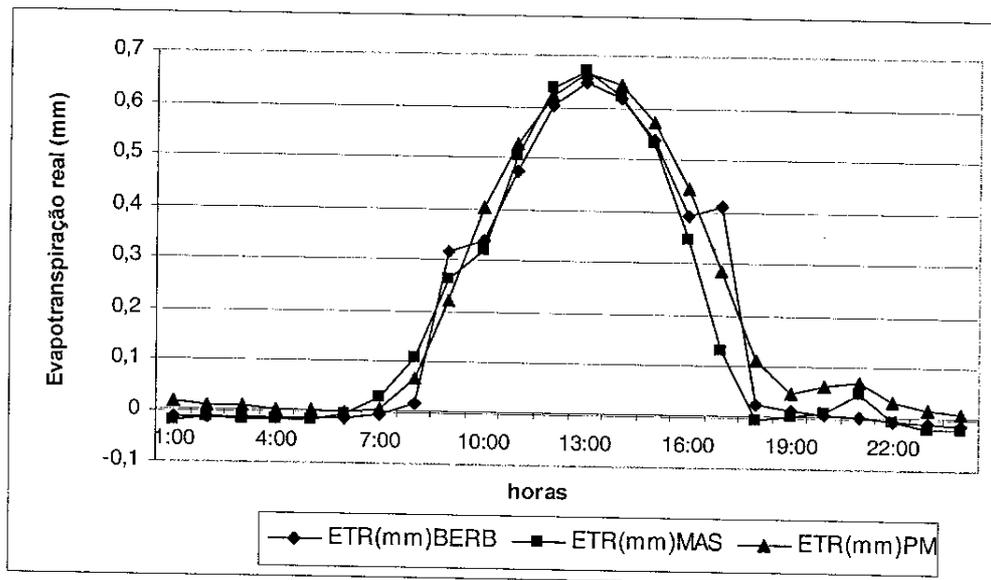


Figura 6. Curso diário da evapotranspiração média horária obtido pelos métodos BERB, MAS e PM, para o estágio de enchimento de grãos (16 a 20/08/99).

também há advecção de calor sensível para a superfície evaporante, pois o fluxo de vapor d'água suplanta o saldo de radiação.

A regressão linear (Fig. 7) entre BERB e MAS mostra um ajuste muito bom ($R^2=0,93$), com coeficiente angular de 1,0, mostrando uma concordância entre os métodos. Entre o PM e MAS o R^2 foi de 0,95 e o coeficiente angular de 1,05.

Os dias 24/08 a 02/09/99 foram escolhidos para representar o quarto período e é caracterizado por uma radiação solar global média diária de $18,55 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com 9,2 horas de insolação média. Neste período o saldo de radiação foi de $9,02 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, temperatura máxima de $30,30 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura mínima de $11,26 \text{ }^\circ\text{C}$, albedo médio de 0,13 e fluxo de vapor

d'água de $14,68 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A cultura se encontrava no estágio de maturação fisiológica (81 a 91 DAE), com uma altura média de 0,97m e IAF= 4,0. Os sensores foram colocados a 1,15 m e 2,15 m de altura respectivamente.

Na Figura 8 é mostrada a comparação entre a evapotranspiração estimada pelo MAS, o BERB e PM e na Figura 9 a regressão linear entre os métodos.

Pode-se notar uma forte advecção de calor sensível para a superfície considerada pois o fluxo de vapor d'água suplanta fortemente o saldo de radiação.

A regressão linear (Fig. 9) entre BERB e MAS mostra um ajuste muito bom ($R^2=0,96$), com coeficiente angular de 1,12 o que mostra que os

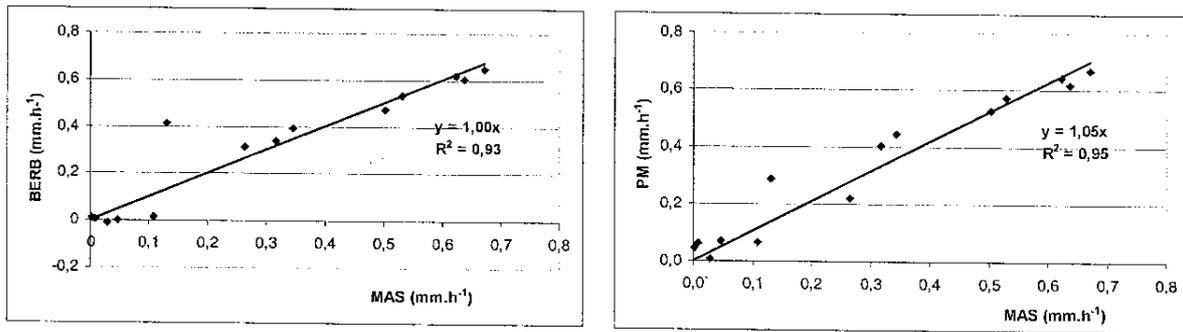


Figura 7. Regressão linear entre os fluxos de vapor obtidos pelos métodos BERB-MAS e PM-MAS, (24/08 a 02/09/99).

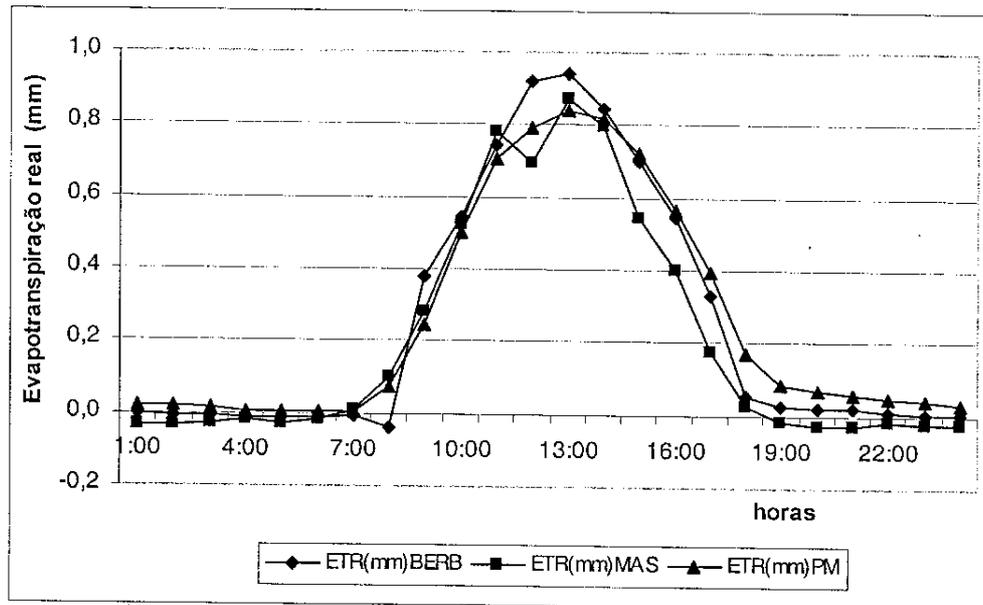


Figura 8. Curso diário da evapotranspiração média horária obtida pelos métodos BERB, MAS e PM, para o estágio de maturação fisiológica (24/08 a 02/09/99).

dados estão próximos da reta 1:1. Entre o PM e o MAS o R^2 foi de 0,92 e o coeficiente angular de 1,05.

ITIER (1980) obteve coeficiente de determinação de 0,95 na comparação do MAS com o MAC sobre alfafa, utilizando valores de $\frac{1}{4}$ de hora. FERNANDES (2001) conseguiu um $r^2 = 0,40$ entre o MAS e o método de Penman-Monteith, para valores horários.

Na Tabela 1 são apresentados os valores totais dos fluxos de energia para cada período. Nota-se que os valores totais do fluxo de vapor d'água, estimados pelos métodos, não diferem

significativamente, conforme mostrado pela análise estatística. Nos períodos de FL, EG e MF os valores do fluxo de vapor d'água suplanta aqueles do saldo de radiação, evidenciando que uma parcela do fluxo de calor sensível foi utilizada no processo evaporativo da superfície.

Nota-se que durante a fase de desenvolvimento vegetativo da cultura, o fluxo de vapor d'água obtido pelo MAS foi praticamente igual ao obtido pelo BERB. Porém, a partir da fase de florescimento o fluxo de vapor d'água obtido pelo MAS tende a subestimar os valores em relação aqueles obtidos pela BERB. Na comparação do MAS com PM, o primeiro superestimou os valores nos dois primeiros

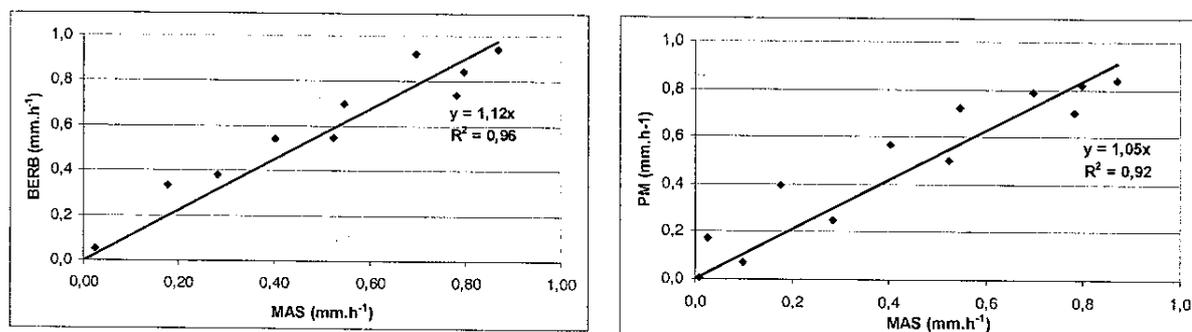


Figura 9. Regressão linear entre a evapotranspiração obtida pelos métodos BERB – MAS e PM-MAS, (24/08 a 2/09/99).

Tabela 1. Totais diários médios dos fluxos de energia envolvidos no balanço de energia sobre a cultura de feijão ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$).

Estádio	Q^*	G	H-BERB	λE -BERB	H-MAS	λE -MAS	λE -PM
DV	8,85	0,16	0,73	7,96	0,70	7,99	7,49
FL	8,75	-0,49	-2,54	11,78	-1,77	11,00	10,25
EG	9,19	-0,26	-1,03	10,48	-0,53	9,99	11,86
MF	9,02	-0,42	-5,24	14,68	-2,56	12,00	15,20

DV –desenvolvimento vegetativo; FL- florescimento; EG – enchimento de grãos; MF – maturação fisiológica.

Tabela 2. Valores da evapotranspiração real (mm) obtida pelos métodos aerodinâmico simplificado, balanço de energia e Penman-Monteith.

Estádio	ETR(BERB)	ETR(MAS)	ETR(PM)	BERB-MAS	PM-MAS
DV	3,25	3,26	3,06	0,00	-0,07
FL	4,20	4,49	4,19	-0,07	-0,07
EG	4,28	4,07	4,84	0,05	0,16
MF	5,99	4,90	6,21	0,18	0,21
MÉDIA	4,43	4,18	4,57	0,04	0,06

DV –desenvolvimento vegetativo; FL- florescimento; EG – enchimento de grãos; MF – maturação fisiológica.

estádios, invertendo-se a tendência nos estádios finais. Uma outra característica mostrada pelos três métodos foi a advecção de calor sensível, fato que ocorreu nos estádios de florescimento, enchimento de grãos e maturação fisiológica. Nesse particular o MAS foi o menos influenciado por esta característica. O erro médio percentual entre os três métodos variou de 4 a 6%.

A comparação entre os valores da evapotranspiração, pelos três métodos, nos diferentes estádios pode ser vista na Tabela 2.

Com o aumento em altura da cultura, o MAS teve a tendência de diminuir os valores em relação aos outros métodos, o que também foi observado por RANA E KATERJI (1996), para a cultura de sorgo. ITIER et al. (1981) obteve valores de evapotranspiração médios diários, pelo MAS com apenas 3% de diferença em relação ao BERB. Os valores médios obtidos por FERNANDES (2001) entre o MAS e o BERB resultaram em um $r^2=0,81$ e entre o MAS e PM foi $r^2=0,65$. Em se tratando de valores acumulados, ITIER et al.(1981) encontraram apenas 1% de diferença entre o MAS e o BERB. FERNANDES (2001) encontrou $R^2=0,99$ para ambas as correlações, utilizando-se valores acumulados.

Conclusões

O método aerodinâmico simplificado mostrou ser uma ferramenta eficaz para estimativa da evapotranspiração quando se dispõe de valores confiáveis dos gradientes de temperatura e velocidade do vento, medidos acima do dossel vegetativo.

Os resultados obtidos mostram que existe uma boa correlação entre os valores do fluxo de vapor d'água estimados pelo método aerodinâmico simplificado, quando comparado aos métodos do balanço de energia e de Penman-Monteith. O erro médio relativo entre o MAS e o BERB foi de 4% e entre o MAS e PM foi de 6%.

Referências Bibliográficas

ALFONSI, R.R. et al. Balanço de energia em milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.21, n.12, p. 1233-5, 1986.

ALLEN, R. G. et al. **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**, Rome: FAO, 1998, 301p. Irrigation and Drainage Paper 56.

ANDRÉ, R.G.B. **Aspectos energéticos e hídricos da cultura do milho (*Zea mays* L.) na região de Jaboticabal, SP**. Jaboticabal, 1996, 96 p. Tese (Livre-docência). FCAV/UNESP.

ARYA, S.P. **Introduction to micrometeorology**. 2nd. ed. San Diego. Academic Press, 2001. 420 p.

BERGAMASCHI, H. et al. Deficiência hídrica em feijoeiro, II. Balanço de energia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.23, n.7, p. 745-57, 1988.

CUNHA, G. R., BERGAMACHI, H. Balanço de energia em alfafa. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.2, p.9-16, 1994.

CUNHA, G. R. et al. Balanço de energia em cultura de milho: Estudo de casos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6, 1989. Maceió, AL. Anais..., São José dos Campos: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1989. p.417-26.

FERNANDES, E.J. **Determinação da evapotranspiração real pelos métodos da razão de Bowen e aerodinâmico simplificado**. Jaboticabal, 2001, 108p. Tese (Livre-docência), FCAV/UNESP. 108p, 2001.

FONTANA, D.C., BERLATO, M.A., BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília. v.26, n.3, p.403-10, 1991.

FROTA, P. C. E. **Estudo do calor sensível e latente no interior de uma cultura de milho (*Zea mays*, L.)**. Piracicaba, 1978. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia), ESALQ/USP, 1978.

ITIER, B. Um méthode simplifiée pour la mesure du flux de chaleur sensible. *Journal Recherches Atmospheriques*, v.14, n.1, p.17-34, 1980.

ITIER, B. Une méthode simple pour la mesure de l'évapotranspiration réelle à l'échelle de la parcelle. *Agronomie*, v.1, n.10, p.869-76, 1981.

estádios, invertendo-se a tendência nos estádios finais. Uma outra característica mostrada pelos três métodos foi a advecção de calor sensível, fato que ocorreu nos estádios de florescimento, enchimento de grãos e maturação fisiológica. Nesse particular o MAS foi o menos influenciado por esta característica. O erro médio percentual entre os três métodos variou de 4 a 6%.

A comparação entre os valores da evapotranspiração, pelos três métodos, nos diferentes estádios pode ser vista na Tabela 2.

Com o aumento em altura da cultura, o MAS teve a tendência de diminuir os valores em relação aos outros métodos, o que também foi observado por RANA E KATERJI (1996), para a cultura de sorgo. ITIER et al. (1981) obteve valores de evapotranspiração médios diários, pelo MAS com apenas 3% de diferença em relação ao BERB. Os valores médios obtidos por FERNANDES (2001) entre o MAS e o BERB resultaram em um $r^2=0,81$ e entre o MAS e PM foi $r^2=0,65$. Em se tratando de valores acumulados, ITIER et al.(1981) encontraram apenas 1% de diferença entre o MAS e o BERB. FERNANDES (2001) encontrou $R^2=0,99$ para ambas as correlações, utilizando-se valores acumulados.

Conclusões

O método aerodinâmico simplificado mostrou ser uma ferramenta eficaz para estimativa da evapotranspiração quando se dispõe de valores confiáveis dos gradientes de temperatura e velocidade do vento, medidos acima do dossel vegetativo.

Os resultados obtidos mostram que existe uma boa correlação entre os valores do fluxo de vapor d'água estimados pelo método aerodinâmico simplificado, quando comparado aos métodos do balanço de energia e de Penman-Monteith. O erro médio relativo entre o MAS e o BERB foi de 4% e entre o MAS e PM foi de 6%.

Referências Bibliográficas

ALFONSI, R.R. et al. Balanço de energia em milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.21, n.12, p. 1233-5, 1986.

ALLEN, R. G. et al. **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**, Rome: FAO, 1998, 301p. Irrigation and Drainage Paper 56.

ANDRÉ, R.G.B. **Aspectos energéticos e hídricos da cultura do milho (*Zea mays* L.) na região de Jaboticabal, SP**. Jaboticabal, 1996, 96 p. Tese (Livre-docência). FCAV/UNESP.

ARYA, S.P. **Introduction to micrometeorology**. 2nd. ed. San Diego. Academic Press, 2001. 420 p.

BERGAMASCHI, H. et al. Deficiência hídrica em feijoeiro, II. Balanço de energia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.23, n.7, p. 745-57, 1988.

CUNHA, G. R., BERGAMACHI, H. Balanço de energia em alfafa. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.2, p.9-16, 1994.

CUNHA, G. R. et al. Balanço de energia em cultura de milho: Estudo de casos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6, 1989. Maceió, AL. Anais..., São José dos Campos: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1989. p.417-26.

FERNANDES, E.J. **Determinação da evapotranspiração real pelos métodos da razão de Bowen e aerodinâmico simplificado**. Jaboticabal, 2001, 108p. Tese (Livre-docência), FCAV/UNESP. 108p, 2001.

FONTANA, D.C., BERLATO, M.A., BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília. v.26, n.3, p.403-10, 1991.

FROTA, P. C. E. **Estudo do calor sensível e latente no interior de uma cultura de milho (*Zea mays*, L.)**. Piracicaba, 1978. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia), ESALQ/USP, 1978.

ITIER, B. Um méthode simplifiée pour la mesure du flux de chaleur sensible. *Journal Recherches Atmospheriques*, v.14, n.1, p.17-34, 1980.

ITIER, B. Une méthode simple pour la mesure de l'évapotranspiration réelle à l'échelle de la parcelle. *Agronomie*, v.1, n.10, p.869-76, 1981.

- ITIER, B., CELIER, P., RIOU, C. Actual evapotranspiration measurement by a simplified aerodynamic system. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION. 1985. Chicago Illinois. Proceedings... p.201-215.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, London. v.107, p. 1-27, 1981.
- ORTEGA-FARIAS, S.O., CUENCA, R.H., EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by bulk aerodynamic method over grass canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, n. 81, p.131-146, 1996.
- PEDRO JUNIOR, M.J. **Balço de energia em soja (*Glycine max* L. Merrill)**. Piracicaba, 1977. 82p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1977.
- PEREZ, P.J. et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 97, p. 141-50, 1999.
- PRUEGER, J.H. et al. Bowen- ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration. *Agronomy Journal*, v.89, p.730-6, 1997.
- RIOU, C. Une expression analytique du flux de chaleur sensible en conditions suradiabatiques à partir de mesures du vent et de la température à deux niveaux. *Journal Recherches Atmospheriques*, v.1, n.16, p. 15-22, 1982.
- RANA, G. KATERJI, N. Evapotranspiration measurement for tall plant canopies: The sweet sorghum case. *Theoretical and Applied Climatology*, Volume 54, Issue 3 - 4, Sep 1996, p. 187 - 200.
- SÁ, L.D. de A., VISWANADHAM, Y., MANZI, A.O. Energy flux partitioning over the Amazon Forest. *Theoretical and Applied Climatology*, Wien, v.39, n.1, p.1-16, 1988.
- SANTOS, R.Z., ANDRÉ, R.G.B. Consumo da água nos diferentes estádios de crescimento da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.27, n.4, p.543-8, 1992.
- SILVA, L.D.B., FOLEGATTI, M. V., VILLA NOVA, N. A. . Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, SP, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005.
- UNLAND, H.E., et al. Surface flux measurements and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. *Agricultural and Forest Meteorology*, n. 82, p.119-153, 1996.
- VILLA NOVA, N.A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz**. Piracicaba, 1973. 89 p. Tese(Livre-Docência)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- VISWANADHAM, Y., ANDRÉ, R.G.B. Energy balance of soybeans grown in Brazil. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Ser B, Viena, v.33, p.141-57, 1983.