

MAURO KOJI KOBAYASHI

**PARAMETRIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO DOSSEL DA CULTURA
DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.) UTILIZANDO A RAZÃO DE
BOWEN ASSOCIADA À TERMOMETRIA A INFRAVERMELHO**

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Agrícola, para obtenção do
título "Doctor Scientiae"

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL

2001

MAURO KOJI KOBAYASHI

PARAMETRIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO DOSSEL DA CULTURA DO FEJJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.) UTILIZANDO A RAZÃO DE BOWEN ASSOCIADA À TERMOMETRIA A INFRAVERMELHO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título "Doctor Scientiae"

APROVADA: 10 de agosto de 2001

Dr. Reinaldo Lúcio Gomide
(Co-Orientador)

Dr. Paulo César Magalhães

Prof. Dr. Mauro Aparecido Martinez

Prof. Dr. Paulo Afonso Ferreira

Prof. Dr. Gilberto Chohaku Sedyama
(Orientador)

À minha família,

Ao Sr. Reinaldo L. Gomide,

Ao Sr. Gilberto C. Sedyama

Aos meus amigos

AGRADECIMENTO

Aos meus pais Manabo e Yassuko e ao meu irmão Eurico, que tanto me ensinaram e me apoiaram.

Especialmente ao Prof. Gilberto Sedyama e ao Dr. Reinaldo Gomide, pelo incentivo, amizade e valiosa orientação, sem os quais não teria concluído esse trabalho.

Ao Dr. Paulo César Magalhães e ao Prof. Márcio Mota Ramos, pela orientação, amizade, apoio e por estarem sempre disponíveis.

Ao Reinaldo e à Zuilma Gomide que me acolheram em sua casa na etapa final de elaboração da tese.

A todos os amigos que fiz durante a realização do curso.

Ao Carlos Solano, pela amizade e convívio.

Ao Edson e à Cidinha pela amizade e ajuda quando estive em Viçosa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo suporte financeiro.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização deste Curso.

À Embrapa Milho e Sorgo, pela possibilidade de realização, em suas dependências, de todas as etapas da tese.

Aos Profs. Mauro A. Martinez e Paulo A. Ferreira, pelas sugestões e críticas.

Aos funcionários da área de irrigação da Embrapa Milho e Sorgo: Ronaldo, Klebinho, Barão, Juca, pela amizade e colaboração na execução deste trabalho.

Aos amigos do NIASA: Evandro, Ricardo, Paulo Emílio, Camilo, João Batista, Levi, Osvaldo, Marcinho.

Aos pesquisadores e funcionários da Embrapa Milho e Sorgo.

Aos professores e funcionários do DEA.

BIOGRAFIA

MAURO KOJI KOBAYASHI, filho de Manabo Kobayashi e Yassuko Kobayashi, nasceu em Osvaldo Cruz, SP, em 5 de setembro de 1970.

Em 1987, concluiu o 2º grau na Escola Estadual de Primeiro e Segundo Grau Benjamim Constant, em Osvaldo Cruz, SP.

Em 1988, iniciou o Curso de Graduação em Agronomia na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, SP, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, diplomando-se em dezembro de 1992.

No primeiro semestre de 1993, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, concluindo em agosto de 1995.

LISTA DE SÍMBOLOS

β	valor da Razão de Bowen();
Δ	declividade da relação pressão de saturação de vapor "versus" temperatura (kPa.°C ¹);
ϵ	emissividade ();
γ	constante psicrométrica (kPa.°C ¹);
λ	calor latente de vaporização (MJ.kg ¹);
ρ	densidade do ar seco(kg.m ³);
σ	constante de Stefan Boltzmann (W.m ² .K ⁴);
λLe	fluxo de calor latente (W.m ²);
c_p	calor específico do ar seco (J.kg ¹ .°C ¹);
d	deslocamento do plano zero do perfil de velocidade do vento (m);
DAS	dias após a semeadura (dias);
DPV	déficit de pressão de vapor d'água do ar (kPa);
e_a	pressão parcial de vapor (kPa);
e_a^*	pressão de saturação do vapor a T_a (kPa);
e_{a1}	pressão parcial de vapor na altura z_1 (kPa);
e_{a2}	pressão parcial de vapor na altura z_2 (kPa);
ET	evapotranspiração;
ETc	evapotranspiração cultura;
ETc _{mm}	evapotranspiração cultura (mm);
ETo	evapotranspiração de referência;

ETcPM evapotranspiração da cultura estimada por meio da equação de Penman-Monteith ($W.m^2$);

ETcRB evapotranspiração da cultura obtida por meio do sistema razão Bowen ($W.m^2$);

f fator de conversão, energia em lâmina de irrigação;

$f_{(IAFxSen)}$ fator de correção para IAF e senescência;

f_{sen} fator de senescência;

G fluxo de calor no solo ($W.m^2$);

H fluxo de calor sensível ($W.m^2$);

hc altura média da cultura (m);

IAF índice de área foliar;

IAF_{efet} IAF efetivo;

$IAF_{efet\ max}$ IAF_{efet} máximo no ciclo fenológico da cultura;

Ic índice de concordância;

IEHC Índice de estresse hídrico da cultura;

k Constante de von Karman ();

Kc coeficiente de cultura;

K_H coeficientes de transporte turbulento de calor sensível ($m^2.s^{-1}$);

K_v coeficientes de transporte turbulento de calor latente ($m^2.s^{-1}$);

O média dos valores de ETc obtidos pelo sistema de Razão de Bowen ($W.m^2$);

Oi valores de ETc obtidos pelo sistema de Razão de Bowen ($W.m^2$);

Pi valores de ETc estimada pela equação de Penman-Monteith ($W.m^2$);

PM Penman-Monteith;

R radiação emitida($W.m^2$);

RB Razão de Bowen;

r_c resistência do dossel da cultura ($s.m^{-1}$);

r_{cp} valor mínimo de resistência do dossel da cultura ($s.m^{-1}$);

r_i resistência climática ($s.m^{-1}$);

R_n saldo de radiação para a superfície ($W.m^2$);

r_s resistência estomática ($s.m^{-1}$);

SEE Erro padrão da estimativa;

T_a temperatura do ar($^{\circ}C$);

T_{a1} temperatura do ar na altura z_1 ($^{\circ}C$);

T_{a2}	temperatura do ar na altura z_2 ($^{\circ}\text{C}$);
T_c	temperatura do dossel da cultura ($^{\circ}\text{C}$);
T_s	temperatura da superfície ($^{\circ}\text{K}$);
U_z	velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);
z	altura (m);
z_1 e z_2	alturas de medição (m);
Z_h	altura de medida da temperatura do bulbo molhado e seco (m);
Z_m	altura de medida de U_z (m);
Z_{oh}	comprimento de rugosidade para o transporte de vapor e calor sensível (m);
Z_{om}	comprimento de rugosidade da cultura para o momentum (m).

LISTA DE QUADROS

QUADRO		Página
1	Algumas características físico-hídricas e granulométrica do solo da área experimental. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998. ...	11
2	Resultado analítico médio de algumas características químicas do solo da área experimental. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	12
3	Dados registrados pelo sistema Razão de Bowen, na planilha eletrônica Excell, com os dados relativos a 20 minutos transportados para uma única linha.	22
4	Condições para serem satisfeitas pelo método RB, de forma que o sentido e as direções dos fluxos de λLe e H estejam corretas e consistentes com a equação 14. R_n é o saldo de radiação, G é o fluxo de calor no solo. Δe_a é a diferença de pressão entre as medições do braço superior e inferior. λLe é o fluxo de calor latente e H é o fluxo de calor sensível (PEREZ et al., 1999).	24
5	Dados processados, na planilha eletrônica Excell, para o cálculo da evapotranspiração da cultura do feijoeiro.	25
6	Início das fases de desenvolvimento do feijoeiro, em dias após a semeadura (DAS) e duração de cada estágio, dias. Dados obtidos em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	31
7	Medições realizadas por meio do transdutor de termometria a infravermelho, em que IEHC é o índice de estresse hídrico da cultura. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	39
8	Distribuição da frequência da direção e sentido predominante do vento, no período de 16 e 76 DAS, entre 6h40min. e 7h40min.	43
9	Índices de comparação entre os métodos de estimativa da ET_c , calculada pela equação de PM, utilizando a temperatura do dossel da cultura para calcular a r_c e obtida pelo método RB, tomado como padrão ($y = ax + b$).	49

LISTA DE FIGURAS

FIGURA

01	Foto ilustrativa da área experimental, indicando a noroeste a estação agroclimatológica automática. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	12
02	Representação dos fluxos de energia na interface entre o ar e a superfície, mostrando a convenção de sinais. "A" representa a contribuição de algum fluxo de energia advectiva, R_n é o saldo de radiação, λL_e é o fluxo de calor latente, H é o fluxo de calor sensível, G é o fluxo de calor no solo, Δe e ΔT é a diferença de pressão de vapor e temperatura medidas em duas alturas, $\partial e/\partial z$ e $\partial T/\partial z$ são os gradientes de pressão e de temperatura (PEREZ et al., 1999).	15
03	Sistema Razão de Bowen com sensores de temperatura do ar e pontos de aspiração do ar (pressão de vapor), velocidade e direção do vento, abrigos de proteção e painel solar. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	17
04	Detalhe dos sensores utilizados no método Razão de Bowen: saldo radiômetro (a); sensores de velocidade e direção do vento (b); termopares e pontos para coleta de amostra de ar (c); "datalogger" (d); termopares e placas de fluxo de calor no solo (e) (CAMPBELL SCIENTIFIC, 1997).	18
05	Transdutor de termometria a infravermelho ("Model 510B AG Multimeter").	26
06	Altura de planta observada e estimada, em função de dias após a semeadura (DAS), em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	32
07	Fitomassa aérea fresca, em função de dias após a semeadura (DAS), em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	33

08	Fitomassa aérea seca, em função de dias após a semeadura (DAS), em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	33
09	Índice de área foliar, em função de dias após a semeadura (DAS) em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	34
10	Resistências estomática (r_s) e do dossel da cultura (r_c), em função de dias após a semeadura (DAS), em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	35
11	Lâminas de água aplicada pela irrigação e proveniente de chuvas ocorridas durante o ciclo fenológico da cultura do feijoeiro. As barras representam as lâminas de água de cada irrigação ou chuva e os pontos são as lâminas acumuladas. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	36
12	Conteúdo de umidade do solo ao longo do ciclo fenológico da cultura do feijoeiro, para quatro faixas de profundidade. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	37
13	Linha base não estressada, que relaciona a diferença entre as temperaturas do dossel da cultura e do ar ($T_c - T_a$) com o déficit de pressão de vapor do ar (DPV). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	40
14	Comportamento do índice de área foliar total (IAF) versus IAF efetivo (IAF_{efet}), ao longo do ciclo fenológico da cultura do feijoeiro. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	41
15	Variação diurna, aos 18 dias após a semeadura (DAS), no estágio V_3 do feijoeiro (1ª folha trifoliada), de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação- R_n , fluxo de calor sensível- H , fluxo de calor latente ET_{cRB}) e da ET_c calculada pela equação de Penman-Monteith (ET_{cPM}), velocidade do vento (Vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	44
16	Variação diurna, aos 33 dias após a semeadura (DAS), no estágio R_7 do feijoeiro (pré-floração), de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação- R_n , fluxo de calor sensível- H , fluxo de calor latente ET_{cRB}) e da ET_c calculada pela equação de Penman-Monteith (ET_{cPM}), velocidade do vento (Vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	45
17	Variação diurna, aos 41 dias após a semeadura (DAS), no estágio R_7 do feijoeiro (Formação de vagens), de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação- R_n , fluxo de calor sensível- H , fluxo de calor latente ET_{cRB}) e da ET_c calculada pela equação de Penman-Monteith (ET_{cPM}), velocidade do vento (Vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	46

18	Variação diurna, aos 73 dias após a semeadura (DAS), no estádio R ₉ do feijoeiro (maturação), de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-R _n , fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (Vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r _i /r _a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	47
19	Relação entre a evapotranspiração da cultura calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM) e a evapotranspiração da cultura medida pela Razão de Bowen (ETcRB). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	48
20	Evapotranspiração da cultura calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), em relação à evapotranspiração da cultura sem aplicação do espalhante adesivo, medida pelo sistema Razão de Bowen (ETcRB _{se}), para 48, 50 e 52 dias após a semeadura (DAS). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	50
21	Evapotranspiração (ETcRB) da cultura do feijoeiro, saldo de radiação (R _n) e fluxo de calor sensível (H), sob influência de espalhante adesivo, medidos pelo sistema de Razão Bowen, e a evapotranspiração provável sem a aplicação do espalhante adesivo (ETcRB _{se}). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.	51

ÍNDICE

RESUMO	xii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1. Equação de Penman-Monteith	03
2.2. Balanço de Energia / Razão de Bowen	05
2.3. Balanço de Energia / Temperatura do dossel da cultura	07
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1. Manejo da Irrigação	13
3.1.1. Descrição do sistema Razão de Bowen	13
3.1.2. Medição da evapotranspiração	16
3.2. Cálculo da resistência do dossel da cultura e da evapotranspiração da cultura	26
3.3. Estudo comparativo de métodos de cálculo de ET_c	29
3.4. Efeito do espalhante adesivo na evapotranspiração da cultura	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Avaliações fenológicas e fisiológicas	31
4.2. Manejo da Irrigação	34
4.3. Cálculo da resistência do dossel da cultura e da evapotranspiração da cultura	38
4.4. Efeito do espalhante adesivo na evapotranspiração	49
5. CONCLUSÕES	52
6. LITERATURA CITADA	53
ANEXOS	57

RESUMO

KOBAYASHI, Mauro Koji, D.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2001.
Parametrização da resistência do dossel da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizando Razão de Bowen associada à termometria a infravermelho. Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama, Co-orientador: Reinaldo Lúcio Gomide. Conselheiros: Márcio Mota Ramos e Luiz Cláudio Costa.

Em um sistema de agricultura irrigada, a necessidade hídrica das culturas é um dos fatores mais importantes a serem obtidos, principalmente porque a disponibilidade de água está cada vez menor, devido ao aumento da demanda de consumo pelos setores urbano, industrial e agrícola. Dessa forma, são necessários estudos no sentido de implementar determinações da evapotranspiração das culturas (ET_c) que permitam a otimização da quantidade de água utilizada nos perímetros irrigados, em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura. Atualmente, é mais comum elaborar o cálculo da ET_c em duas etapas: primeiro, estima-se a evapotranspiração de referência (ET_o) e, a seguir, multiplica-se esta ET_o por um coeficiente de cultura (K_c). Uma forma mais vantajosa de cálculo de ET_c seria a sua estimativa em uma só etapa, eliminando a necessidade de utilização de K_c's. A equação de Penman-Monteith (PM) pode ser utilizada, porém, sua aplicação prática é limitada pela falta de um método confiável para obter os valores de resistência do dossel da cultura (r_c). Dessa forma, este trabalho teve como objetivos: a) calcular a ET_c para o manejo da irrigação utilizando o método Razão de Bowen (RB); b) calcular a r_c do feijoeiro parametrizada em função de características da planta (temperatura do dossel da cultura-T_c) e da atmosfera (saldo de radiação-R_n, déficit de pressão de vapor-DPV e temperatura do ar-T_a); c) comparar os valores de

ETc, calculada utilizando-se esse r_c , com valores obtidos pelo método de RB. Foi conduzido um experimento, em 1,2 ha, na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG. A cultivar de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizada foi a Jalo. A irrigação foi efetuada com um sistema de aspersão convencional e o cálculo da lâmina de água a ser aplicada foi realizado pelo método RB. Usou-se um sistema da CAMPBELL SCIENTIFIC, que gerenciava o processo de aquisição automática dos dados relativos ao balanço de energia e os armazenava a cada intervalo de 20 minutos. Para o desenvolvimento de uma equação empírica de uma linha base não estressada, usando dados medidos de DPV e a diferença entre T_c e T_a , foram selecionados dias em que a cultura estava evapotranspirando potencialmente, com 100% de cobertura vegetal. Essa equação foi usada para obter os valores de $T_c - T_a$ a partir de DPV medido, que foram utilizados para o cálculo de r_c . Posteriormente, uma metodologia foi proposta para a correção de r_c em função do índice de área foliar e um fator de senescência, visando sua utilização em outras fases do ciclo fenológico da cultura. A ETc, foi então, calculada, substituindo os valores de r_c na equação de PM. O resultado relativo à obtenção da equação empírica da linha base não estressada indicou bom ajuste da equação (r^2 de 0,842), e boa concordância (índice de concordância - $I_c = 0,965$) entre os valores obtidos pela equação e os medidos no campo. De modo geral, os valores de ETc calculados com a equação de PM estão subestimados. A equação que relaciona a ETc determinada por PM com a obtida por RB se mantém praticamente paralela à reta 1:1, com uma diferença média de -45 W.m^{-2} , provavelmente devido à contribuição de energia advectiva proveniente de áreas externas. Em vários horários de medição de diferentes dias do ciclo fenológico da cultura, o fluxo de calor latente obtido pelo sistema RB ultrapassou o valor do saldo de radiação, reforçando a possibilidade de ter havido efeito de advecção. A razão entre a resistência climática e a resistência aerodinâmica foi utilizada como indicador do efeito da contribuição de energia advectiva de áreas adjacentes à área experimental. Concluiu-se que: a) os maiores valores da relação r_i/r_a , correspondem aos menores valores de ETc determinados pela equação de PM, quando comparados com os valores obtidos pelo método RB; b) a ETc calculada pela equação de PM, utilizando r_c calculada a partir da T_c , foi subestimada, quando comparada com a obtida pelo método RB; c) o efeito da advecção afetou diretamente a correlação entre os valores calculados e medidos de ETc, dificultando a

análise do método de cálculo de r_c que foi proposto; d) a aplicação do espalhante adesivo alterou a partição da energia disponível, afetando também, a T_c e r_c . Recomenda-se que nova pesquisa seja efetuada, para verificar a eficiência do método de cálculo de r_c proposto, em uma área com maior bordadura, diminuindo o efeito da contribuição advectiva.

ABSTRACT

KOBAYASHI, Mauro Koji, D.S., Universidade Federal de Viçosa, August, 2001.

Parameterization of dry bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.) canopy resistance by means of energy balance (Bowen Ratio) approach associated with infrared thermometry for determining evapotranspiration rates and irrigation scheduling. Adviser: Gilberto Chohaku Sedyama, Co-Adviser: Reinaldo Lúcio Gomide. Committee members: Márcio Mota Ramos and Luiz Cláudio Costa.

In a irrigated agriculture, the crop water requirements is one of the most important parameter to be obtained, specially due to the limited available water, increasing demand of water consumption in urban and industrial sectors. Therefore, it is evident the need of studies in order to determine crop evapotranspiration (ET_c), which would permit the optimizations of amount of water used in the irrigated areas for different crop growth stage. Actually, ET_c is readily calculated in two steps: first, the reference evapotranspiration (ET_o) is estimated, and then multiplied by a crop coefficient (K_c). The most reliable way of calculating ET_c would be in only one step, eliminating the need of using K_c's. The original Penman-Monteith equation (PM) can be used, although it is limited in its practical application, due to the lack of a reliable method of attaining the values of crop canopy resistance (r_c). The objectives of this research were: a) to calculate the ET_c for irrigation scheduling using the Bowen-ratio technique (BR); b) to obtain the r_c values for dry bean canopy, using the crop canopy temperature, T_c, and others atmosphere parameters such as: net radiation, R_n, vapor pressure deficit, VPD and air temperature, T_a); and c) to compare the calculated values of ET_c using the later r_c, to ET_c values obtained by BR technique. The research was carried out in an experimental area of 1,2 ha at EMBRAPA Milho e Sorgo, located at

Sete Lagoas, MG. The cultivar chosen of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) was *Jalo*. The irrigation water was applied using a sprinkle irrigation system and the ET_c was measured by using the BR technique. A Campbell Scientific system was setup with an automatic acquisition system to obtain the energy's balance, every 20 minutes. Typical days, in which the crop was evapotranspiring in such full-cover vegetation, were selected to develop an empirical equation of a non-water-stressed baseline using VPD data and the difference between T_c and T_a. The derived equation was used in order to obtain the values of T_c - T_a, from measured VPD used to calculate r_c. Afterwards, a methodology to correct r_c in function of the leaf area index and a plant senescence factor was proposed, with the objective of using in another crop growth stage. The ET_c was then calculated, substituting the values of r_c in the PM equation. The results obtained from the empirical equation for non-water-stressed baseline indicated a good fit to the linear equation ($r^2 = 0,842$) between the values obtained from the equation and those measured at the field crop conditions. In general, the ET_c values calculated with the original PM equation were underestimated. The equation which related the ET_c, obtained from original PM, to the ET_c obtained by BR, was nearly parallel to the straight line 1:1, with an average deviation of -45 W.m^{-2} , probably due to the contribution of the advective energy from adjacent areas. Several measurements, in different crop growth stage, the latent heat flux obtained by BR system exceeded the value of the net radiation, due to sensible heat advection effect. The ratio between the climatic and aerodynamic resistances (r_i/r_a) was used as indicator of the effect of the sensible heat advective energy contribution from the adjacent areas of the experiment. The results may lead to the following conclusions: a) the largest values of the ratio (r_i/r_a) corresponded to the smallest values of ET_c determined by PM equation, when compared with the values obtained by BR method; b) the ET_c, calculated by PM equation and using r_c calculated from T_c was underestimated when compared with the one obtained from BR method; c) the advection effect influenced directly the correlation between the calculated and measured ET_c values. The advection effect made no reasonable interpretation to the proposed r_c calculation; d) the application of the surfactant modified the partition of the available energy, affecting T_c and r_c.

1. INTRODUÇÃO

Em um sistema de agricultura irrigada, a determinação da necessidade hídrica das culturas é um dos fatores mais importantes a serem obtidos, principalmente porque a disponibilidade de água está cada vez menor, devido ao aumento da demanda de consumo pelos setores urbano, industrial e agrícola. Dessa forma, são necessários estudos no sentido de implementar determinações da evapotranspiração (ET) que permitam a otimização da quantidade de água a ser utilizada nos perímetros irrigados, em diferentes estádios de desenvolvimento das culturas, visando melhorar o uso e o manejo de água e aumentar a eficiência dos sistemas de irrigação.

A ET pode ser obtida por diferentes métodos, que se baseiam em parâmetros físicos do solo, climáticos, microclimáticos e fisiológicos das plantas.

Um método fundamentado em parâmetros microclimáticos bastante conhecido é a Razão de Bowen (RB), que apresenta a vantagem de não necessitar informações sobre as características aerodinâmicas da superfície de interesse, de integrar o fluxo de calor latente de extensas áreas e de estimar o fluxo em escala de tempo menor que a horária. Entretanto, para se obterem valores precisos de ET, são necessárias medições acuradas do gradiente de temperatura e de umidade. Isso requer equipamentos com muita sensibilidade e precisão, o que encarece o custo do sistema.

Atualmente, é mais comum calcular a evapotranspiração da cultura (ET_c) em duas etapas: primeiro, estima-se a evapotranspiração de referência (ET_o) e, a seguir, multiplica-se esta ET_o por um coeficiente de cultura (K_c). Uma forma mais vantajosa de cálculo de ET_c seria a sua estimativa em uma só etapa, eliminando a necessidade de utilização do K_c. Para tanto, seria necessário usar um modelo de estimativa da ET_c que

melhor representasse os efeitos das condições climáticas e dos valores das resistências aerodinâmica (r_a) e do dossel da cultura (r_c), que são específicos para cada cultura. A equação de Penman-Monteith (PM) é bastante usada e sua formulação teórica pode ser obtida a partir da equação do balanço de energia, que relaciona a diferença entre as temperaturas do dossel da cultura (T_c) e do ar (T_a) com o déficit de pressão de vapor (DPV) do ar, o saldo de radiação (Rn) e as resistências r_c e r_a .

A proposta resultante de uma discussão de vários pesquisadores, organizada e recomendada pela FAO, é que r_c seja calculada em função da resistência estomática (r_s) e do índice de área foliar (IAF) da cultura (SMITH, 1991), ou seja:

$$r_c = \frac{r_s}{0,5.IAF} \quad (1)$$

em que:

r_c - resistência do dossel da cultura ($s.m^{-1}$);

r_s - resistência estomática ($s.m^{-1}$);

IAF - índice de área foliar.

A limitação dessa proposta é a obtenção de valores confiáveis e consistentes de r_s , uma vez que há grande variação com a hora do dia, as condições climáticas, a idade da folha escolhida para a determinação e, além do fato da determinação representar uma medida pontual, necessitando, assim, inúmeras amostragens para caracterizar a cultura no campo.

Para a aplicação prática da equação de PM é necessário realizar estudos no sentido de se formular um método confiável e simples para se obter valores de r_c para as diferentes culturas.

Este trabalho teve como objetivos: a) calcular a ET_c para o manejo da irrigação utilizando o método RB; b) calcular a resistência do dossel da cultura (r_c) do feijoeiro parametrizada em função de características da planta (T_c) e da atmosfera (Rn, DPV, T_a); c) comparar os valores de ET_c , calculada utilizando-se esse r_c , com os valores obtidos pelo método RB.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vários trabalhos têm sido conduzidos nos últimos 50 anos sobre a evapotranspiração em superfícies cultivadas e naturais. Isso tem levado à considerável progresso para a compreensão dos processos fisiológicos e físicos que determinam a taxa de evaporação, permitindo um avanço nas técnicas de medições e proporcionando uma grande quantidade de simulações e modelos de predição, bem como inúmeras aplicações dirigidas ao usuário. Apesar disso, questões como aquelas relacionadas ao determinismo do cálculo da resistência da superfície à evapotranspiração necessitam ser pesquisadas (ITIER e BRUNET, 1996).

2.1. Equação de Penman-Monteith

A equação de PM é freqüentemente utilizada para estimar a r_c , quando todos os outros termos da equação são conhecidos. Alguns trabalhos têm comparado a r_c determinada por esse processo com valores médios medidos da resistência estomatal de folhas individuais de todo o dossel. Diferenças ocorrem devido: a) amostragens imperfeitas de folhas e método arbitrário no cálculo do valor médio da condutância para representar o dossel da cultura; b) dependência da r_c de fatores não fisiológicos como a evaporação da água do solo úmido ou ramos; e c) complexidade do comportamento aerodinâmico do dossel da cultura (Finnigan e Raupach, 1996; Raupach e Finnigan, 1998; Baldocchi et al., 1991; citados por CAMPBELL, 2000).

Apesar de ser provável que a estimativa da r_c obtida por meio da equação de PM sempre seja afetada por algum grau de processos não fisiológicos, pequenos progressos

podem ser conseguidos apesar de não assumir que: a) a condutância seja determinada primeiramente pelo comportamento do estômato a diferentes níveis de dentro do dossel; e b) que o comportamento final destes estômatos seja comparável com aquele de uma única grande folha individual, apesar da grande variação por todo o dossel, especialmente da radiação solar. Se estas considerações são adotadas, a resistência deveria ser correlacionada com os fatores ambientais que governa a resistência estomatal de folhas individuais em experimentos dentro de laboratórios (MONTEITH, 1995).

Na tentativa para fazer uma relação determinística da r_c com fatores climáticos, pode-se assumir que a r_c é a soma de componentes fisiológicos e climáticos, embora estes dois componentes realmente não possam ser separados segundo Finningan e Raupach, 1987 (STEDUTO et al., 1996).

Uma hipótese para explicar diferenças entre a ET_o medida e estimada diz respeito ao conceito de resistência do dossel e a relação entre a vegetação e a condição climática da atmosfera existente. No caso da equação de PM, r_c é chamado mais corretamente de resistência da superfície, porque não representa um termo puramente fisiológico.

A equação de PM, embora com base fisiológica, tem sido processada e utilizada com algumas suposições/simplificações. A primeira, é a redução da condição do fluxo de energia na cultura em três dimensões (que deve ser homogêneo, mesma altura, contínuo e extenso) para uma condição de uma única grande folha ("big leaf") unidimensional, onde a energia disponível é absorvida e do qual o calor latente e sensível são dissipados. Visto que esta "big leaf" não está saturada, também é necessário considerar que há outra superfície, com mesma temperatura, que está saturada e de onde, o fluxo de calor latente origina. Enquanto, o fluxo de calor sensível encontra uma única resistência (r_a), o fluxo de calor latente é controlada por duas resistências em séries ($r_a + r_c$) (ALVES et al., 1998).

RANA et. al. (1997) verificaram que vários autores têm aplicado a equação de PM para estimar a ET_c em diferentes culturas no campo, por exemplo: Perrier et. al. (1980) testaram a equação em alfafa, Steiner et al. (1991) avaliaram a equação para o sorgo granífero, Howell et. al. (1994) em trigo de inverno, sorgo e milho. Em todos estes trabalhos foi fixado um valor de r_c para todo o ciclo fenológico da cultura, a partir

de valores medidos da r_s (como recomendado por ALLEN et. al., 1989) ou estimado por modelos aplicados para a cultura sem estresse hídrico (IDSO, 1983).

Recentemente, a equação de PM tem despertado um renovado interesse, especialmente para prever a ET em um único passo, sem o uso do coeficiente de cultura. Porém, para uso da equação de PM, metodologias para determinar a r_a e a r_c devem estar disponíveis. Esforços têm sido realizados para se determinar r_c de forma mais fácil e com maior acurácia. Normalmente, têm-se utilizado medições de resistência estomatal, devido à falta de modelos confiáveis do funcionamento estomatal, para determinar r_c diretamente de parâmetros climáticos (ALVES et. al., 1998).

Segundo ITIER e BRUNET (1996), o cálculo da r_c pode ser obtido por meio da integração da resistência estomatal das folhas individuais do dossel como um todo ou utilizando a equação de PM, quando todas as outras variáveis são conhecidas. Uma grande quantidade de metodologias tem sido proposta nos últimos 15 anos. Por exemplo, uma simples expressão da r_c , como a soma em paralelo das resistências individuais das folhas, ponderada pela fração da área das folhas em cada camada. Ainda segundo os mesmos autores, Rochette et al. (1991) compararam seis dessas metodologias e mostraram que proporcionaram uma estimativa pobre. Tanto os métodos que calculam r_c por meio da integração da resistência estomatal das folhas individuais do dossel como aqueles que utilizam a equação de PM não contemplam a não-linearidade inerente da combinação das equações das resistências.

2.2. Balanço de Energia / Razão de Bowen

A partição da energia disponível entre o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (λLe) depende da disponibilidade de água para as plantas. Sob condição em que o suprimento de água não é limitante e onde há cobertura total do solo, a maior parte da energia é utilizada para o λLe e, ao contrário, a energia é utilizada para o H. Suprimento inadequado de água causa decréscimo no fluxo de calor latente, devido ao fechamento dos estômatos, resultando em aumento na temperatura do dossel da cultura, levando ao aumento de H (Campbell e Norman, 1990; citados por KALLURI et al., 1998).

O método do balanço de energia para determinar a ET_c tem condições de ser utilizado para valores horários, especialmente durante as horas de brilho solar. A Razão

de Bowen é o método mais comumente utilizado como método do balanço de energia. Valores noturnos confiáveis são difíceis de serem obtidos, por causa da necessidade de se obterem valores extremamente precisos dos componentes do balanço de energia, que podem ser negativos e/ou praticamente iguais, porém com sinais opostos. O método depende dos gradientes determinados acima do dossel da planta, porém o cálculo dos fluxos de vapor d'água é independente das resistências estomatais de uma forma individual, ou do próprio dossel vegetativo da planta. A precisão desse método decresce, da mesma forma como a dos demais métodos, com o decréscimo do fluxo de vapor d'água causado pelo aumento na resistência do dossel e/ou pela baixa demanda evaporativa.

O método RB assume algumas considerações, segundo Fritschen e Simpson (1989), citados por TODD et al. (2000): o transporte é unidimensional, sem gradiente horizontal; os sensores que medem os gradientes estão localizados dentro da subcamada de equilíbrio, onde os fluxos são considerados constantes com a altura; a superfície é homogênea em relação à origem e destino do calor, vapor d'água e momentum; a razão entre os coeficientes de troca turbulenta para calor sensível e calor latente é igual a 1.

O método RB apresenta as seguintes vantagens: é direto, possui medições simples, não requer informações sobre as características da superfície de interesse, integra λLe de extensas áreas (centenas e milhares de metro quadrado), estima λLe em pequenos períodos de tempo (menor que uma hora) e fornece medições contínuas. As desvantagens desse método são: sensibilidade a erros sistemáticos dos instrumentos que medem os gradientes dos termos do balanço de energia, possibilidade de descontinuidade dos dados, quando o valor da Razão de Bowen (β) se aproxima de -1, e requerer uma adequada bordadura para assegurar as considerações assumidas pelo método (TODD, 2000).

As condições hídricas da superfície evaporante é que vão definir os valores de β . Após uma aplicação de água, irrigação ou chuva, essa superfície vai estar bem umedecida e uma maior parte de R_n vai ser utilizada para λLe , resultando em valores baixos de β . Caso contrário, em uma condição de estresse hídrico, essa superfície vai apresentar restrição hídrica e uma maior parte de R_n vai ser utilizada no aquecimento do ar (H), fornecendo valores elevados de β (GOMIDE, 1998 e PEREIRA, 1997).

Alguns autores, como KUSTAS et al. (1996) e UNLAND et al. (1996), consideram que deve-se utilizar apenas o conjunto de dados ou suas médias calculadas durante o dia, desprezando dados perdidos, correspondente a dias com chuvas ou outros problemas de medição, devido ao fato de haver grande diferença no processo de transferência de energia entre o período do dia e da noite, causada pela diferente disponibilidade de energia e estabilidade atmosférica.

2.3. Balanço de Energia / Temperatura do dossel da cultura

A planta integra as condições de solo-água-atmosfera, respondendo por meio de parâmetros fisiológicos, como a transpiração, o potencial hídrico foliar, o potencial osmótico e a resistência estomática, que caracterizam seu estado hídrico. Tais parâmetros estão correlacionados com a temperatura foliar do dossel da cultura.

A termometria a infravermelho mede a radiação emitida pelo alvo e relaciona essa radiação com a temperatura de sua superfície, pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2)$$

em que:

- R - radiação emitida ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$);
- T_s - temperatura da superfície ($^{\circ}\text{K}$);
- ε - emissividade (adimensional);
- σ - constante de Stefan-Boltzmann = $5,674 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

Muitos termômetros têm filtros que admitem energia entre 8 e 14 μm de comprimento de onda para alcançar o sensor. Esse comprimento de onda compreende o máximo de emissão dos corpos negros às temperaturas normais e tem baixa absorção pelo vapor de água. Em superfícies naturais, a emissividade entre esses comprimentos de onda é relativamente alta, porém a absorção pelo vapor de água não pode ser sempre desprezada; para medidas precisas de emissividade, essa absorção deve ser conhecida. Outra complicação é o fato de que parte da irradiação emitida pelas áreas vizinhas e refletida pela superfície nesse comprimento de onda também pode interferir no sensor, somando-se à radiação recebida do alvo (JACKSON, 1988).

JACKSON et al. (1981) desenvolveram uma equação relacionando a diferença $T_c - T_a$ com o DPV do ar, saldo de radiação e resistência do dossel da cultura e resistência aerodinâmica a partir do balanço de energia da cultura:

$$T_c - T_a = \frac{r_a (R_n - G)}{\rho c_p} \cdot \frac{\gamma(1 + r_c/r_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} - \frac{e_a^* - e_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (3)$$

em que:

- T_a - temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);
- T_c - temperatura do dossel da cultura ($^{\circ}\text{C}$);
- R_n - saldo de radiação para a superfície ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$);
- G - fluxo de calor no solo ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$);
- r_c - resistência do dossel da cultura ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$);
- r_s - resistência aerodinâmica ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$);
- ρ - densidade do ar seco ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);
- c_p - calor específico do ar seco ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$);
- γ - constante psicrométrica ($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$);
- Δ - declividade da relação pressão de saturação de vapor "versus" temperatura;
- e_a - pressão parcial de vapor (kPa);
- e_a^* - pressão de saturação do vapor a T_a (kPa).

JACKSON et al. (1981) discutiram os limites de $T_c - T_a$ para condições específicas, afirmando que o limite superior pode ser encontrado em condição de máximo estresse, em que r_c aumenta indefinidamente, isto é, r_c tende ao infinito. Neste caso, a Equação 3 torna-se:

$$T_c - T_a = \frac{r_a (R_n - G)}{\rho c_p} \quad (4)$$

Também segundo JACKSON et al. (1981), o limite inferior pode ser obtido em condição de plantas sem limitação hídrica, em que se tem a resistência da cultura sob condição de evapotranspiração potencial (r_{cp}), fazendo $r_c = r_{cp}$ na Equação 3:

$$T_c - T_a = \frac{r_a (R_n - G)}{\rho c_p} \cdot \frac{\gamma(1 + r_{cp}/r_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_{cp}/r_a)} - \frac{e_a^* - e_a}{\Delta + \gamma(1 + r_{cp}/r_a)} \quad (5)$$

HATFIELD *et al.* (1984), em pesquisa realizada para determinar a evapotranspiração em várias culturas utilizando T_c , observaram que a evapotranspiração calculada, mediante a incorporação da resistência aerodinâmica no modelo de balanço de energia na superfície, apresentou boa correlação com medidas obtidas em lisímetros, com erros inferiores a 10%, para o solo completamente coberto.

Observações, com intervalos de meia hora, de saldo de radiação e fluxo de calor latente e de calor no solo foram realizadas em cultura do trigo, por CHOUDHURY *et al.* (1986), que calcularam o valor do fluxo de calor sensível e, posteriormente, a temperatura do dossel da cultura, resolvendo iterativamente a equação aerodinâmica do fluxo de calor sensível. Os autores verificaram que esse valor pode ser maior ou menor que os observados com termômetro a infravermelho, sob condições atmosféricas estáveis ou instáveis. Entretanto, quando as temperaturas do termômetro a infravermelho foram utilizadas na equação do balanço de energia para estimar o fluxo de calor latente, obtiveram uma boa correlação ($R^2 = 0,96$) e um erro-padrão moderado (47 W.m^{-2}).

OLUFAYO *et al.* (1993), com o objetivo de determinar o comportamento do potencial da água na folha e T_c em relação ao saldo de radiação e déficit de pressão de vapor do ar para o sorgo, sob o clima mediterrâneo, observaram máximos valores de T_c próximo ao meio-dia, com maiores T_c nas parcelas estressadas. Também obtiveram alta correlação na relação linear entre $T_c - T_a$ e déficit de pressão de vapor na parcela bemirrigada.

FELDHAKKE e EDWARDS (1992) estabeleceram relação da T_c com saldo de radiação e DPV. Observaram que a T_c diminuiu de $2,1^\circ\text{C}$ para um incremento de 1kPa no DPV e elevou $0,6^\circ\text{C}$ para um aumento de 100 W.m^{-2} no saldo de radiação, exceto para níveis de saldo de radiação menores que 100 W.m^{-2} .

PAZZETTI *et al.* (1992) avaliaram, no campo, a resposta de plantas de feijão, cultivar Carioca, submetidas a quatro regimes de irrigação, visando adotar um indicador fisiológico que permitisse determinar o momento de se efetuar a irrigação. Verificaram que existem estreitas relações entre potencial hídrico foliar, resistência estomática e transpiração com a T_c , em diferentes níveis de umidade do solo.

PETERSCHMITT e PERRIER (1991) determinaram a relação entre a evapotranspiração, o saldo de radiação, o fluxo de calor no solo e a diferença entre T_c e

T_a para o arroz, amendoim e solo nu. Os resultados experimentais foram analisados por uma interpretação analítica da relação entre evapotranspiração e T_c . A consistência entre os valores experimentais e os valores teóricos foi boa para o amendoim e o solo nu e aceitável para o arroz.

O'TOOLE e HATFIELD (1983) observaram oscilações na diferença T_c-T_a de sorgo, milho e feijão, provocadas pela flutuação na T_c . Essas oscilações foram causadas pelas interações entre a velocidade do vento e a corrente convectiva acima da cultura. A flutuação na diferença entre T_c e T_a , provocada pela variação na velocidade do vento, poderá causar erros no cálculo do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC), com valores equivocadamente mais baixos para altas velocidades do vento.

BERLINER et al. (1984), estudando as características do balanço de energia da cultura relevantes para a termometria a infravermelho, verificaram que mudanças instantâneas na velocidade do vento afetaram a temperatura do dossel da cultura. Essa variação pode ser devido ao resfriamento ou à exposição de parte do dossel que estava anteriormente sombreada, porém os resultados indicaram que, em função da variação lenta da temperatura do dossel, pode-se assumir que a diminuição da temperatura, associada à velocidade do vento, é, principalmente, devido ao resfriamento do dossel.

Vários tipos de erros são possíveis na medição da T_c . KALMA e JUPP (1990) obtiveram dados que indicam que os erros de refletividade e de emissividade e o efeito do azimute são limitações importantes. Estes autores verificaram que o efeito do ângulo de visada pode ser considerado insignificante.

Rápidas variações na cobertura de nuvens podem afetar as medições da temperatura do ar e do dossel e, por conseguinte, a estimativa do saldo de radiação. A utilização do termômetro a infravermelho, inadequadamente calibrado e com o campo de visão superior ao da área visada, também implicará a obtenção de valores incorretos da T_c (JACKSON et al., 1981).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido, em condições de campo, na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG. As coordenadas da área são 19°27'21 de latitude Sul, 44°10'22 de longitude Oeste e 732 m de altitude. O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Escuro álico, fase cerrado, com relevo suavemente ondulado. Algumas características físico-hídricas e químicas do solo, determinadas no laboratório de física de solos da Embrapa Milho e Sorgo, são apresentadas nos Quadros 1 e 2, respectivamente. A adubação de plantio foi realizada com base na análise de fertilidade do solo.

Quadro 1. Algumas características físico-hídricas e granulométrica do solo da área experimental. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

Profundidade (cm)	CC ⁽¹⁾ (cm ⁻³ .cm ⁻³)	PM ⁽²⁾ (cm ⁻³ .cm ⁻³)	Da ⁽³⁾ (g.cm ⁻³)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
0-10	32,43	22,89	0,91	9	37	53
10-30	35,08	26,1	1,03	8	27	65
30-50	34,28	25,57	0,98	8	17	75
50-70	33,63	25,94	0,95	8	18	74

⁽¹⁾ Capacidade de campo, considerado como o potencial matricial da água no solo (ψ_m) em -0,33 MPa

⁽²⁾ Ponto de murcha permanente, considerado como o potencial matricial da água no solo (ψ_m) em -1,5 MPa

⁽³⁾ peso específico do solo

Quadro 2. Resultado analítico médio de algumas características químicas do solo da área experimental. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

Prof.	pH	H+Al	Al	Ca	Mg	K	P	MO	Sat. Al
		————	cmol.100dm ⁻³	————	————	(mg.100 cm ⁻³)		(dag.kg ⁻¹)	
0-20	6,2	3,91	0,000	5,90	1,01	159	19	3,90	0
20-40	5,3	5,53	0,008	4,98	0,64	66	10	3,59	0,17

A cultivar de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizada foi a Jalo. A semeadura foi realizada em uma área de 1,2 ha, georreferenciada com o auxílio de um GPS com precisão submétrica, como mostra a Figura 1. O espaçamento entre fileiras de plantio foi de 0,50 m, distribuindo-se 12 sementes por metro de fileira, com uma população de aproximadamente 260.000 plantas por hectare.

A área do experimento era delimitada a nordeste e leste por uma estreita faixa com milho e depois solo nu; a sudeste, sul, sudoeste e oeste, por capim com pouco crescimento ativo e/ou solo nu. A noroeste estava localizada a estação agroclimatológica automática, com grama batatais.

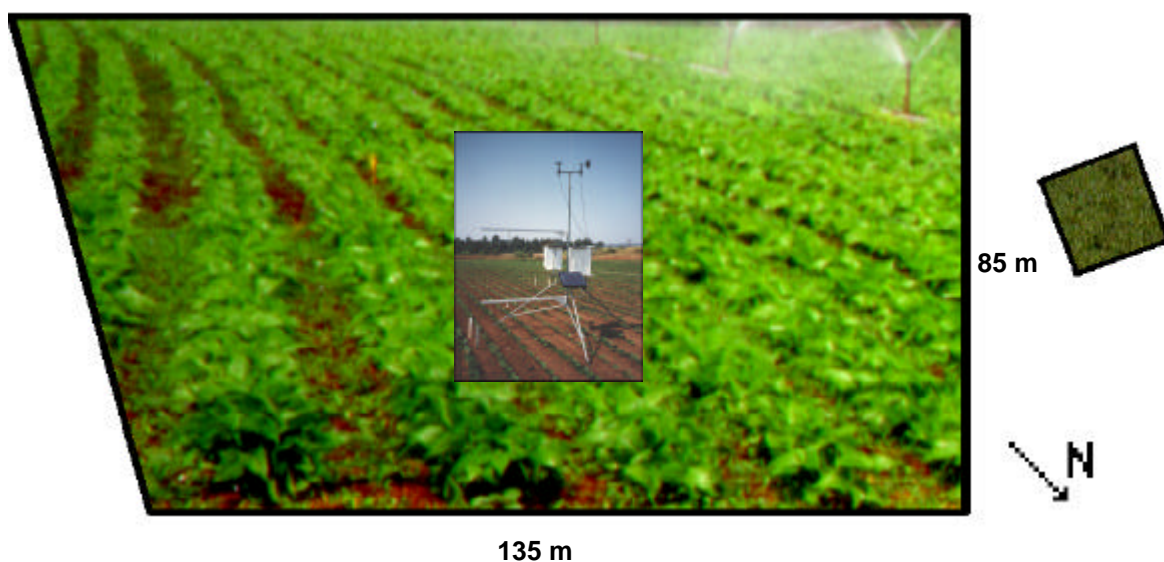


Figura 1. Foto ilustrativa da área experimental, indicando a noroeste a estação agroclimatológica automática. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

O manejo da cultura (adubação, controle de pragas, de plantas daninhas e doenças) foi realizado conforme recomendação técnica para o feijão. Aplicou-se a mistura Orthene 750 BR + Assist para o controle da vaquinha (*Diabrotica speciosa*), sendo que o Assist foi utilizado como espalhante adesivo.

Os parâmetros fisiológicos da cultura do feijão foram monitorados, entre 11 e 13 horas, com um porômetro de difusão, para obtenção da resistência estomática da folha.

Na avaliação dos parâmetros fenológicos foram, determinados a altura de plantas, o peso de matéria seca, o peso de matéria fresca e a área foliar, por meio de um integrador eletrônico de área. As fases de desenvolvimento da planta do feijoeiro foram definidas segundo a escala do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). O dia considerado para a mudança de estágio fenológico foi quando mais de 50% das plantas atingiram a fase subsequente.

A umidade do solo foi determinada para a profundidade de até 70 cm:

0-10 cm - método gravimétrico;

10-30 cm - método gravimétrico;

30-50 cm - por meio da Sonda de Neutron;

50-70 cm - por meio da Sonda de Neutron.

3.1. Manejo da irrigação

A irrigação foi efetuada com um sistema de aspersão convencional, com linha principal fixa e linhas laterais móveis. O espaçamento entre as linhas principais e laterais era de 18 e 12 m, respectivamente. O sistema tinha uma intensidade de aplicação de $16,7 \text{ mm.h}^{-1}$. O cálculo da lâmina de água aplicada em cada irrigação foi realizado em tempo real, pelo método RB, usando um sistema da CAMPBELL SCIENTIFIC (1997).

3.1.1. Descrição do sistema Razão de Bowen

O balanço de energia é um método segundo o qual são realizadas medições automáticas do transporte vertical de entidades em uma camada de escoamento atmosférico turbulento, acima de uma superfície natural rugosa (vegetação), situada a poucos metros da superfície do solo. Nessas condições, a partição entre o fluxo de calor sensível (H) e latente normalmente pode ser obtida pelo método RB:

$$\beta = \frac{H}{\lambda L_e} \quad (6)$$

em que:

- β - valor da RB();
- H - fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$);
- λL_e - fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$);
- λ - calor latente de vaporização ($2,45 MJ.kg^{-1}$).

A RB é utilizada com o balanço de energia de uma superfície uniforme, que pode ser simplificado por:

$$R_n = G + H + \lambda L_e \quad (7)$$

em que:

- R_n - saldo de radiação para a superfície ($W.m^{-2}$);
- G - fluxo de calor no solo ($W.m^{-2}$).

Geralmente, a convenção de sinal utilizada é R_n positiva do ar para a superfície; H , e λL_e positivos da superfície para o ar e G positivo da superfície do solo para as camadas mais profundas do solo (Figura 2). Substituindo H por $(\lambda L_e.\beta)$ na Equação 7 e solucionando para λL_e , resulta:

$$ETcRB = \lambda L_e = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad \text{para } \beta \neq -1 \quad (8)$$

Os fluxos de calor latente e sensível podem ser expressos como:

$$\lambda L_e = \frac{\rho c_p}{\gamma} K_v \frac{\partial e_a}{\partial z} \quad (9)$$

$$H = \rho c_p K_H \frac{\partial T}{\partial z} \quad (10)$$

em que:

- ρ - densidade do ar seco($kg.m^{-3}$);
- c_p - calor específico do ar seco ($J.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$);
- γ - constante psicrométrica ($kPa.\text{°C}^{-1}$);
- K_v - coeficientes de transporte turbulento de calor latente ($m^2.s^{-1}$);
- K_H - coeficientes de transporte turbulento de calor sensível ($m^2.s^{-1}$);
- e_a - pressão parcial de vapor (kPa);
- z - altura (m).

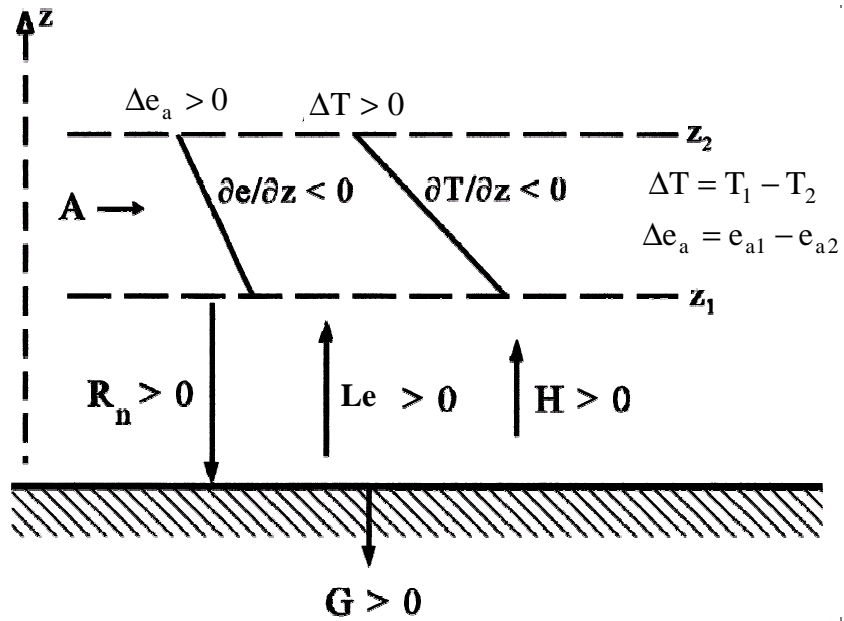


Figura 2. Representação dos fluxos de energia na interface entre o ar e a superfície, mostrando a convenção de sinais. “A” representa a contribuição de algum fluxo de energia advectiva, R_n é o saldo de radiação, λLe é o fluxo de calor latente, H é o fluxo de calor sensível, G é o fluxo de calor no solo, Δe e ΔT é a diferença de pressão de vapor e temperatura medidas em duas alturas, $\partial e/\partial z$ e $\partial T/\partial z$ são os gradientes de pressão e de temperatura (PEREZ et al., 1999).

Na prática, medem-se os gradientes finitos e um coeficiente efetivo de transporte turbulento (eddy diffusivity) é considerado na determinação do gradiente vertical:

$$\lambda L_e = \frac{\rho c_p K_v}{\gamma} \frac{\Delta e_a}{\Delta z} = \frac{\rho c_p K_v}{\gamma} \frac{(e_{a1} - e_{a2})}{(z_1 - z_2)} \quad (11)$$

$$H = \rho c_p K_H \frac{\Delta T}{\Delta z} = \rho c_p K_H \frac{(T_1 - T_2)}{(z_1 - z_2)} \quad (12)$$

em que:

- e_{a1} - pressão parcial de vapor na altura z_1 (kPa);
- e_{a2} - pressão parcial de vapor na altura z_2 (kPa);
- T_1 - temperatura do ar na altura z_1 (°C);
- T_2 - temperatura do ar na altura z_2 (°C);
- z_1 e z_2 - alturas de medição (m).

Em geral, o transporte atmosférico de λLe e H é feito por meio de turbilhões que se deslocam aleatoriamente acima de uma superfície natural rugosa, numa tendência de homogeneização de λLe e H com a altura. Conseqüentemente, faz sentido supor que tanto λLe como H sejam igualmente transportados pelo mesmo turbilhão. Nessa condição específica de mesmo escoamento atmosférico turbulento, os coeficientes K_v e K_H podem ser considerados quantitativamente iguais. O valor da Razão de Bowen, β , é obtido das equações 7, 11 e 12 da seguinte forma:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e_a} = \gamma \frac{(T_1 - T_2)}{(e_{a1} - e_{a2})} \quad (13)$$

A sensibilidade de β é diretamente relacionada aos gradientes de temperatura e de pressão de vapor medidos (equação 13). Isso significa que um erro de 1 % nas medições resulta em 1 % de erro em β . Os fluxos de H e λLe calculados aproximam-se do valor infinito quando o valor de β aproxima-se de -1. Essa situação geralmente ocorre somente à noite, quando há pouca energia disponível ($R_n - G$). Na prática, quando o valor de β está muito próximo de -1 ($-1,25 < \beta < -0,75$), os valores de H e λLe são considerados desprezíveis e não são calculados (GOMIDE, 1998).

3.1.2. Medição da evapotranspiração

O fluxo de calor latente (λLe) é a parte da energia disponível utilizada na ET_c . O método requer medições de R_n , G e também de T_a e e_a , a duas alturas acima da superfície evaporante, para a determinação dos fluxos λLe e H . Os dados necessários para o cálculo da ET_c por meio do método RB foram obtidos em um conjunto de sensores, capazes de registrar as informações com rapidez e em tempo real. Os sensores foram programados para a tomada de dados a intervalos de 1 ou 10 segundos, e foram diretamente conectados a um sistema automático de aquisição de dados (Figura 3). Os valores médios ou totais, de acordo com a variável, foram armazenados em intervalos de 20 minutos, por um "datalogger" (Figura 4d).

O saldo de radiação (R_n) foi monitorado por meio de saldo radiômetro (Figura 4a); a velocidade e direção do vento, com anemômetro (Figura 4b); o fluxo de calor do solo, com placas de fluxo de calor e temperatura do solo, com termopares (Figura 4e).

Foram, também, monitoradas a temperatura do ar e a pressão parcial de vapor do ar a duas alturas acima do dossel das plantas, 0,10 e 1,10 m, respectivamente, visando a obtenção dos gradientes dos fluxos de calor latente e sensível. Os sensores de temperatura do ar e pontos de aspiração do ar (pressão parcial de vapor) estão em destaque na Figura 4c.



Figura 3. Sistema Razão de Bowen com sensores de temperatura do ar e pontos de aspiração do ar (pressão de vapor), velocidade e direção do vento, abrigos de proteção e painel solar. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

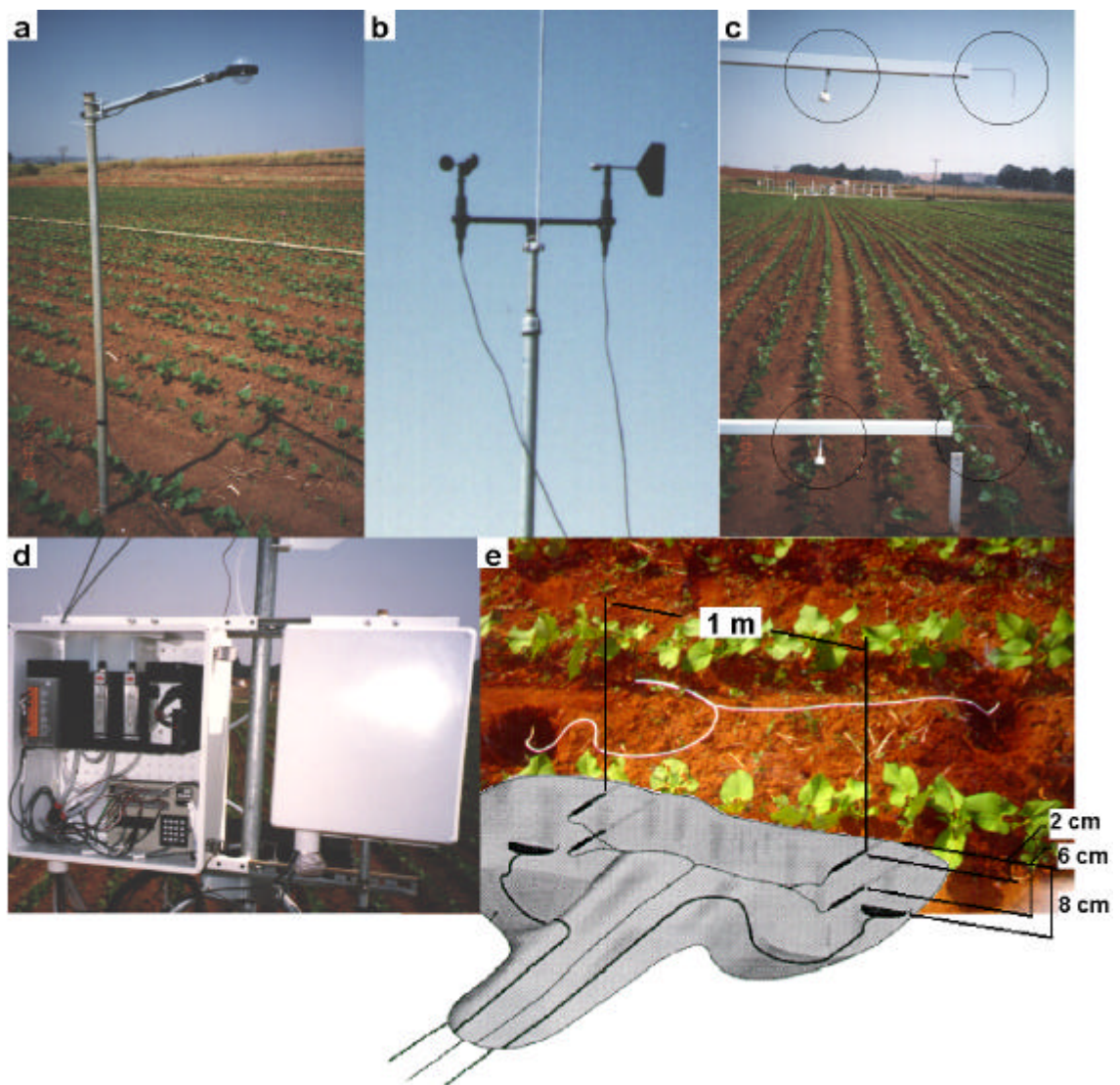


Figura 4. Detalhe dos sensores utilizados no método Razão de Bowen: saldo radiômetro (a); sensores de velocidade e direção do vento (b); termopares e pontos para coleta de amostra de ar (c); "datalogger" (d); termopares e placas de fluxo de calor no solo (e) (CAMPBELL SCIENTIFIC, 1997).

A concentração de vapor foi medida utilizando um higrômetro de ponto de orvalho “cooled mirror” (General Eastern Corp., modelo DEW-10), por meio de uma técnica desenvolvida para estudos de gradiente em múltiplos níveis (LEMON, 1960). Amostras de ar coletadas de duas alturas foram direcionadas aos “cooled mirror”, após passarem através de um processo de mistura de volumes. Uma bomba de baixa potência foi responsável pela coleta do ar, por aspiração. Para ajustar e fazer coincidir as taxas de fluxo de ar, rotômetros, manualmente ajustáveis, foram posicionados nos dois braços de amostragens. Uma caixa coletora de dados ("datalogger") foi usada para monitorar todos os sensores e controlar a abertura e o fechamento das chaves eletrônicas das válvulas reguladoras de fluxo de ar, por meio do "cooled mirror" (Figura 4d). A resolução de medição da temperatura do ponto de orvalho foi de $\pm 0,003^{\circ}\text{C}$, para uma faixa de temperatura de aproximadamente 35°C . O higrômetro de ponto de orvalho (Dew-10) apresentava uma estabilidade de aproximadamente $0,05^{\circ}\text{C}$, fornecendo uma resolução para pressão de vapor melhor do que $\pm 0,01$ kPa, para uma ampla condição de variação de meio ambiente.

A cada intervalo de 2 min., o ar que estava sendo puxado por meio do "cooled mirror" era mudado de uma altura para a outra, devido ao controle das chaves eletrônicas. A cada ciclo de 2 min., o tempo admitido para que o “mirror” estabilizasse no novo ponto de orvalho era de 40 s e o tempo de duração de medições para um nível individual foi de 1 min. e 20 s. A temperatura do ponto de orvalho era medida a cada segundo e a pressão de vapor foi calculada pelo "datalogger", usando a equação descrita por LOWE (1976). A pressão de vapor média era calculada e registrada a cada 20 minutos para cada altura.

A temperatura do ar foi medida para duas alturas, em posições bem próximas das amostragens do ar, com termopares de cromo-constantan. O diferencial de voltagem gerado foi devido à diferença de temperatura entre os dois níveis, T_1 e T_2 . Nesse caso, não existiu erro de saída inerente aos sensores. A resolução do datalogger foi de $0,006^{\circ}\text{C}$, com um ruído de $0,1 \mu\text{V rms}$.

A temperatura do solo foi medida com termopares de cromo-constantan. A temperatura média do solo foi obtida de quatro termopares instalados em paralelo, a uma distância de 1 m, localizados a 2 e 6 cm da superfície do solo, de tal forma que dois a dois fornecessem a temperatura média da camada de solo acima dos dois sensores de fluxo de

calor no solo, instalados 8 cm abaixo da superfície do solo, na linha e entre linhas de plantio. No local de instalação desses sensores, representativo da área em estudo, procedeu-se à abertura de uma pequena trincheira com uma pá, tendo-se o cuidado de manter o solo retirado intacto nas imediações. Os sensores foram instalados, usando-se uma faca, em uma das paredes da trincheira, onde o solo não estava deformado. Dessa forma, o solo do local de instalação pôde ser repostado, procurando sempre alterar o mínimo a estrutura natural do solo. As profundidades de colocação dos sensores, em relação à superfície do solo, e o espaçamento entre os sensores estão ilustrados na Figura 4e.

O saldo de radiação (R_n) foi medido por meio de um sensor, que era formado por 60 junções de termopilhas com baixa resistência elétrica (4Ω), visando reduzir a susceptibilidade ao ruído. Esse sensor, instalado a 1,5 m do solo, integrou todas as ondas de radiação, chegando e saindo da superfície, isto é, os componentes referentes às ondas curtas e longas. A radiação chegando à superfície consistia da radiação solar direta e difusa mais a irradiação de ondas longas proveniente do céu. A radiação saindo da superfície consistiu da radiação solar refletida mais o componente de ondas longas terrestres. A integração de todas essas radiações registrados no "datalogger" consistia no R_n disponível na superfície.

Os dados relativos a cada intervalo de 20 minutos são gravados em duas linhas, em que o primeiro número refere-se a um código de gravação do programa. As informações, na mesma linha, são separadas por meio de vírgula.

As informações registradas na linha em que o código de gravação é 110 são: dia do ano, horário de gravação, temperatura do painel ($^{\circ}\text{C}$), temperatura do braço inferior ($^{\circ}\text{C}$), diferença entre a temperatura do braço inferior e superior ($^{\circ}\text{C}$), temperatura de ponto de orvalho do braço inferior ($^{\circ}\text{C}$), pressão parcial de vapor do braço inferior (kPa), temperatura de ponto de orvalho do braço superior ($^{\circ}\text{C}$), pressão parcial de vapor do braço superior (kPa), respectivamente.

As informações registradas na linha em que o código de gravação é 237 são: saldo de radiação ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), fluxo de calor no solo da placa 1 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), fluxo de calor no solo da placa 2 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), temperatura no solo ($^{\circ}\text{C}$), diferença da temperatura do solo em relação a medição anterior ($^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), direção do vento (graus), desvio padrão da direção do vento, voltagem da bateria (Volts).

Os dados foram importados pela planilha eletrônica Excell, na qual se fez o processamento das informações. O Quadro 3 ilustra os dados, referentes a um intervalo de tempo, transferidos para uma única linha, sem os códigos de gravação. As informações contidas em cada coluna da planilha eletrônica Excell são: dia do ano (coluna A), horário de gravação (B), temperatura do painel (C), temperatura do braço inferior (D), diferença entre a temperatura do braço inferior e superior (E), temperatura de ponto de orvalho do braço inferior (F), pressão parcial de vapor do braço inferior (G), temperatura de ponto de orvalho do braço superior (H), pressão parcial de vapor do braço superior (I), saldo de radiação (K), fluxo de calor no solo da placa 1 (L), fluxo de calor no solo da placa 2 (M), temperatura do solo (N), diferença da temperatura do solo em relação a medição anterior (O), velocidade do vento (P), direção do vento (Q), desvio padrão da direção do vento (R) e voltagem da bateria (S).

Quadro 3. Dados registrados pelo sistema Razão de Bowen, na planilha eletrônica Excell, com os dados relativos a 20 minutos transportados para uma única linha.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
2	Dia	Hora	T. Paine I °C	T. Inf. °C	dT °C	T. pto orvalho Inf. (°C)	P.V. Inf kPa	T. pto orvalho Sup (°C)	P.V. Sup. kPa		Rn W.m ⁻²	G1 W.m ⁻²	G2 W.m ⁻²	Ts °C	dTs °C	V. Vento m.s ⁻¹	Dir. Graus	SD Dir. Vento	Bat.
3	262	640	17.69	18.13	-0.375	12.49	1.447	12.31	1.43		4.835	-25.4	-22.2	20.31	-0.057	0.426	101.4	18.23	12.41
4	262	700	18	18.68	0.149	13.07	1.504	12.7	1.468		51.81	-25	-21.8	20.35	0.041	0.552	66.54	14.63	12.45
5	262	720	18.6	20.32	0.205	13.83	1.58	13.5	1.546		91.3	-23.8	-20.6	20.55	0.198	0.364	51.04	12.58	12.52
6	262	740	19.69	22.28	0.26	14.24	1.623	13.53	1.55		158.1	-21.4	-18.3	20.89	0.34	1.333	66.75	8.38	12.63
7	262	800	21.01	23.64	0.288	14.06	1.604	13.36	1.533		195.1	-17.6	-15	21.34	0.451	1.636	73.1	11.3	12.81
8	262	820	22.35	24.68	0.355	14.25	1.623	13.51	1.547		239.9	-12.7	-10.3	21.8	0.457	1.8	72.2	13.67	12.91
9	262	840	23.74	26.01	0.527	14.63	1.664	13.71	1.567		336	-7.28	-4.96	22.29	0.492	1.741	57.09	19.27	13.02
10	262	900	25.18	27.12	0.434	14.07	1.605	13.05	1.502		408.9	-1.44	1.019	22.88	0.59	2.935	43.31	15.51	13.02
11	262	920	26.51	27.92	0.461	13.81	1.578	12.65	1.463		425.7	4.424	7.71	23.47	0.593	2.261	22.09	26.35	12.99
12	262	940	27.75	28.79	0.64	14.21	1.619	12.79	1.476		529.3	9.45	14.24	24.16	0.685	2.066	41.84	31	12.95
13	262	1000	28.93	29.69	0.62	14.24	1.622	12.8	1.478		572.3	14.67	20.9	24.91	0.753	2.294	14.37	24.6	12.92
14	262	1020	29.97	30.25	0.641	14.05	1.603	12.47	1.446		579.9	20.63	28.11	25.58	0.672	1.581	4.737	37.68	12.91
15	262	1040	30.95	30.94	0.538	13.87	1.585	12.48	1.447		616.1	26.23	34.68	26.28	0.695	2.329	358.1	23.25	12.89
16	262	1100	31.77	31.48	0.564	13.53	1.55	11.69	1.373		651	31.64	40.44	26.88	0.603	2.222	27.03	30.04	12.87
17	262	1120	32.47	31.92	0.531	13.11	1.508	11.28	1.337		670	36.26	45.03	27.5	0.621	2.119	42.69	35.16	12.86
18	262	1140	33.08	32.2	0.442	13.36	1.533	11.01	1.312		682	40.42	49.15	28.04	0.536	2.67	56.67	24.39	12.86
19	262	1200	33.6	32.56	0.46	13.68	1.565	11.35	1.343		685.3	43.22	52.09	28.39	0.352	2.698	52.46	25.64	12.85
20	262	1220	34.3	33.1	0.542	12.91	1.488	11.17	1.327		677.9	45.14	54.24	28.76	0.37	1.534	350.8	34.76	12.83
21	262	1240	34.88	33.17	0.357	13.27	1.524	11.33	1.341		609.2	47.62	56.73	29.25	0.492	1.988	24.07	28.95	12.82
22	262	1300	35.06	32.87	0.135	13.26	1.523	11.14	1.325		483.9	49.67	58.63	29.53	0.28	2.327	66.19	33.84	12.78
23	262	1320	35.1	33.19	0.169	12.17	1.418	10.22	1.245		543.9	48.93	57.86	29.38	-0.15	2.609	88.6	32.65	12.79
24	262	1340	34.85	32.33	-0.342	11.72	1.376	9.96	1.224		271.4	44.93	54.44	29.17	-0.209	2.243	16.72	31.82	12.73

Os dados mostrados no Quadro 3 foram processados para o cálculo dos valores de β e de E_{Tc} , seguindo a recomendação proposta por CAMPBELL SCIENTIFIC (1997). Os resultados desses cálculos são mostrados no Quadro 5. As informações contidas em cada coluna da planilha eletrônica Excell são: dia do ano (coluna A), horário de gravação (B), diferença entre a temperatura do braço inferior e superior (C), pressão parcial de vapor do braço inferior (D), pressão parcial de vapor do braço superior (E), saldo de radiação (F), fluxo de calor no solo da placa 1 (G), fluxo de calor no solo da placa 2 (H), diferença da temperatura do solo em relação à medição anterior (I), Razão de Bowen (K), calor armazenado pelo solo (L), fluxo de calor no solo na superfície do solo (M), fluxo de calor latente (N), resultado para as condições apresentadas no Quadro 4 (valor 1 ou 0, se verdadeira ou não, respectivamente) (O), resultado para a condição $-1,3 \leq \beta \leq -0,70$ (valor 1 ou 0, se for falso ou verdadeiro, respectivamente) (P) e resultado da multiplicação das colunas "O" e "P" (Q).

Posteriormente, foi realizada uma filtragem, utilizando somente dados:

- durante o dia, entre 6h40min. e 17h20min.;
- que satisfizeram as condições do Quadro 4;
- que resultaram em valores de $\beta > -0,70$ ou $\beta < -1,30$.

Os valores de λL_e e H obtidos pelo método RB devem ser consistentes com os gradientes dos fluxos, mas, devido a problemas nos instrumentos de medições, fornecem sinais incorretos desses fluxos. As equações 8 e 13 podem ser reorganizadas (PEREZ et al., 1999) para obter:

$$\frac{\Delta e}{L_e} = \gamma \frac{\Delta T}{H} = \frac{\Delta e + \gamma \Delta T}{R_n} > 0 \quad (14)$$

Esta expressão deve ser sempre maior que zero, de acordo com a convenção de sinais utilizada. O Quadro 4 mostra as combinações de condições que devem ser verdadeiras para que a direção e o sentido do fluxo de λL_e e H estejam corretas (PEREZ et al., 1999).

Quadro 4. Condições para serem satisfeitas pelo método RB, de forma que o sentido e as direções dos fluxos de λLe e H estejam corretas e consistentes com a equação 14. R_n é o saldo de radiação, G é o fluxo de calor no solo. Δe_a é a diferença de pressão entre as medições do braço superior e inferior. λLe é o fluxo de calor latente e H é o fluxo de calor sensível (PEREZ et al., 1999).

Energia disponível	Diferença de pressão de vapor	Razão de Bowen	Fluxo de calor
$R_n - G > 0$	$\Delta e_a > 0$	$\beta > -1$	$\lambda Le > 0$ e $H \leq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H > 0$ para $\beta > 0$
	$\Delta e_a < 0$	$\beta < -1$	$\lambda Le < 0$ e $H > 0$
$R_n - G < 0$	$\Delta e_a > 0$	$\beta > -1$	$\lambda Le > 0$ e $H < 0$
	$\Delta e_a < 0$	$\beta < -1$	$\lambda Le < 0$ e $H \geq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H < 0$ para $\beta > 0$

No Quadro 5, a coluna "O" pode assumir valor 1 ou 0, respectivamente, se as condições do Quadro 4 são satisfeitas ou não. A coluna "P" verifica a condição para o intervalo dos valores de β , sendo valor 1 se $-1,3 \leq \beta \leq -0,70$ for falso e valor 0, o contrário. A coluna "Q" é o produto da coluna "O" e "P", somente assumindo valor 1 se as condições anteriores são satisfeitas. Os dados dos intervalos em que a coluna "Q" assumiu valor 0 foram eliminados.

O sistema fornece o fluxo de calor latente na forma de energia ($W.m^{-2}$), em intervalos de 20 minutos ou 1.200 segundos. Para converter em lâmina de irrigação (mm), foi utilizada a Equação 15. Acumulando esses valores coletados durante o dia, obtém-se a ETc diária. A lâmina de irrigação foi obtida acumulando a ETc diária entre as irrigações subseqüentes.

$$ETc_{mm} = \frac{ETc}{\lambda} \cdot f \quad (15)$$

em que:

$f = 0,0012$ - fator de conversão, energia em lâmina de irrigação ($MJ.s^{-1}.W^{-1}$)

λ - calor latente de vaporização ($2,45 MJ.kg^{-1}$).

Quadro 5. Dados processados, na planilha eletrônica Excell, para o cálculo da evapotranspiração da cultura do feijoeiro.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2	Dia	Hora	dT (°C)	P.V. Inf kPa	P.V. Sup. kPa	Rn (W.m ⁻²)	G1 (W.m ⁻²)	G2 (W.m ⁻²)	dTs (°C)		β	S (W.m ⁻²)	G (W.m ⁻²)	Le (W.m ⁻²)	Cond. 1	-1,3<B<-0,70	Cond. Final
3	246	640	-0.375	1.447	1.430	4.8	-25.4	-22.2	-0.057		-1.346	-9.9	-33.7	-111.4	0	1	0
4	246	700	0.149	1.504	1.468	51.8	-25.0	-21.8	0.041		0.253	7.2	-16.2	54.3	1	1	1
5	246	720	0.205	1.580	1.546	91.3	-23.8	-20.6	0.198		0.368	34.5	12.4	57.7	1	1	1
6	246	740	0.260	1.623	1.550	158.1	-21.4	-18.3	0.340		0.217	59.3	39.5	97.5	1	1	1
7	246	800	0.288	1.604	1.533	195.1	-17.6	-15.0	0.451		0.248	78.7	62.4	106.4	1	1	1
8	246	820	0.355	1.623	1.547	239.9	-12.7	-10.3	0.457		0.285	79.7	68.2	133.6	1	1	1
9	246	840	0.527	1.664	1.567	336.0	-7.3	-5.0	0.492		0.332	85.8	79.7	192.5	1	1	1
10	246	900	0.434	1.605	1.502	408.9	-1.4	1.0	0.590		0.257	102.9	102.7	243.6	1	1	1
11	246	920	0.461	1.578	1.463	425.7	4.4	7.7	0.593		0.245	103.5	109.5	254.0	1	1	1
12	246	940	0.640	1.619	1.476	529.3	9.5	14.2	0.685		0.273	119.5	131.4	312.6	1	1	1
13	246	1000	0.620	1.622	1.478	572.3	14.7	20.9	0.753		0.263	131.4	149.2	335.1	1	1	1
14	246	1020	0.641	1.603	1.446	579.9	20.6	28.1	0.672		0.249	117.2	141.6	350.9	1	1	1
15	246	1040	0.538	1.585	1.447	616.1	26.2	34.7	0.695		0.238	121.3	151.7	375.1	1	1	1
16	246	1100	0.564	1.550	1.373	651.0	31.6	40.4	0.603		0.194	105.2	141.2	426.8	1	1	1
17	246	1120	0.531	1.508	1.337	670.0	36.3	45.0	0.621		0.190	108.3	149.0	438.0	1	1	1
18	246	1140	0.442	1.533	1.312	682.0	40.4	49.2	0.536		0.122	93.5	138.3	484.6	1	1	1
19	246	1200	0.460	1.565	1.343	685.3	43.2	52.1	0.352		0.126	61.4	109.1	511.5	1	1	1
20	246	1220	0.542	1.488	1.327	677.9	45.1	54.2	0.370		0.205	64.6	114.2	467.6	1	1	1
21	246	1240	0.357	1.524	1.341	609.2	47.6	56.7	0.492		0.119	85.8	138.0	421.1	1	1	1
22	246	1300	0.135	1.523	1.325	483.9	49.7	58.6	0.280		0.042	48.8	103.0	365.7	1	1	1
23	246	1320	0.169	1.418	1.245	543.9	48.9	57.9	-0.150		0.060	-26.2	27.2	487.6	1	1	1
24	246	1340	-0.342	1.376	1.224	271.4	44.9	54.4	-0.209		-0.137	-36.5	13.2	299.3	1	1	1
25	246	1400	0.125	1.350	1.195	586.7	40.2	49.6	-0.012		0.049	-2.1	42.8	518.4	1	1	1
26	246	1420	-0.070	1.295	1.141	542.4	36.5	46.6	0.049		-0.028	8.5	50.1	506.4	1	1	1
27	246	1440	-0.160	1.265	1.108	494.1	34.7	45.6	-0.248		-0.062	-43.3	-3.1	530.2	1	1	1
28	246	1500	-0.212	1.126	0.991	446.7	31.9	42.8	-0.097		-0.096	-16.9	20.4	471.5	1	1	1
29	246	1520	-0.217	1.263	1.112	398.2	28.8	39.6	-0.182		-0.088	-31.8	2.4	433.8	1	1	1
30	246	1540	-0.408	1.248	1.117	325.6	25.8	36.0	-0.166		-0.190	-29.0	2.0	399.6	1	1	1
31	246	1600	-0.549	1.168	1.039	243.2	22.6	31.4	-0.417		-0.260	-72.8	-45.7	390.3	1	1	1
32	246	1620	-0.691	1.167	1.037	190.2	18.9	25.9	-0.358		-0.324	-62.5	-40.0	340.8	1	1	1

3.2. Cálculo da resistência do dossel da cultura e da evapotranspiração da cultura

Para o desenvolvimento de uma equação empírica de uma linha base não estressada, utilizando os dados medidos de déficit de pressão de vapor (DPV) do ar e a diferença $T_c - T_a$ (IDSO, 1981), foram selecionados dias em que a cultura estava cobrindo o solo completamente (entre 46 e 50 DAS - estágio de formação de vagens) e evapotranspirando potencialmente. Os valores de DPV, T_c e T_a foram medidos utilizando-se um transdutor de termometria a infravermelho (Figura 5).

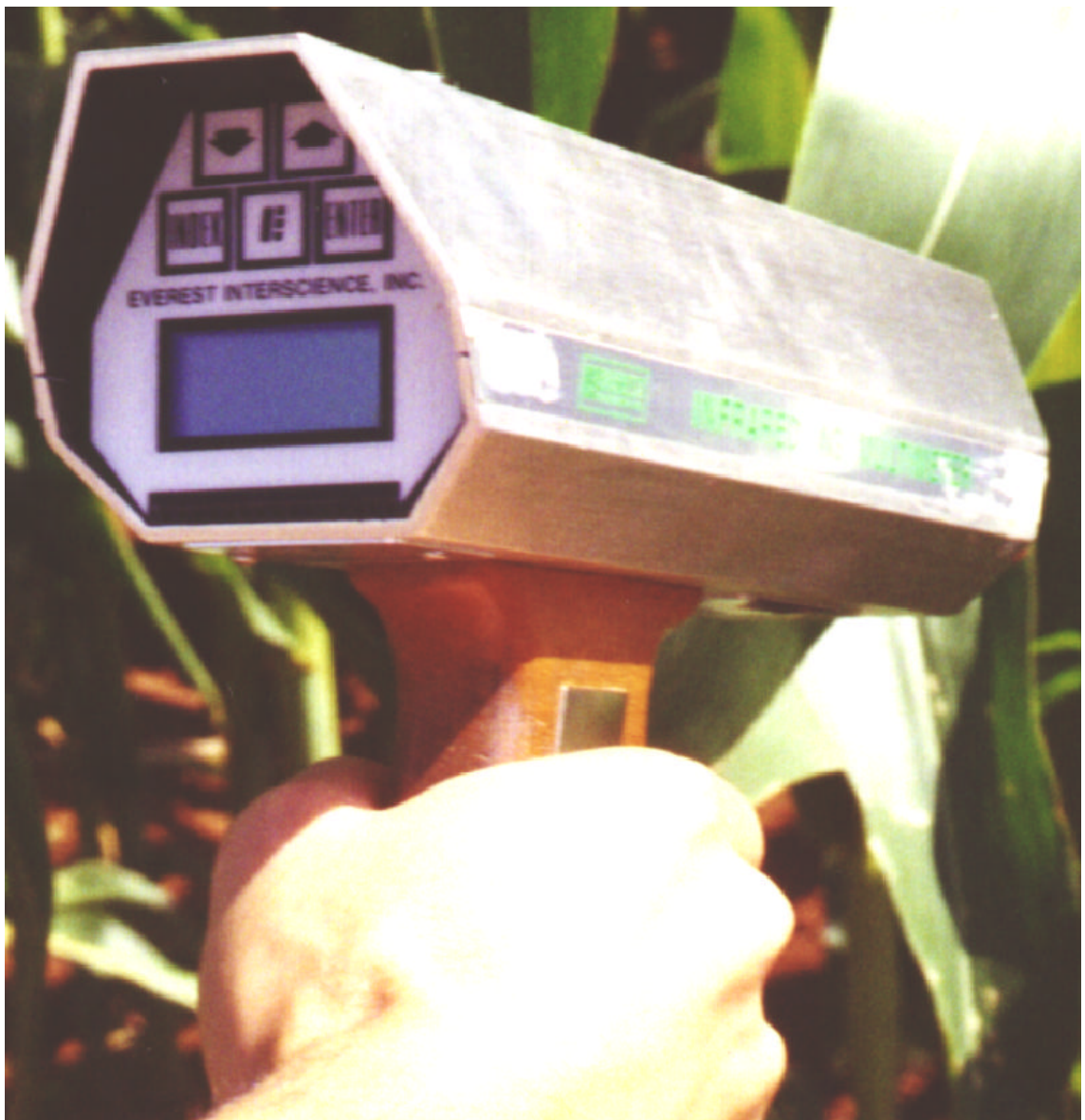


Figura 5. Transdutor de termometria a infravermelho ("Model 510B AG Multimeter").

Esse transdutor é um multimedidor específico para monitorar estresse hídrico de plantas ("Model 510B AG Multimeter"), com as seguintes especificações:

- Temperatura do dossel: -10°C a 70°C, resolução de $\pm 0,5$;
- Temperatura do ar: 0°C a 50°C, $\pm 0,2$ °C;
- $T_c - T_a$: -10°C a 20°C, $\pm 0,7$ °C;
- Umidade relativa do ar: 5% a 95%, $\pm 5\%$;
- Déficit de pressão de vapor: 1 a 10kPa, $\pm 0,5$ kPa;
- Índice de estresse hídrico da cultura: 0 a 1,0; 0,1;
- Radiação global: 300 a 1000 W.m⁻²;
- Campo de visada: 15°;
- Emissividade: 0,98;
- Comprimento de onda: 8 a 14μm.

Foi realizada uma regressão linear com os valores medidos de DPV e de $T_c - T_a$. Posteriormente, essa equação foi usada para obter os valores de $T_c - T_a$ a partir de DPV medido. Esses valores de $T_c - T_a$ foram substituídos na equação 16, para a determinação de r_c , assumindo que esse é o valor mínimo de r_c (r_{cp}) para essa condição climática. Essa equação foi obtida reorganizando a equação 5:

$$r_{cp} = \frac{\gamma r_a (R_n - G) / (\rho c_p) - (T_c - T_a)(\Delta + \gamma) - (e_a^* - e_a)}{\gamma [(T_c - T_a) - r_a (R_n - G) / (\rho c_p)]} \cdot r_a \quad (16)$$

O valor de r_c foi obtido utilizando o valor de r_a , calculada por meio da equação 17, proposta por BRUTSAERT (1982) e recomendada por ALLEN et al. (1989):

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{Z_m - d}{Z_{om}}\right) \ln\left(\frac{Z_h - d}{Z_{oh}}\right)}{k^2 U_z} \quad (17)$$

em que:

- U_z - velocidade do vento (m.s⁻¹);
- Z_m - altura de medida de U_z (m);
- Z_h - altura de medida da temperatura do bulbo molhado e seco (m);
- k - constante de von Karman ();

- d - $\frac{2}{3}hc$, é o deslocamento do plano zero do perfil de velocidade do vento (m);
- Z_{om} - $0,123.hc$, é o comprimento de rugosidade da cultura para o transporte de momentum (m);
- Z_{oh} - $0,0123.hc$, é o comprimento de rugosidade da cultura para o transporte de vapor e calor sensível (m);
- hc - altura média da cultura (m).

A adoção da Equação 17 para o cálculo de r_a pressupõe que a cultura está representada por uma única grande folha, localizada a uma altura $d+Z_{oh}$. Esta consideração pode não ser inteiramente verdadeira quando a troca no topo da cultura, entre $d+Z_{oh}$ e hc , é importante como fonte de calor latente. Utilizando $d+Z_{oh}$ como o nível da superfície evaporativa, primeiramente pode resultar na superestimativa de r_a e provavelmente uma subestimativa de r_c (PEREIRA et al., 1999). Este foi o motivo indicado por ALVES et al. (1998) para a fato de terem encontrado valores negativos de r_c para alface e trigo.

Os demais termos utilizados pela Equação 16 foram medidos pelo sistema RB, instalado no centro da área experimental.

O valor de r_{cp} foi obtido para a condição de cobertura total do solo, em que a cultura apresentava índice de área foliar (IAF) de aproximadamente 4 e o início do processo de senescência ainda não estava evidente. Em diferentes fases de desenvolvimento da cultura, encontram-se diferentes condições de IAF, sombreamento e processo de senescência. Dessa maneira, foi realizada uma correção para IAF e senescência, a saber:

$$r_c = r_{cp} \cdot f_{(IAFxSen)} \quad (18)$$

em que:

- r_{cp} - valor mínimo de resistência do dossel da cultura ($s.m^{-1}$);
- $f_{(IAFxSen)}$ - fator de correção para IAF e senescência.

O cálculo do fator $f_{(IAFxSen)}$ foi obtido primeiramente calculando-se o IAF efetivo (IAF_{efet}), ou seja, quando nem toda área foliar da cultura está contribuindo para a

transpiração. Considerou-se que o processo de sombreamento e senescência torna-se significativo a partir do momento em que a cultura atingiu um IAF 4, com um fator de senescência (f_{sen}) de forma exponencial até o final do ciclo:

$$f_{\text{Sen}} = a \cdot \exp(b \cdot \text{DAS}) \quad (19)$$

em que:

a e b - coeficientes de regressão;

DAS - dias após a semeadura.

A obtenção dos coeficientes a e b foi feita de tal forma que maximizassem o coeficiente de correlação da equação de regressão (R^2) e o índice de concordância (I_c), quando a ETc calculada pela equação de PM foi comparada com a ETc obtida pelo método RB.

O IAF efetivo (IAF_{efet}) foi calculado por:

$$IAF_{\text{efet}} = \frac{IAF}{f_{\text{Sen}}} \quad (20)$$

$$f_{(IAF \times \text{Sen})} = \frac{IAF_{\text{efet}}}{IAF_{\text{efet max}}} \quad (21)$$

em que:

$IAF_{\text{efet max}}$ é o IAF_{efet} máximo no ciclo fenológico da cultura.

Uma vez calculada a resistência da superfície r_c (Equação 18), o cálculo da evapotranspiração foi obtido com a utilização da equação de Penman-Monteith:

$$ETc_{\text{PM}} = \lambda L_e = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p (e_a^* - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (22)$$

3.3. Estudo comparativo de métodos de cálculo de ETc

Os resultados obtidos foram comparados por meio de análises de regressão linear simples e gráficos de valores de ETc obtidos pelo método RB (considerado padrão) e estimados pelo modelo de PM, utilizando o método proposto para calcular r_c .

O valor do coeficiente de correlação da equação de regressão (r^2), analisado isoladamente, pode levar a interpretações inadequadas de performance do modelo estudado. Por isso, utilizou-se também o índice de concordância (I_c), segundo Willmott,

(1981), citado por MAGGIOTTO, (1996). O valor de I_c pode variar entre 0 e 1, de total discordância a total concordância, respectivamente. O I_c foi calculado por:

$$I_c = 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (23)$$

em que:

- P_i - valores de ETc estimada pela equação de Penman-Monteith ($W.m^{-2}$);
- O - média dos valores de ETc obtidos pelo sistema de RB ($W.m^{-2}$);
- O_i - valores de ETc obtidos pelo sistema de RB ($W.m^{-2}$).

Outro índice utilizado na análise foi o seguinte:

$$SEE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n - 1} \right)^{0,5} \quad (24)$$

em que:

- SEE - Erro padrão da estimativa.

3.4. Efeito do espalhante adesivo na evapotranspiração da cultura

No dia seguinte à aplicação, aos 50 DAS, da mistura Orthene 750 BR + Assist, para controle da vaquinha (*Diabrotica speciosa*), em que o Assist foi utilizado como espalhante adesivo, foi verificada uma redução na ETc do feijoeiro.

Para o estudo do efeito desse espalhante adesivo, foi calculado o provável valor da ETc, caso não tivesse sido aplicado o produto, procedendo-se da seguinte maneira:

- Foi utilizada a equação PM para o cálculo da ETc aos 51 DAS, utilizando o método proposto para o cálculo de r_c ;
- O valor de ETc obtido foi corrigido por meio de uma equação de regressão;
- Para elaborar essa equação, selecionaram-se dois dias anteriores à aplicação e um dia após a aplicação, fez se a regressão dos valores de ETc ($ETc_{RB_{se}} = a + b.ETc_{PM}$), em que $ETc_{RB_{se}}$ é a ETc provável se não tivesse sido aplicado o espalhante adesivo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliações fenológicas e fisiológicas

A duração de cada fase está apresentada no Quadro 6. A duração do ciclo total do feijoeiro foi de 76 dias.

Quadro 6. Início das fases de desenvolvimento do feijoeiro, em dias após a semeadura (DAS) e duração de cada estágio, dias. Dados obtidos em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

	Estádios Fenológicos	Início (DAS)	Duração (Dias)
V ₀	Germinação	3	2
V ₁	Emergência	5	3
V ₂	Folhas primárias	8	5
V ₃	1ª folha trifoliada	13	6
V ₄	3ª folha trifoliada	19	6
R ₅	Pré-floração	25	9
R ₆	Floração	34	6
R ₇	Formação de vagens	40	10
R ₈	Enchimento de vagens	50	14
R ₉	Maturação	64	12
Duração Total do Ciclo			76

A altura das plantas, ao longo do ciclo fenológico da cultura, está apresentada na Figura 6. A taxa de crescimento foi crescente até aproximadamente 37 DAS. Após essa fase, a taxa de crescimento foi retardada, até atingir a altura máxima de 0,70 m, aos 47 DAS. A regressão dos valores de altura e respectivos coeficientes de ajustamento estão, também, apresentados na Figura 6.

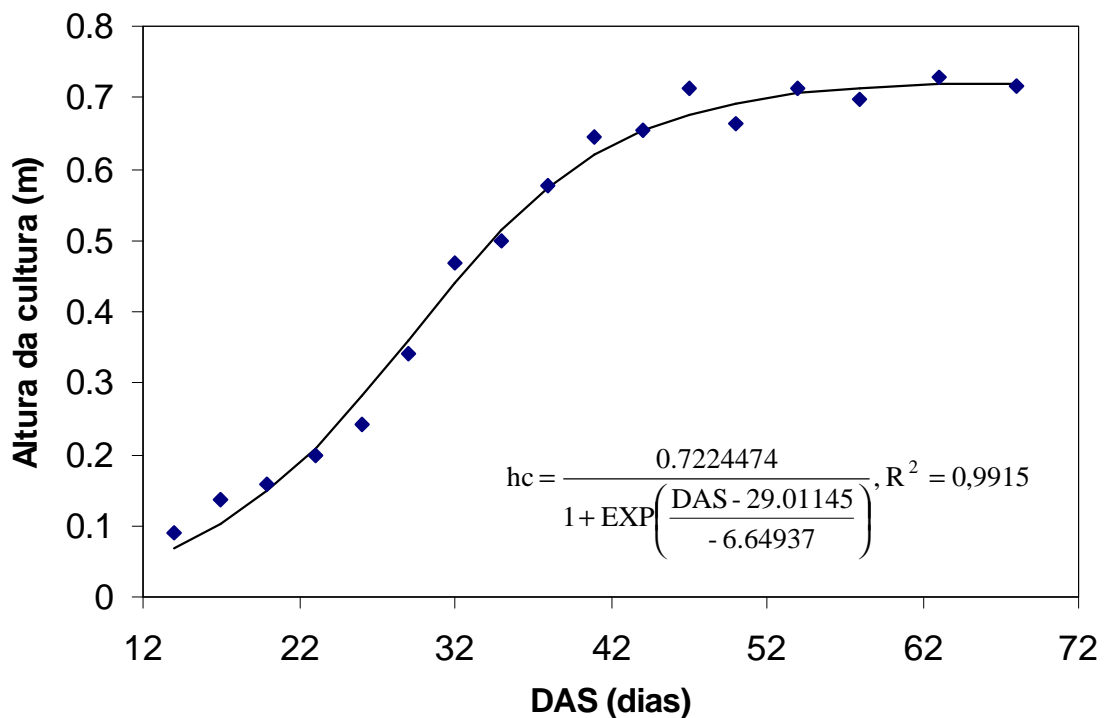


Figura 6. Altura de planta observada e estimada, em função de dias após a semeadura (DAS), em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

As Figuras 7 e 8 ilustram a variação dos valores dos peso fresco e seco da fitomassa aérea do feijoeiro. Observa-se que os valores máximos desses pesos foram atingidos aos 57 DAS e aos 62 DAS, respectivamente. A regressão desses valores e respectivos coeficientes de ajustamento estão, também, apresentados nas figuras.

Os valores de índice de área foliar (IAF) estão apresentados na Figura 9. Os resultados indicam que o valor máximo de IAF foi de 5,77, atingido aos 50 DAS. Posteriormente, o IAF diminui rapidamente. A regressão dos valores observados de IAF foi ajustada por meio do modelo de Gauss, resultando na expressão mostrada na Figura 9.

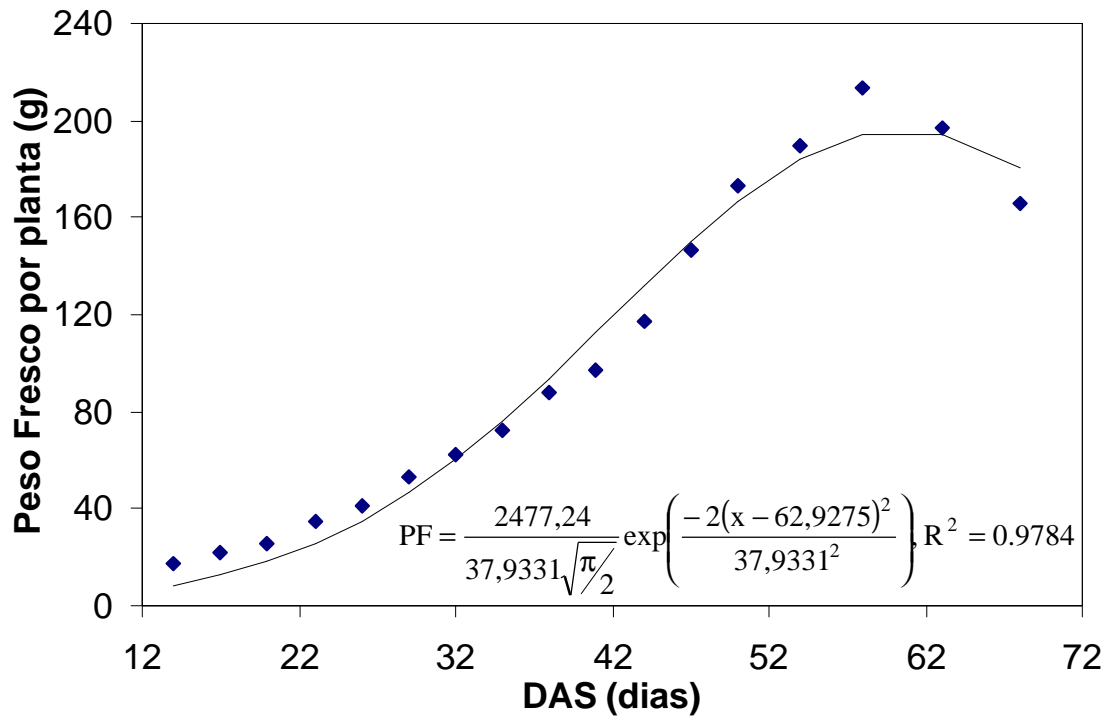


Figura 7. Fitomassa aérea fresca, em função de dias após a semeadura (DAS), em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

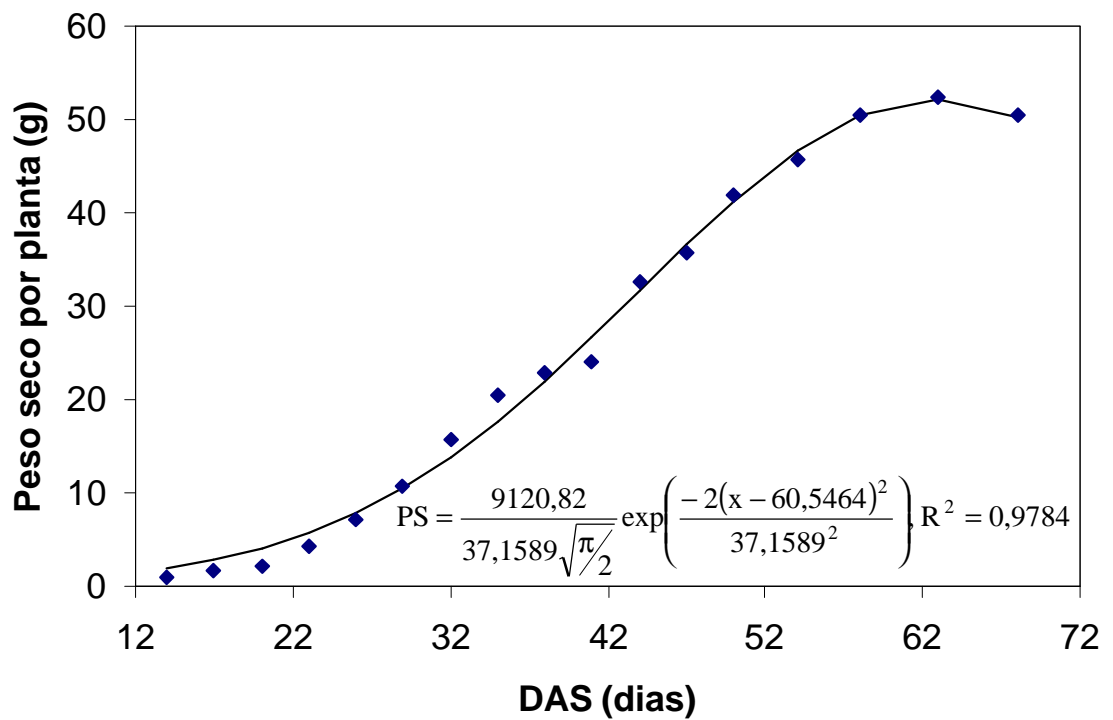


Figura 8. Fitomassa aérea seca, em função de dias após a semeadura (DAS), em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

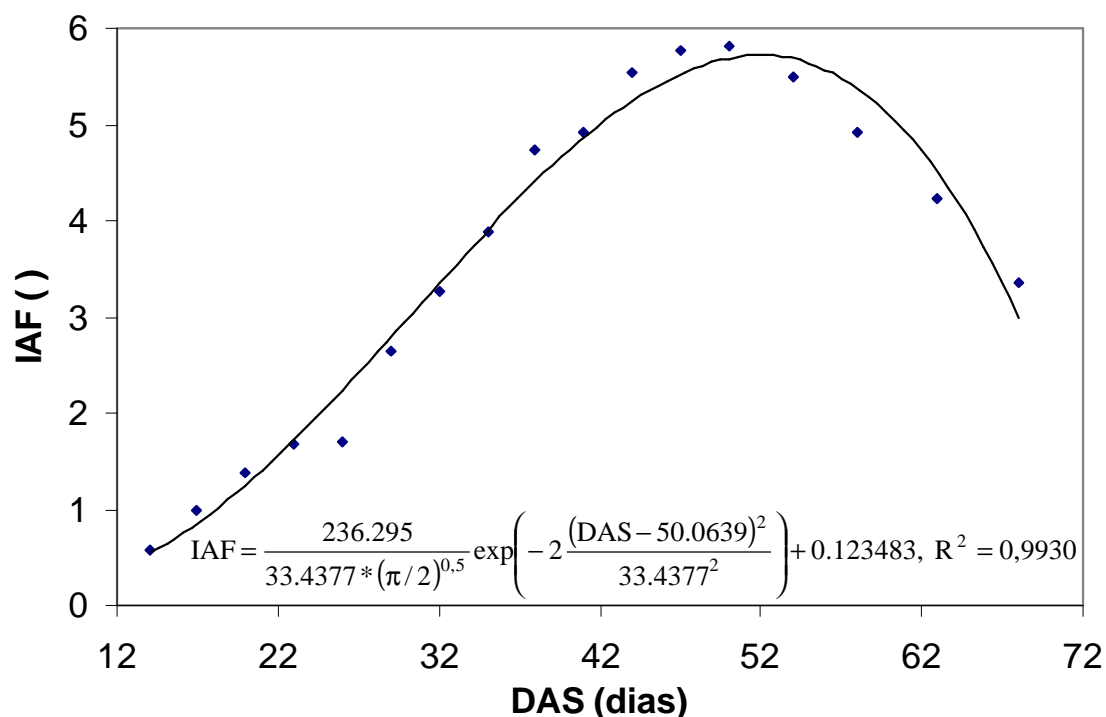


Figura 9. Índice de área foliar, em função de dias após a semeadura (DAS) em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

O número de determinações de resistência estomática (r_s) e resistência do dossel da cultura (r_c) foi limitado pelas más condições climáticas para a realização das medições, isto é, ocorreram poucos dias sem a presença de nuvens. As variações da cobertura de nuvens afetam o balanço de radiação e, conseqüentemente, as medições de T_a e T_c .

As medições concentraram-se entre 42 e 55 DAS, conforme ilustrado na Figura 10. O menor valor de r_s foi de $21,75 \text{ s.m}^{-1}$, ocorrido aos 48 DAS, coincidindo com o menor valor de r_c , ou seja, $6,32 \text{ s.m}^{-1}$. Os maiores valores verificados para r_s e r_c foram, respectivamente, $135,75$ e $44,40 \text{ s.m}^{-1}$, aos 51 DAS. A ocorrência desses valores mais elevados foi devido à aplicação, no dia anterior, da mistura Orthene + Assist. O Assist, utilizado como espalhante adesivo, é um óleo mineral que obstruiu as aberturas dos estômatos, diminuindo a transpiração. Discussão mais detalhada desse fato encontra-se no item 4.3.

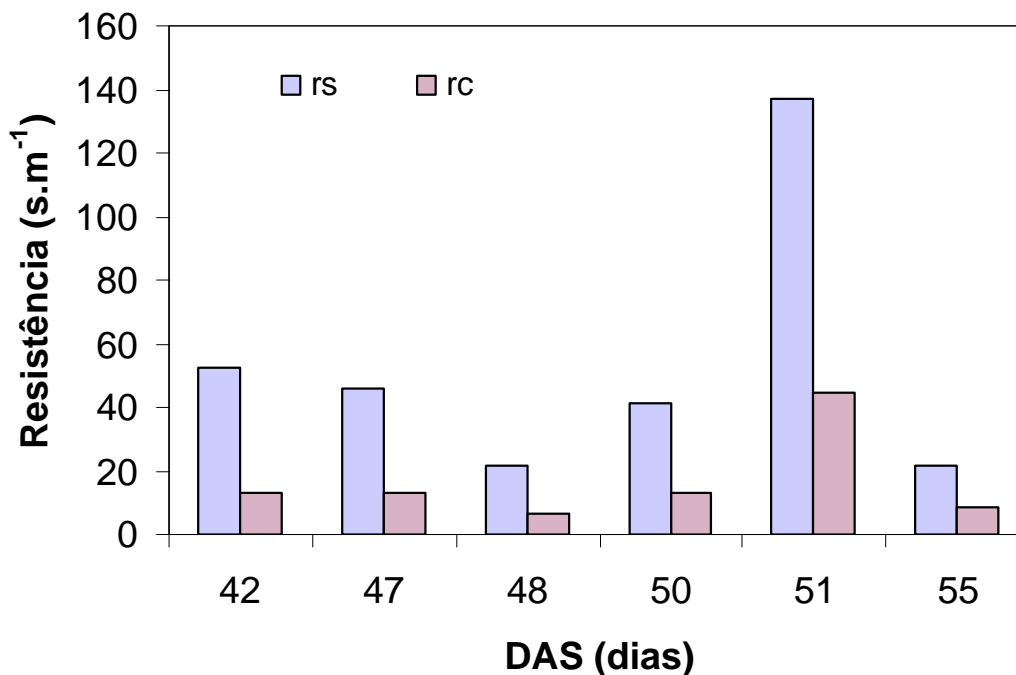


Figura 10. Resistências estomática (r_s) e do dossel da cultura (r_c), em função de dias após a semeadura (DAS), em condições de campo. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

4.2. Manejo da Irrigação

No dia do plantio, 3 de setembro de 1998, foi aplicada uma lâmina de água de 58,5 mm, por meio de um sistema de irrigação por aspersão convencional. Até 15 DAS, quando iniciou-se o monitoramento da ET_c por meio do sistema RB, foi aplicada uma lâmina de água de 49,28 mm, calculada a partir dos dados de evaporação de água de um Tanque Classe A. As lâminas de água aplicadas nas irrigações e provenientes de chuvas ocorridas estão ilustradas na Figura 11. As barras representam os valores de lâminas de água de cada irrigação ou chuva, enquanto que as linhas representam os valores acumulados das lâminas de água de irrigação e chuva. As lâminas totais de água aplicada pelas irrigações e chuvas foram de 197,47 e 237,7 mm, respectivamente. Nota-se que as chuvas concentraram-se no período de 51 a 71 DAS.

A Figura 12 apresenta a variação da umidade do solo em função do ciclo fenológico da cultura e da profundidade do solo. Observa-se que a variação de valores de umidade dia a dia é maior nas profundidades menores, sendo que, na profundidade de 50 a 70 cm, quase não há variação de umidade, até 58 DAS, quando ocorreu uma chuva com maior lâmina. A menor umidade, até a profundidade de 50 cm, foi de 29 cm³.cm⁻³, indicando que a cultura, provavelmente, não sofreu estresse hídrico.

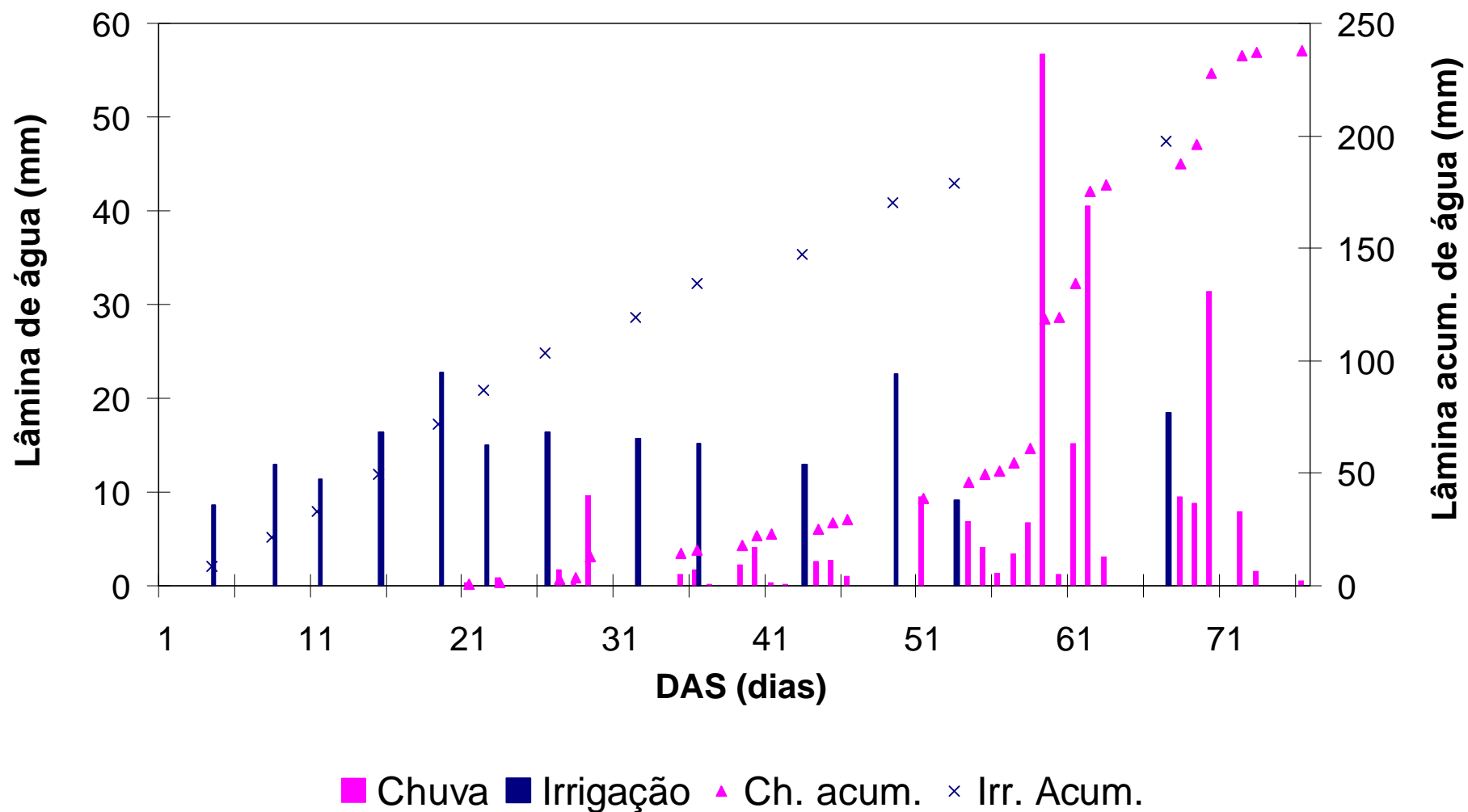


Figura 11. Lâminas de água aplicada pela irrigação e proveniente de chuvas ocorridas durante o ciclo fenológico da cultura do feijoeiro. As barras representam as lâminas de água de cada irrigação ou chuva e os pontos são as lâminas acumuladas. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

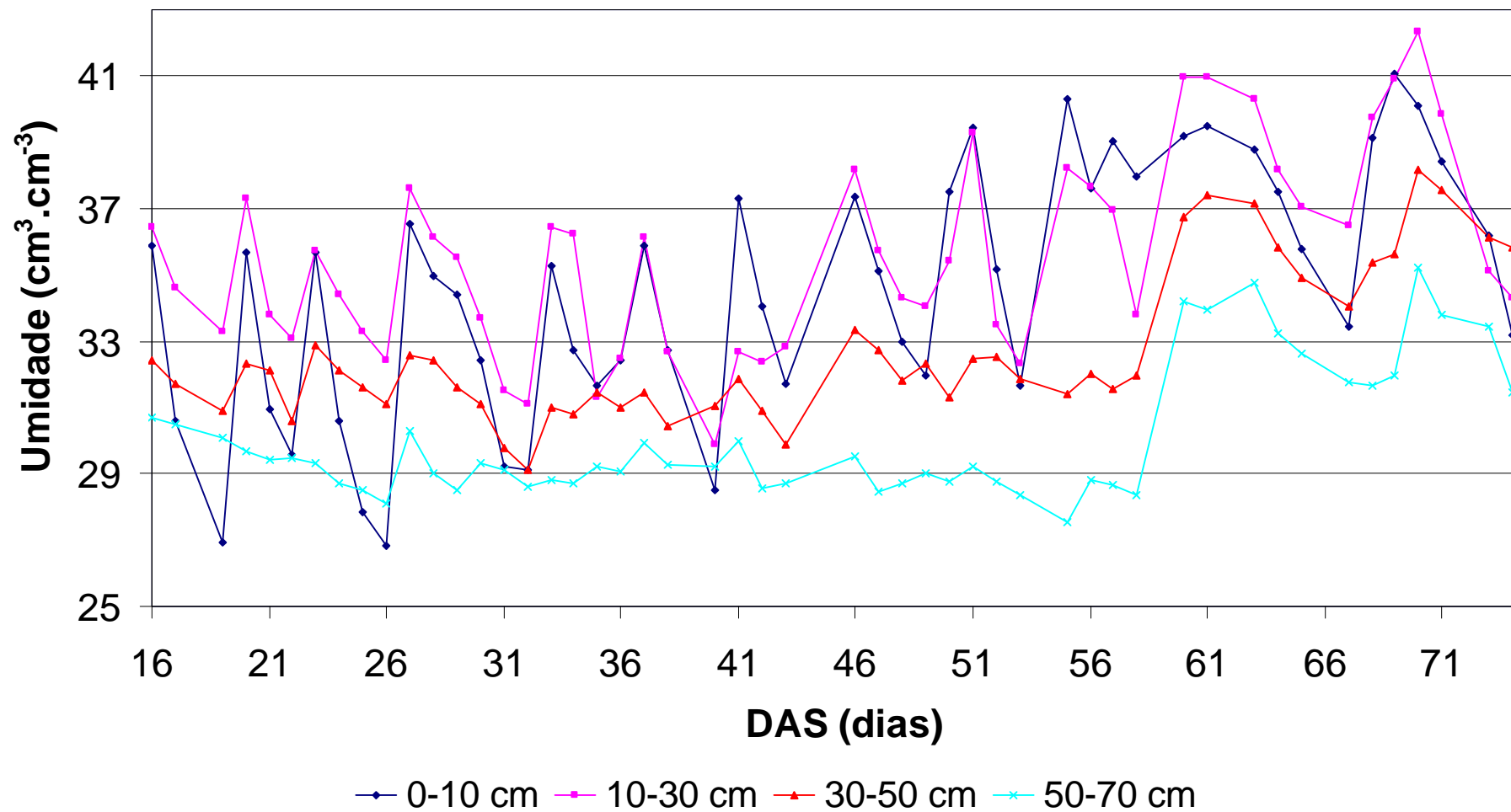


Figura 12. Conteúdo de umidade do solo ao longo do ciclo fenológico da cultura do feijoeiro, para quatro faixas de profundidade. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

4.3. Cálculo da resistência do dossel da cultura e da evapotranspiração da cultura

Para a elaboração da equação da linha base não estressada, que relaciona o déficit de pressão de vapor (DPV) com $T_c - T_a$, utilizaram-se dados coletados com o transdutor de temperatura a infravermelho, apresentados no Quadro 7, obtendo-se:

$$(T_c - T_a) = 3,3063 - 2,8895.DPV \quad (25)$$

Não foi possível fazer maior número de determinações com esse transdutor, por limitação de condições climáticas (pouco dias sem presença de nuvens). Não foram utilizados no ajuste da equação de regressão, dados obtidos com baixos valores de R_n , uma vez que FELDHAKKE e EDWARDS (1992), estabelecendo relação da T_c com saldo de radiação e DPV, observaram que a T_c elevou $0,6^\circ\text{C}$ para um aumento de 100 W.m^{-2} no saldo de radiação, exceto para níveis de saldo de radiação menores que 100 W.m^{-2} . Também não foram utilizados os dados de 51 DAS, uma vez que a cultura sofreu a interferência da aplicação Orthene+Assist.

O ajuste da Equação 25 encontra-se ilustrado na Figura 13. Observa-se um bom ajuste da equação ($r^2 = 0,842$), indicando que houve boa correlação entre os valores estimados e medidos. Nesse ajuste, foi obtido um I_c de 0,965, significando que houve boa concordância entre os valores obtidos pela equação e medidos no campo. O índice I_c é mais sensível a erros sistemáticos e não sistemáticos dos modelos, daí a razão do uso desse índice nas análises.

Foram obtidos valores negativos de r_c . Como não têm significado físico, foram substituídos por um r_c , considerado quando ocorre a evapotranspiração máxima. Foi utilizado um valor de r_{cp} igual a $4,9 \text{ s.m}^{-1}$, encontrado por KOBAYASHI (1996).

O modelo exponencial da Equação 19 está sendo proposto, pois o processo de senescência, no início, ocorre lentamente e é atenuado pelo crescimento ativo da planta. Posteriormente, esse crescimento diminui e o processo de senescência se torna mais acentuado, sendo possível verificá-lo visualmente.

Quadro 7. Medições realizadas por meio do transdutor de termometria a infravermelho, em que IEHC é o índice de estresse hídrico da cultura. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

DAS	Hora	IEHC	Radiação Solar (W.m ⁻²)	Temperatura do dossel (°C)	Temperatura do ar (°C)	T _c -T _a (°C)	Umidade Relativa (%)	Déficit de pres-são de vapor (kPa)
46	13:15	0,037	1169	27,925	29,700	-1,775	55,0	1,850
	13:20	0,021	1450	27,425	29,725	-2,300	51,5	1,975
	13:23	0,091	1193	28,425	30,075	-1,650	52,3	1,975
	13:32	0,081	1228	28,050	29,650	-1,600	52,8	1,925
	13:35	-0,032	1178	26,825	29,525	-2,700	51,0	1,950
47	10:23	0,046	1652	26,375	26,900	-0,525	57,5	1,450
	10:26	0,082	1573	26,125	26,825	-0,700	53,5	1,600
	10:39	-0,043	1611	25,625	27,275	-1,650	54,0	1,600
48	11:38	-0,055	1590	25,500	26,825	-1,325	56,3	1,475
	11:49	0,014	1679	25,700	26,225	-0,525	57,3	1,375
	13:00	0,045	1442	26,350	27,550	-1,200	53,5	1,675
	13:13	0,126	1306	27,225	27,975	-0,750	53,0	1,750
	14:54	-0,083	358	24,725	29,750	-5,025	39,8	2,500
	14:57	-0,060	142	25,275	29,300	-4,025	43,5	2,275
50	15:39	-0,072	175	25,450	30,025	-4,575	42,3	2,400
	09:15	-0,090	1015	25,175	26,750	-1,575	56,3	1,475
	09:18	-0,069	1060	25,425	26,850	-1,425	57,5	1,475
	12:01	0,092	1579	27,175	31,767	-4,592	34,0	3,025
51	12:04	-0,050	1548	26,000	31,000	-5,000	41,3	2,600
	09:12	0,090	818	27,125	26,700	0,425	63,5	1,225
	09:20	0,046	863	27,325	28,725	-1,400	54,0	1,750
	09:59	0,147	1395	28,700	29,450	-0,750	54,0	1,825
	10:03	0,040	1423	26,950	29,600	-2,650	47,0	2,150
	11:20	0,214	1769	28,125	28,925	-0,800	47,0	2,075
	11:22	0,356	1769	29,675	29,325	0,350	45,8	2,175
	12:26	0,132	1519	28,075	31,350	-3,275	39,3	2,725
	12:29	0,144	1496	27,975	31,700	-3,725	36,0	2,950
	13:38	-0,014	1302	26,375	30,650	-4,275	42,0	2,500
	13:41	-0,042	1326	26,375	30,800	-4,425	43,8	2,450
	14:19	0,067	858	27,125	32,675	-5,550	33,8	3,250
	14:22	-0,024	866	26,200	31,875	-5,675	37,8	2,900
	14:47	0,016	502	26,050	32,225	-6,175	32,0	3,225
	14:49	-0,096	510	24,900	31,625	-6,725	35,3	2,950
15:18	0,006	159	25,750	31,825	-6,075	32,3	3,150	
15:21	-0,081	194	24,950	32,175	-7,225	33,5	3,150	

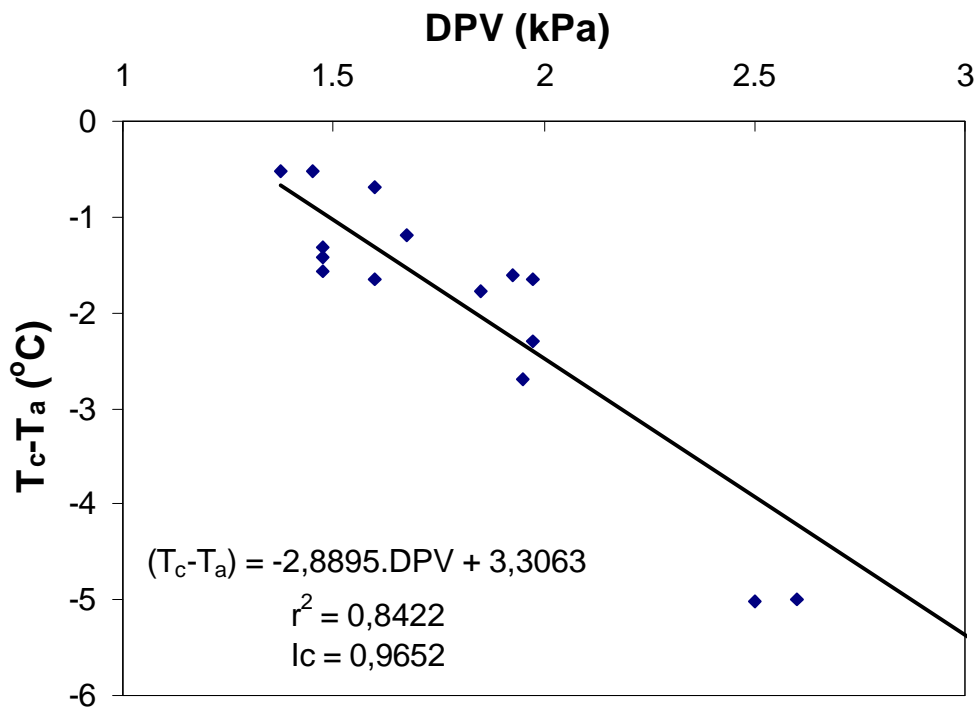


Figura 13. Linha base não estressada, que relaciona a diferença entre as temperaturas do dossel da cultura e do ar ($T_c - T_a$) com o déficit de pressão de vapor do ar (DPV). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

Esse modelo está de acordo com GOUDRIAAN e Van LAAR (1994), que propuseram as seguintes relações para descrever o processo de senescência na elaboração do modelo "SUCROS1 - A crop growth model for potential production": $DLAI = LAI \cdot RDR$, em que $RDR = \text{Max}(RDRDV, RDRSH)$. Essa taxa de senescência (DLAI) é descrita com base na taxa relativa de morte das folhas (RDR, dia^{-1}). Essa taxa assume um valor máximo em função da idade (RDRDV) e do auto-sombreamento (RDRSH).

A equação obtida para o fator de senescência foi:

$$f_{\text{sen}} = 0,25341547 \exp(0,039220713 \cdot \text{DAS}) \quad (26)$$

A Equação 26 foi aplicada a partir de 35 DAS, quando o IAF atingiu aproximadamente 4 e iniciou-se o estágio de floração.

Aplicando a Equação 20, obteve-se o comportamento de IAF_{efet} . "versus" IAF, mostrado na Figura 14.

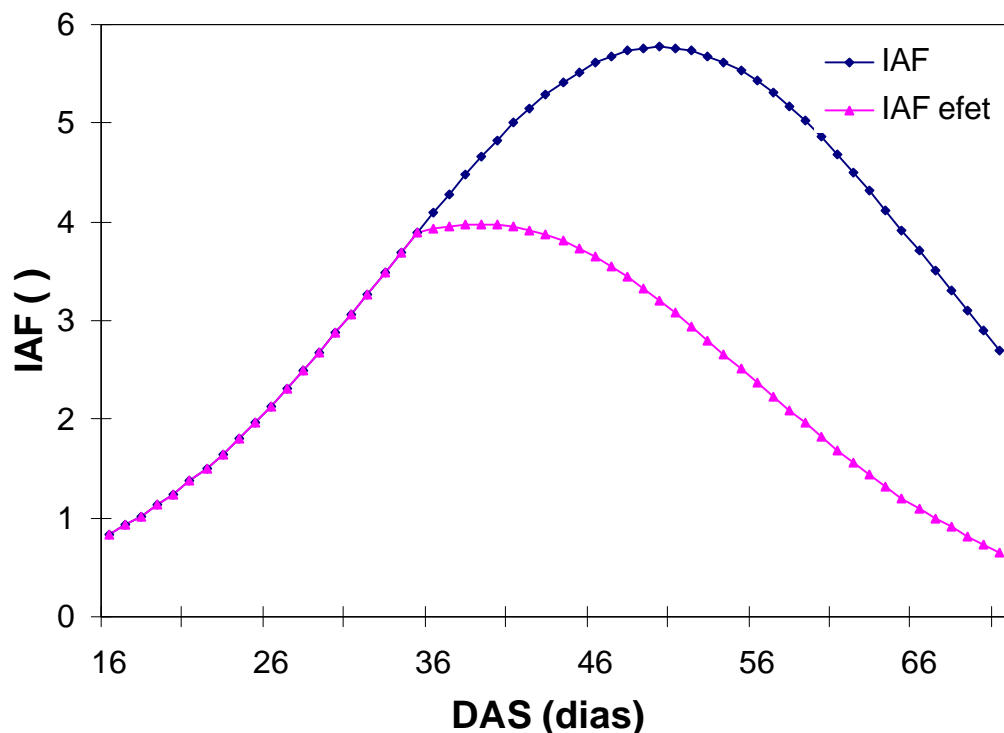


Figura 14. Comportamento do índice de área foliar total (IAF) versus IAF efetivo (IAF_{efet}), ao longo do ciclo fenológico da cultura do feijoeiro. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

O sistema RB monitorou as informações necessárias para o cálculo da ET_c da cultura do feijoeiro, de 16 a 76 DAS. Alguns termos do balanço de energia desse período estão apresentados nas Figuras do Anexo 3. De modo geral, houve grande variação na radiação solar e, conseqüentemente, nos demais termos do balanço, exceto no início do desenvolvimento da cultura. Nesse período, foram selecionados quatro dias, correspondendo a quatro estádios distintos de desenvolvimento, para uma discussão mais detalhada, conforme segue:

- 18 DAS, 1ª folha trifoliada, $IAF = 1,02$, $IAF_{efet} = 1,02$
- 33 DAS, pré-floração, $IAF = 3,68$, $IAF_{efet} = 3,68$
- 41 DAS, formação de vagens, $IAF = 5,00$, $IAF_{efet} = 3,95$
- 73 DAS, maturação, $IAF = 1,82$, $IAF_{efet} = 0,36$

As Figuras 15 a 18 ilustram exemplos de variação diurna de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação- R_n , fluxo de calor sensível- H , fluxo de calor latente ET_{cRB}) e da ET_c , calculada pela equação de Penman-Monteith (ET_{cPM}), velocidade

do vento e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a), para quatro estádios de desenvolvimento da cultura.

Verificou-se que, em vários horários de medição e em vários dias, o fluxo de calor latente medido pelo sistema RB ultrapassou o valor do saldo de radiação, indicando a possibilidade de ter havido efeito de advecção. Pelo fato da contribuição da energia advectiva não ter sido medida diretamente, foi utilizada a razão entre a resistência climática (r_i) e a resistência aerodinâmica (Equação 27), para indicar o efeito de contribuição de energia advectiva de áreas adjacentes à área experimental, conforme proposto por Thom (1975), citado por TODD (2000). Esses autores salientam que essa razão será muito grande caso seja muito forte o fluxo de ar seco sobre a vegetação, denominado de efeito oásis.

$$\frac{r_i}{r_a} = \frac{\rho_a c_p \text{DPV} (R_n - G)^{-1}}{\left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2 (k^2 u)^{-1}} \quad (27)$$

Aos 18 DAS (Figura 15), a curva ETc calculada pela equação de PM (ETcPM), aproximou-se bastante da ETc medida pelo sistema RB (ETcRB), exceto no final do dia, quando a razão r_i/r_a se torna maior, superior a 2, indicando uma contribuição devido à energia advectiva proveniente de área externa, provavelmente mais seca e quente. A razão r_i/r_a sofre o efeito principalmente da velocidade do vento e do saldo de radiação, sendo diretamente proporcional ao aumento da velocidade do vento e inversamente proporcional ao saldo de radiação.

Aos 33 DAS (Figura 16), houve uma diferença entre as curvas ETcPM e ETcBR durante todo o dia, comparada com a Figura 18, com valores de r_i/r_a superior a 2 durante todo o dia, indicando a possibilidade de ter havido efeito mais forte de advecção.

Aos 41 DAS (Figura 17), os valores de ETcBR também foram maiores que os valores de ETcPM. Essa diferença aumenta com o aumento de r_i/r_a .

Aos 73 DAS (Figura 18), no final do ciclo, a relação entre ETcPM e ETcRB foi bastante diversa. Em alguns intervalos, os valores de ETcPM foram subestimados e em outros, superestimados. Isso ocorreu, provavelmente, porque houve uma interação entre o efeito do processo de senescência da cultura, o fator $f_{(IAFxSen)}$ (foi inserido no cálculo de r_c) e o efeito da advecção. Como todos esses efeitos interagem, não foi possível isolar o efeito de cada um.

De modo geral (Figuras 15 a 18), os valores de calor sensível (H) se tornam menores e até mesmo negativos na parte da tarde, quando foram obtidos maiores valores de r_i/r_a , indicando a ocorrência de um fluxo de H das camadas superiores para as inferiores, reforçando a hipótese de que a área onde o sistema RB estava instalado recebeu interferência de massa de ar mais quente e seca.

Analisando, conjuntamente, todos os gráficos gerados, nota-se que, provavelmente, há efeito de advecção para velocidade de vento acima de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$. Isso pode ser verificado pelos resultados das análises de distribuição de frequência da direção e sentido predominante do vento, para o período estudado (de 16 a 76 DAS, entre 6h:40min. e 17h20min.), apresentados no Quadro 8. O efeito do vento foi aumentado porque o sentido predominante do vento, aproximadamente 60% (sentido NE→SO e L→O), apresentaram as menores bordaduras da área experimental (Figura 1 e Quadro 8).

Quadro 8. Distribuição da frequência da direção e sentido predominante do vento, no período de 16 e 76 DAS, entre 6h40min. e 7h40min.

Sentido do Vento	Porcentagem de ocorrência (%)
NE→SO	39,8
L→O	21,0
SE→NO	4,1
S→N	2,3
SO→NE	2,5
O→L	6,7
NO→SE	10,9
N→S	12,7

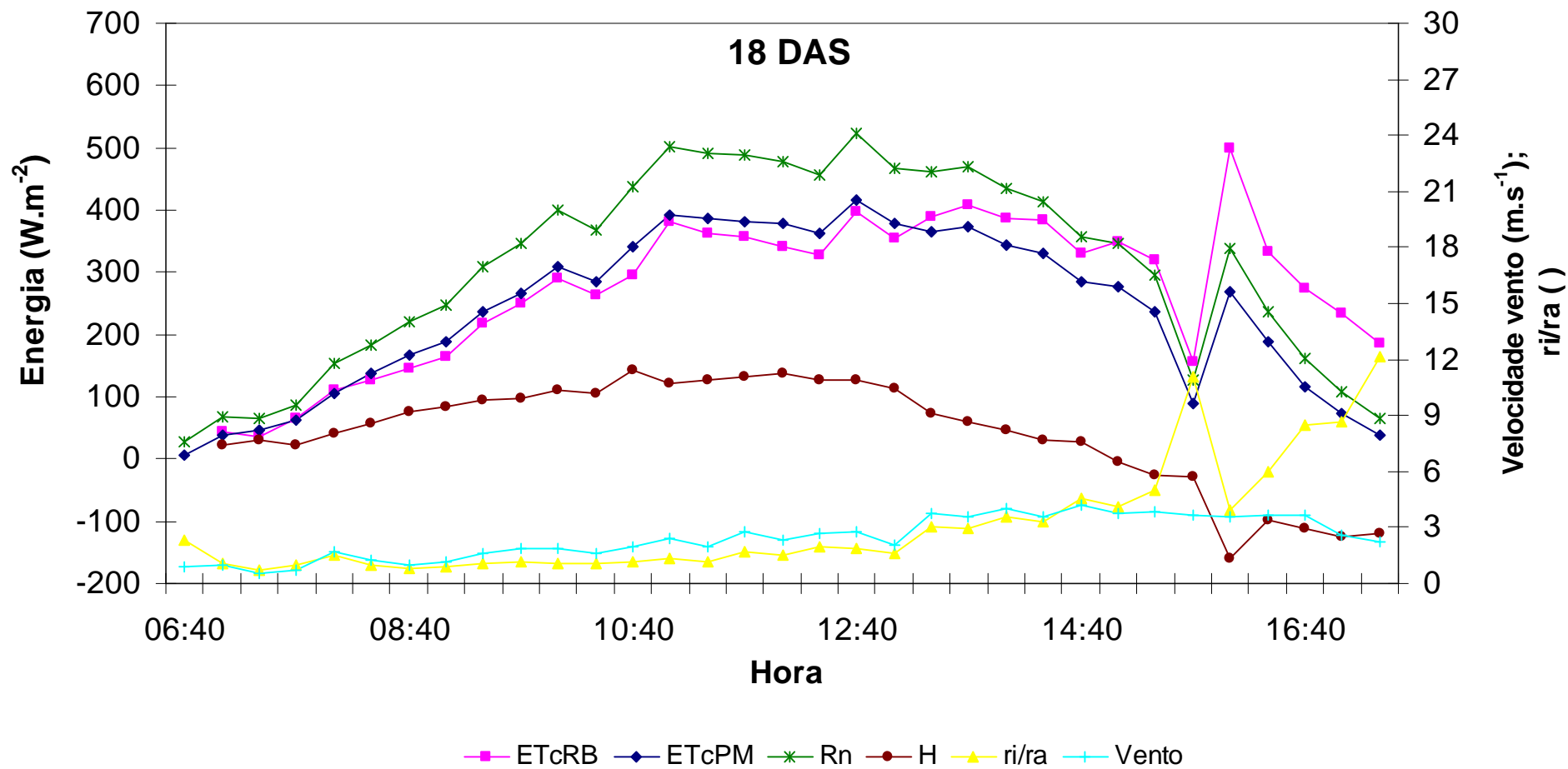


Figura 15. Variação diurna, aos 18 dias após a semeadura (DAS), no estádio V₃ do feijoeiro (1^a folha trifoliada), de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente ETcRB) e da ETC calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (Vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

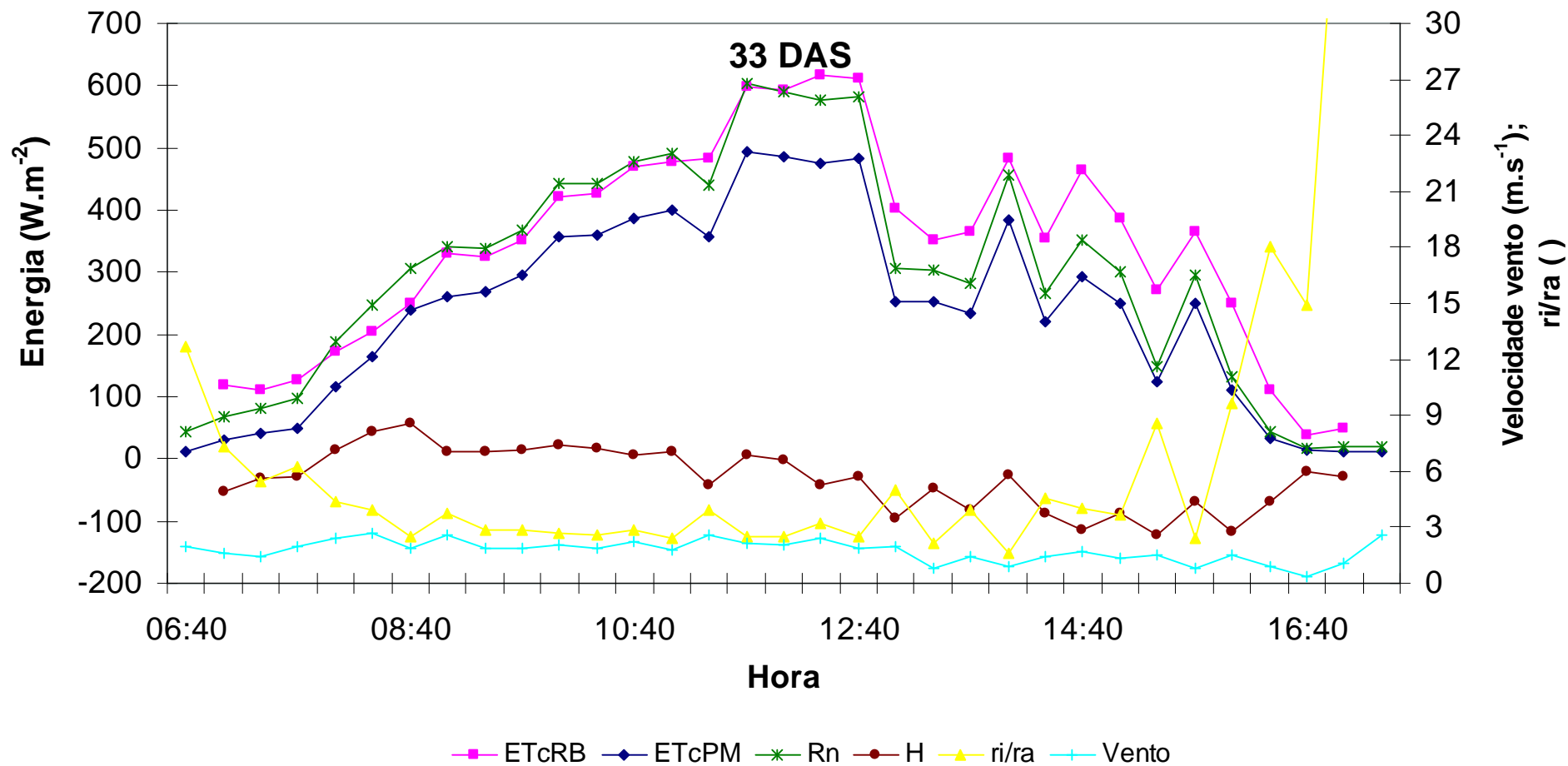


Figura 16. Variação diurna, aos 33 dias após a semeadura (DAS), no estágio R7 do feijoeiro (pré-floração), de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente ETcRB) e da ETC calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (Vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

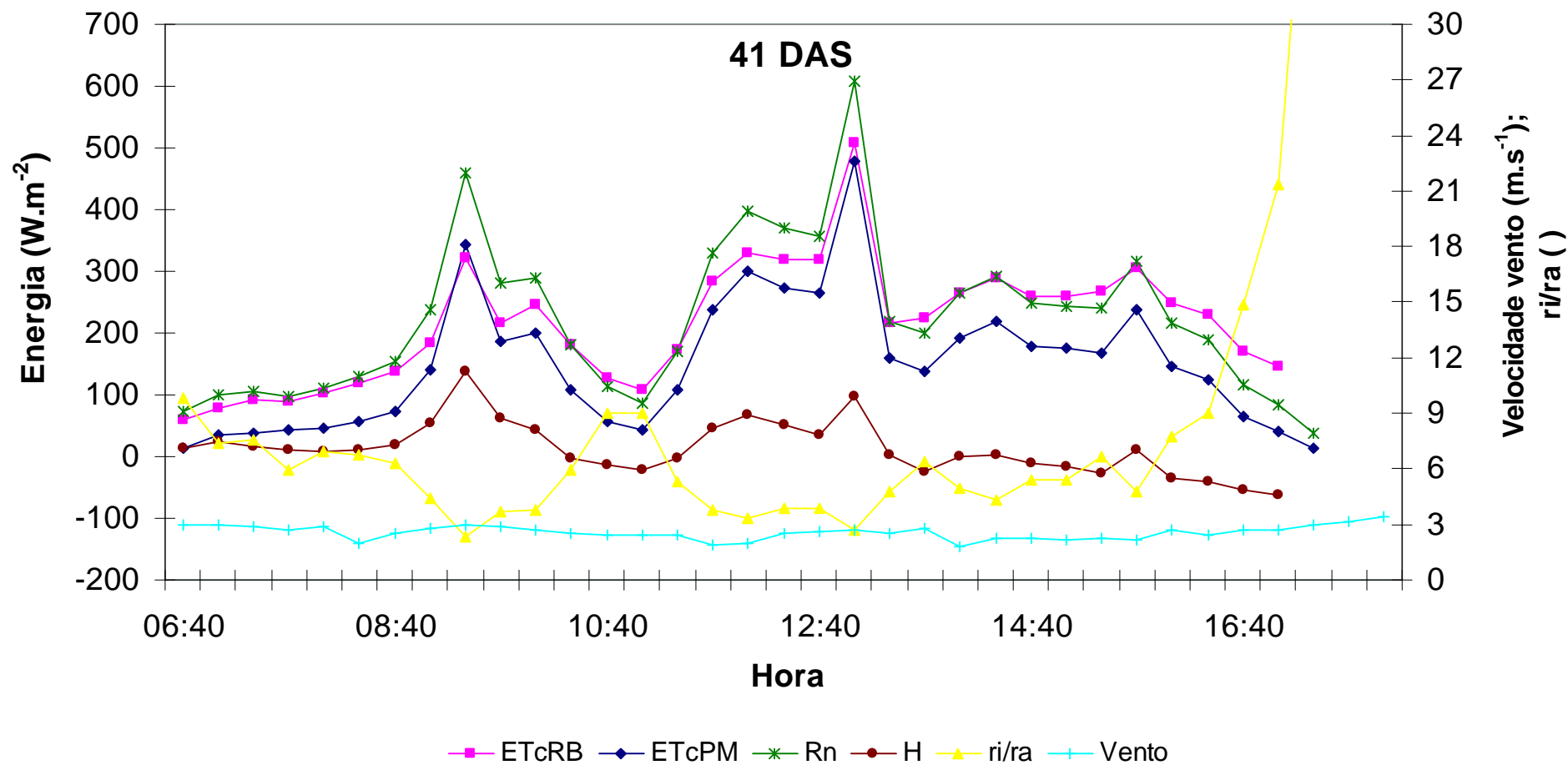


Figura 17. Variação diurna, aos 41 dias após a semeadura (DAS), no estágio R₇ do feijoeiro (Formação de vagens), de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (Vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

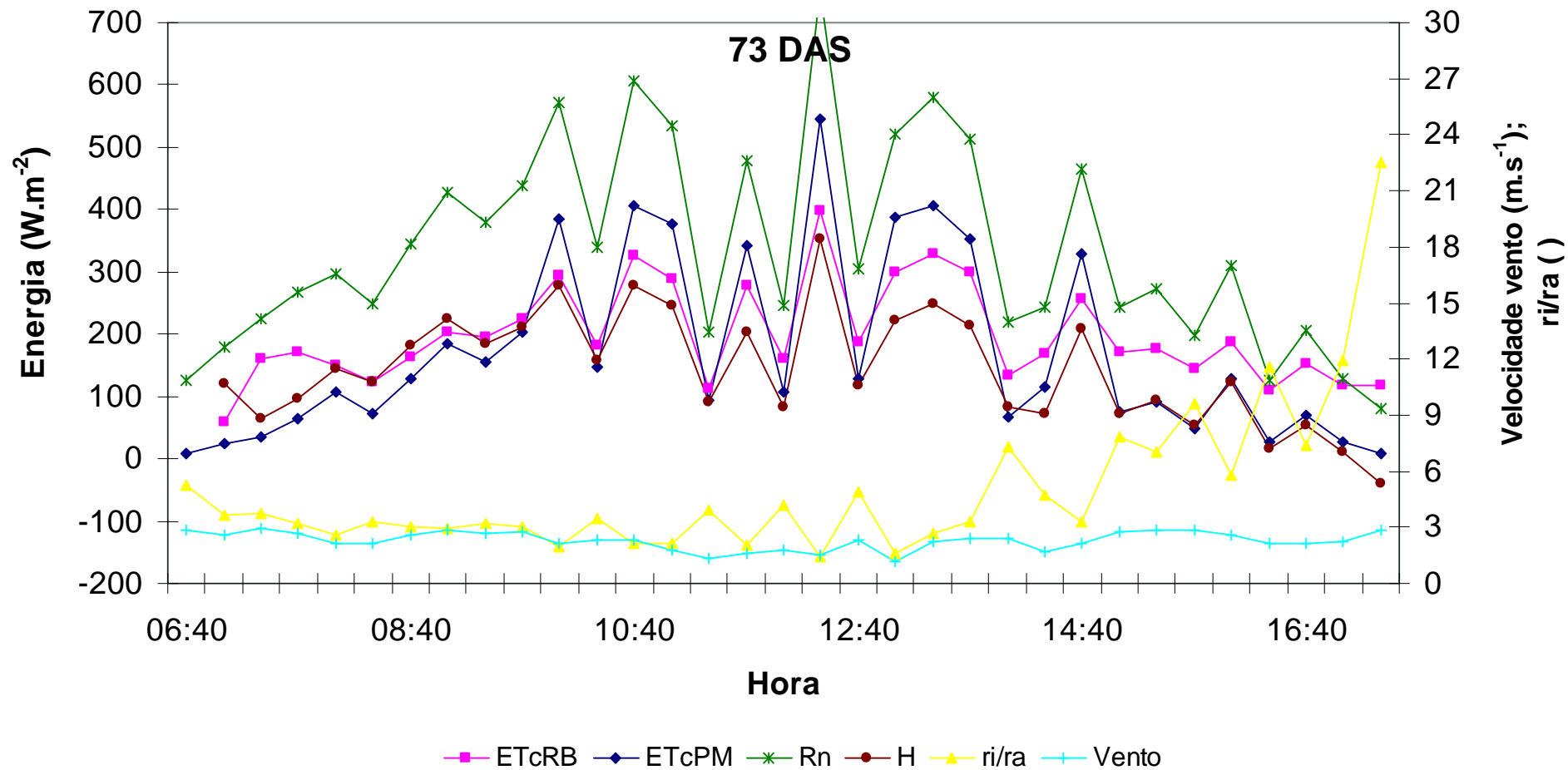


Figura 18. Variação diurna, aos 73 dias após a semeadura (DAS), no estágio R₉ do feijoeiro (maturação), de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (Vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

A Figura 19 mostra a relação entre os valores de ETcRB e ETcPM, com o ajuste da regressão linear. Observa-se boa correlação entre os valores calculados e medidos de ETc. No entanto, de modo geral, os valores calculados com a equação de Penman-Monteith subestimaram a ETc. A equação ajustada mantém-se praticamente paralela à reta 1:1, com uma diferença média de -45 W.m^{-2} , provavelmente devido à contribuição de energia advectiva proveniente de área externa.

O Quadro 9 apresenta os coeficientes da equação ajustada, coeficiente de determinação, índice de concordância e erro padrão da estimativa. Apesar de apresentar boa correlação e boa concordância (0,92) entre os valores medidos pelo método RB e calculados pela equação de PM, obteve-se um erro padrão da estimativa relativamente alto ($76,68 \text{ W.m}^{-2}$).

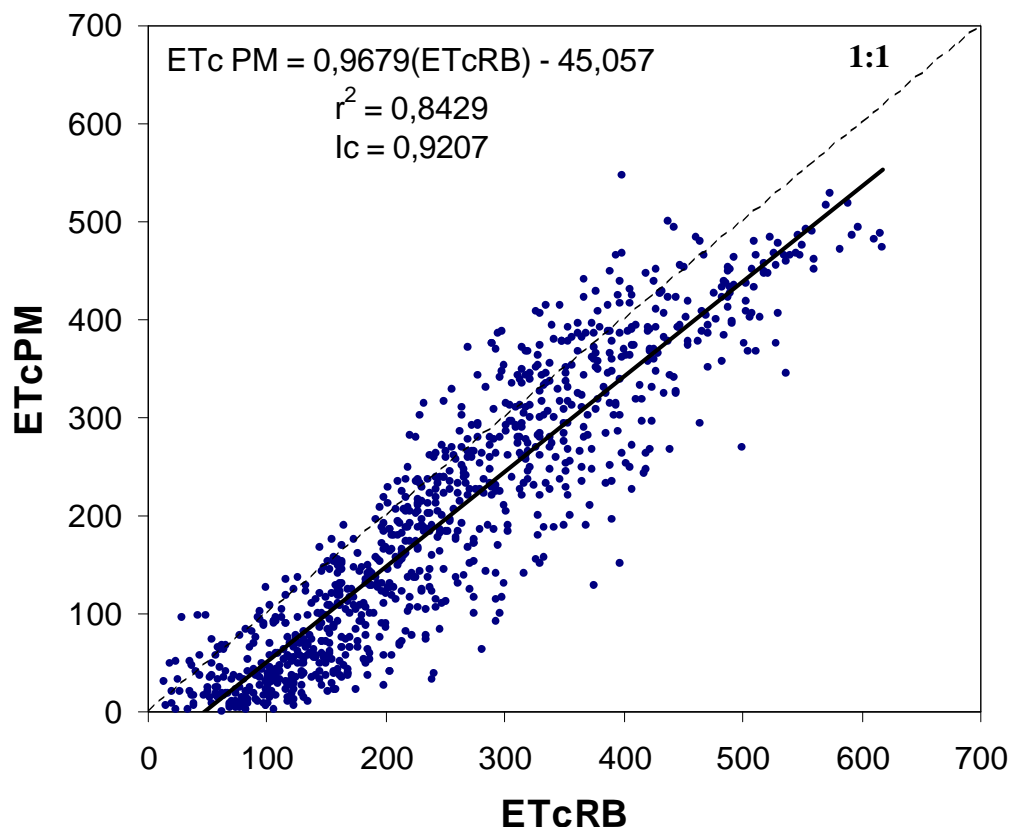


Figura 19. Relação entre a evapotranspiração da cultura calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM) e a evapotranspiração da cultura medida pela Razão de Bowen (ETcRB). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

Quadro 9. Índices de comparação entre os métodos de estimativa da ETc, calculada pela equação de PM, utilizando a temperatura do dossel da cultura para calcular a r_c e obtida pelo método RB, tomado como padrão (y = ax + b).

a ()	b (W.m ⁻²)	r ² ()	Ic ()	SEE (W.m ⁻²)
0,9679	-45,057	0,8429	0,9207	76,68

Ic = índice de concordância SEE = erro padrão da estimativa

4.4. Efeito do espalhante adesivo na evapotranspiração

Os valores de ETcRB_{se} e ETcPM e o ajuste da regressão linear para os dias próximos ao 51 DAS estão ilustrados na Figura 20. Observa-se boa correlação (r² = 0,88) e concordância (Ic = 0,896) entre os valores calculados e medidos de ETc. No entanto, de modo geral, os valores calculados com a equação de Penman-Monteith subestimaram a ETc. Dessa maneira, para que o cálculo da ETc provável da cultura do feijoeiro, sem aplicação do espalhante adesivo, ficasse mais próximo do real, os valores de ETc obtida pela equação de PM foram corrigidos pela Equação 28, reorganizando a equação da regressão:

$$ETcRB_{se} = \frac{(ETcPM + 47,128)}{0,8835} \quad (28)$$

A Figura 21 ilustra o comportamento de alguns componentes do balanço de energia, quando foi aplicado o espalhante adesivo (ETcRB, H e Rn) e a ETc se não tivesse sido aplicado o espalhante adesivo (ETcRB_{se}). Os intervalos que não estão plotados são dados do sistema RB que não satisfizeram as condições do Quadro 4. Observa-se que houve uma redução muito grande da evapotranspiração medida pelo sistema RB, quando comparada com a calculada pela equação PM. Esse valor chegou a um mínimo de 14% da ETc provável (sem a aplicação do espalhante).

O produto “Assist” é um óleo mineral inseticida e acariciada (do grupo dos hidrocarbonetos), que foi utilizado como espalhante adesivo. Provavelmente ele formou uma película sobre as folhas, obstruindo os estômatos e diminuindo a taxa de transpiração.

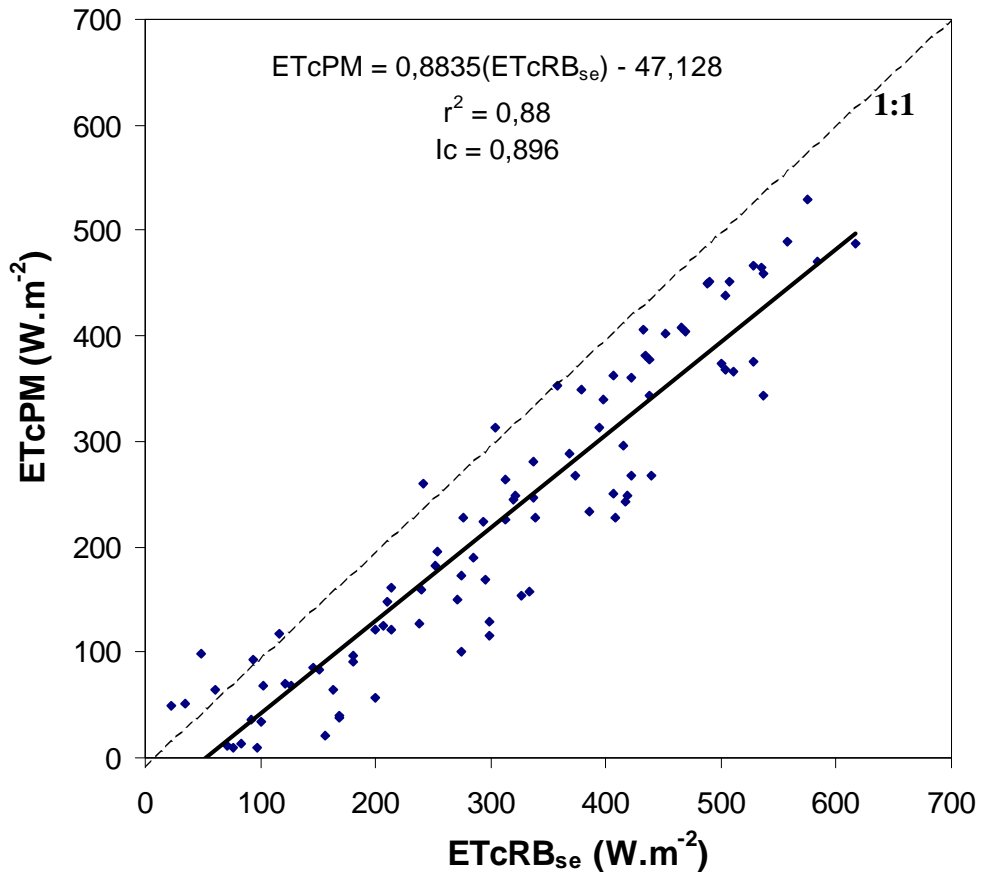


Figura 20. Evapotranspiração da cultura calculada pela equação de Penman-Monteith (ET_{cPM}), em relação à evapotranspiração da cultura sem aplicação do espalhante adesivo, medida pelo sistema Razão de Bowen ($ET_{cRB_{se}}$), para 48, 50 e 52 dias após a semeadura (DAS). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

O Assist causou uma mudança na partição da energia disponível, com a diminuição do fluxo de calor latente. Houve, também, uma partição maior para o fluxo de calor sensível, ou seja, foi utilizada para o aquecimento do ar próximo à superfície coberta pela vegetação.

O efeito do Assist também pode ser notado na temperatura do dossel da cultura. Conseqüentemente, na diferença $T_c - T_a$ (Quadro 7), na resistência estomática e na resistência do dossel da cultura (Figura 13), quando foram registrados valores menos negativos de $T_c - T_a$ e valores mais altos de r_s e r_c .

O efeito do Assist foi muito grande no início do dia, diminuindo o seu efeito a partir de aproximadamente 12h20min., confirmado pelo fato de os valores $T_c - T_a$ se tornarem mais negativos a partir dessa mesma hora.

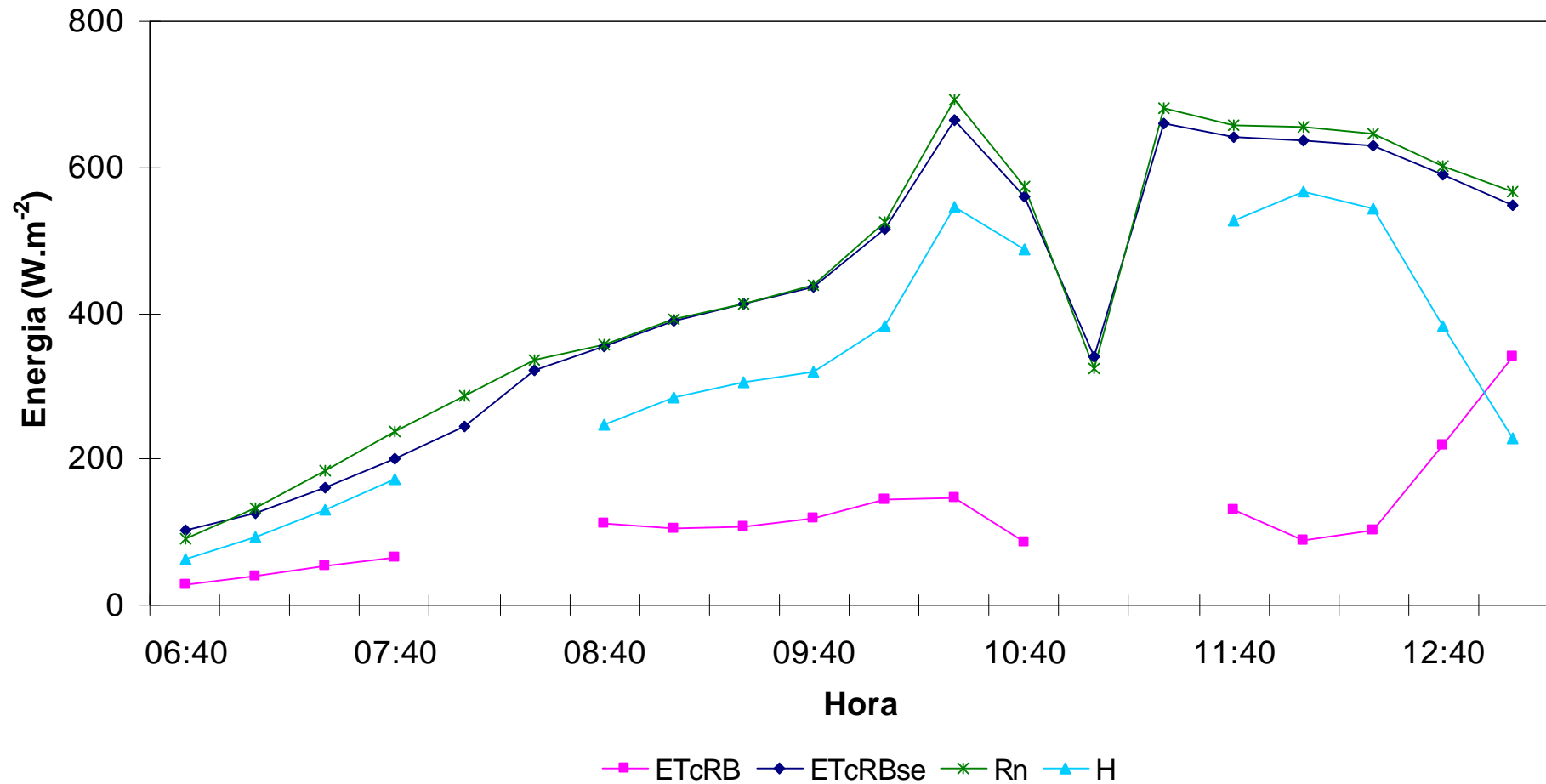


Figura 21. Evapotranspiração (ETcRB) da cultura do feijoeiro, saldo de radiação (Rn) e fluxo de calor sensível (H), sob influência de espalhante adesivo, medidos pelo sistema de Razão Bowen, e a evapotranspiração provável sem a aplicação do espalhante adesivo (ETcRB_{se}). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.

5. CONCLUSÕES

- A ET_c calculada pela equação de Penman-Monteith, utilizando r_c calculada a partir da temperatura do dossel da cultura, foi subestimada, quando comparada com a obtida pelo método RB;
- Os maiores valores da relação r_i/r_a correspondem aos menores valores de ET_c determinada pela equação de PM, quando comparados com os valores obtidos pelo método RB;
- O efeito da advecção afetou diretamente a correlação entre os valores calculados e medidos de ET_c, dificultando a análise do método de cálculo de r_c que foi proposto.
- A aplicação do espalhante adesivo alterou a partição da energia disponível, afetando também, a T_c , r_s e r_c ;

6. LITERATURA CITADA

- ALLEN, R.G., JENSEN, M.E., WRIGHT, J.L, BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v.81, n.4, p.650-62, 1989.
- ALVES. I., PERRIER. A., PEREIRA, L.S. Aerodynamic and surface resistance of complete cover crop: How good is the "Big Leaf". **Transaction of the ASAE**, v.41, n.2, p.345-351, 1998.
- BERLINER, P., OOSTERHUIS, D.M., GREEN, G.C. Evaluation of the infrared thermometer as a crop stress detector. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.31, n.2, p.219-230, 1984.
- BRUTSAERT, W.H. **Evaporation into the atmosphere**. Eidel, Dordrecht, 1982. 299p.
- CAMPBELL, G.S. Monteith symposium: topics in environmental Physics. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.104, p.1-4, 2000.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. **Bowen ratio instrumentation instruction manual**. Logan, Campbell Scientific. 1.1-2.10, 1997.
- CHOUDHURY, B.J., REGINATO, R.J., IDSO, S.B. An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.37, p.75-88, 1986.
- FELDHAKE, C.M., EDWARDS, W.M. Pasture canopy temperature under cloudy humid conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.60, p.133-144, 1992.
- GOMIDE, R.L. Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: FARIA, M.A. de (editor). **Manejo de Irrigação**, XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. UFLA/SBEA. 1998, 378p.

- GOUDRIAAN, J., Van LAAR, H.H. **Modeling potential crop growth processes: textbook with exercises**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1994, 238p.
- HATFIELD, J.L., REGINATO, R.J., IDSO, S.B. Evaluation of canopy temperature-evapotranspiration models over various crops. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.32, p.41-53, 1984.
- IDSO, S.B. Stomatal regulation of evaporation from well-water plant canopies: a new synthesis. **Agricultural and Forest Meteorology**, v29, p.213-217, 1983.
- ITIER, B., BRUNET, Y. Recent development and present trends in evaporation research: a partial survey. In: CAMP, C.R., SADLER, E.J., YODER, R.E. (Eds.), **Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Proceedings of the International Conference**, San Antonio, TX, 3–6 November 1996. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, p.1-20
- JACKSON, R.D. Canopy temperature and crop water stress. In: HILLEL, D. **Advance in irrigation**. New York, Academic Press, v. 1, p.43-85, 1988.
- JACKSON, R.D., IDSO, S.B., REGINATO, R.J., PINTER, P.J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resource Research**, v.17, n.4, p.1133-8, 1981.
- KALMA, J.D., JUPP, D.L.B. Estimating evaporation from pasture using infrared thermometry: evaluation of a one-layer resistance model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.51, p.223-246, 1990.
- KALLURI, S. N. V., TOWNSHEND, J. R. G., DORAISWAMY, P. A simple single layer model to estimate transpiration from vegetation using multi-spectral and meteorological data. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n.6, p.1037-53, 1998.
- KOBAYASHI, M.K. **Determinação do índice de estresse hídrico da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) por meio da termometria a infravermelho, e do fator de disponibilidade de água no solo, em minilísímetro de pesagem**. Viçosa, UFV, 1996. 90p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola).
- KUSTAS, W.P., STANNARD, D.I., ALLWINE, K.J. Variability in surface energy flux partitioning during Washita'92: resulting effects on Penman-Monteith and Priestley-Taylor parameters. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.82, p.171–193, 1996 .

- LEMON, E.R. Photosynthesis under field conditions: II. An aerodynamic method for determining the turbulent carbon dioxide exchange between the atmosphere and corn field. **Agronomy Journal**, v.52, p.697-703, 1960.
- LOWE, P.R. An approximating polynomial for computation of saturation vapor pressure. **Journal Applied Meteorology**, v.16, p.100-103, 1976.
- MAGGIOTTO, S.R. **Estimativa da Evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho**. Piracicaba, ESALQ, 1996. 71p. (Dissertação – Mestrado em Agronomia).
- MONTEITH, J.L. Accommodation between transpiring vegetation and the convective boundary layer. **Journal of Hydrology**, v.166, p.251-263, 1995.
- OLUFAYO, A., BALDY, C., RUELLE, P. et al. Diurnal course of canopy temperature and leaf water potential of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) under a Mediterranean climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.64, n.2, p.223-236, 1993.
- O'TOOLE, J.C., HATFIELD, J.L. Effect of wind on the crop water stress index derived by infrared thermometry. **Agronomy Journal**, v.75, n.5, p.811-817, 1983.
- PAZZETTI, G.A., OLIVA, M.A., RESENDE, M. Aplicação da termometria por infravermelho a irrigação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.): parâmetros fisiológicos. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.4, n.1, p.27-31, 1992.
- PEREIRA, A.R., VILLA NOVA, N.A., SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba, FEALQ, 1997, 183p.
- PEREIRA, L.S., PERRIER, A. ALLEN, R.G. ALVES, I. Evapotranspiration: concepts and future trends. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. p.45-51. March/April. 1999.
- PEREZ, P.J., CASTELLVI, F., IBAÑEZ, M., ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97, p.141-150, 1999.
- PETERSCHMITT, J.M., PERRIER, A. Evapotranspiration and canopy temperature of rice and groundnut in southeast coastal India. Crop coefficient approach and relationship between evapotranspiration and canopy temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.56, p.273-298, 1991.

- RANA, G., KATERJI, N., MASTRORILLI, M., EL MOUJABBER, M., BRISSON, N.
Validation of a model of actual evapotranspiration for water stressed soybeans, .
Agricultural and Forest Meteorology. v.86, p. 215-224, Sep 1997.
- SMITH, M., SEGEREN, A., SANTOS PEREIRA, L. *et al.* **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Roma, FAO. 1991. 45p.
- STEDUTO, P., CALIANDRO, A., RUBINO, P., et al. Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates in the Mediterranean Region. In: Camp, C.R., Sadler, E.J., Yoder, R.E. (Eds.), *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Proceedings of the International Conference*, San Antonio, TX, 3–6 November 1996. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, p.357–364.
- TODD, R.W., EVETT, S.R., HOWELL, T.A. The Bowen ratio-energy balance for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.335-348. 2000.
- UNLAND, H.E., HOUSER, P.R., SHUTTLEWORTH, W.J., YANG, Z.L. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.82, p.119–153, 1996.

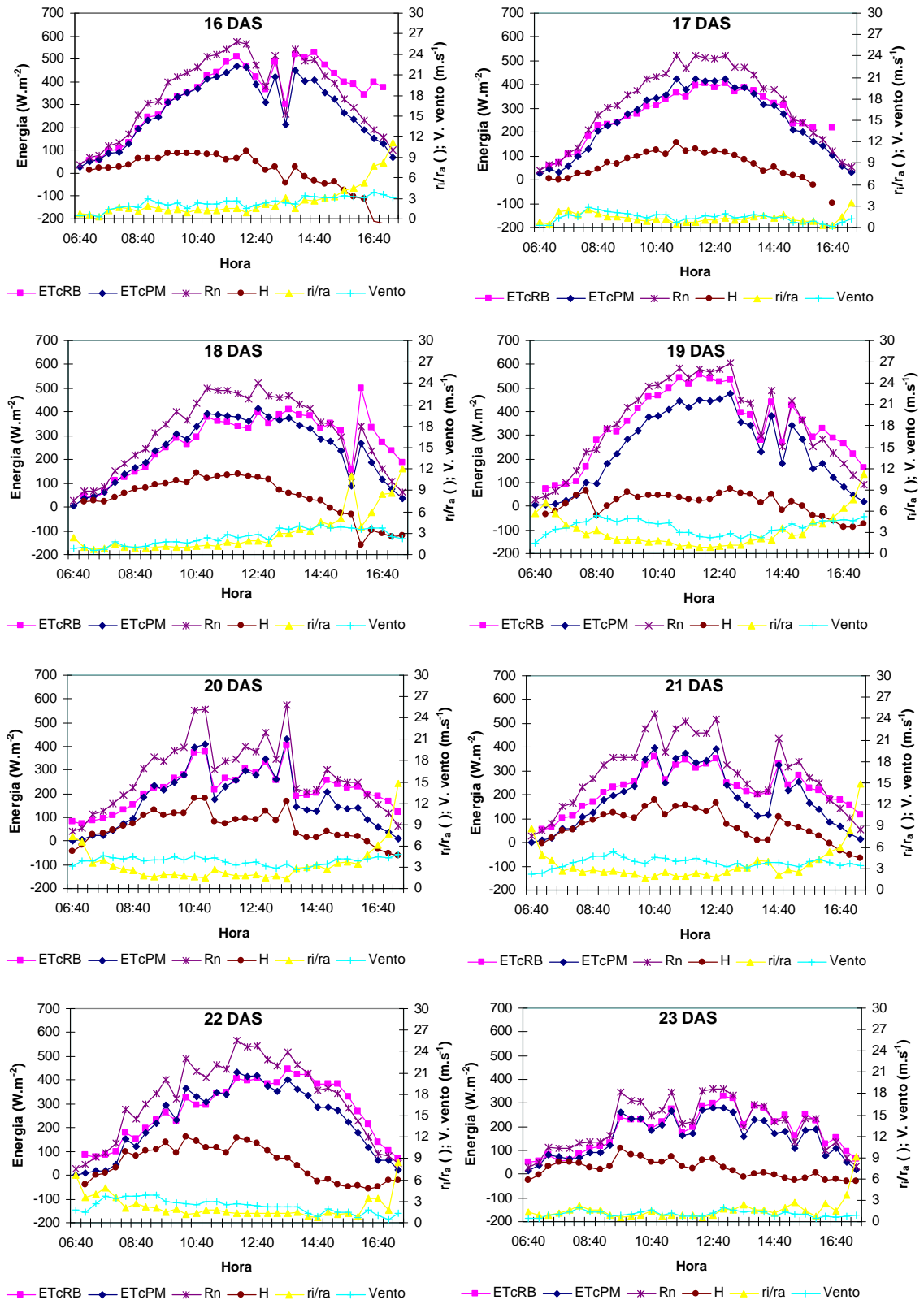
ANEXOS


```
File Edit View Insert Format Help
110,262,640,17.69,18.13,-.375,12.49,1.447,12.31,1.43
237,262,640,4.835,-25.43,-22.17,8.88,20.31,-.057,.426,101.4,18.23,12.41
110,262,700,18,18.68,.149,13.07,1.504,12.7,1.468
237,262,700,51.81,-25.02,-21.78,19.84,20.35,.041,.552,66.54,14.63,12.45
110,262,720,18.6,20.32,.205,13.83,1.58,13.5,1.546
237,262,720,91.3,-23.81,-20.56,28.9,20.55,.198,.364,51.04,12.58,12.52
110,262,740,19.69,22.28,.26,14.24,1.623,13.53,1.55
237,262,740,158.1,-21.39,-18.33,41.79,20.89,.34,1.333,66.75,8.38,12.63
110,262,800,21.01,23.64,.288,14.06,1.604,13.36,1.533
237,262,800,195.1,-17.61,-14.98,47.28,21.34,.451,1.636,73.1,11.3,12.81
110,262,820,22.35,24.68,.355,14.25,1.623,13.51,1.547
237,262,820,239.9,-12.71,-10.32,54.24,21.8,.457,1.8,72.2,13.67,12.91
110,262,840,23.74,26.01,.527,14.63,1.664,13.71,1.567
237,262,840,336,-7.28,-4.961,68.46,22.29,.492,1.741,57.09,19.27,13.02
110,262,900,25.18,27.12,.434,14.07,1.605,13.05,1.502
237,262,900,408.9,-1.441,1.019,77.5,22.88,.59,2.935,43.31,15.51,13.02
110,262,920,26.51,27.92,.461,13.81,1.578,12.65,1.463
237,262,920,425.7,4.424,7.71,78.6,23.47,.593,2.261,22.09,26.35,12.99
110,262,940,27.75,28.79,.64,14.21,1.619,12.79,1.476
237,262,940,529.3,9.45,14.24,92.9,24.16,.685,2.066,41.84,31,12.95
110,262,1000,28.93,29.69,.62,14.24,1.622,12.8,1.478
237,262,1000,572.3,14.67,20.9,97.4,24.91,.753,2.294,14.37,24.6,12.92
110,262,1020,29.97,30.25,.641,14.05,1.603,12.47,1.446
237,262,1020,579.9,20.63,28.11,97.5,25.58,.672,1.581,4.737,37.68,12.91
110,262,1040,30.95,30.94,.538,13.87,1.585,12.48,1.447
237,262,1040,616.1,26.23,34.68,101.3,26.28,.695,2.329,358.1,23.25,12.89
110,262,1100,31.77,31.48,.564,13.53,1.55,11.69,1.373
237,262,1100,651,31.64,40.44,105.9,26.88,.603,2.222,27.03,30.04,12.87
```

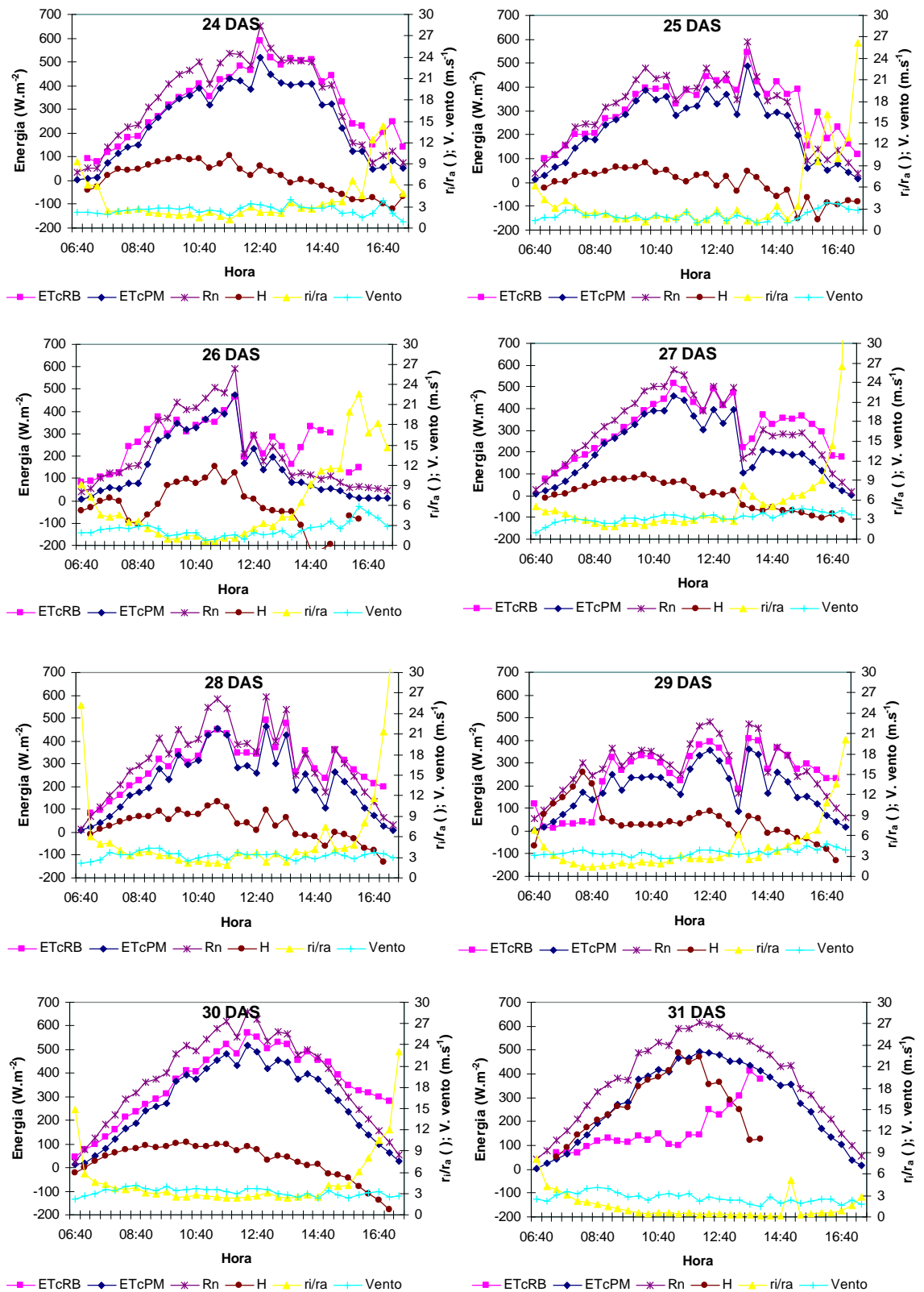
Anexo 1. Dados registrados pelo sistema Razão de Bowen, em seu formato original.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	110	262	640	17.69	18.13	-0.375	12.49	1.447	12.31	1.43			
2	237	262	640	4.835	-25.43	-22.17	8.88	20.31	-0.057	0.426	101.4	18.23	12.41
3	110	262	700	18	18.68	0.149	13.07	1.504	12.7	1.468			
4	237	262	700	51.81	-25.02	-21.78	19.84	20.35	0.041	0.552	66.54	14.63	12.45
5	110	262	720	18.6	20.32	0.205	13.83	1.58	13.5	1.546			
6	237	262	720	91.3	-23.81	-20.56	28.9	20.55	0.198	0.364	51.04	12.58	12.52
7	110	262	740	19.69	22.28	0.26	14.24	1.623	13.53	1.55			
8	237	262	740	158.1	-21.39	-18.33	41.79	20.89	0.34	1.333	66.75	8.38	12.63
9	110	262	800	21.01	23.64	0.288	14.06	1.604	13.36	1.533			
10	237	262	800	195.1	-17.61	-14.98	47.28	21.34	0.451	1.636	73.1	11.3	12.81
11	110	262	820	22.35	24.68	0.355	14.25	1.623	13.51	1.547			
12	237	262	820	239.9	-12.71	-10.32	54.24	21.8	0.457	1.8	72.2	13.67	12.91
13	110	262	840	23.74	26.01	0.527	14.63	1.664	13.71	1.567			
14	237	262	840	336	-7.28	-4.961	68.46	22.29	0.492	1.741	57.09	19.27	13.02
15	110	262	900	25.18	27.12	0.434	14.07	1.605	13.05	1.502			
16	237	262	900	408.9	-1.441	1.019	77.5	22.88	0.59	2.935	43.31	15.51	13.02
17	110	262	920	26.51	27.92	0.461	13.81	1.578	12.65	1.463			
18	237	262	920	425.7	4.424	7.71	78.6	23.47	0.593	2.261	22.09	26.35	12.99
19	110	262	940	27.75	28.79	0.64	14.21	1.619	12.79	1.476			
20	237	262	940	529.3	9.45	14.24	92.9	24.16	0.685	2.066	41.84	31	12.95
21	110	262	1000	28.93	29.69	0.62	14.24	1.622	12.8	1.478			
22	237	262	1000	572.3	14.67	20.9	97.4	24.91	0.753	2.294	14.37	24.6	12.92
23	110	262	1020	29.97	30.25	0.641	14.05	1.603	12.47	1.446			
24	237	262	1020	579.9	20.63	28.11	97.5	25.58	0.672	1.581	4.737	37.68	12.91
25	110	262	1040	30.95	30.94	0.538	13.87	1.585	12.48	1.447			
26	237	262	1040	616.1	26.23	34.68	101.3	26.28	0.695	2.329	358.1	23.25	12.89

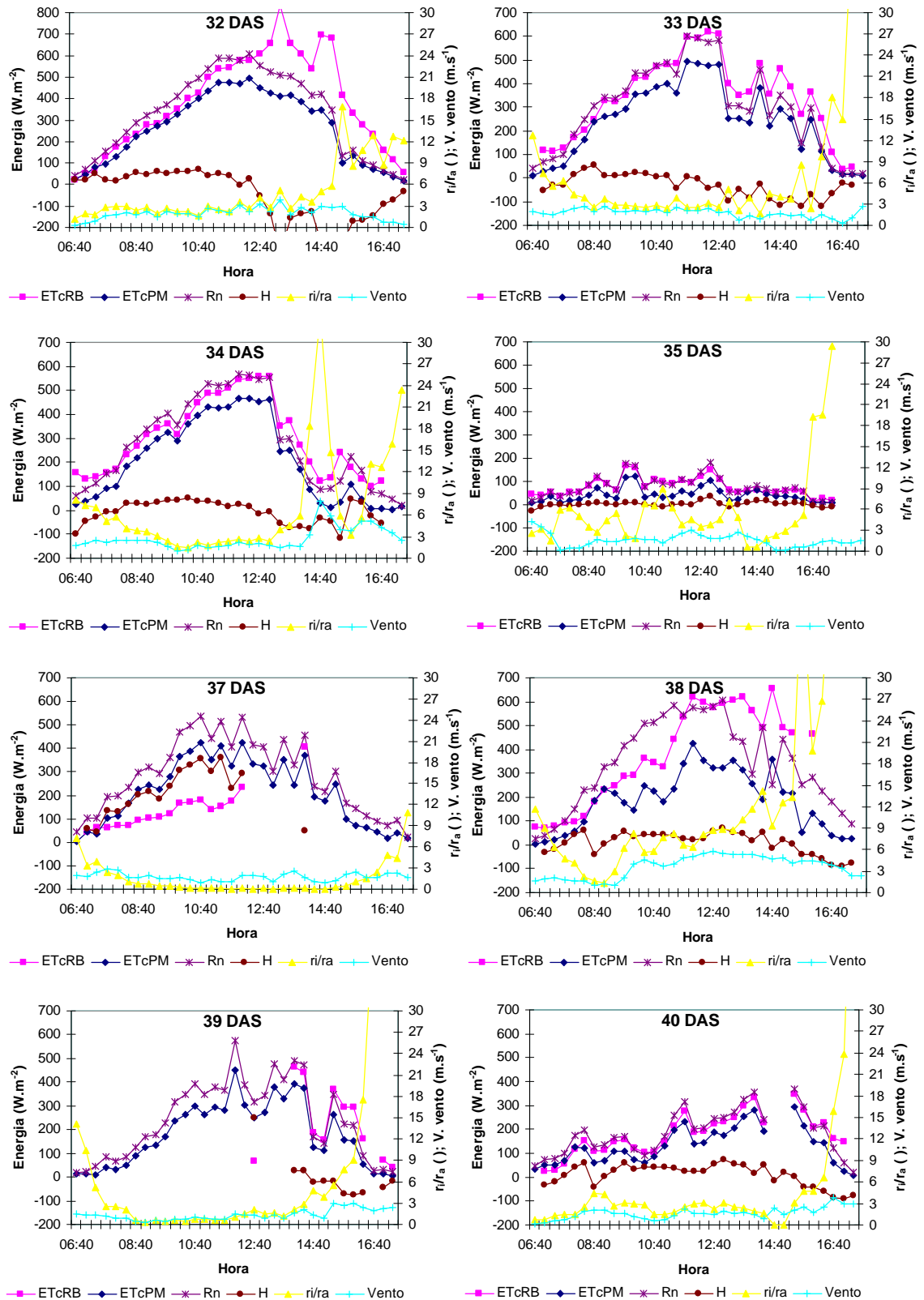
Anexo 2. Informações registradas pelo sistema Razão de Bowen, convertidas para a planilha eletrônica Excell.



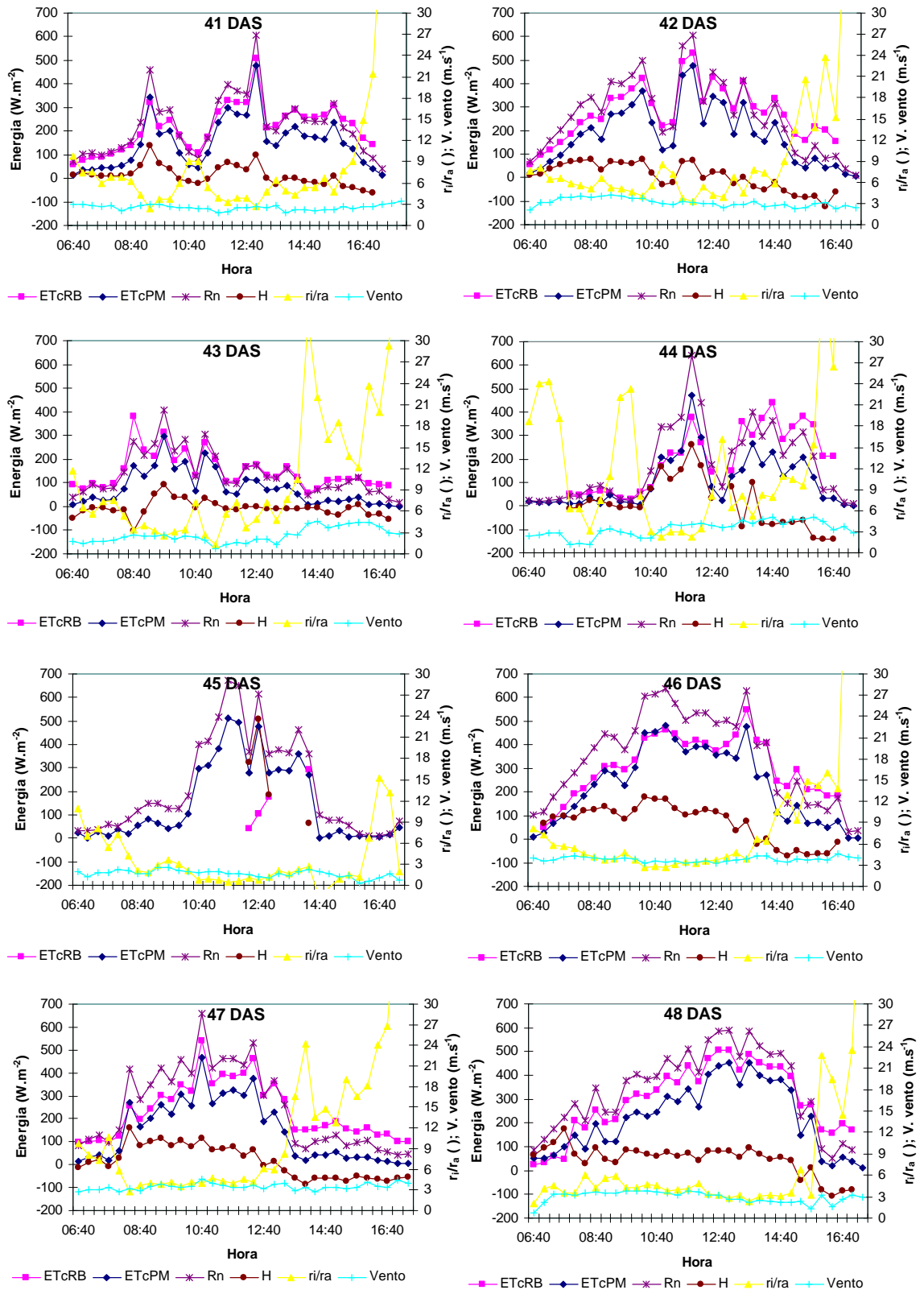
Anexo 3a. Variação diurna, para vários dias (dias após a semeadura-DAS) do feijoeiro, de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente-ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.



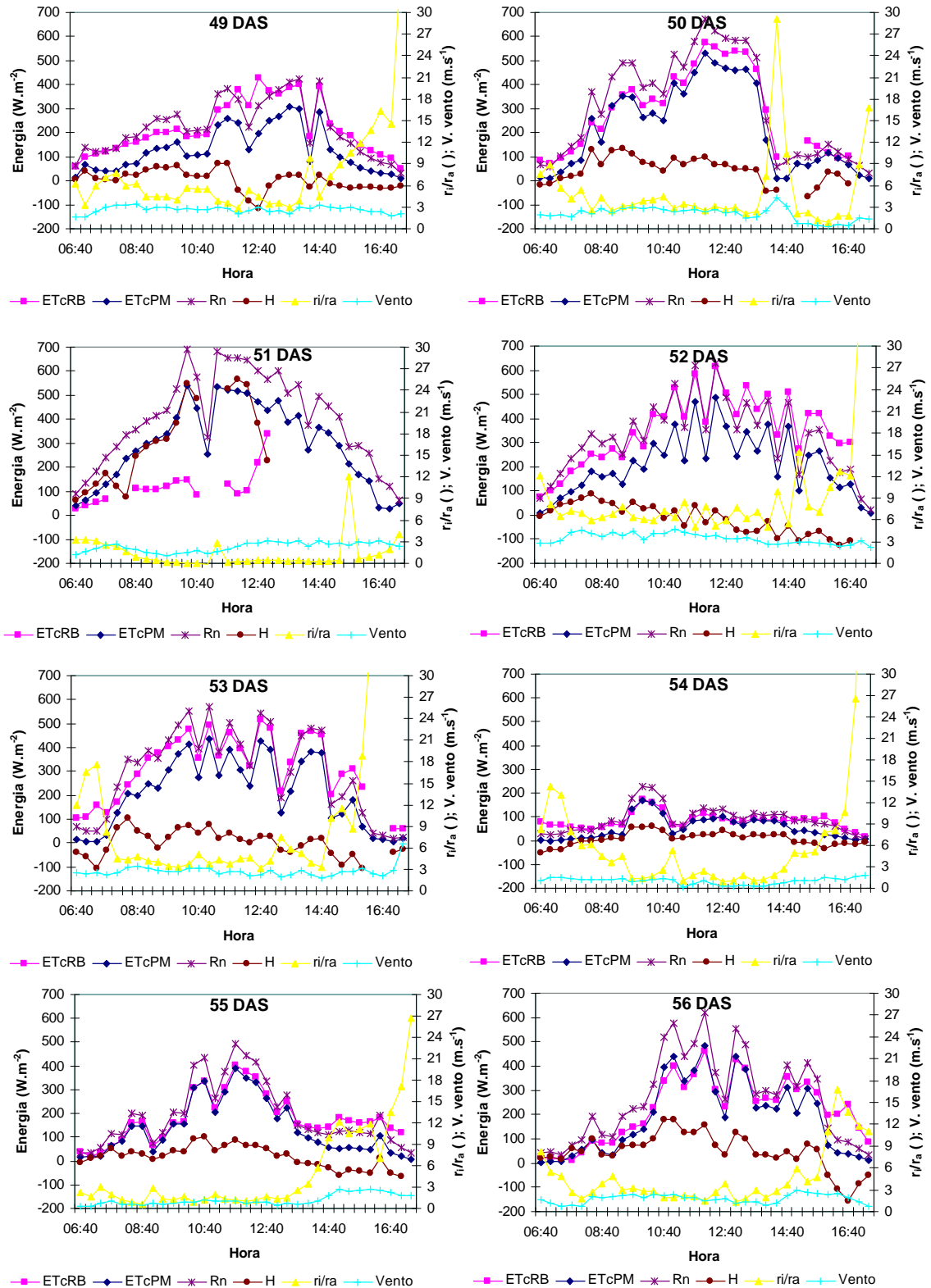
Anexo 3b. Variação diurna, para vários dias (dias após a semeadura-DAS) do feijoeiro, de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente-ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.



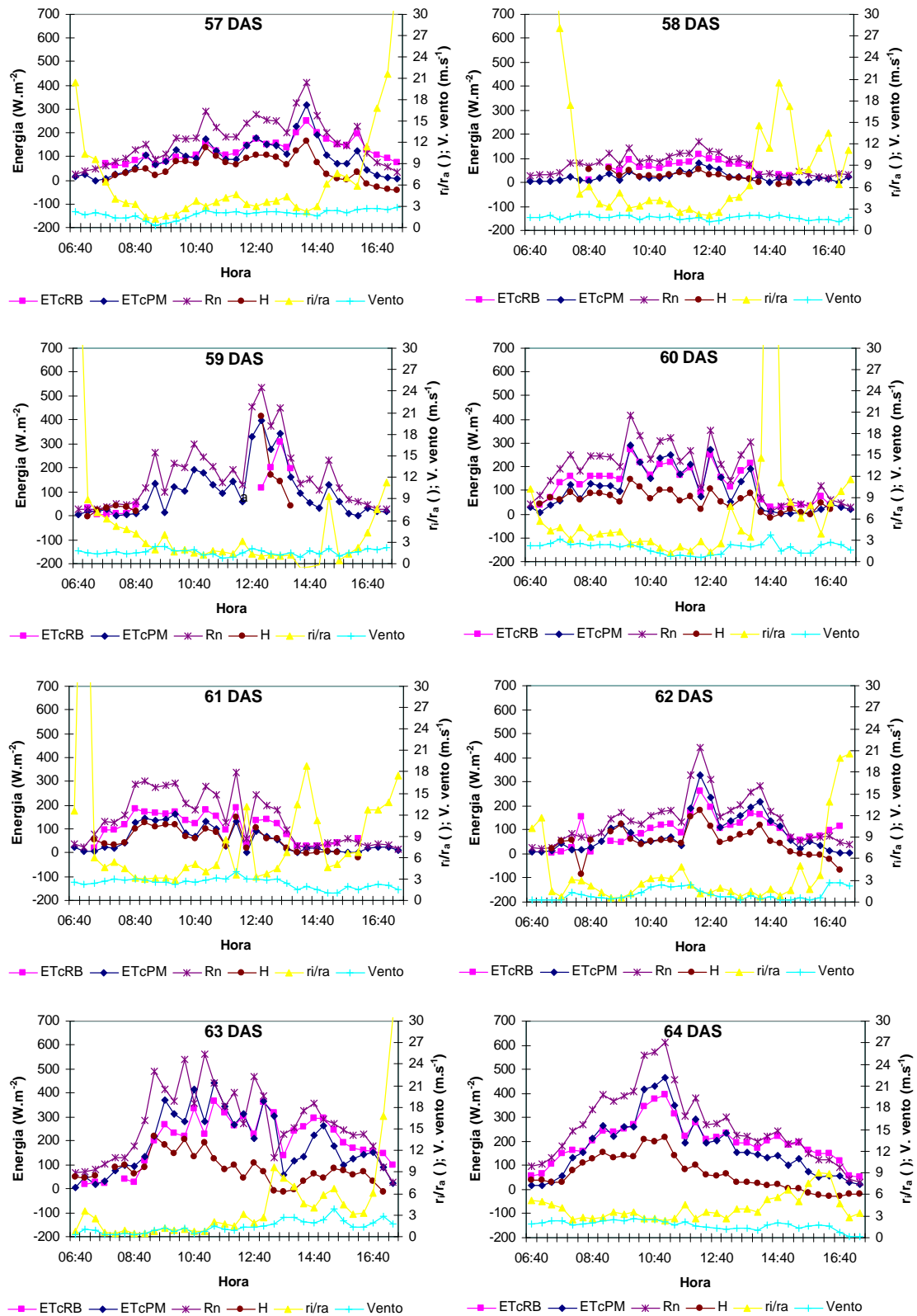
Anexo 3c. Variação diurna, para vários dias (dias após a semeadura-DAS) do feijoeiro, de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente-ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.



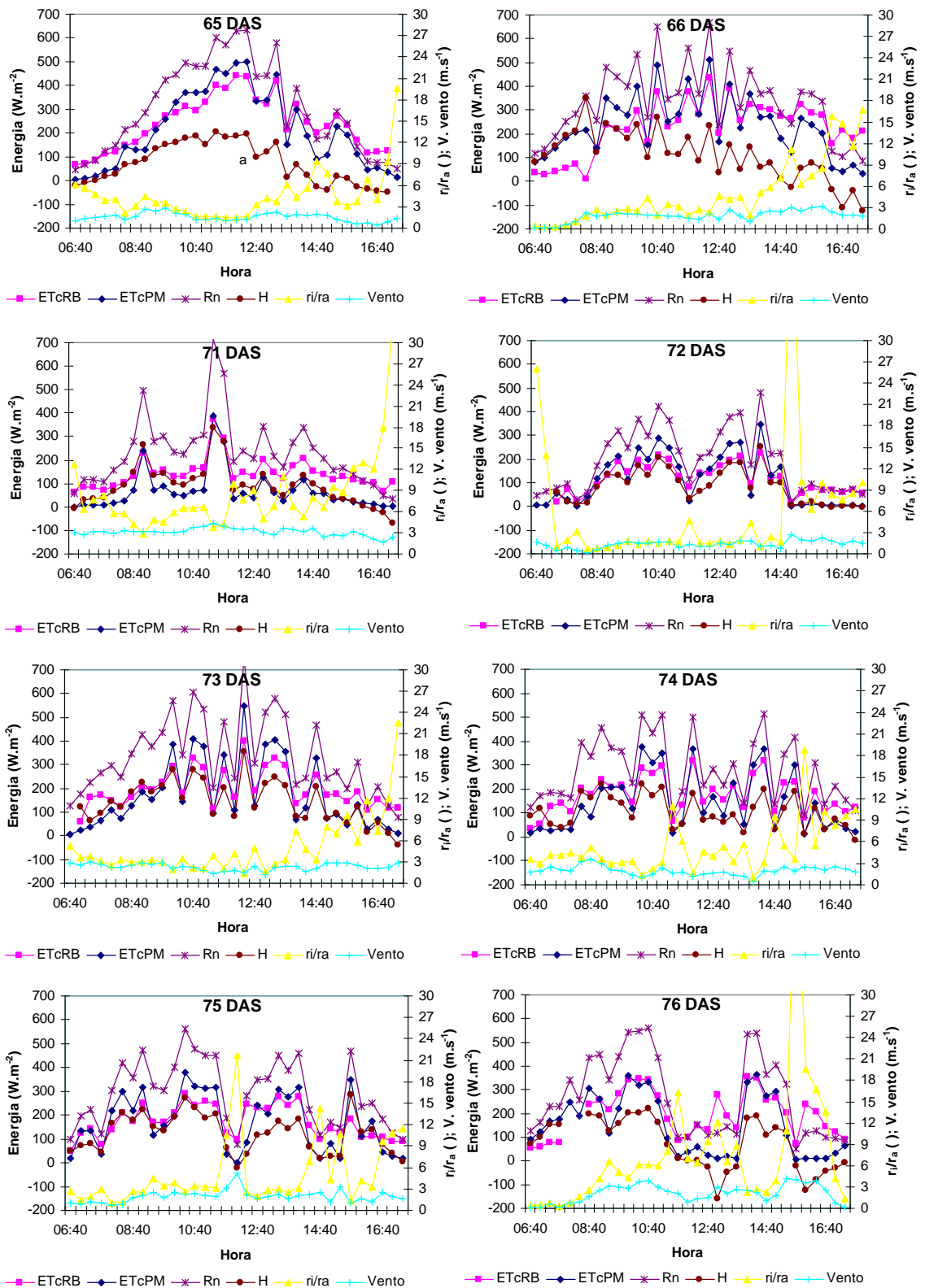
Anexo 3d. Variação diurna, para vários dias (dias após a semeadura-DAS) do feijoeiro, de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente-ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_t/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.



Anexo 3e. Variação diurna, para vários dias (dias após a semeadura-DAS) do feijoeiro, de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente-ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.



Anexo 3f. Variação diurna, para vários dias (dias após a semeadura-DAS) do feijoeiro, de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente-ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_r/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.



Anexo 3g. Variação diurna, para vários dias (dias após a semeadura-DAS) do feijoeiro, de alguns termos do balanço de energia (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente-ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_t/r_a). Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 1998.