

MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DA NECESSIDADE HÍDRICA DAS CULTURAS DO FEIJOEIRO E MILHO POR MEIO DO BALANÇO DE ENERGIA/ RAZÃO DE BOWEN¹

REINALDO L. GOMIDE²; MAURO K. KOBAYASHI³; ISA MARIA DE P. BORATTO⁴

¹ Trabalho financiado pelos projetos de Pesquisa Embrapa, SEP 12.1999.021-02 - Programa 12 Automação Agropecuária e FAPEMIG CAG- 1146/96, com apoio administrativo financeiro da FAPED.

² Eng. Agrônomo/ Ph.D. Eng. de Irrigação, Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, Fone (31) 3027-1328, gomide@cnpms.embrapa.br.

³ Eng. Agrônomo/ D.Sc. Eng. Agrícola, Professor da UNIMONTES, Janaúba, MG, mauro.koji@unimontes.br.

⁴ Geógrafa, Geoprocessamento, Bolsista FUNARBE/Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, isaborattp@yahoo.com.br.

1 RESUMO

O trabalho consistiu no monitoramento automático da necessidade hídrica das culturas do feijoeiro e milho por meio do balanço de energia (BE), associado à razão de Bowen (RB), para estabelecer critérios adequados de decisão do momento de aplicação de água de irrigação. Em vários dias e horários, os resultados indicaram que o fluxo de calor latente (L_e) das culturas, ultrapassaram o valor do saldo radiação (R_n) medido, devido a ocorrência de efeito de energia de advecção, para ventos acima de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$. Os valores baixos de razão de Bowen (β) ocorreram para as condições sem restrição hídrica das culturas e do solo, em que uma maior parte de R_n foi dissipada em forma de L_e . Os valores elevados de β foram verificados com o decorrer do tempo, após a aplicação de água de irrigação ou chuva, em ocasiões que se induziu o estresse hídrico nas culturas, com uma maior parte de R_n sendo usada no aquecimento do ar e dissipada em forma de calor sensível (H). A evapotranspiração das culturas (ET_c) determinada pela equação de Penman-Monteith (PM) correlacionou bem com a ET_c obtida pelas estações de RB, no entanto, subestimando os valores em magnitude, principalmente, na parte da tarde, no início e no meio dos ciclos fenológicos das culturas do feijoeiro e milho.

Palavras-Chave: evapotranspiração, programação de irrigação, parâmetros microclimáticos de superfície.

GOMIDE, R. L.; KOBAYASHI, M. K.; BORATTO, I. M. de P. AUTOMATIC BEANS AND MAIZE CROPS WATER REQUIREMENTS MONITORING BY MEANS OF ENERGY BALANCE/ BOWEN RATIO

2 SUMMARY

The work consisted in the automatic monitoring of beans and maize crops water requirements by means of energy balance (EB), associated to the Bowen ratio (BR), to establish adequate support decision criteria of the irrigation water application moment. In several days and times, the results

indicated that the latent heat flux (L_e) of crops, exceeded the value of the net radiation (R_n) measured, due to the occurrence of advection energy effect, for wind speed above 1.5 m.s^{-1} . The Low values of the Bowen ratio (β) occurred for the conditions without water restriction of the crops and soil, in which a majority portion of R_n was dissipated in the form of L_e . High values of β were verified with the passage of time, after the application of irrigation water or rainfall, on occasions that water stress was induced in the crops, with a majority portion of R_n being used to warm the air and to be dissipated in the form of sensible heat (H). The crops evapotranspiration (ET_c) determined by the Penman-Monteith equation (PM) correlated well with the ET_c obtained by BR stations, however, underestimating the value in magnitude, especially in the afternoon period at the beginning and middle of the phenological cycles of the bean and maize crops.

Keywords: evapotranspiration, irrigation scheduling, surface microclimatic parameters.

3 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos fatores responsáveis pela instabilidade da produção agrícola no Brasil, destaca-se a variabilidade do regime pluvial, com flutuações distintas (estações seca e chuvosa), oferecendo grande risco para a prática da agricultura. A irrigação é uma alternativa tecnológica para contornar este problema, visando assegurar a estabilidade e o aumento de produtividade e de qualidade dos produtos agrícolas. A sua adoção vem crescendo no país.

Para os usuários da agricultura irrigada no Brasil, a programação das irrigações é o tema mais importante e crítico no que diz respeito à otimização de uso de água e energia. Em algumas partes do país e do estado de Minas Gerais, principalmente o Norte e Noroeste do estado, os recursos hídricos são escassos, requerendo estudos criteriosos que levem ao disciplinamento do uso da água. Infelizmente, a maioria dos usuários da irrigação desconhece e não utiliza estratégias de programação da aplicação de água que possibilitem produtividades adequadas, com maior eficiência de uso de água. O emprego de técnicas de automação em sistemas agrícolas irrigados ainda é incipiente no Brasil. Critérios de decisão de quando aplicar a água de irrigação pode ser mais bem estudado por meio de avaliações e medições, diretas ou indiretas, da necessidade hídrica das culturas e do status de água das plantas. Dentre esses sistemas, a partição do saldo radiação de uma superfície coberta por vegetação, usando o método do balanço de energia (BE), associado à razão de Bowen (RB), é uma alternativa, que, no entanto, requer pessoal capacitado.

A medição da necessidade hídrica das culturas envolve parâmetros ligados às plantas e condições agrometeorológicas em nível de superfície. Uma vez que as plantas integram o sistema solo-água-atmosfera, tais parâmetros indicam com melhor precisão a condição hídrica das culturas, não apresentando as restrições relacionadas com os parâmetros envolvendo o balanço de água no solo. O conhecimento da necessidade hídrica das plantas é que vai estabelecer o momento mais adequado para aplicação da água e a quantidade de água requerida pelo sistema de irrigação, definindo a programação de irrigação.

A energia utilizada na transferência de vapor d'água das superfícies das folhas da vegetação e dos solos para a atmosfera provém da diferença, entre os fluxos de radiações incidentes e ascendentes, conhecido como saldo radiação (R_n), que é dissipado nos processos de

evaporação da água, de aquecimento do ar e do solo, assim como, em menor escala na fotossíntese (Brutsaert, 1982; Rosenberg et al., 1983; Monteith & Unsworth, 1990); sendo que essa última, consome apenas 2 a 3% do total do R_n , sendo importante apenas em medições muito precisas, durante curtos intervalos de tempo (Nielsen et al., 1989).

O objetivo principal do trabalho foi o monitoramento automático da necessidade hídrica das culturas do feijoeiro e milho por meio do BE, associado à RB, com um controle preciso, rápido e em tempo real, visando gerar resultados de requerimento de água das culturas, para estabelecer critérios de decisão do momento de aplicação de água de irrigação, assegurando um adequado suprimento de água às plantas e uma programação mais racional das irrigações, com aumento de eficiência no uso de água e de energia, melhoria de produtividade e aumento da margem de lucro dos produtores.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de campo foram conduzidos em uma mesma área experimental, de aproximadamente 1,5 ha, da Embrapa Milho e Sorgo, localizada em Sete Lagoas, MG, de coordenadas geográficas de 19° 27' 21" de latitude Sul, 44° 10' 22" de longitude Oeste e 731 m de altitude, onde foram plantadas as culturas do feijoeiro (inverno) e milho (verão), nos anos de 2005/2006, com semeaduras realizadas em abril/maio e outubro/novembro, respectivamente. Para as culturas de feijão e milho, utilizaram-se 0,5 m e 0,9 m de espaçamento entre fileiras de plantio, com 12 a 14 e 6 a 7 sementes por metro de fileira, resultando um estande final de cerca de 240.000 e 60.000 plantas/ha, respectivamente. As melhores recomendações de tratamentos culturais das duas culturas foram usadas e as adubações de plantio foram realizadas com base nas análises de fertilidade do solo. As adubações de cobertura e o controle de pragas e doenças foram realizados, sempre que necessário, com a aplicação de N, na forma de uréia, e de agroquímicos, respectivamente, a fim de manter as plantas saudáveis.

A estimativa de reposição do requerimento de água das duas culturas foi realizada com a determinação da evapotranspiração de referência (ET_o), calculada por meio da equação modificada de Penman-Monteith (PM) e dos respectivos coeficientes de culturas (K_c) (Allen et al., 1998), a partir dos dados climáticos adquiridos de uma estação climática automática, instalada ao lado dos ensaios.

A irrigação foi realizada por meio de um sistema de aspersão convencional, com espaçamento entre aspersores de 12 m x 18 m. O cálculo da lâmina d'água a ser aplicada em cada irrigação, para evitar estresse hídrico das plantas, foi realizado com base em $ET_c = ET_o K_c$ ($ET_c - PM$) e na eficiência do sistema de irrigação, assumida como sendo de 85 %.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico argiloso. As características físico-hídricas e químicas do solo foram determinadas no laboratório de física e química de solos da Embrapa Milho e Sorgo.

O balanço de energia das superfícies cobertas com as culturas do milho e feijão foi obtido a partir do monitoramento automático dos termos da seguinte equação:

$$R_n = G + H + L_e \quad (1)$$

onde, R_n é o saldo de radiação para a respectiva superfície, que é dissipado por meio de: G = fluxo de calor no solo, H = fluxo de calor sensível e L_e = fluxo de calor latente. Geralmente, a convenção de sinal utilizada é R_n positiva do ar para a superfície e G , H , e L_e positivos da superfície para o ar. Gradientes finitos de H e L_e foram medidos e um coeficiente efetivo de transporte turbulento (“eddy diffusivity”) foi considerado na determinação do gradiente vertical, a saber:

$$L_e = \frac{\lambda \rho \varepsilon K_v (e_1 - e_2)}{p (z_1 - z_2)} \quad (2)$$

$$H = \rho c_p K_H \frac{(T_1 - T_2)}{(z_1 - z_2)} \quad (3)$$

onde, ρ é a densidade de vapor d’água, ρ é a densidade do ar seco, c_p é o calor específico do ar seco, T é a temperatura do ar, z é a altura vertical, K_v e K_H são os coeficientes de transporte turbulento (eddy diffusivities) de calor latente e de calor sensível, respectivamente. Os coeficientes K_v e K_H são funções da altura e das condições de escoamento. Os gradientes de vapor d’água e temperatura refletem médias temporais e espaciais.

O transporte atmosférico de L_e e H é feito em geral por meio de turbilhões que se deslocam aleatoriamente acima da superfície natural rugosa, numa tendência de homogeneização de L_e e H com a altura (z). Daí faz sentido supor que tanto L_e como H sejam igualmente transportados pelo mesmo turbilhão e que os coeficientes K_v e K_H podem ser considerados iguais. A razão de H para L_e , conhecida como razão de Bowen (RB), β , foi usada para a partição da energia disponível na superfície em fluxo de calor sensível e latente (Bowen, 1926) da seguinte forma:

$$\beta = \frac{H}{L_e} = \frac{p c_p (T_1 - T_2)}{\lambda \varepsilon (e_1 - e_2)} \quad \text{onde, } \frac{p c_p}{\lambda \varepsilon} = \gamma = \text{constante psicrométrica.} \quad (4)$$

Substituindo $L_e \beta$ por H na Equação 1 e resolvendo para L_e resulta:

$$L_e = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (5)$$

A evapotranspiração atual (ETc) ou real (ETr) das culturas foi obtida do termo L_e . Deste modo, o trabalho requereu registros de R_n , G e de temperaturas do ar (T_1 e T_2) e pressão de vapor d’água do ar (e_1 e e_2), a duas alturas acima do dossel das plantas (z_1 e z_2), para estimar H e L_e .

A Figura 1 mostra as estações do sistema de BE/RB, utilizadas na medição automática de gradientes verticais de L_e , H e de G por meio de sensores de concentração de vapor d’água do ar, temperatura do ar, temperatura do solo e placas de fluxo de G , saldo radiação, velocidade e direção do vento, com abrigos de proteção micro-meteorológicos e painéis solar, instalados sobre o dossel vegetativo das culturas de feijão e milho, para os registros e cálculos de ETc. Com

relação às alturas, para se obter os respectivos gradientes verticais de L_e e H , realizaram-se dois pontos de amostragens nas medições, um logo acima do dossel das culturas ($\sim 0,1$ m) e outro distanciado verticalmente de 1,1m do primeiro. O “datalogger” e o sistema automático controlador do fluxo e da aspiração de ar e também do sensor de concentração de vapor d’água do ar foram protegidos por um abrigo micro-meteorológico. Os dois braços dos sensores de temperatura e pressão de vapor d’água do ar, o abrigo de proteção do datalogger, bateria, sistema automático controlador do fluxo de ar e o painel solar foram todos montados em um único tripé. Um braço transversal com os sensores para medir a velocidade e a direção do vento foi montado no topo do tubo de subida do tripé, a uma altura de 3,5m (Figura 1).

A concentração de vapor do ar foi monitorada por meio de um higrômetro de ponto de orvalho “cooled mirror” (General Eastern Corp., modelo DEW-10), utilizando uma técnica desenvolvida para estudos de gradiente em múltiplo níveis (Lemon, 1960). Amostras de ar coletadas de duas alturas foram direcionadas ao “cooled mirror” após passarem através de um processo de mistura de volumes. Uma simples bomba de baixa potência foi responsável pela coleta do ar por aspiração (Figura 1). Para ajustar e fazer coincidir as taxas de fluxo de ar, rotômetros manualmente ajustáveis foram usados nos dois braços de amostragens. Uma taxa de fluxo de ar de $0,4 \text{ L min}^{-1}$ com câmaras de mistura de 2 L forneceu uma constante de tempo de 5 min. Um “datalogger” foi usado para medir todos os sensores e controlar a abertura e o fechamento das chaves eletrônicas das válvulas reguladoras de fluxo de ar através do “cooled mirror”. A resolução de medição da temperatura do ponto de orvalho foi de $\pm 0,003 \text{ }^\circ\text{C}$ para uma faixa de temperatura de $\pm 35 \text{ }^\circ\text{C}$. O higrômetro de ponto de orvalho (Dew-10) apresentou uma estabilidade de aproximadamente $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$, fornecendo uma resolução para pressão de vapor melhor do que $\pm 0,01 \text{ KPa}$, para uma ampla condição de variação de meio ambiente.

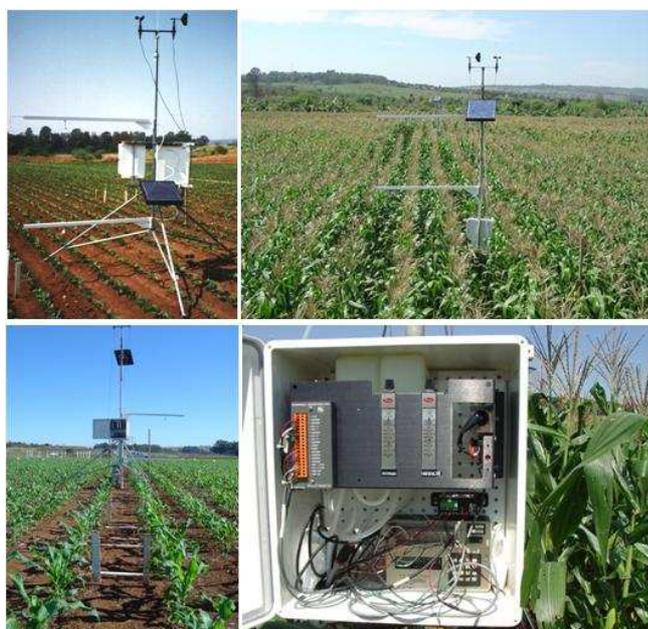


Figura 1. Estações do sistema de balanço de energia/ razão de Bowen (BE/RB), utilizadas na medição automática de fluxos de calor latente (L_e), sensível (H) e de solo (G), instaladas nas culturas de feijão e milho, com os seus respectivos sensores, dataloggers,

abrigos de proteção e painéis solares (Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 2005/2006).

A cada intervalo de 2 min o ar que estava sendo puxado através do “cooled mirror” foi 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 foi 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 foi medida a cada segundo e a pressão de vapor foi calculada pelo “datalogger” usando a equação descrita por Lowe (1976). A média de pressão de vapor foi calculada a cada 20 min para cada altura (Figura 1).

A temperatura do ar foi medida a duas alturas, em posições bem próximas das amostragens do ar, com termopares de cromo-constantan (Figura 1). 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 “offset” inerente aos sensores. A resolução do “datalogger” foi de 0,006 °C com um ruído de 0,1 μ V rms.

O saldo de radiação (R_n) foi medido com um saldo radiômetro, instalado a 1,5 m acima do dossel da cultura. A temperatura e o fluxo de calor no solo (G) foram medidos com termopares de cromo-constantan. A temperatura média do solo foi proveniente de quatro termopares montados juntos em paralelo, de tal forma que de dois em dois forneceram a temperatura média da camada de solo acima dos dois sensores de fluxo de calor no solo (G). O local para instalação desses sensores foi representativo da área em estudo, onde se procedeu a abertura de uma pequena trincheira com o auxílio de uma pá, tendo-se o cuidado de manter o solo retirado intacto nas imediações. Os sensores foram instalados, com o auxílio de uma faca, em uma das paredes da trincheira, onde o solo não foi deformado. Desta forma, mais tarde, a trincheira do local de instalação teve o seu solo repostado, procurando sempre alterar o mínimo a estrutura natural do solo. As profundidades de colocação dos sensores de temperatura do solo e de fluxo de calor no solo, em relação à superfície do solo, foram de 2 e 6 cm e 8 cm, respectivamente, e o espaçamento entre os sensores foi de 1 m. As médias das leituras de R_n e G foram obtidas no mesmo período de tempo que as médias de diferenças de temperatura do ar e pressão de vapor do ar (20 min).

Para realizar a aquisição automática dos sinais digitais de todos os sensores das estações de BE/RB, desenvolveu-se um programa com as instruções do EDLOG do PC208W, versão 3.3 (Campbell Scientific, 1997), que foi transferido aos “dataloggers”, para a aquisição automática de dados, em tempo real e execução das bases de dados armazenados e o seu pré-processamento, para posterior exportação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinar a quantidade de água necessária em uma irrigação (ou seja, necessidade hídrica ou evapotranspiração das culturas- ETc), de forma precisa e acurada, o contínuo solo-planta-atmosfera (S-P-A) deve ser considerado sempre um sistema dinâmico, fisicamente integrado, onde os processos de transporte ocorrem interativamente. Neste sistema, os fatores meteorológicos de superfície controlam a força de demanda hídrica, atuando como “dreno”, os de solo controlam a fonte de água e os ligados às plantas controlam a transmissão de água da fonte

para o dreno. Daí, o sistema automático do BE, associado à RB, baseado em registros, em tempo real, de parâmetros ligados ao contínuo S-P-A, pode ser usado para determinar a necessidade hídrica das culturas e estabelecer estratégias de manejo de irrigação, visando otimizar e racionalizar a utilização da água e da energia de sistemas de produção agrícolas irrigados.

Os resultados de variação de microclima, no período de dezembro de 2005 a maio de 2006, com base nos dados registrados da estação climática automática, localizada próximo a área experimental, indicaram uma variação na amplitude térmica do ar no período (diferença entre as temperaturas do ar máxima e mínima) de 5° a 14° C. Os valores registrados de temperatura do ar mínima (T_{mín}), média (T_{méd}) e máxima (T_{máx}) variaram nesse período de aproximadamente 11 a 21°C, 19 a 26° C e 22 a 34° C, respectivamente. Os dias 22 de abril e 5 de maio de 2006 apresentaram as mais baixas temperaturas do ar, 11,5 e 13° C, respectivamente. As maiores temperaturas (T_{max}) foram na faixa de 30 a 34 °C e ocorreram nos meses de Janeiro e Fevereiro (verão) de 2006. No período, o menor valor de umidade relativa do ar (UR_{min}) foi de 35 %, sendo que os valores médios (UR_{med}) variaram de 68 a 100 %, sendo o último valor devido a situação de dias com chuvas. A estação chuvosa (Dezembro de 2005 e Janeiro a Março de 2006) compreendeu período que foram registrados valores de precipitação de 50 a 118 mm. A precipitação acumulada mensal foi de 396, 126, 108 e 414 mm para os meses de Dezembro de 2005 e Janeiro a Março de 2006, respectivamente.

As variações diárias da ETo, em mm/dia, determinada pelo método de Penman-Monteith, e velocidade média do vento (VV méd), em m/s, encontram-se na Figura 2. Os maiores valores diários de ETo (demanda hídrica da cultura) foram na faixa de 4,8 a 6,6 mm/dia e os menores valores diários foram da ordem de 1,2 a 2,8 mm/dia. A variação diária da velocidade média do vento (VV méd), em m/s, ficou na faixa de 0,6 a 2,4 m/s.

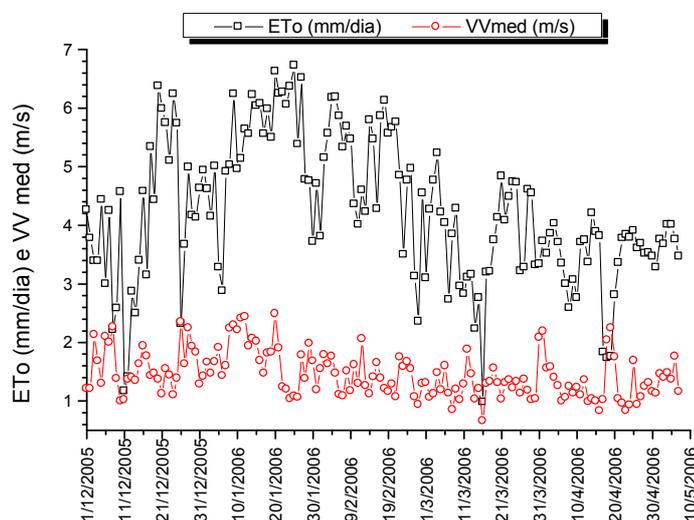


Figura 2. Variação diária da evapotranspiração de referência (ETo), em mm/dia, e velocidade média do vento (VV med), em m/s, para o período de dezembro de 2005 a maio de 2006 na estação climática automática localizada próximo a área experimental (Sete Lagoas, MG, Embrapa Milho e Sorgo).

Os tipos de dados registrados automaticamente pelas estações BE/RB encontram-se ilustrados na Tabela 1. Esses dados foram coletados por meio de interface direta de um notebook com o “datalogger” no campo, para posterior importação, sem os códigos de gravação do arquivo original (*.dat), em uma planilha eletrônica Excell.

Tabela 1. Dados registrados pelo sistema Razão de Bowen a intervalos de 20 minutos no campo, coletados por meio de interface direta de um notebook com o datalogger e importados/ processados posteriormente em uma planilha eletrônica Excell. Identificação das colunas: dia Juliano do ano (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).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
	Dia	Hora	T. Painel °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.	
2																				
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	

A Tabela 2 ilustra os resultados dos dados processados da Tabela 1 na planilha Excell para os cálculos dos valores de β e de evapotranspiração real da cultura (ET_r), pelo método BE/RB, seguindo a recomendação proposta pelo fabricante Campbell Scientific (1997). Posteriormente, foi realizada uma filtragem destes dados, utilizando no cálculo da ET_r somente os dados coletados durante o dia, entre os horários de 6h 40min e 17h 20min.

As estações de BE/RB forneceram o fluxo de calor latente (L_e) ou $ET_c = ETr$ na forma de energia ($W.m^{-2}$), em intervalos de 20 minutos. Para converter este valor de L_e em lâmina de irrigação (mm), foi utilizada a seguinte equação:

$$ETr_{mm} = \frac{ET_c}{\lambda} \cdot f \quad (6)$$

em que: $f = 0,0012$ é o fator de conversão de energia em lâmina de irrigação ($MJ.s^{-1}.W^{-1}$); λ é calor latente de vaporização da água ($2,45 MJ.kg^{-1}$). A ETr diária da cultura foi determinada com a acumulação dos valores de L_e ou ETr coletados durante o dia. A lâmina de irrigação a ser aplicada no regime hídrico sem estresse hídrico foi obtida acumulando as ETr 's diárias entre as irrigações subseqüentes.

Tabela 2. Dados processados na planilha Excell para os cálculos dos valores de Razão de Bowen- β e de evapotranspiração real da cultura- ETr (L_e), pelo método BE/RB, seguindo a recomendação proposta pelo fabricante (Campbell Scientific, 1997). Identificação das colunas: dia Juliano do ano (A), horário de gravação (B), diferença entre a temperatura do braço inferior e superior- dT (C), pressão parcial de vapor do braço inferior- P.V. Inf. (D), pressão parcial de vapor do braço superior- P.V. Sup. (E), saldo de radiação- R_n (F), fluxo de calor no solo da placa 1- G1 (G), fluxo de calor no solo da placa 2- G2 (H), diferença da temperatura do solo em relação à medição anterior- dTs (I), Razão de Bowen- β (K), calor armazenado pelo solo- S (L), fluxo de calor na superfície do solo- G (M), fluxo de calor latente- L_e (N), que é a energia usada na ETr .

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	Dia	Hora	dT (°C)	P.V. Inf kPa	P.V. Sup. kPa	R_n ($W.m^{-2}$)	G1 ($W.m^{-2}$)	G2 ($W.m^{-2}$)	dTs (°C)		β	S ($W.m^{-2}$)	G ($W.m^{-2}$)	L_e ($W.m^{-2}$)
2														
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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

Em vários dias e horários de medição das estações BE/RB, verificou-se que o fluxo de L_e registrado ultrapassou o valor do R_n medido, indicando a possibilidade de ter havido efeito de energia de advecção de áreas adjacentes às áreas experimentais. Pelo fato da contribuição da energia advectiva não ter sido medida diretamente, foi utilizada a razão r_i/r_a da Equação 7, para indicar o efeito de contribuição de energia advectiva de áreas adjacentes à área experimental (Todd et al., 2000).

$$\frac{r_i}{r_a} = \frac{\rho_a c_p DPV (R_n - G)^{-1}}{\left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2 (k^2 u)^{-1}} \quad (7)$$

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.

A variação diurna de alguns termos do BE/RB, tais como R_n , H e L_e (ETr ou ETcRB) e, também, da ETc calculada pela equação de PM (ETcPM), velocidade do vento (Vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a) são mostrados nas Figuras 3 e 4, para as culturas do feijoeiro (estádio V_3 , 1ª. folha trifoliada) e do milho (estádio V_8 , vegetativo com 8 folhas), respectivamente.

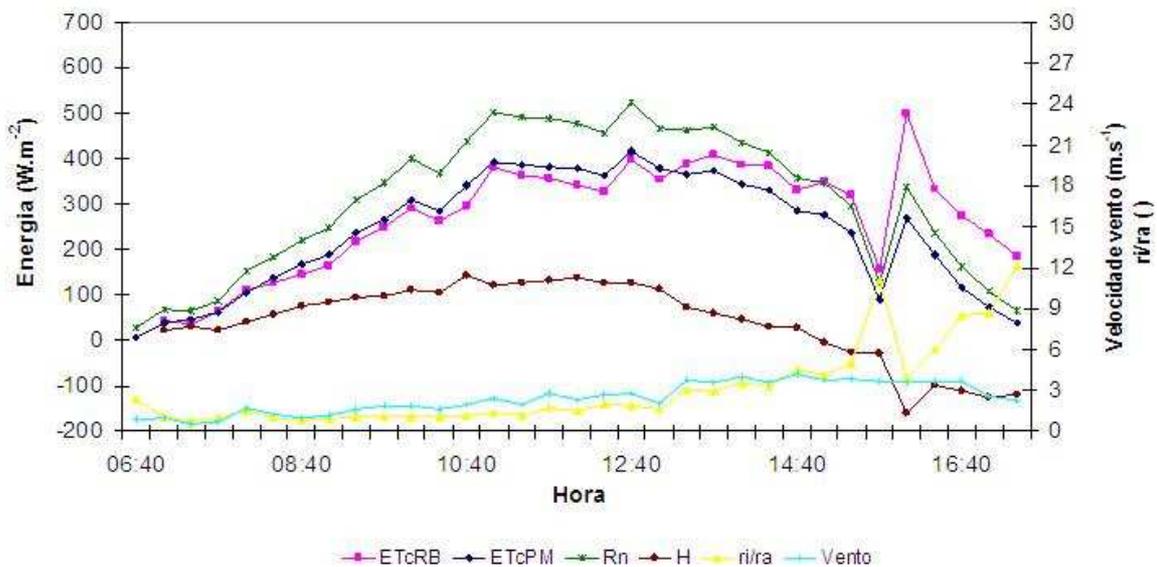


Figura 3. Variação diurna de alguns termos do balanço de energia/ razão de Bowen (saldo radiação- R_n , fluxo de calor sensível- H , fluxo de calor latente ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (Vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a) no estádio V_3 da cultura do feijoeiro (Sete Lagoas, MG, Embrapa Milho e Sorgo, 2005/2006).

Verifica-se na Figura 3 que 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 áreas adjacentes externas à área experimental, 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 (Equação 7). Já na Figura 4, observa-se que houve uma diferença entre as curvas ETcPM e ETcBR durante todo o dia, quando comparada com a Figura 3, 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.

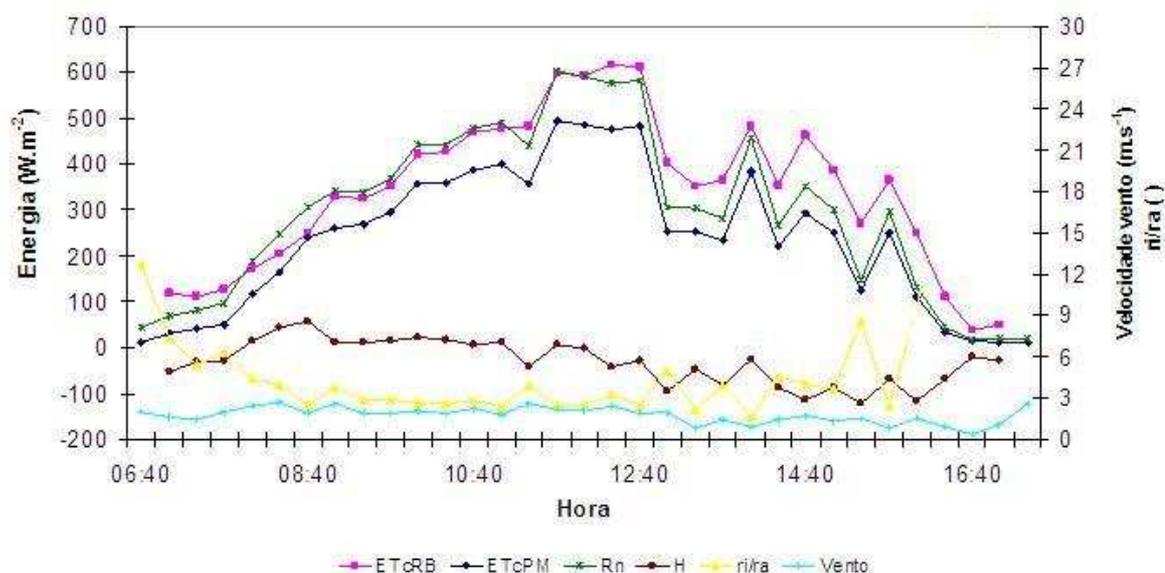


Figura 4. Variação diurna de alguns termos do balanço de energia/ razão de Bowen (saldo radiação-Rn, fluxo de calor sensível-H, fluxo de calor latente ETcRB) e da ETc calculada pela equação de Penman-Monteith (ETcPM), velocidade do vento (Vento) e a razão resistência climática/resistência aerodinâmica (r_i/r_a) no estádio V₈ da cultura do milho (Sete Lagoas, MG, Embrapa Milho e Sorgo, 2005/2006).

De modo geral, 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 BE/RB estava instalado recebeu interferência de massa de ar mais quente e seca de áreas adjacentes.

Analisando, conjuntamente, todos os dados obtidos pelo sistema BE/RB, nota-se que, provavelmente, há efeito de advecção na área experimental para intensidade de velocidade de vento acima de 1,5 m.s⁻¹. Este efeito do vento foi aumentado porque o sentido predominante do vento, aproximadamente 60% do tempo, foi o sentido NE→SO e L→O, que correspondeu à direção da área experimental com as menores bordaduras (107,14 m) em relação ao posicionamento das estações do sistema BE/RB, uma vez que essa área foi irregular, com dimensões de 107,14 m x 140,00 m (15.000,00 m² ou 1,5 ha).

A sensibilidade de β foi diretamente relacionada aos gradientes de temperatura e de pressão de vapor medidos (Equação 4). Isso significa que um erro de 1 % nas medições resulta em 1 % de erro em β . Os fluxos (H e L_e) calculados aproximaram do valor infinito quando o valor de β aproximou de -1. Essa situação geralmente ocorreu somente durante a noite quando houve pouca energia disponível ($R_n - G$). Sempre que os valores de β estiveram muito próximos de -1, isto é, $-1,25 < \beta < -0,75$, os valores de H e L_e foram considerados negligíveis e não foram calculados.

As condições hídricas da superfície evaporante é que definiu os valores de β . Após uma aplicação de água, irrigação ou chuva, essa superfície manteve-se bem umedecida e uma maior parte de R_n foi usada em L_e , resultando em valores baixos de β . Caso contrário, com o decorrer do tempo após a aplicação de água, em uma condição do ciclo da cultura que se induziu o estresse hídrico, a superfície com vegetação apresentou restrição hídrica e uma maior parte de R_n foi utilizada no aquecimento do ar (H), fornecendo valores elevados de β .

De um modo geral, os resultados permitiram concluir que no início e no meio dos ciclos fenológicos das culturas, os valores calculados pela equação PM subestimaram a ET_c quando comparados com os valores obtidos pelo sistema RB, principalmente na parte da tarde. Em vários horários de medição de diferentes dias, o fluxo de L_e obtido pelas estações de RB ultrapassou o valor do R_n , indicando a possibilidade de ter havido efeito de advecção. Devido a isso, os valores de ET_c calculados com a equação de PM foram subestimados. A equação que relaciona a ET_c determinada por PM com a obtida por RB se manteve praticamente paralela à reta 1:1 (Figura 5), com uma diferença constante de 45 W.m^{-2} , provavelmente devido à contribuição de energia advectiva proveniente de áreas externas. No geral, os resultados permitiram concluir que a ET_c PM foi subestimada quando comparada com a ET_c RB.

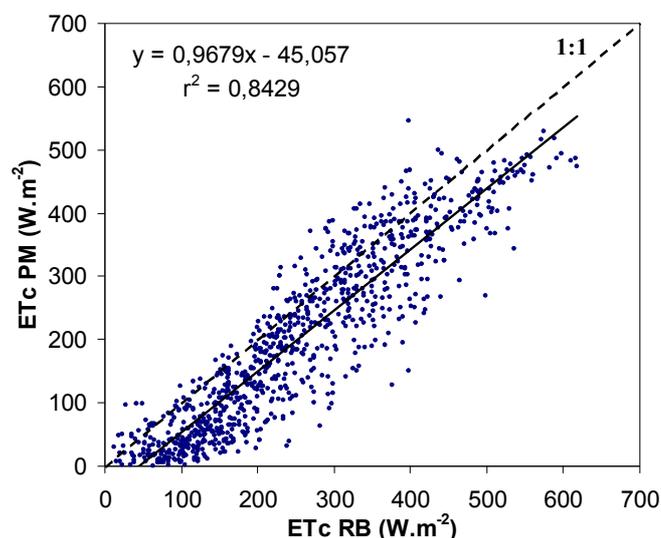


Figura 5. Relação entre a evapotranspiração das culturas calculada pela equação de Penman-Monteith (ET_c PM) e medida pela razão de Bowen (ET_c RB) (Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 2005/2006).

6 CONCLUSÕES

O fluxo de calor latente (L_e) das culturas do feijoeiro e milho, obtidas por meio do BE/RB, registrado ultrapassou o valor do R_n medido, em vários dias e horários de medições das estações BE/RB, indicando a ocorrência de efeito de energia de advecção de áreas adjacentes às áreas cultivadas, principalmente para valores da razão r_i/r_a maior ou igual a 2 e intensidades de velocidade de vento acima de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$, correspondente a direção da área experimental com as menores bordaduras.

Os valores de razão de Bowen (β) foram definidos pelas condições hídricas da superfície evaporante. Os valores baixos de β ocorreram quando a necessidade hídrica das culturas do feijoeiro e milho mantiveram-se próximo à máxima ou potencial, solo com superfície vegetativa bem umedecidos, ocasiões em que uma maior parte de R_n foi dissipada em forma de L_e . Os valores elevados de β foram verificados com o decorrer do tempo, após a aplicação de água de irrigação ou chuva, em uma determinada condição do ciclo da cultura, que se induziu o estresse hídrico, a superfície com vegetação apresentou restrição hídrica e, nessas situações, uma maior parte de R_n foi usada no aquecimento do ar e dissipado em forma de H.

No início e no meio dos ciclos fenológicos das culturas do feijoeiro e milho, os valores de ET_c calculados pela equação PM subestimaram a ET_c , quando comparados com os valores obtidos pelo sistema RB, principalmente na parte da tarde.

A ET_c determinada pela equação de PM correlacionou bem com a ET_c obtida pelas estações de RB, subestimando os valores em magnitude com uma diferença aproximada de 45 W.m^{-2} , devido à contribuição de energia advectiva proveniente de áreas adjacentes.

O sistema de monitoramento automático dos componentes do balanço de energia, associado à razão de Bowen, das áreas cultivadas com o feijoeiro e milho, mostrou-se sensível para detectar a influência de áreas adjacentes na partição do saldo radiação em fluxos de calor latente, sensível e do solo, devendo ser usado como método padrão para aferir e calibrar outros métodos de determinação da necessidade hídrica de culturas.

7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome, FAO, 1998. 300p. (Irrigation and Drainage Paper 56).

BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water. **Phys. Rev.**, v.27, p.779-787, 1926.

BRUTSAERT, W.H. **Evaporation into the atmosphere**. Eidel, Dordrecht, 1982. 299p.

CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. **Bowen ratio instrumentation instruction manual**. Logan, Campbell Scientific. 1.1-2.10.1997.

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.

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

NIELSEN, D. C.; ANDERSON, R. L. Infrared thermometry to measure single leaf temperatures for quantification of water stress in sunflower. **Agronomy Journal**, 81: 840-842, 1989.

ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L. & VERMA, S.B. **Microclimate: the biological environment**. John Willey & Sons, Inc., NY, 1983. 495p.

TODD, R.W., EVETT, S.R., HOWELL, T.A. The bowen ratio-energy balance for estimating latent heat flux of irrigated alfafa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.103, p.335-348, 2000.