

ESTUDO DO CALOR SENSÍVEL E LATENTE OBTIDOS POR INTERMÉDIO DA RAZÃO DE BOWEN EM UMA CULTURA DE SOJA IRRIGADA.

Edemo João Fernandes

*Departamento de Engenharia Rural, Universidade Estadual Paulista, Campus de Jaboticabal, SP,
eijfernan@fcav.unesp.br*

1 RESUMO

O experimento teve por objetivo estudar as variações dos fluxos de calor sensível e latente sobre uma cultura de soja irrigada, obtidos com a utilização da razão de Bowen. Foi construída uma estação micrometeorológica, com deslocamento vertical dos sensores para manter o mesmo nível de medidas acima da cobertura vegetal. A estação foi instalada na parte central da parcela, distante 130 m da margem principal da direção dos ventos predominantes. Os fluxos foram calculados em função dos gradientes verticais de temperaturas determinadas a 0,15 e 1,15 m de altura acima da cultura de soja. Em condições de bom suprimento de água e com a cultura cobrindo totalmente o solo o fluxo de calor latente é o maior consumidor da energia disponível na vegetação. O fluxo de calor sensível foi maior no início do desenvolvimento da cultura, quando o índice de área foliar foi menor. A cobertura vegetal é preponderante no consumo da energia disponível na vegetação em forma de calor latente.

UNITERMOS: fluxos de calor, radiação líquida, temperatura do ar.

FERNANDES, E. J. F. STUDY OF SENSIBLE AND LATENT HEAT OBTAINED BY BOWEN RATIO FROM IRRIGATED SOYBEAN CROP

2 ABSTRACT

The goal of this experiment was to study the latent and sensible heat variation determined by Bowen ratio from an irrigated soybean crop. A micrometeorological station with vertical displacement was constructed to maintain the same level of all measures over the canopy. The station was installed in the center of the crop, and it was over 130 m away from the main edge of the predominant wind direction. Fluxes were calculated by vertical temperature gradient determined at 0.15 and 1.15 m over the canopy. The latent heat flux was the mean energy consumer when the canopy covered the soil totally, and there were good soil water conditions. The sensible heat flux was greater when the soil was not totally covered by the canopy. The canopy was essential on the amount of latent heat dissipated by the crop.

KEYWORDS: heat fluxes, net radiation, air temperature.

3 INTRODUÇÃO

Com o aperfeiçoamento de sensores utilizados para medir diretamente variáveis acima da cobertura vegetal, tornou-se possível a avaliação da resposta da cultura ao seu ambiente, pela utilização de vários métodos aerodinâmicos e de balanço de energia. Esses métodos possibilitam determinar, com certa acurácia, os fluxos existentes entre a cultura e seu meio ambiente, definindo assim, as necessidades hídricas da cultura.

A importância da determinação dos fluxos de calor latente e sensível, que ocorrem entre a vegetação e o meio ambiente, é que eles representam a troca de calor e a perda de água pela cultura, fatores importantes na avaliação do balanço de energia e estresse hídrico da cultura e da evapotranspiração.

A separação da energia disponível em calor sensível e latente pode geralmente ser obtida pelo método do balanço de energia, baseado nas relações fluxo-perfil de transferências de energia e massa e utilizado para estimar a evapotranspiração sobre solo nu ou vegetado. Nesse método, a exatidão dos valores calculados para os fluxos de calor latente e sensível depende da precisão das medidas (Perrier, 1975).

A energia é necessária para originar os processos de evaporação do solo e transpiração da vegetação. Essa energia é suprida pela radiação solar e pela advecção do calor sensível, quando o ar quente e seco é transportado sobre a cultura. Quando não existe a advecção de calor sensível, o máximo consumo de energia pela evapotranspiração não pode exceder a radiação líquida (Doraiswamy & Rosenberg, 1974).

Um dos métodos que possibilitam determinar os fluxos de calor é a razão de Bowen, baseada na partição da energia líquida (R_n) em calor sensível (H) e latente (LE). O calor latente consiste no fluxo de vapor d'água originado pela energia recebida pela superfície. Esses fluxos fazem parte do balanço de energia juntamente com o fluxo de calor no solo (G), em que $R_n = LE + H + G$.

De acordo com o princípio de conservação de energia, a energia radiativa líquida disponível na superfície deve ser igual ao total dos processos de consumo de energia, isto é, a soma dos fluxos de energia entrando e saindo da superfície devem ser algebricamente iguais a zero (Polavarapu, 1968).

Segundo Pieri & Fuchs (1990) o balanço de energia da superfície usando a razão de Bowen consiste na separação das densidades de fluxo de calor sensível e latente. Esse método é baseado na hipótese de que as difusividades dos vórtices para esses fluxos são iguais. A hipótese de similaridade implica que o mesmo turbilhão transporta calor e vapor d'água e conseqüentemente, essas fontes de calor e vapor na superfície são uniformemente distribuídas. A razão de Bowen pode então ser calculada de medidas de gradiente de temperatura e umidade em dois níveis acima da cultura. A temperatura e umidade relativa do ar devem ser medidas nas mesmas alturas e preferencialmente, no mesmo volume de ar.

O método da razão de Bowen tornou-se uma prática padrão para medir fluxos de calor latente e sensível pela equação do balanço de energia. A precisão do método foi testada por vários pesquisadores e sua validade como medida da evapotranspiração está bem fundamentada por vários autores (Tanner, 1960; Fritschen, 1966; Fuchs & Tanner, 1970; Sinclair et al., 1975; Revheim & Jordan, 1976; Spittlehouse & Blanck, 1980) entre outros. Uma opinião unânime é que o fluxo de calor latente pode ser estimado com variação não superior a 10% (Sinclair et al., 1975). A maior dificuldade do método está associada à instrumentação, a qual deve detectar diferenças de temperatura e pressão de vapor e depende da acurácia dos sensores.

Para McIlroy (1971) o sistema micrometeorológico baseado na partição de energia, frequentemente chamado de método de razão de Bowen, parece adequado para determinar o uso de água em superfícies vegetadas.

As trocas de energia e massa entre um solo nu e a atmosfera são bastante diferentes daquelas de uma cultura completamente desenvolvida. A evaporação é rapidamente limitada por uma fina camada seca a qual tende a prevenir a evaporação (Kondo et al., 1992). O fluxo de calor no solo pode atingir valores expressivos em relação à radiação líquida, enquanto que para uma superfície vegetada ele é um termo menor no balanço de energia.

Ashktorab et al. (1989) relatou que o modelo de fluxos em coberturas vegetais indicou que, quando a superfície do solo permaneceu úmida, a evaporação sob uma vegetação moderadamente densa (índice de área foliar em torno de 3,0) constituiu uma fração considerável (30%) do fluxo de calor latente total em um período de 24 horas.

Medidas feitas por Brown & Covey (1966) também mostraram um grande fluxo de calor latente em uma superfície úmida do solo sob vegetação densa.

Baldocchi et al. (1983) também relataram que condições de estresse hídrico influenciam enormemente a divisão da radiação líquida em calor latente e sensível. Quando a cultura estava em boas condições hídricas toda a radiação líquida foi consumida como fluxo de calor latente. Quando a cultura estava em estresse hídrico somente 66% da radiação líquida foi consumida como calor latente. O calor sensível direcionou-se para a superfície em boas condições de umidade do solo e em sentido contrário quando a cultura se encontra com estresse hídrico.

O objetivo desse trabalho foi verificar as variações dos fluxos de calor latente e sensível sobre uma cultura de soja em conforto hídrico, obtidos pelo método da razão de Bowen.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio foi instalado na Área Demonstrativa e Experimental de Irrigação, ADEI, da FCAV/UNESP, campus de Jaboticabal, SP. As coordenadas geográficas são 21°15'22" de latitude sul e 48°18'58" de longitude oeste, sendo a altitude média 570 m, apresentando clima tipo Cwa (subtropical com inverno seco) de acordo com a classificação de Köppen. A temperatura média anual é de 22 °C, com 70% de umidade relativa média do ar e 1400 mm de precipitação média anual.

Utilizou-se um sistema de irrigação por aspersão convencional, com espaçamento de 18x18 m, sendo instalada na área experimental a cultura da soja, cultivar Conquista, com espaçamento entre linhas de 0,53 m, em 13/5/1996. A área útil do experimento foi de 4752 m².

A quantidade de água aplicada em cada parcela foi função dos valores da evapotranspiração da cultura (ET_c), obtidos por meio de dados fornecidos por um tanque classe A e do coeficiente da cultura (k_c), sendo a ET_c calculada por intermédio das seguintes equações:

$$ET_o = E_{ca} k_p \quad (1)$$

$$ET_c = ET_o k_c \quad (2)$$

em que E_{To} é a evapotranspiração de referência (grama batatais) (mm), E_{ca} a evaporação medida no tanque classe A (mm), k_p o coeficiente do tanque classe A (Smith, 1990), E_{Tc} a evapotranspiração da cultura (mm) e k_c o coeficiente da cultura.

O valor da lâmina de água aplicada em cada irrigação foi determinado pela média das quantidades de água recebidas em oito pluviômetros distribuídos na parcela.

A separação de energia entre fluxo de calor sensível (H) e de calor latente (LE) foi obtida pelo método da razão de Bowen (Kustas et al., 1996; Perez et al, 1999):

$$\beta = H/LE \quad (3)$$

A razão de Bowen é usada com o balanço de energia, o qual para superfícies uniformes (PEREZ et al., 1999) pode ser simplificado por:

$$R_n = G + H + LE \quad (4)$$

e substituindo a equação 4 na 5, originam-se as seguintes expressões para LE e H :

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

$$H = (R_n - G) \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (6)$$

em que R_n é a radiação líquida ($W\ m^{-2}$), G o fluxo de calor no solo ($W\ m^{-2}$), H o fluxo de calor sensível ($W\ m^{-2}$), LE o fluxo de calor latente ($W\ m^{-2}$) e β a razão de Bowen.

Em um período médio t , a relação empírica entre os fluxos e gradientes verticais pode ser formulada como:

$$H = -\rho c_p K_h \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

$$LE = -\frac{\rho c_p}{\gamma} K_v \frac{\partial e}{\partial z} \quad (8)$$

Assumindo que $K_h = K_v$ (Verma et al, 1978) e medindo os gradientes de temperatura e pressão de vapor entre dois níveis dentro da camada limite da superfície, β é definido como:

$$\beta = \gamma \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\frac{\partial e}{\partial z}} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (9)$$

em que ΔT e Δe são as diferenças entre as temperaturas ($^{\circ}C$) e pressões de vapor (kPa) medidas em dois níveis, γ é a constante psicrométrica ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$), c_p o calor específico do ar à pressão constante ($kJ\ kg^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$), K_h e K_v os coeficientes de difusividade turbulenta de calor e vapor d'água ($m^2\ s^{-1}$).

A densidade do ar atmosférico, a constante psicrométrica, o calor específico do ar, a pressão atmosférica e o calor latente de vaporização foram obtidos segundo fórmulas sugeridas por Smith (1990):

A radiação líquida foi obtida por intermédio de um radiômetro líquido diferencial marca Rebs, modelo Q-7, com cúpulas de polietileno, liberando uma força eletromotriz proporcional a R_n e colocado horizontalmente a 2,0 m acima da cobertura vegetal. Esse sensor possui um fator nominal de calibração para valores positivos de $8,6 \text{ W m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$ e para valores negativos $13,09 \text{ W m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$.

O fluxo de calor no solo foi medido por meio de um fluxímetro marca Rebs instalado a 0,03 m abaixo da superfície do solo. O instrumento possui um fator de calibração de $39,6 \text{ W m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$, resistência de 2,0 ohms e condutividade térmica $1,22 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Os sensores utilizados no psicrômetro foram termopares do tipo T, de cobre-constantan, instalados em abrigo com ventilação natural (Fernandes, 2001). Os psicrômetros foram instalados a 0,15 e 1,15 m acima da cultura.

Os sensores foram instalados em uma estação constituída de um mastro dotado de três suportes, que possibilitavam o deslocamento vertical do conjunto de sensores, acima da cobertura vegetal, em função do desenvolvimento da cultura. Nos suportes inferior (0,15 m) e de altura média (1,15 m) foram colocados os psicrômetros (temperaturas da junção úmida e do ar) e anemômetros e no suporte superior (2,0 m) o radiômetro líquido e um termopar. Todos os sensores eram conectados, por meio de cabos, a um sistema de aquisição e armazenamento de dados ("datalogger") da Campbell Scientific, modelo CR10.

A estação foi posicionada no interior da parcela e distava 130 m da margem principal da direção dos ventos predominantes (sudeste), para evitar os efeitos da advecção e os fluxos serem determinados somente em função dos efeitos verticais (Figura 1).

O posicionamento dos sensores acima da cobertura vegetal foi escolhido para estabelecer um compromisso entre precisão, representatividade das medidas e definição correta das alturas, determinadas de acordo com as seguintes premissas (Itier et al., 1985):

- z_2 deve estar na camada de fluxo constante;
- z_1 deve estar a uma altura suficiente para manter $\sqrt{z_1 z_2}$ fora da camada de rugosidade;
- z_2 e z_1 devem estar distantes o suficiente para medir diferenças de velocidade do vento e temperatura com suficiente precisão.

Tendo vista esses aspectos foram escolhidas as alturas: $z_{\text{inf}} = 0,15$ (altura inferior), z_m (altura média) = 1,15 e $z_{\text{sup}} = 2,0$ m (altura superior) ($\sqrt{z_1 z_2} = 0,42$ m) para o posicionamento dos sensores, determinadas previamente pela análise de dados obtidos no campo.

A determinação do índice de área foliar (IAF) foi efetuada a cada quatorze dias, retirando-se cinco plantas em quatro sub-áreas da parcela, de tal forma que se obteve vinte plantas. Dessas plantas, foram destacados os folíolos para medição da área foliar total média (AFT), em cada amostragem.

A determinação da área foliar de cada folíolo (AFi), foi feita utilizando-se de um "Área meter" e a AFT foi o resultado do somatório das áreas foliares parciais (AFi) dividido pelo número de plantas amostradas, de acordo com a seguinte expressão:

$$AFT = 1/10 \sum AFi \quad (\text{cm}^2) \quad (10)$$

O índice de área foliar foi calculado dividindo-se a AFT pela área de solo disponível para uma planta (espaçamento = esp), como segue:

$$IAF = AFT/\text{esp} \quad (11)$$

Serão mostrados dados referentes a quatro períodos distintos do desenvolvimento da cultura: início das amostragens, caracterizando a não cobertura total da superfície do solo; estádios de florescimento e de enchimento de grãos, que se referem aos períodos de maior consumo de água pela cultura e etapa final das amostragens.

Apresentar-se-ão dados das temperaturas da junção úmida e do ar, velocidade do vento e radiação líquida, os quais correspondem as principais variáveis na determinação dos fluxos de calor no solo, sensível e latente pelo método da razão de Bowen.

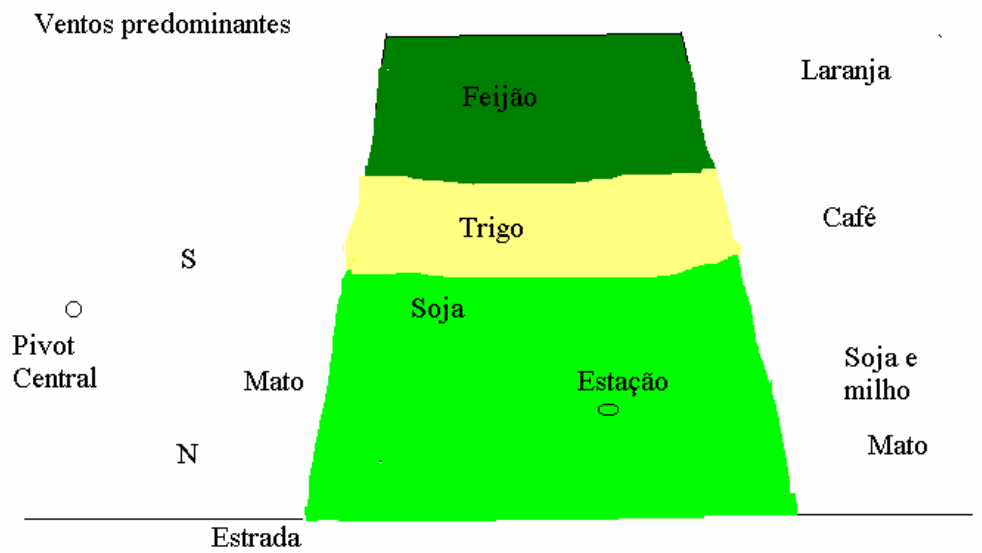


Figura 1. Croqui da área experimental.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A parcela em estudo recebeu, durante o período de amostragem, 393,9 mm de lâmina total de água, sendo 250,9 mm mediante irrigações e 143,0 mm por chuvas. Foram efetuadas nove irrigações nessa parcela.

Na Figura 2 encontram-se os valores médios do índice de área foliar. Verifica-se que até aos 50 d.a.e. (dias após a emergência) a relação das áreas vegetação/solo era inferior à unidade e de 74 a 86 d.a.e. essa relação era maior do que 2,0. Essa relação foi superior a unidade dos 51 aos 105 d.a.e.

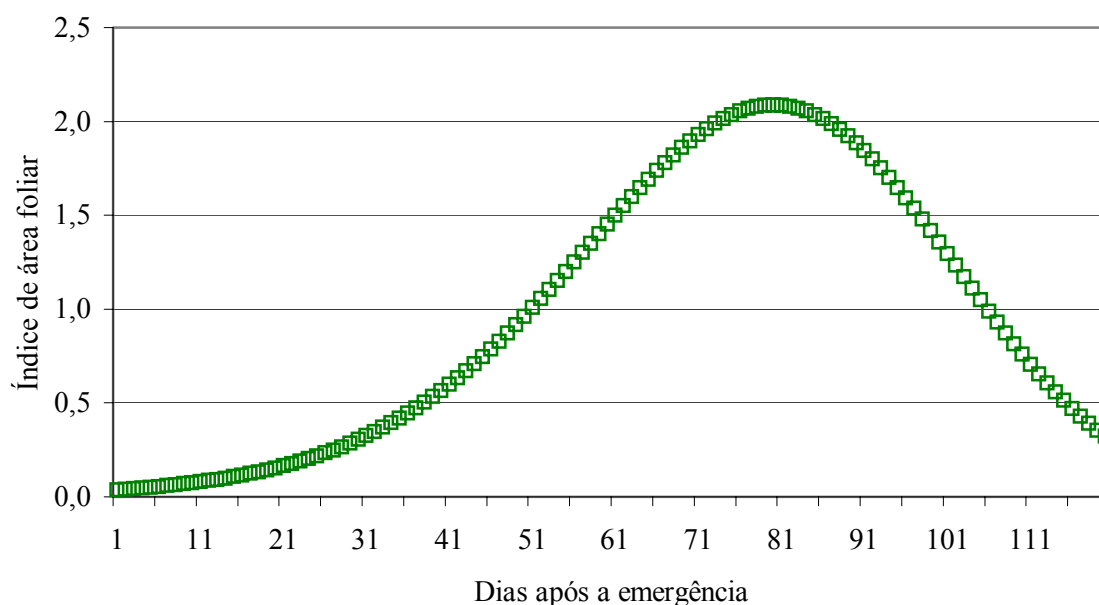


Figura 2. Valores médios do índice de área foliar obtidos por regressão.

A Tabela 1 mostra a caracterização dos estádios de desenvolvimento da cultura em função do tempo, no período compreendido entre 35 e 118 d.a.e., segundo metodologia sugerida por Costa (1982).

Tabela 1. Estádios de desenvolvimento da cultura da soja.

Data	d.a.e.	Estádio	Descrição
27/6	35	V3	Vegetativo, três nós no caule.
30/6	38	V4	Vegetativo, quatro nós no caule
04/7	42	V5	Vegetativo, cinco nós no caule
13/7	51	R1	Início do florescimento
16/7	54	R2	Florescimento
27/7	65	R3	Início da formação de legumes
31/7	69	R4	Formação de legumes
08/8	77	R5	Início do enchimento de grãos
21/8	90	R6	Máximo volume de grãos
12/9	112	R7	Maturação fisiológica
17/9	117	R8	Maturação

d.a.e. – dias após a emergência de 70% das plântulas.

Na Figura 3 encontram-se os valores das temperaturas da junção úmida e do ar, obtidos em duas alturas acima da cobertura vegetal (índice i significa inferior e s superior) em 30/6 (38 d.a.e., estágio V4), correspondendo ao período inicial das amostragens, época em que a cultura não estava cobrindo totalmente o solo (IAF = 0,50). As temperaturas da

junção úmida e do ar medidas no nível inferior (Tui e Tai) foram menores do que as do nível superior (Tus e Tas) no período compreendido entre 0:15 e 7:30 horas, situação característica da inversão térmica noturna. Entre 7:30 e 8:45 horas os valores se equivaleram e entre 9:00 e 16:00 horas houve a inversão desses valores, caracterizando a instabilidade térmica diurna, onde o ar aquecido da superfície, com temperatura superior ao da camada acima, tende a se elevar em razão de sua menor densidade. Das 17:45 horas em diante ocorre novamente a inversão térmica, com as temperaturas da camada superior tornando-se maiores do que as da inferior. Essas situações estão relacionadas ao aquecimento da superfície pela radiação solar e ao resfriamento. O solo e a vegetação possuem capacidade calorífica menor do que o ar atmosférico, ou seja, necessitam menores quantidades de energia do que o ar para aumentar a sua temperatura. Portanto, a radiação solar recebida provocará maior aquecimento da superfície do que o ar. A superfície aquecida, por condução e principalmente por convecção, provocará o aumento da temperatura da camada de ar vizinha, a qual sendo mais quente e possuindo menor densidade que a camada superior se elevará, produzindo a instabilidade térmica. Os maiores valores das temperaturas da junção úmida e do ar foram 16,5 °C (13:45 horas) e 19,7 °C (14:45 horas), respectivamente, observando-se uma defasagem no tempo em relação ao valor máximo da radiação incidente (Figura 4).

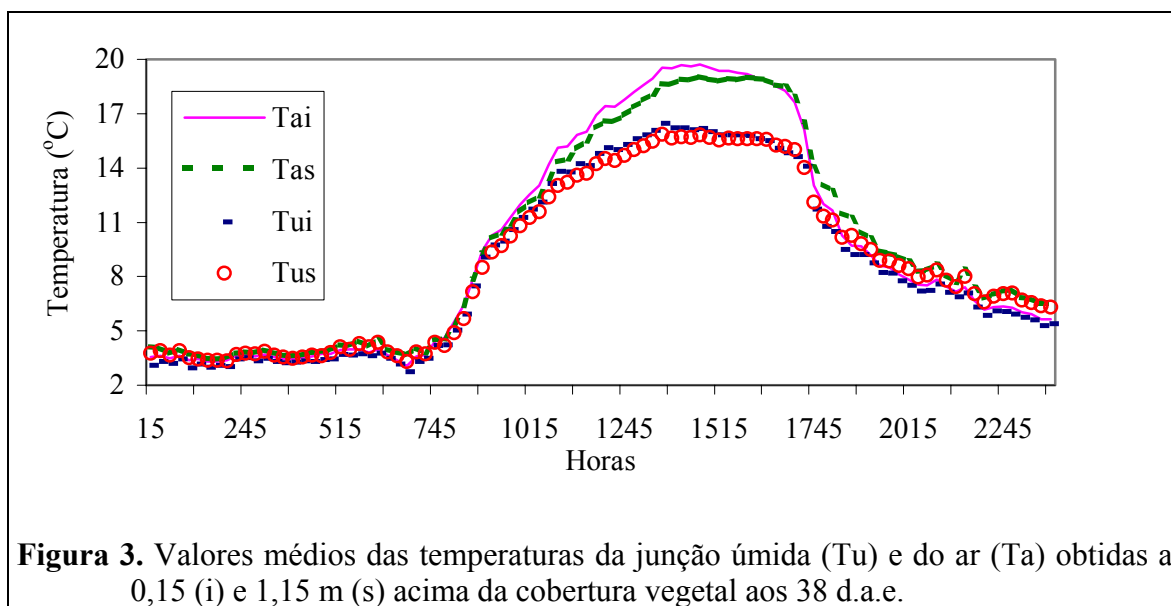
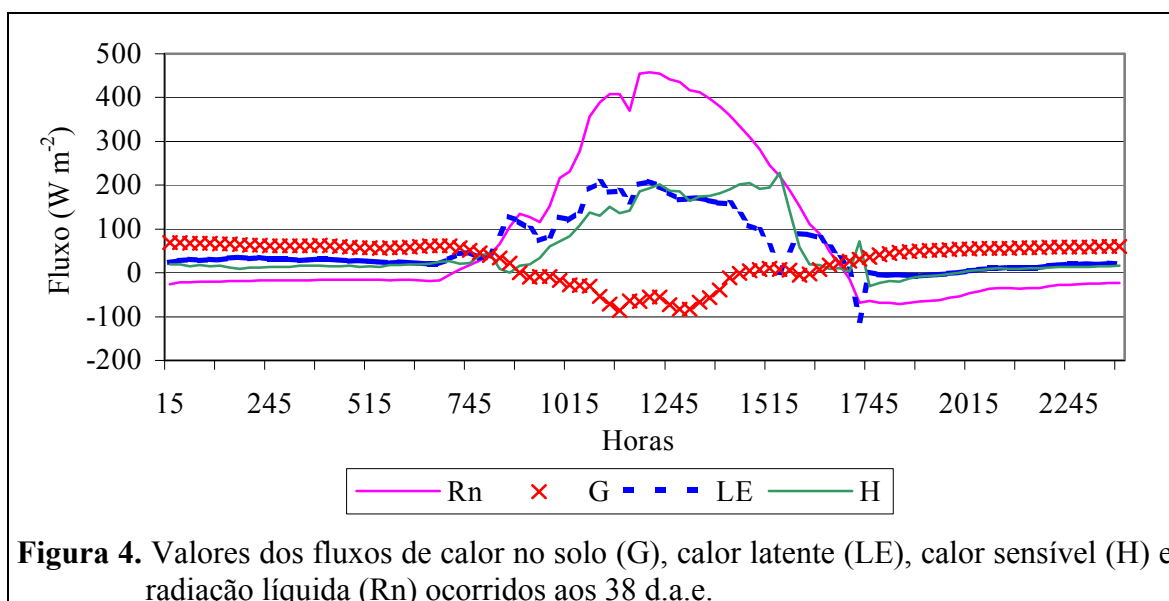


Figura 3. Valores médios das temperaturas da junção úmida (Tu) e do ar (Ta) obtidas a 0,15 (i) e 1,15 m (s) acima da cobertura vegetal aos 38 d.a.e.

Na Figura 4 estão os valores dos fluxos de calor no solo, calor latente, calor sensível e radiação líquida ocorridos aos 38 d.a.e (30/6). Houve a ocorrência de chuvas dois dias antes dessa data. Nota-se que os fluxos de calor latente e sensível, em proporções próximas, foram responsáveis pela maior parte da perda da energia absorvida pela superfície. O fluxo de calor latente contribuiu com 48,2% do consumo de energia e o de calor sensível 44,9%, mostrando que mesmo em condições de solo úmido, a evapotranspiração é pequena e o fluxo de calor sensível, quando a vegetação não cobre totalmente o solo, representa uma considerável quantidade da energia disponível. Os valores do fluxo de calor latente foram superiores àqueles encontrados por Ashktorab et al. (1989). O maior valor de R_n foi 457,1 W m⁻² e o de LE, 209,0 W m⁻², observados as 12:15 horas. O maior valor do fluxo de calor do solo em direção a superfície foi 68,6 W m⁻², ocorrido as 0:15 horas, e em sentido contrário, -83,8 W m⁻² (18% da R_n), as 13:15 horas,

concordando com o relato de Kondo et al. (1992), de que o fluxo de calor pode ser expressivo quando a cobertura do solo não for total. Os valores de Rn foram positivos no período compreendido entre 7:30 e 17:00 horas.



Na Figura 5 encontram-se os valores das temperaturas da junção úmida e do ar medidos em duas alturas, no dia 24 de julho (62 d.a.e.), período em que a cultura se encontrava em pleno florescimento ($\text{IAF} = 1,55$). Observa-se que a partir das 7:30 horas (15 minutos após a radiação líquida tornar-se positiva) a temperatura do ar medida em nível inferior (Tai) mostrou-se superior a temperatura do ar medida em nível superior (Tas), caracterizando a instabilidade térmica. As 15:45 horas ocorre a inversão térmica, com Tas passando a ser maior do que Tai. A mesma situação ocorre com as temperaturas da junção úmida medidas no nível inferior (Tui) e superior (Tus). O maior valor registrado foi 27°C (Tam), ocorrido as 16:15 horas.

A Figura 6 apresenta os valores dos fluxos de calor no solo, calor latente, calor sensível e radiação líquida, calculados aos 62 d.a.e., um dia após uma irrigação. Verifica-se que a maior parte da energia absorvida pela vegetação foi consumida em evapotranspiração, na forma de calor latente, ao passo que o fluxo de calor sensível teve uma menor participação no consumo da energia disponível, concordando com os relatos de Brown & Covey (1966) e Baldocchi (1983). Os fluxos de calor latente e sensível corresponderam a 81% e 10%, da radiação líquida, respectivamente. Nota-se que, como a cultura estava cobrindo totalmente o solo, a fração do calor sensível foi bem menor do que o registrado aos 38 d.a.e. Os maiores valores de Rn ocorreram entre 12:00 e 13:00 horas (em torno de 419 W m^{-2}) e os de LE entre 13:00 e 13:30 horas (338 W m^{-2}). O maior valor do fluxo de calor no solo no período diurno foi $48,6 \text{ W m}^{-2}$, ocorrido as 12:15 horas, e no noturno (período com Rn negativo), 30 W m^{-2} (7:15 horas). Observa-se que o fluxo de calor no solo diminuiu em relação ao registrado em 30/6, provavelmente em função do aumento da cobertura vegetal, como citado por Kondo et al., (1992). Os valores de Rn foram positivos entre 7:15 e 17:15 horas.

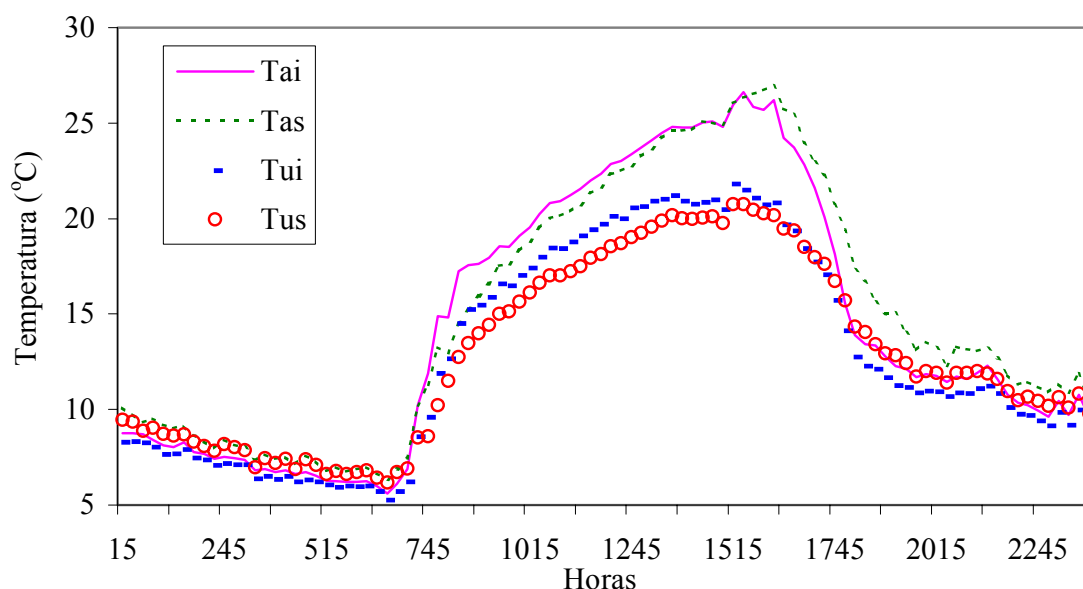


Figura 5. Valores médios temperaturas da junção úmida (Tu) e do ar (Ta), medidas a 0,15 (i) e 1,15 m (s) de altura e obtidas aos 62 d.a.e.

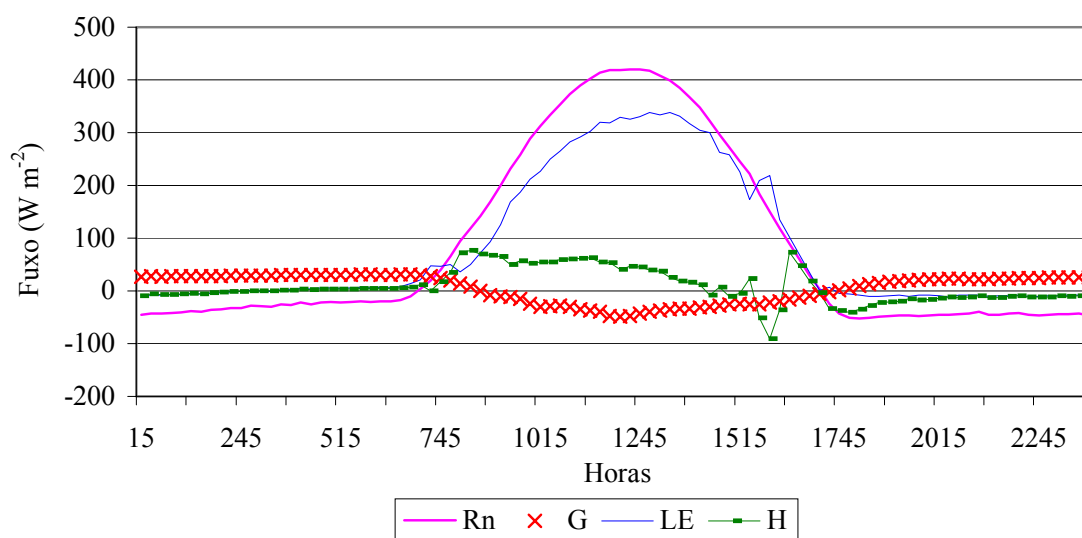
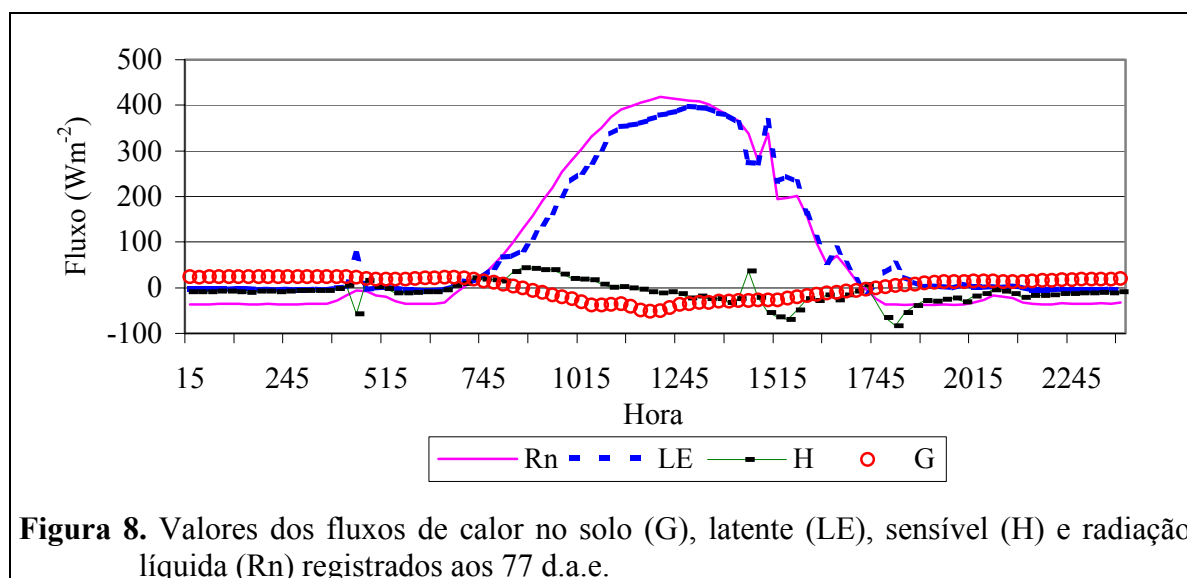
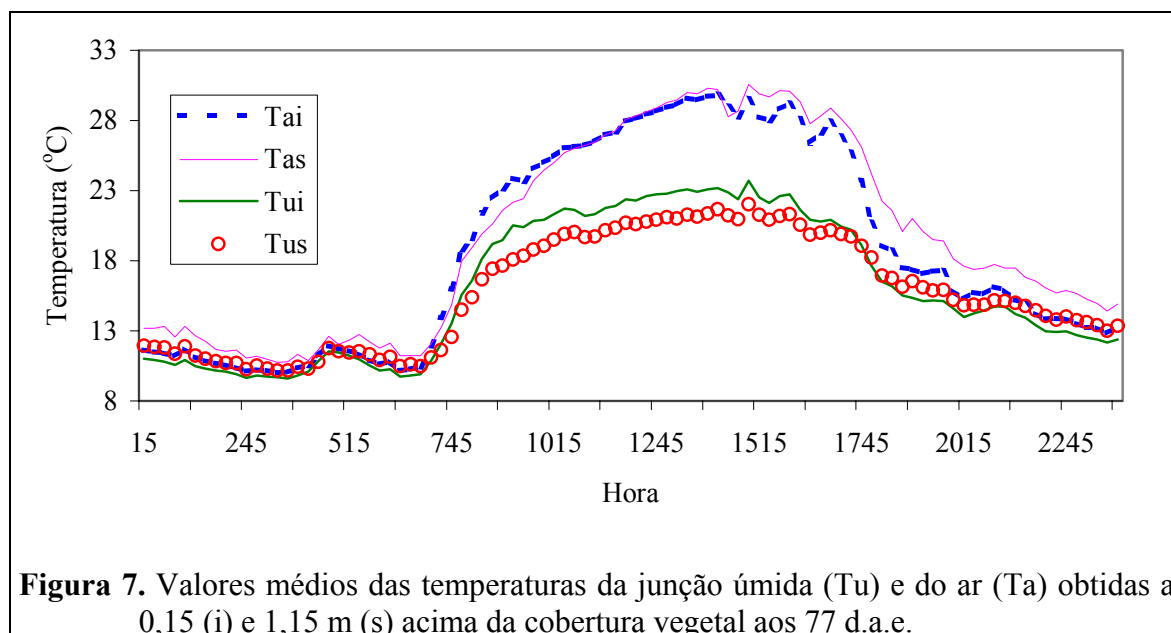


Figura 6. Valores dos fluxos de calor no solo (G), latente (LE), sensível (H) e radiação líquida (Rn) registrados aos 62 d.a.e.

Os valores das temperaturas da junção úmida e do ar ocorridos em 8 de agosto (77 d.a.e.), data do início de enchimento dos grãos, são mostrados na Figura 7, notando-se que Tai foi superior a Tas somente entre 7:30 e 10:45 horas. Esse fato pode, provavelmente, estar relacionado a maior quantidade de vapor de água próximo à superfície vegetada, pois com o aumento da radiação incidente, aumentou a evapotranspiração, diminuindo a temperatura da camada de ar próxima a superfície, em razão da liberação de calor latente. Isso foi decorrente das condições hídricas da cultura

nessa data. Houve uma irrigação com aplicação de 20,3 mm de lâmina de água no dia 7 de agosto. Entre 10:45 e 14:45 horas os dados de temperatura foram semelhantes e após, T_{as} tornou-se superior a T_{ai} . Para a temperatura da junção úmida, T_{ui} suplantou T_{us} das 7:45 às 17:30 horas, período maior do que ocorreu com os valores da temperatura do ar. O diferencial entre temperaturas foi maior para as de junção úmida do que para as do ar. Os maiores valores das temperaturas do ar e da junção úmida foram 30,6 (T_{as}) e 23,7 °C (T_{ui}) ocorridos às 15:00 horas, novamente notando-se uma defasagem em relação ao maior valor de R_n (Figura 8).



Na Figura 8 encontram-se os valores dos fluxos de calor no solo, calor latente, calor sensível e radiação líquida, obtidos aos 77 d.a.e., correspondente a metade do período de amostragem, ocasião em que a vegetação cobria totalmente o solo ($IAF = 2,07$). Foi efetuada uma irrigação dois dias antes. Percebe-se que quase a totalidade da energia disponível (R_n) foi utilizada para a evapotranspiração, em forma de calor latente. O fluxo

de calor latente consumiu 93% da R_n , ao passo que H foi responsável por 3,8%. O maior valor de R_n foi $417,9 \text{ W m}^{-2}$ (12:15 horas) e o de LE $398,1 \text{ W m}^{-2}$ (13:00 horas). O maior valor do fluxo de calor no solo foi $25,0 \text{ W m}^{-2}$ e o menor $-51,2 \text{ W m}^{-2}$ (12:00 horas). Comparando esses valores com aqueles da Figura 3 verifica-se a influência da vegetação sobre o fluxo de calor no solo, com G apresentando valores menores quando a superfície do solo está totalmente coberta, acarretando menor quantidade de energia recebida pela vegetação por ocasião da inversão do fluxo (período noturno), conforme relatou Kondo et al. (1992). Os dados de R_n foram positivos entre 7:15 e 17:15 horas.

A Figura 9 apresenta os dados das temperaturas da junção úmida e do ar do dia 12 de setembro (maturação fisiológica) (112 d.a.e.), caracterizando o período final do experimento ($IAF = 0,66$). Verifica-se que T_{ai} é maior do que T_{as} das 6:45 às 16:00 horas e torna-se inferior a partir das 17:45 horas. T_{ui} é superior a T_{um} das 7:00 às 17:45 horas, ocorrendo a inversão dos valores às 19:30 horas. A maior temperatura foi $27,9^\circ\text{C}$ (T_{ai}), registrada às 14:30 horas.

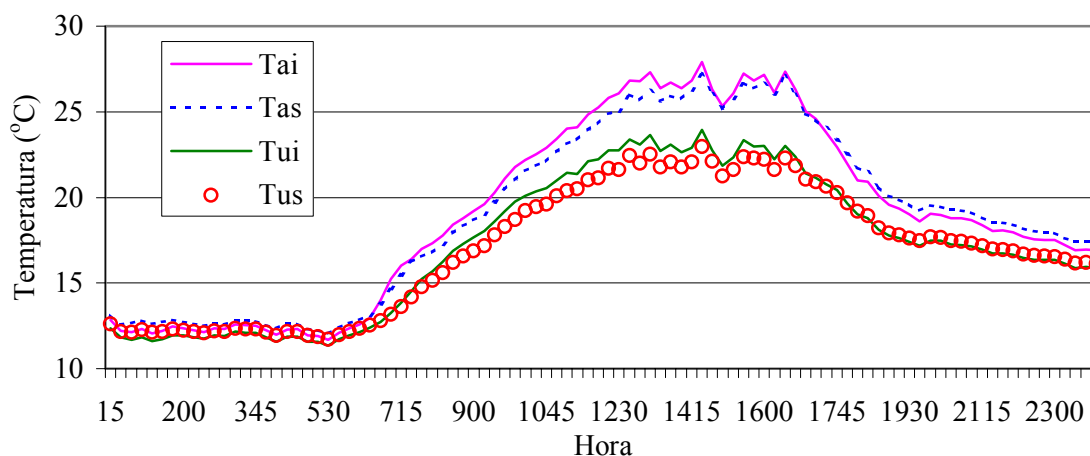


Figura 9. Valores médios das temperaturas da junção úmida (T_u) e do ar (T_a) obtidas a 0,15 (i) e 1,15 m (s) acima da cobertura vegetal aos 112 d.a.e.

Na Figura 10 encontram-se os dados dos fluxos de calor no solo, latente, sensível e radiação líquida verificados aos 112 d.a.e., notando-se que a maior parcela de R_n foi consumida na evaporação da água. Houve ocorrência de chuvas dois dias antes dessa data. O fluxo de calor sensível correspondeu a 22,8% da energia disponível consumida, ao passo que o calor latente utilizou 72,3% dessa energia. Apesar dessa data representar o período final do experimento, 66% da superfície do solo ainda era coberta pela vegetação. O maior valor de R_n foi 598 W m^{-2} , de H $154,4 \text{ W m}^{-2}$ e de LE $404,2 \text{ W m}^{-2}$, todos ocorridos às 13:00 horas. Para o fluxo de calor no solo o maior valor foi $15,4 \text{ W m}^{-2}$ e o menor $-37,0 \text{ W m}^{-2}$ (13:30 horas), valores menores do que aqueles observados quando a cultura cobria totalmente o solo.

Os períodos escolhidos para apresentação dos dados corresponderam a um ou dois dias após a ocorrência de chuvas ou irrigações. Comparando-se os resultados verifica-se que, nas duas situações, o fluxo de calor latente foi o maior consumidor da energia disponível, porém, quando a evapotranspiração foi calculada logo após chuvas ou irrigações, o percentual foi maior. O fluxo de calor no solo não foi apenas função do IAF , como relataram Kondo et al. (1992), pois em 12/9 o IAF era menor do que nos dois

períodos de amostragem anteriores, porém apresentou o menor fluxo de calor no solo. Pode-se observar que, quando o fluxo de calor latente foi menor, o fluxo de calor do solo foi maior. Em todos os períodos, com exceção do dia 8 de agosto, T_{ai} foi superior a T_{as} na maior parte do dia (no mínimo sete horas). Para o dia 8 de agosto isso ocorreu somente no início da manhã (7:30 as 10:45 horas), mas não afetou os valores do fluxo de calor latente, que foram altos. No momento de ocorrência das maiores radiações também se verificaram os maiores fluxos de calor no solo e latente, com uma defasagem máxima de uma hora. As maiores temperaturas estiveram sempre defasadas em relação aos maiores valores de R_n .

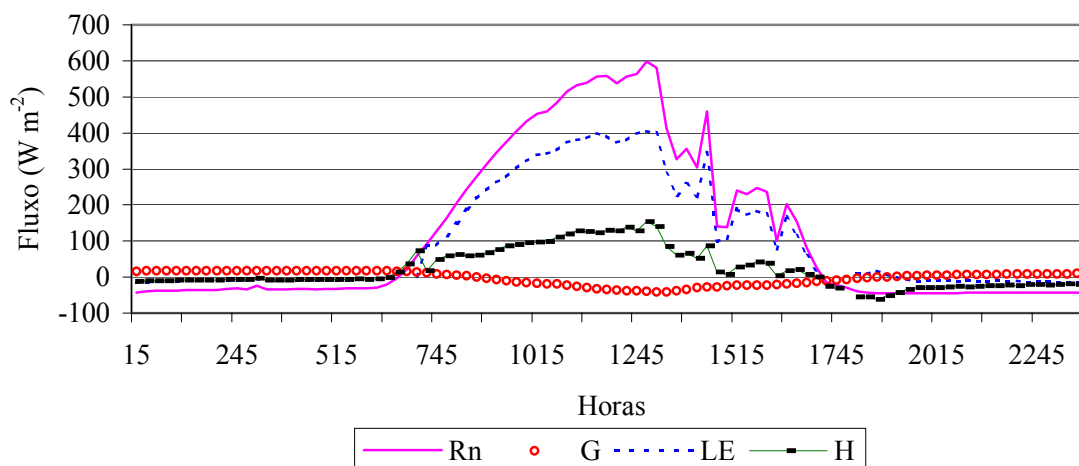


Figura 10. Valores dos fluxos de calor no solo (G), latente (LE), sensível (H) e radiação líquida (R_n) registrados em 112 d.a.e.

Nas Figuras 11 e 12 são apresentados os fluxos de calor do solo, sensível, latente e radiação líquida para os dias 6 de agosto (75 d.a.e., estádio R4, sete dias após uma irrigação de 30 mm) e 26 de agosto (95 d.a.e., estádio R6, doze dias após uma irrigação de 10 mm) que se referem ao dia antecedente à ocorrência de uma irrigação, com o intuito de se analisar a relação dos fluxos em períodos de menor conteúdo de umidade do solo. Verifica-se que, mesmo nesses períodos, o fluxo de calor latente foi o maior consumidor de energia da vegetação, indicando que a cultura esteve sempre se desenvolvendo sob boas condições hídricas do solo. O fluxo de calor latente foi sempre menor do que R_n , mostrando que a advecção não foi importante no fornecimento de energia para a evaporação da água, como citam Doraiswamy & Rosenberg (1974) e Perez et al. (1999). Isso indica que o correto posicionamento da estação no campo, pois a evapotranspiração foi função apenas da energia incidente. O fluxo de calor latente correspondeu a 88,8 e 95,0%, respectivamente para os dois períodos analisados, enquanto que o fluxo de calor sensível foi 5,6 e 0,8% para as duas datas, respectivamente. Apesar do maior intervalo sem irrigação ou chuva, o fluxo de calor latente foi maior aos 95 d.a.e. do que aos 75 d.a.e. O fluxo de calor no solo foi maior quando o índice de área foliar foi menor ($IAF = 0,50$)

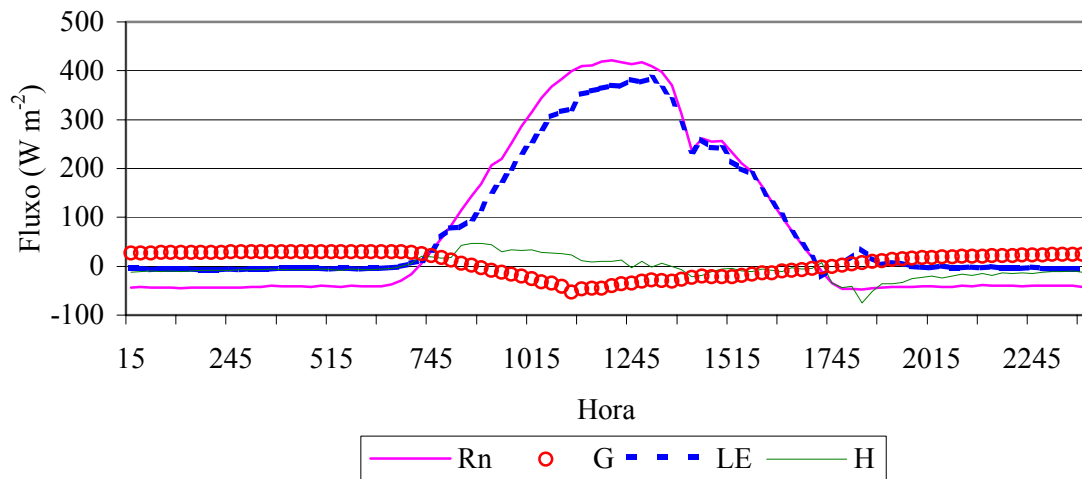


Figura 11. Valores dos fluxos de calor no solo (G), latente (LE), sensível (H) e radiação líquida (Rn) registrados em 06/8/1996.

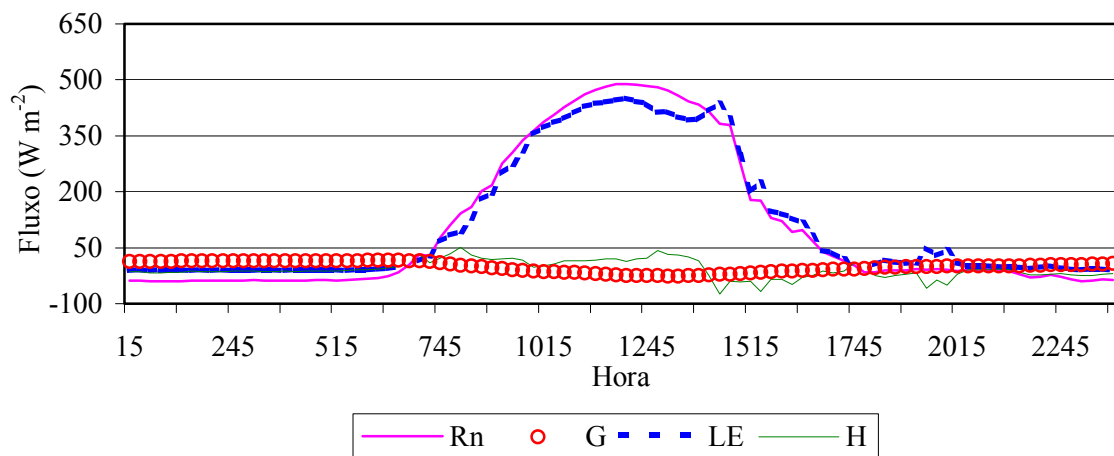


Figura 12. Valores dos fluxos de calor no solo (G), latente (LE), sensível (H) e radiação líquida (Rn) registrados em 26/8/1996.

6 CONCLUSÕES

Em condições de bom suprimento de água e com a cultura cobrindo totalmente o solo o fluxo de calor latente é o maior consumidor da energia disponível na vegetação. O fluxo de calor latente diminuiu quando a cultura não cobriu totalmente o solo. O fluxo de calor sensível foi maior no início do desenvolvimento da cultura, quando o índice de área foliar foi menor. Maior intervalo entre irrigações ou chuva diminuiu o fluxo de calor latente. A cobertura vegetal é preponderante no consumo da energia disponível na vegetação em forma de calor latente.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHKTORAB, H. et al. Energy balance determinations close to the soil surface using a micro-Bowen ratio system. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdan, v. 46, p. 259-274, 1989.
- BALDOCCHI, D. D. et al. Influence of water stress on the diurnal exchange of mass and energy between the atmosphere and a soybean canopy. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 543-548, 1983.
- BROWN, K. W.; COVEY, W. The energy-budget evaluation of the micrometeoro-logical transfer processes within a cornfield. **Agricultural Meteorology**, Amsterdan, v. 3, p. 73-96, 1966.
- COSTA, J. A. **Características dos estádios de desenvolvimento da soja**. Campinas, Fundação Cargill, 1982. 30 p.
- DENMEAD, O. T. Plant physiological methods for studying evapotranspiration: problems of telling the forest from the trees. **Agricultural Water Management**, Amsterdan, v. 8, p. 167-189, 1984.
- DORAISWAMY, P. C.; ROSENBERG, N. J. Reflectant induced modification of soybean canopy radiation balance. I, Preliminary tests with a kaolinite reflectant. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, p. 224-228, 1974.
- FRITSCHEN, L. J. Evapotranspiration rates of field crops determined by de Bowen ratio method. **Agronomy Journal**, Madison, v. 58, p. 339-342, 1966.
- FUCHS, M.; TANNER, C. B. Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometry. **Agricultural Meteorology**, Amsterdan, v. 7, p. 329-334, 1970.
- ITIER, B.; CELLIER, P.; RIOU, C. Actual evapotranspiration measurement by a simplified aerodynamic system. **Advances in Evapotranspiration**, Proceedings of the National Conference on Advances in Evapotranspiration, Chicago, ASAE Publication 14-85, p. 201-215, 1985.
- KONDO, J.; SAIGUSA, N.; SATO, T. A model and experimental study of evaporation from bare soil surfaces. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 31, p. 304-312, 1992.
- 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 an Forest Meteorology**, Amsterdan, v. 82, p. 171-193, 1996.
- McILROY, I. C. An instrument for continuous recording of natural evaporation. **Agricultural Meteorology**, Amsterdan, v. 9, p. 93-100, 1971.
- PEREZ, P. J. et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdan, v. 97, p. 141-150, 1999.

PERRIER, A. Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles III. Évapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. **Annuaire Agronomique**, Paris, v. 26, n. 2, p. 229-243, 1975.

PIERI, P.; FUCHS, M. Comparison of Bowen ratio and aerodynamic estimates of evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 49, p. 243-256, 1990.

POLAVARAPU, R. J. Some studies of sensible and latent heat fluxes at Waltair, southeastern coast of India. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 5, p. 254-268, 1968.

REVHEIM, K. J. A.; JORDAN, R. B. Precision of evaporation measurements using the Bowen ratio. **Boundary-Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 10, p. 97-111, 1976

SINCLAIR, T. R.; ALLEN, L. H.; LEMON, E. R. An analysis of errors in the calculation of energy flux densities above vegetation by a Bowen ratio profile method. **Boundary-Layer Atmosphere**, v. 8, p. 129-139, 1975.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Roma, FAO, 1990. 45 p.

SPITTLEHOUSE, D. A.; BLANCK, T. A. Evaluation of the Bowen ratio/energy balance method for determining forest evapotranspiration. **Atmosphere-Oceans**, Downsview, v. 18, p. 98-116, 1980.

TANNER, C. B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. **Soil Science Society of American Proceedings**, Madison, v. 24, p. 1-9, 1960.

VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L. Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 17, p. 330-338, 1978.