

## BALANÇO DE ENERGIA EM CULTURA DE MILHO<sup>1</sup>

### ENERGY BALANCE IN MAIZE CROP

Gilberto Rocca da Cunha<sup>2</sup>, Homero Bergamaschi<sup>3</sup>, Moacir Antonio Berlato<sup>3</sup> e Ronaldo Matzenauer<sup>4</sup>

#### RESUMO

O balanço de energia - Método da razão de Bowen - tem sido amplamente utilizado para a quantificação de fluxos de propriedades físicas na camada de ar próxima à superfície do solo, particularmente em análise micrometeorológica de sistemas cultivados. Neste sentido, foram determinados os componentes do balanço de energia para alguns dias do ciclo de desenvolvimento de uma cultura de milho, cv. SAVE 342, considerando estádios de desenvolvimento e condições de demanda evaporativa da atmosfera diferenciados, durante a estação de crescimento 1986/87, em Taquari, RS (29°48'S, 51°59'W e 76 m de altitude). Com instrumental instalado no interior de uma área experimental de 81 x 81 m, foram feitas medições diurnas, em intervalos de 30 minutos, envolvendo: saldo de radiação (Rn), fluxo de calor no solo (S) e de perfis de gradientes psicrométricos, com termopares de cobre-constantan. A partir das medições e com base no cálculo da razão de Bowen foram determinados os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H) na atmosfera. Em média, Rn foi fracionado em 80% para LE, 14% para H e 6% para S, tendo este fracionamento se diferenciado ao longo do desenvolvimento da cultura, de forma inversa, para H e S, e de forma direta para LE, com o aumento do índice de área foliar (IAF).

**Palavras-chave:** fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente, fluxo de calor no solo, razão de Bowen.

#### SUMMARY

The energy balance - Bowen ratio method - has been largely applied for quantifying physical properties fluxes in the atmospheric boundary layer, particularly in cropping system micrometeorology analyses. The energy balance componentes were determined in a maize crop, cv. SAVE-342, during some

---

<sup>1</sup> Extraído da dissertação de mestrado apresentada pelo primeiro autor à UFRGS-Faculdade de Agronomia, em agosto de 1988.

<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Agr.<sup>o</sup> Dr., EMBRAPA-Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, Cx. Postal 569, CEP 99001-970 Passo Fundo, RS. Bolsista do CNPq.

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> Agr.<sup>o</sup> Dr., UFRGS-Faculdade de Agronomia, Cx. Postal 776, CEP 90001-970, Porto Alegre, RS. Bolsista do CNPq.

<sup>4</sup> Eng<sup>o</sup> Agr.<sup>o</sup>, Dr. Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), Rua Gonçalves Dias, 570. CEP-90570-001, Porto Alegre, RS. Bolsista do CNPq.

days at different crop development stages and atmospheric demand conditions in the 1986/87 growing season in Taquari, RS (29°48'S, 51°59'W and altitude 46 m). Equipment was placed within a 81 x 81 m experimental area and the following readings were taken at 30 minute intervals, during day time: net radiation (Rn), soil heat flux (S), and psychrometric gradient profiles measured with copper-constantan thermocouples. The latent heat flux (LE) and the sensible heat flux (H) in the atmosphere were calculated based on the above measurements and on Bowen ratio. On average, Rn was partitioned 80% for LE, 14% for H and 6% for S. The pattern of Rn partition was related to the increase of leaf area index (LAI) in a direct way for LE and in a inverse way for H and S.

**Key words:** sensible heat flux, latent heat flux, Bowen ratio.

## INTRODUÇÃO

A quantificação de fluxos de propriedades físicas na camada de ar próxima à superfície do solo é um dos principais objetivos de análise mi-crometeorológica em sistemas cultivados.

Uma lavoura consiste em um sistema aberto, onde há constante troca de matéria e energia com o meio, no caso, o solo e a camada limite da atmosfera.

Nesse contexto, o princípio de conservação de energia tem sido empregado em diversos estudos, conforme se observa, entre outros, em TANNER (1960), VILLA NOVA (1973), PERRIER et al. (1976), PEDRO JÚNIOR (1977), ANDRÉ & VISWANADHAM (1986), NISHIMURA et al. (1986), ALFONSI et al. (1986), PRATES et al. (1987), FONTANA (1987) e BERGAMASCHI et al. (1988), visando, principalmente, através da quantificação do fluxo turbulento de calor latente na atmosfera, a estimativa de evapotranspiração de culturas em intervalos de tempo inferior ou igual a um dia. Para tal, tem sido utilizada a equação simplificada de balanço de energia em um sistema cultivado, formada pelos componentes saldo de radiação (Rn), fluxos turbulentos de calor latente (LE) e sensível (H) na atmosfera e pelo fluxo de calor sensível no solo (S) ( $Rn + LE + H + S = 0$ ), cuja solução tem sido obtida através da razão H/LE, proposta por BOWEN (1926), determinada via medições de gradientes psicrométricos sobre a cultura.

Deste modo, o presente trabalho teve por objetivo quantificar os componentes do balanço de energia - método da Razão de Bowen - em diferentes estádios de desenvolvimento de uma cultura de milho e em condições diferenciadas de demanda evaporativa atmosférica.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Estação Experimental Fitotécnica de Taquari, pertencente à Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado do Rio Grande do Sul-RS, durante o ano agrícola 1986/87, situada no município de Taquari, (latitude: 29°48'S , longitude: 51°49'W e altitude de 76 m.

O clima da região é do tipo Cfa (subtropical úmido de verão quente), pela classificação de Köppen, e o solo da área pertence à unidade de mapeamento Rio Pardo, classificado como laterítico bruno-avermelhado distrófico.

Uma parcela experimental de 6561 m<sup>2</sup> (81 m x 81 m), cultivada com o milho híbrido SAVE-342, foi semeada em 21 de novembro de 1986, com espaçamento entre linhas de 0,90 m em uma população, ajustada via desbaste, de 50.000 plantas/ha.

A cultura de milho recebeu adubação (base e cobertura) conforme análise de solo e o controle de plantas daninhas foi feito pelo uso de herbicidas em pré-emergência e, posteriormente, através de capinas.

Durante o transcorrer do experimento, foram realizadas medições micrometeorológicas, no interior e sobre a cultura, e de disponibilidade hídrica no solo, para alguns dias do ciclo de desenvolvimento da cultura. A representação esquemática da distribuição vertical dos instrumentos na unidade experimental pode ser visualizada na Figura 1.

As determinações micrometeorológicas foram feitas em intervalos espaçados de 30 minutos, durante um período compreendido entre 7 h e 18 h 30 min, com os sensores de sinal elétrico acoplados a um sistema de medição, composto de uma chave comutadora e um milivoltímetro, com resolução de 0,01 mV, envolvendo as determinações de temperatura de solo, utilizando-se pares termo-elétricos de cobre-constantan (22 AWG), localizados a 0,225 m da linha de plantas, nas profundidades de 0,05; 0,10; 0,30 e 0,60 m; umidade de solo, com três conjuntos de tensiômetros de manômetro de Hg, instalados nas profundidades de 0,075; 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75; 0,90; 1,05 e 1,20 m; fluxo de calor no solo, através de uma placa medidora de fluxo de calor em solo (Middleton), com resposta de 16,8 mV por cal.cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>, localizada a 0,225 m da fileira de plantas e na profundidade de 0,01 m; temperatura de ar, com psicrometros de pares termo-elétricos de cobre-constantan (22 AWG) sendo um seco e um umedecido por uma gaze embebida em água destilada, instalados em micro-abrigos de PVC branco nos níveis, correspondentes a 0,05 m; 0,25 h; 0,50 h; h; h + 0,30 m; h + 0,90 m e h + 2,00m acima do solo, sendo h a altura da cultura; e saldo de radiação: utilizando-se um saldo-radiômetro (Phillip Schenk), com resposta de 6,138 mV por cal.cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>, instalado a uma altura de 4 m acima do solo.

A partir das medições instantâneas de saldo de radiação (Rn), fluxo de calor no solo (S), diferenças de temperaturas entre os termopares secos ( $\Delta T$ ) e úmidos ( $\Delta TU$ ), instalados nos níveis h e h + 0,9 m, foram calculados os componentes do balanço de energia na cultura, considerando-se a equação simplificada de balanço de energia e a razão de Bowen (B = H/LE), conforme segue:

- Fluxo de calor latente na atmosfera (LE)

$$LE = -\frac{Rn + S}{1 + B} \quad (1)$$

- Fluxo de calor sensível na atmosfera (H)

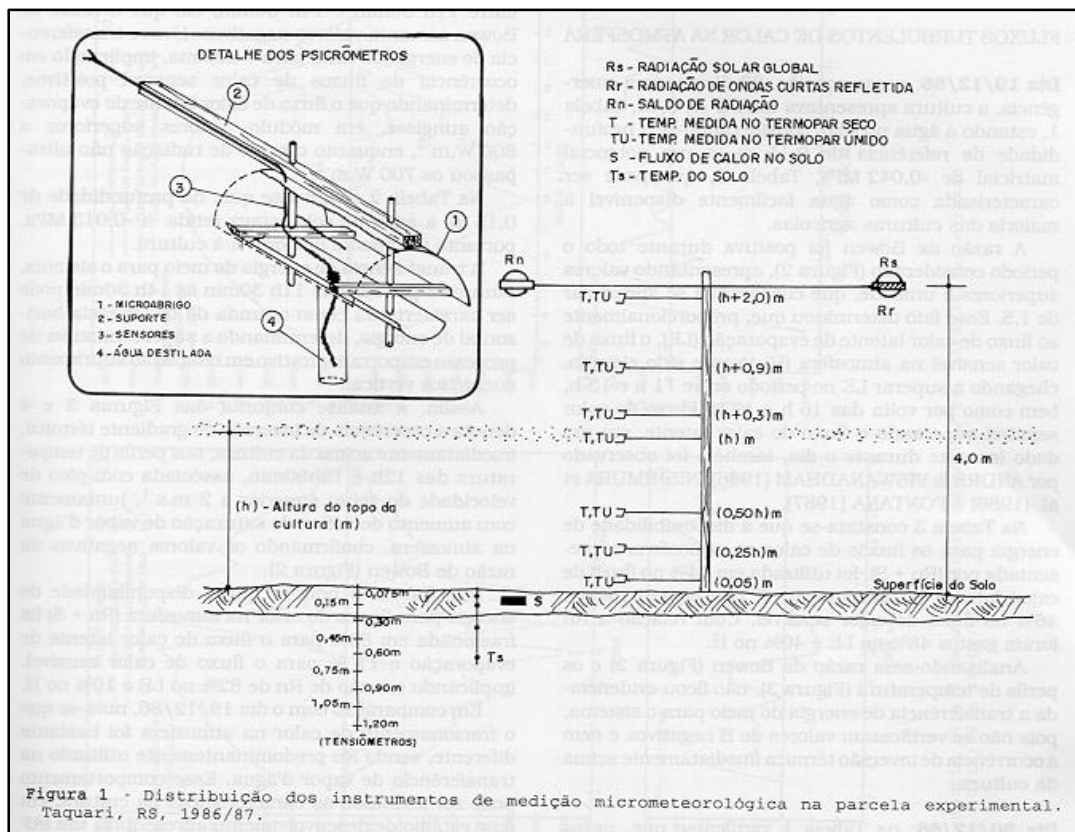
$$H = -(Rn + LE + S) \quad (2)$$

A razão de Bowen (B) foi calculada a partir da equação apresentada por WEBB (1965):

$$B = \left( \frac{s + g}{g} \cdot \frac{\Delta TU}{\Delta T} - 1 \right)^{-1} \quad (3)$$

sendo  $g$  constante psicrométrica ( $0,66 \text{ mb} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) e  $s$  a tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água no ar ( $\text{mb} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ), em função de temperatura média úmida ( $^\circ\text{C}$ ), entre os dois níveis considerados na obtenção dos gradientes psicrométricos.

As determinações biológicas, nos dias correspondentes às medições micrometeorológicas, compreenderam a identificação dos estádios de desenvolvimento da cultura (escala de Hanway, 1966; descrita por GOMES & KARAZAWA, 1982) e medições de índice de área foliar (IAF), feitas em três segmentos de três plantas ( $0,59 \text{ m}^2$ ), marcadas no início do experimento, sendo a superfície de uma folha qualquer obtida pelo produto do comprimento pela maior largura, multiplicado por 0,75.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os componentes do balanço de energia, para seis dias do ciclo de desenvolvimento da cultura de milho, encontram-se na Tabela 1. Observa-se que houve variação no aporte de energia, representado pelo saldo de radiação, que ficou compreendido entre  $12,2 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e  $18,1 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , juntamente com as variações de desenvolvimento da cultura, cujo IAF variou entre 0,42 e 3,15. A interação entre esses fatores com a disponibilidade de umidade no solo e com as condições atmosféricas implicaram em fracionamento diferencial do saldo de radiação.

Tabela 1 - Estádio de desenvolvimento, número de dias após a emergência, índice de área foliar e componentes do balanço de energia em uma cultura de milho, cv. SAVE-342. Taquari, RS, 1986/87

Data	Estádio <sup>1</sup>	DAE	IAF	Rn	LE	H	S
(MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> )							
19/12/86	1,5	22	0,42	14,6021	-7,0697	-5,9104	-1,6220
30/12/86	2,0	33	1,21	17,9217	-14,6246	-1,7774	-1,5197
28/01/87	4,0	62	3,15	17,2693	-14,7774	-1,5835	-0,9084
12/02/87	6,0	77	2,65	18,1265	-16,5327	-1,1256	-0,4682
19/02/87	7,0	84	2,53	12,1585	-11,1504	-0,6569	-0,3512
26/02/87	9,0	91	2,23	17,3566	-14,3530	-2,3770	-0,6266

<sup>1</sup> Escala de Hanway (1966), descrita por GOMES & KARAZAWA (1982); DAE - número de dias após a emergência; IAF - índice de área foliar; Rn - saldo de radiação; LE - fluxo de calor latente de evaporação; H - fluxo de calor sensível e S - fluxo de calor no solo.

## FLUXOS TURBULENTOS DE CALOR NA ATMOSFERA

**Dia 19/12/86:** nessa ocasião, 22 dias após a emergência, a cultura apresentava um IAF de 0,42, Tabela 1, estando a água no solo, considerando-se a profundidade de referência de 0,15 m, a um potencial matricial de -0,042 MPa, Tabela 2, que pode ser caracterizada como água facilmente disponível à maioria das culturas agrícolas.

A razão de Bowen foi positiva durante todo o período considerado (Figura 2), apresentando valores superiores à unidade, que chegaram a se aproximar de 1,5. Esse fato determinou que, proporcionalmente ao fluxo de calor latente de evaporação (LE), o fluxo de calor sensível na atmosfera (H) tivesse sido elevado, chegando a superar LE no período entre 11 h e 13 h, bem como por volta das 16 h e 17 h. Fluxo de calor sensível superando o fluxo de calor latente, em um dado instante durante o dia, também foi observado por ANDRÉ & VISWANADHAM (1986); NISHIMURA et al. (1986) e FONTANA (1987).

Na Tabela 3 constata-se que a disponibilidade de energia para os fluxos de calor na atmosfera, representada por  $(R_n + S)$ , foi utilizada em 54% no fluxo de calor latente de evaporação e, conseqüentemente, 46% no fluxo de calor sensível. Com relação a  $R_n$  foram gastos 48% no LE e 40% no H.

Analisando-se a razão de Bowen (Figura 2) e os perfis de temperatura (Figura 3), não ficou evidenciada a transferência de energia do meio para o sistema, pois não se verificaram valores de B negativos e nem a ocorrência de inversão térmica imediatamente acima da cultura.

**Dia 30/12/86:** na Tabela 1 verifica-se que, nessa data, passavam-se 33 dias da emergência, estando a cultura com um IAF de 1,21.

Pela Figura 2 constata-se que a razão de Bowen foi positiva durante a maior parte do dia, porém suas magnitudes foram inferiores às obtidas em 19/12/86, não sendo verificados valores superiores à unidade. Portanto, em nenhum instante o fluxo de calor sensível foi superior ao fluxo de calor latente de evaporação.

Destaca-se, na Figura 2, o período compreendido entre 11h 30min e 14h 30min, em que a razão de Bowen assumiu valores negativos. Houve transferência de energia do meio para o sistema, implicando em ocorrência de fluxos de calor sensível positivos, determinando que o fluxo de calor latente de evaporação atingisse, em módulo, valores superiores a  $800 \text{ W.m}^{-2}$ , enquanto o saldo de radiação não ultrapassou os  $700 \text{ W.m}^{-2}$ .

Na Tabela 2 observa-se que, na profundidade de 0,15 m, a água no solo estava retida a -0,013 MPa, portanto facilmente disponível à cultura.

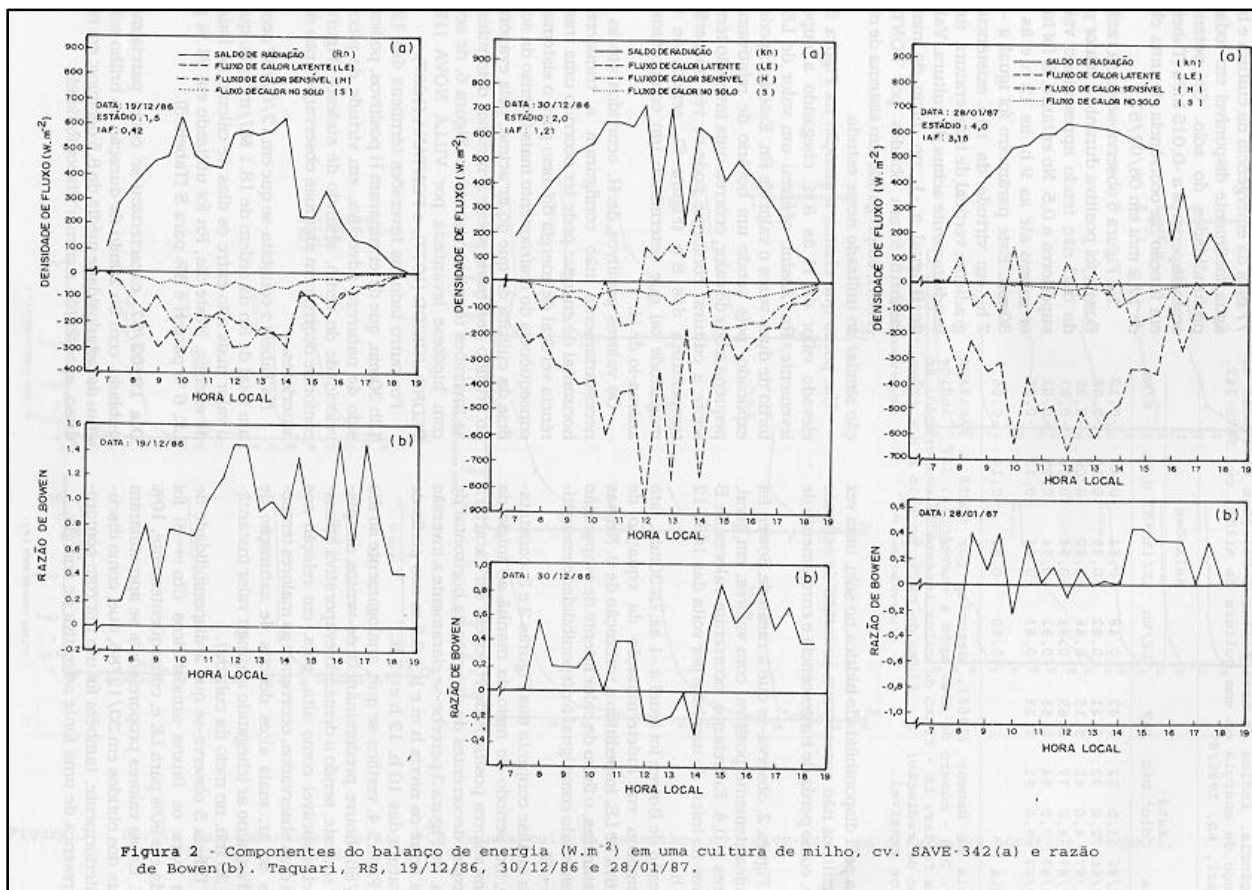


Tabela 2 - Potencial matricial da água no solo (MPa) em diferentes profundidades. Milho, cv. SAVE-342. Taquari, RS, 1986/87

Data	Profundidade (m)								
	0,075	0,150	0,300	0,450	0,600	0,750	0,900	1,050	1,200
19/12/86	<-0,070	-0,042	-0,036	-0,013	-0,010	-0,008	-0,007	-0,007	-0,006
30/12/86	-0,039	-0,013	-0,007	-0,006	-0,005	-0,004	-0,006	-0,004	-0,004
28/01/87	<0,070	<0,070	-0,021	-0,029	-0,015	-0,012	-0,009	-0,008	-0,007
12/02/87	-0,015	-0,011	-0,010	-0,006	-0,005	-0,006	-0,008	-0,010	-0,010
19/02/87	-0,011	-0,024	-0,022	-0,013	-0,010	-0,010	-0,010	-0,012	-0,012
26/02/87	-0,012	-0,021	-0,029	-0,021	-0,017	-0,016	-0,015	-0,014	-0,014

A transferência de energia do meio para o sistema, durante o período das 11h 30min às 14h 30min pode ser caracterizada como oriunda da divergência horizontal de energia, determinando a superestimativa do processo evapotranspirativo em relação ao suprimento energético vertical.

Assim, a análise conjunta das Figuras 3 e 4 denota a ocorrência de inversão do gradiente térmico, imediatamente acima da cultura, nos perfis de temperatura das 12h e 12h30min, associada com pico de velocidade do vento superior a  $2 \text{ m.s}^{-1}$ , juntamente com aumento de déficit de saturação de vapor d'água na atmosfera, confirmando os valores negativos da razão de Bowen (Figura 2).

Pela Tabela 3 nota-se que a disponibilidade de energia para fluxos de calor na atmosfera ( $R_n + S$ )

foi fracionada em 89% para o fluxo de calor latente de evaporação e 11 % para o fluxo de calor sensível, implicando em uso de  $R_n$  de 82% no LE e 10% no H.

Em comparação com o dia 19/12/86, nota-se que o fracionamento de calor na atmosfera foi bastante diferente, sendo  $R_n$  predominantemente utilizado na transferência de vapor d'água. Esse comportamento pode ser atribuído às características da cultura, em cujo estágio de desenvolvimento apresentava um IAF de 1,21, cerca de três vezes o verificado em 19/12/86 (Tabela 1).

**Dia 28/01/87:** embora possa ter havido uma certa restrição quanto à disponibilidade de água no solo, considerando que a água estava retida a potenciais inferiores a -0,06 MPa na profundidade referência (0,15 m) (Tabela 2), constata-se que, nas profundidades superiores a 0,30 m, havia água facilmente disponível à cultura. Considerando o caráter dinâmico do movimento de água no solo, pode-se inferir que a evapotranspiração não foi restringida pela disponibilidade hídrica no solo, uma vez que a cultura não apresentava sintomas de estresse hídrico, como perda de turgescência e enrolamento de folhas.

Na Figura 2, observa-se que a razão de Bowen foi predominantemente positiva, com valores, em geral, inferiores a 0,4. Entretanto, ocorreram valores de B negativos no início da manhã e por volta das 10 h, 12 h e 13 h.

A razão de Bowen foi igual a -1 às 7h 30min, fato que implicou em indeterminação da equação de estimativa de LE, impedindo a utilização de B. Nessas circunstâncias, o fluxo de calor latente de evaporação foi considerado como igual à disponibilidade energética ( $R_n + S$ ).

Pela análise conjunta das Figuras 2 e 3, constata-se que, no período do meio da manhã ao início da tarde, os valores positivos de H podem ser caracterizados como decorrentes da divergência horizontal de energia. Na Figura 3 percebe-se claramente a inversão térmica entre os níveis h m e h + 0,9 m nos perfis de temperatura das 10 h, 12 h e 13 h.

Na Figura 4, verifica-se que, analogamente ao dia 30/12/86, houve predominância de ventos do quadrante sudeste, sendo a demanda evaporativa atmosférica classificável como alta, pois, em relação aos demais dias observados, ocorreram as maiores temperaturas do ar, mais altos déficits de saturação de vapor d'água no ar (chegando a atingir valor instantâneo de 35 mb, no meio da cultura). Na Tabela 5 observa-se que a disponibilidade de energia para os fluxos atmosféricos ( $R_n + S$ ) foi utilizada em 90% para LE e, conseqüentemente, 10% para H. Esses valores proporcionais se aproximaram bastante dos obtidos em 30/12/86, que, como discutido anteriormente, também foi um dia com comprovada presença de uma fonte advectiva de energia.



**Dia 12/02/87:** nesta data, passavam-se 77 dias da emergência da cultura e havia água facilmente disponível em todas as profundidades do solo. Os potenciais eram superiores a -0,015 MPa (Tabela 2), em função da ocorrência de uma chuva de 17,2 mm em 08/02/87.

Na Figura 5 observa-se que a razão de Bowen foi positiva durante a maior parte do dia, não tendo apresentado valores superiores a 0,5. No entanto, B foi inferior a zero até as 9 h, às 12 h e às 13h 30min. Este parâmetro foi igual a -1 às 7 h, em virtude da não existência de gradiente vertical de temperatura úmida imediatamente acima da cultura. Valores de B igual a -1, no início da manhã, também foram obtidos por FONTANA (1987), empregando um sistema de medição similar ao utilizado neste estudo.

**Tabela 3 - Estádio de desenvolvimento, número de dias após a emergência, índice de área foliar e relações derivadas do balanço de energia em uma cultura de milho. cv. SAVE-342. Taquari, RS, 1986/87**

Data	Está- dio <sup>1</sup>	DAE	IAF	Relações			
				LE/Rn	LE/(Rn+S)	H/Rn	S/Rn
19/12/86	1,5	22	0,42	-0,48	-0,54	-0,40	-0,12
30/12/86	2,0	33	1,21	-0,82	-0,89	-0,10	-0,08
28/01/87	4,0	62	3,15	-0,86	-0,90	-0,09	-0,05
12/02/87	6,0	77	2,65	-0,91	-0,94	-0,06	-0,03
19/02/87	7,0	84	2,53	-0,92	-0,94	-0,05	-0,03
26/02/87	9,0	91	2,23	-0,83	-0,86	-0,13	-0,04
Média				-0,80	-0,84	-0,14	-0,06

<sup>1</sup> Escala de Hanway (1966), descrita por GOMES & KARAZAWA (1982); DAE - número de dias após a emergência; IAF - índice de área foliar; LE - fluxo de calor latente de evaporação; Rn - saldo de radiação; S - fluxo de calor no solo e H - fluxo de calor sensível.

Um ponto que chama a atenção na Figura 5 é o elevado valor de H às 8 h, chegando a superar, levemente, Rn. Assim, ocorreu um valor de LE em torno de duas vezes o valor de Rn. Este fato pode ser explicado, pois sendo um horário de relativamente pequena troca de calor, ocorreu uma inversão térmica sobre a cultura, conforme pode-se ver no perfil de temperatura das 8 h (Figura 6), sendo, de uma magnitude tal que determinou um comportamento anômalo de H.

Os valores positivos de H, ocorridos até às 9 h, necessariamente não configuram a transferência horizontal de energia; pode ter ocorrido uma transferência vertical de energia do meio para o sistema, em consequência do resfriamento mais intenso da superfície da cultura do que do ar acima, pela evaporação do orvalho que havia sobre a mesma, determinando as inversões térmicas visíveis na Figura 6, de acordo com hipótese levantada por VILLA NOVA (1973), PEDRO JÚNIOR (1977), e FONTANA (1987).

Por outro lado, as inversões térmicas das 12 h e 13h 30min, que determinaram H positivos, podem ter sido de natureza advectiva, em virtude de picos de velocidade do vento, oriundo de sudeste

(Figura 7), conforme ocorreu em algumas observações nas datas anteriores.

Na Tabela 1 constata-se que em 12/02/87 ocorreu um total de  $R_n$  da ordem de  $18,1 \text{ MJ/m}^2/\text{dia}$ , que foi o valor mais alto entre os dias de cálculo do balanço de energia. Neste dia,  $R_n$  foi utilizado em 91 % para LE, 6 % para H e 3% para S (Tabela 3).

**Dia 19/02/87:** caracterizou-se como parcialmente nublado, com 3h 20min de duração do brilho solar e grau de nebulosidade média de 8,5 décimos; em razão disso, apresentou a menor disponibilidade energética entre aqueles em que foi determinado o balanço de energia (Tabela 1), com um  $R_n$  de  $12,2 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ .

No tocante à disponibilidade hídrica no solo, constata-se, pela Tabela 2, que havia água facilmente disponível à cultura, com potenciais matriciais superiores a  $-0,024 \text{ MPa}$ .

Observou-se que a razão de Bowen às 7 h foi igual a  $-1$ , implicando em indeterminação da equação de estimativa de LE. Este fato ocorreu em virtude de não ter sido detectado gradiente de temperatura úmida.

Entre as 12h 30min e 14 h ocorreram valores de B negativos, indicando transferência de calor sensível do meio para o sistema, fato que ocasionou módulos instantâneos de LE superiores a  $900 \text{ W.m}^{-2}$  (Figura 6). Estes pontos, em que LE superou  $R_n$ , atestam, qualitativamente, a divergência horizontal de energia. Na Figura 6 observa-se inversão térmica sobre a cultura às 14 h e pela Figura 7 constata-se que ocorreram picos de velocidade do vento, nesta faixa de horário, a exemplo dos casos anteriormente observados.

Um aspecto que se constata na Figura 5 é que, em diversos horários, B se igualou a zero, implicando em inexistência de fluxo de calor sensível. Os valores de B igual a zero foram consequência de uma isoterмия verificada imediatamente acima da cultura (perfis de temperatura das 8 h, 17 h e 18 h, na Figura 6). Valores de B igual a zero também foram observados por FONTANA (1987), principalmente nos períodos próximos ao início da manhã e do meio para o final da tarde.

Na Tabela 3 verifica-se que a disponibilidade energética para fluxos atmosféricos ( $R_n + S$ ) foi utilizada na mesma proporção que no dia 12/02/87, ou seja, 94% para LE e 6% para H.

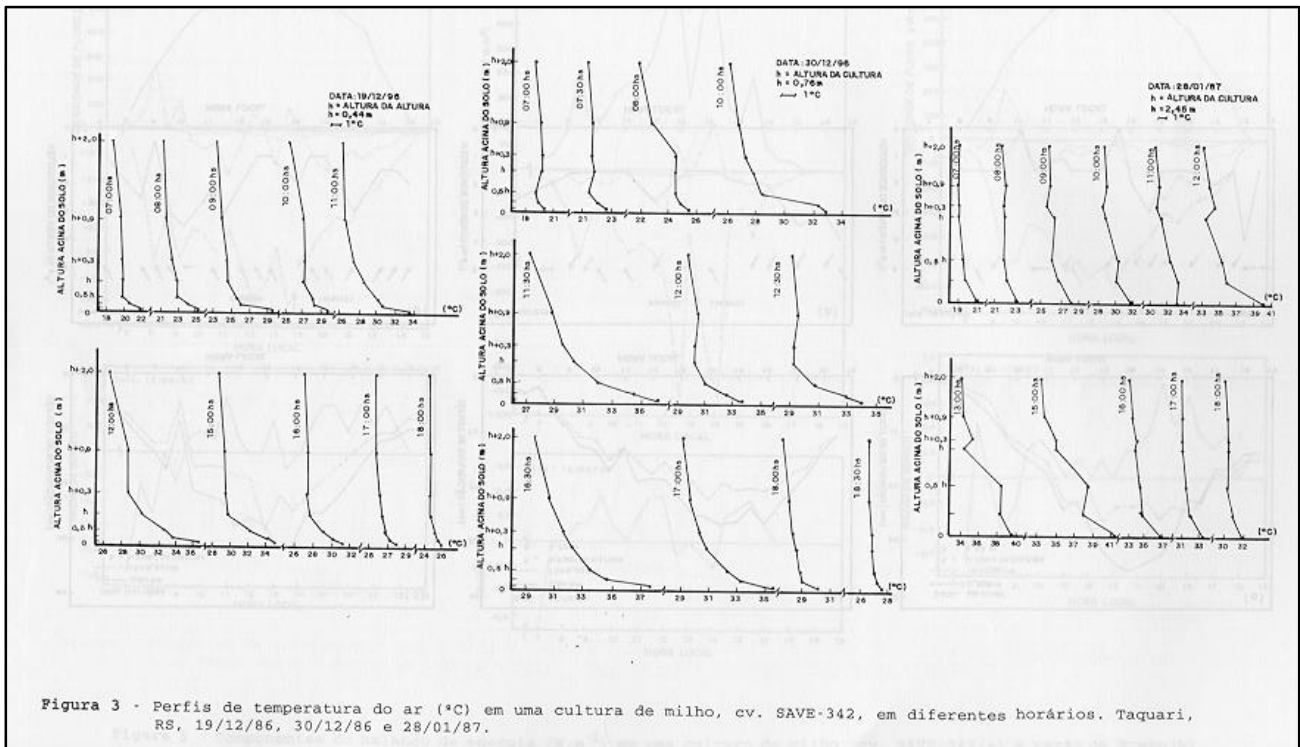


Figura 3 - Perfis de temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) em uma cultura de milho, cv. SAVE-342, em diferentes horários. Taquari, RS, 19/12/86, 30/12/86 e 28/01/87.

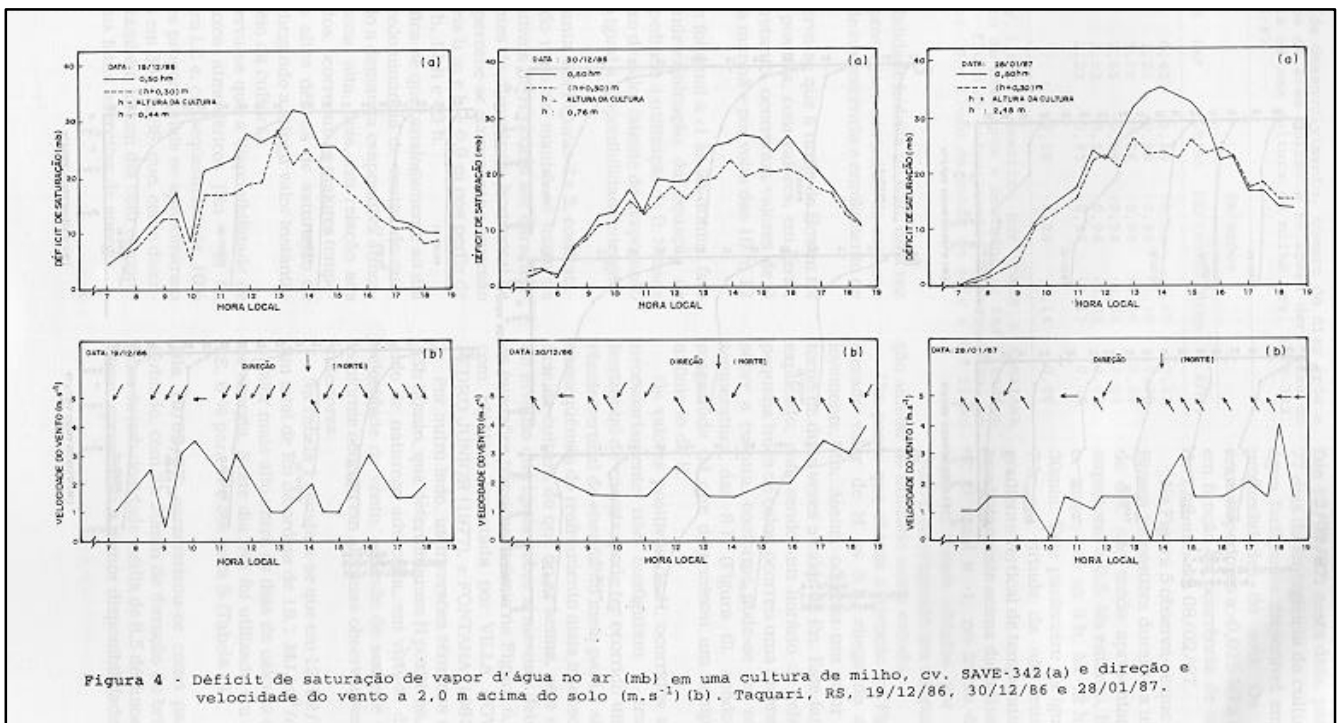
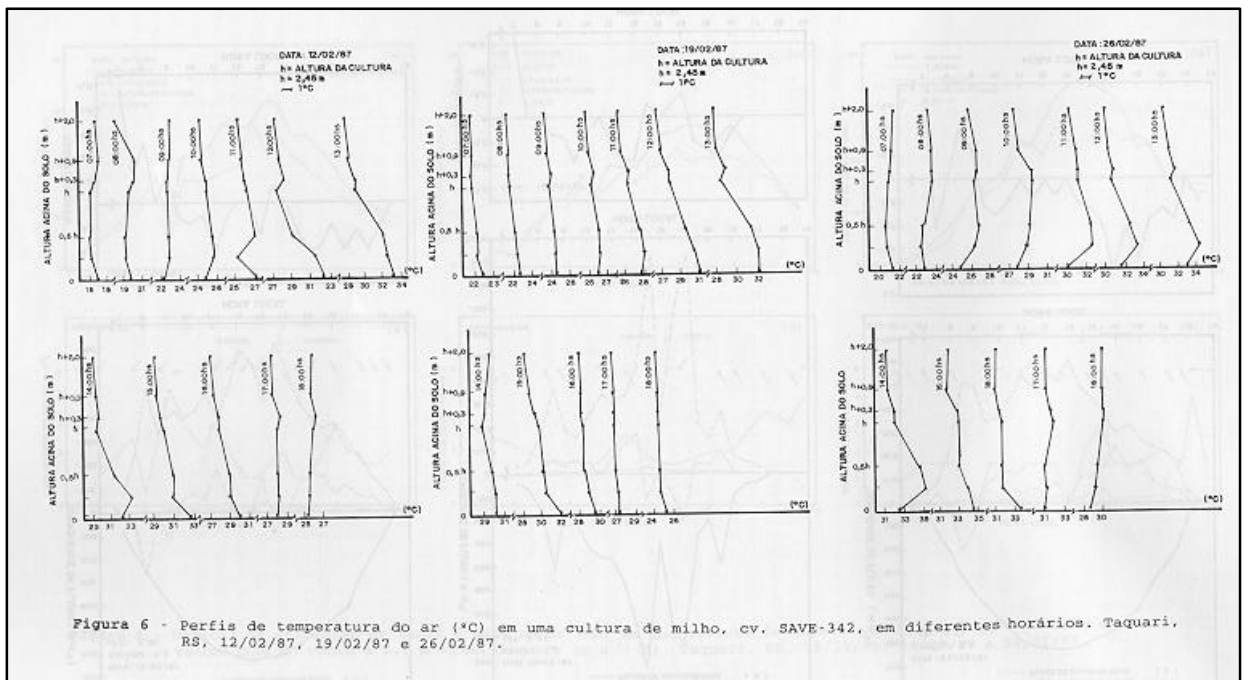
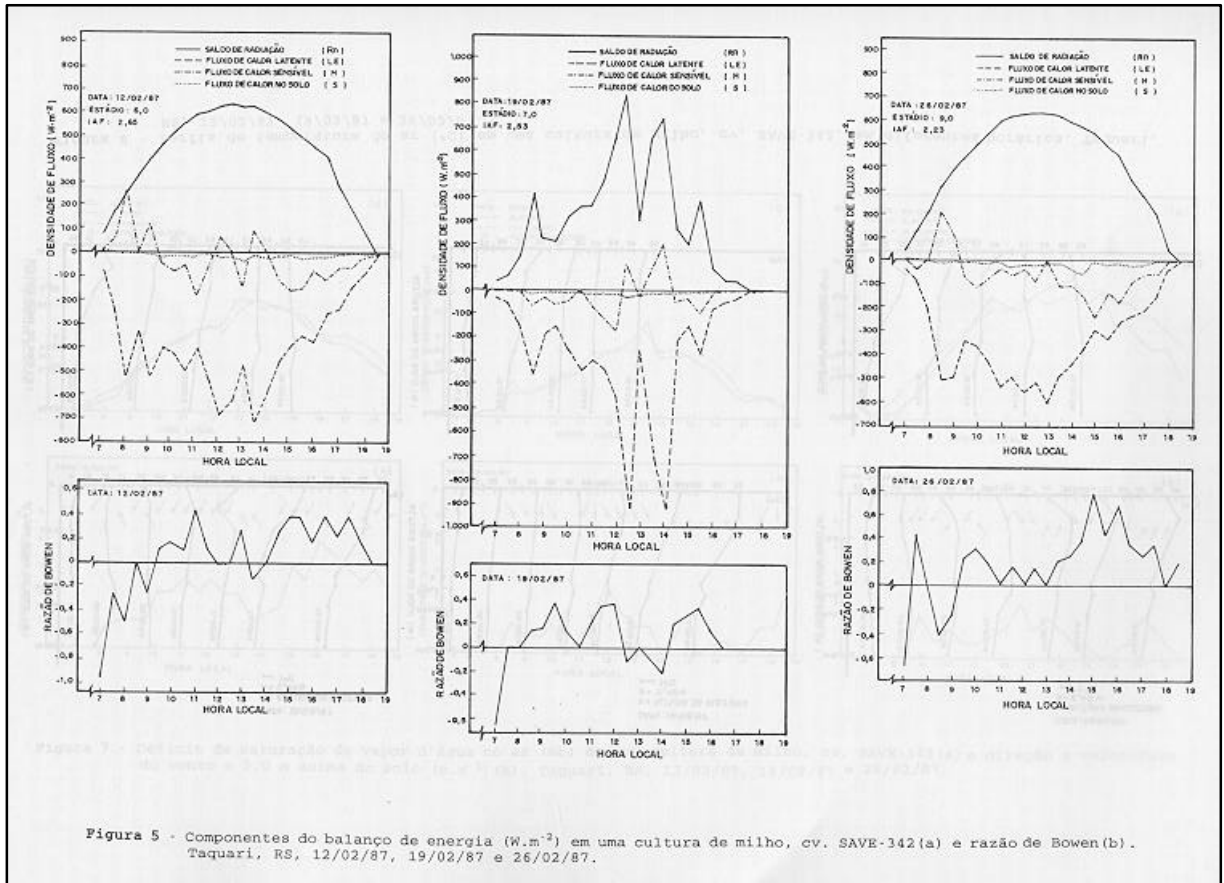
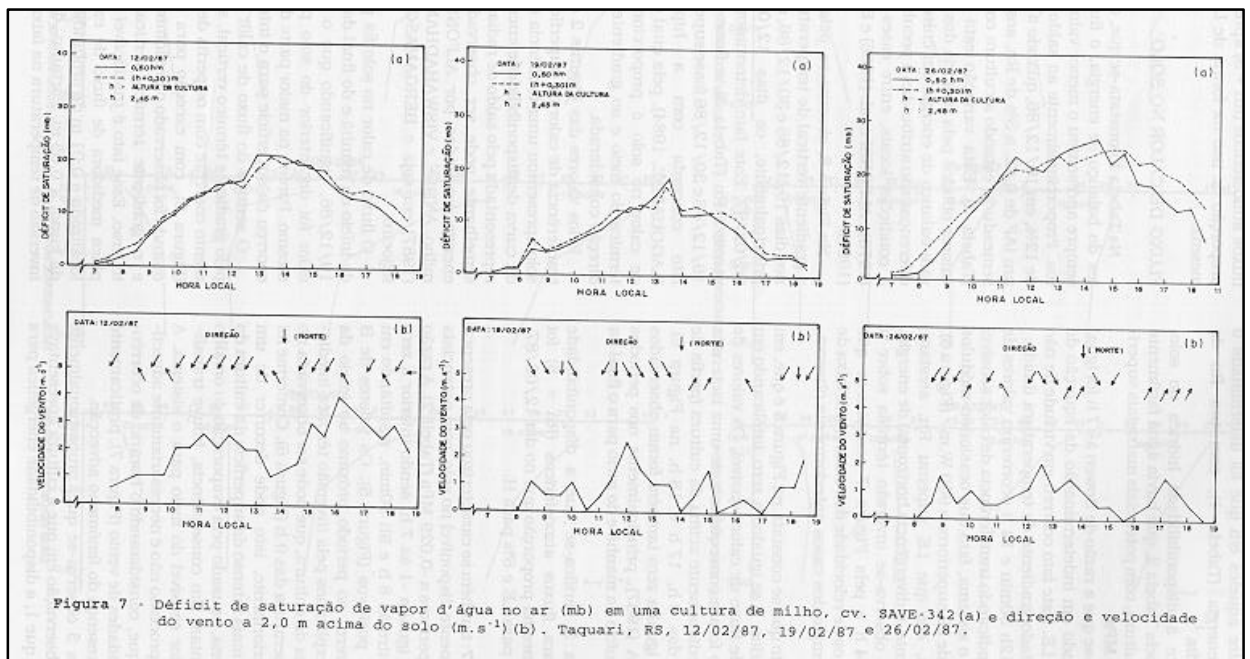


Figura 4 - Déficit de saturação de vapor d'água no ar (mb) em uma cultura de milho, cv. SAVE-342(a) e direção e velocidade do vento a 2,0 m acima do solo ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (b). Taquari, RS, 19/12/86, 30/12/86 e 28/01/87.





**Dia 26/02/87:** também se caracterizou pela presença de água facilmente disponível no solo, com potenciais matriciais superiores a  $-0,029$  MPa (Tabela 2). A razão de Bowen foi igual a  $-1$  às 7 h, sendo inferior a zero no período entre às 8 h e 9h 30min, resultando em valores de H positivos (Figura 5). Os valores de B inferiores a zero, no período próximo ao início da manhã, são explicados pela inversão térmica imediatamente acima da cultura, que pode ser observada no perfil de temperatura das 9 h (Figura 6). Conforme foi referido anteriormente, isto pode decorrer de um resfriamento mais intenso da superfície da cultura do que do ar acima, causado pela evaporação do orvalho sobre as plantas. Em conseqüência, houve transferência de calor sensível do meio para o sistema. A origem deste processo não é necessariamente advectiva, uma vez que, considerando o horário de ocorrência e as velocidades de vento (Figura 7), praticamente se exclui a presença do fenômeno advecção.

Na Tabela 3 observa-se que, proporcionalmente aos dias de observação em que a cultura apresentava IAF maior do que 1, a disponibilidade energética para fluxos atmosféricos ( $R_n + S$ ) apresentou a sua menor proporção de uso na forma de LE somando 86% da mesma.

## FLUXO DE CALOR NO SOLO

Na Tabela 1 constata-se que, dentre os componentes do balanço de energia, o fluxo de calor no solo sempre apresentou o menor valor em termos absolutos. Proporcionalmente ao saldo de radiação, variou de 12%, em 19/12/86, quando a cultura apresentava um IAF de 0,42, a 3% de  $R_n$ , aos 77 e 84 dias após a semeadura, estando a cultura com IAF superior a 2,5 (Tabela 3). Esta variação está dentro da faixa de valores obtidos pela maioria dos autores que realizaram balanço de energia em culturas agrícolas, cujas

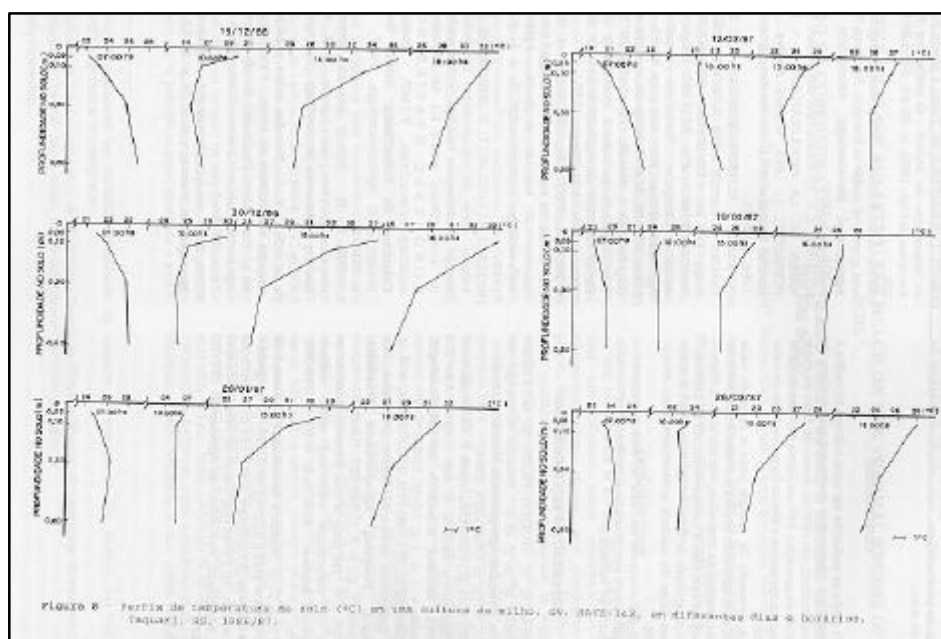
diferenças são atribuídas a peculiaridades associadas a condições locais, entre esses KOWAL e KASSAM (1973), ALFONSI et al. (1986) e BERGAMASCHI et al. (1988).

Na Figura 8, observa-se, pela curva das 15 h que o gradiente vertical de temperatura no solo foi maior nos dias 19/12/86 e 30/12/86, em comparação com, principalmente, os dias 12/02/87, 19/02/87 e 26/02/87. Este fato determinou que, proporcionalmente a  $R_n$  (Tabela 3), o fluxo de calor no solo em 19/12/86 e 30/12/86 fosse superior aos demais dias; isto concorda com a hipótese de Fourier (LAGOUARDE, 1984), pela qual o fluxo unidirecional de calor no solo é proporcional à condutividade térmica do meio e ao gradiente de temperatura na direção considerada.

Pelos valores das Figuras 2 e 5 verifica-se que a transferência de calor da superfície para o interior do solo apresentou uma tendência de acompanhamento da curva de disponibilidade energética na superfície, representada pelo saldo de radiação. Comportamento semelhante pode ser observado nos balanços de energia realizados por ALFONSI et al. (1986) em milho, ANDRÉ e VISWAHADHAM (1986) e FONTANA (1987) em soja e BERGAMASCHI et al. (1988) em feijoeiro.

O fluxo de calor no solo foi positivo nos horários do início da manhã e do final da tarde, exceto no dia 19/12/86, significando que o sentido do fluxo de calor foi do interior do solo para a superfície do mesmo. Porém, na maior parte do dia o fluxo de calor ocorreu da superfície para o interior do solo.

O sentido do fluxo de calor no solo é governado pelo gradiente térmico vertical, sendo esse comportamento coerente com os perfis de temperatura no solo (Figura 8), com exceção para o horário das 18 h, quando foi observado o predomínio de fluxos positivos e o gradiente térmico vertical apresenta sentido inverso. Esse fato é justificável em decorrência de a placa medidora de fluxo de calor no solo estando localizada a 0,01 m de profundidade e o ponto inicial da curva a 0,05 m. Portanto, deve ter existido uma inversão de temperatura na faixa entre a superfície e 0,05 m de profundidade, com relação ao restante do perfil do solo.



## CONCLUSÕES

- O saldo de radiação em uma cultura de milho é utilizado, em proporções médias para o ciclo de desenvolvimento, em 80% na forma de fluxo de calor latente de evaporação, 14% na forma de fluxo de calor sensível na atmosfera e 6% na forma de fluxo de calor no solo.
- A demanda de energia para o fluxo de calor latente de evaporação supera a demanda para o fluxo de calor sensível na atmosfera, aumentando a diferença entre ambos com o desenvolvimento da cultura.
- A magnitude do fluxo de calor no solo e o índice de área foliar da cultura apresentam uma relação inversa.
- A transferência de calor no solo acompanha a disponibilidade energética na superfície, representada pelo saldo de radiação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSI, R. R., SANTOS FILHO, B. G., PEDRO JÚNIOR, M. J. P. et al. Balanço de energia em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21, n. 12, p. 1233-1235, 1986.
- ANDRÉ, R. G. B., VISWANADHAM, Y. Distribuição de energia numa cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Revista Brasileira de Meteorologia**, Brasília, v. 1, n. 1, p. 20-37, 1986.
- BERGAMASCHI, H., OMETTO, J. C., VIEIRA, H. J. et al. Deficiência hídrica em feijoeiro, II. Balanço de energia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 7, p. 745-757. 1988.
- BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**. New York, v. 27, p. 779-787. 1926.
- FONTANA, D. C. **Balanço de radiação e balanço de energia em soja (*Glycine max* (L.) Merrill) irrigada e não irrigada**. Porto Alegre, 1987, 121 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1987.
- GOMES, J., KARAZAWA, M. Como a planta de milho se desenvolve. In: IAPAR. **O milho no Paraná**. Londrina: IAPAR, 1982. p. 33-49. (Circular IAPAR, 29).
- KOWAL, J. M., KASSAM. Water use, energy balance and growth of maize at Samaru, Northern Nigeria. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 12, p. 391-406, 1973.
- LAGUARDE, J. P. La conduction thermique. In: LES BASES DE LA BIOCLIMATOLOGIE - BASES PHYSIQUES, 1., 1984, Méribel. **Anales...**, Paris: Institut National de la Recherche Agronomique, 1984. p.25-33.

- NISHIMURA, T., ALMEIDA, A., ANDRÉ, R. G. B. et al. Balanço de energia numa cultura de milho (*Zea mays* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, IV. 1985, Londrina, PR. **Anais...**, Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1986. 344 p. p. 83-92.
- PEDRO JÚNIOR, M.J. **Balanço de energia em soja** (*Glycine max* L. Merrill). Piracicaba, 1977. 82 p. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Escola Superior de Agronomia Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1977.
- PERRIER, A., ITIER, B., BERTOLONI, J. M. et al. New device for continuous recording of the energy balance of natural surfaces. **Agricultural Meteorology**. Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 71-84, 1976.
- PRATES, J. E., COELHO, D. T., STEINMETZ, S. et al. Relação entre os componentes do balanço de energia em diferentes estádios de desenvolvimento do arroz (*Oryza sativa* L.) de sequeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, V.1987. Belém. PA. **Coletânea de Trabalhos...**, Belém: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1987. 518 p. p. 333-336.
- TANNER, C. B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. **Soil Science Society of America Proceedings**. Madison, v. 24, n. 1, p. 1-9, 1960.
- VILLA NOVA, N. A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz**. Piracicaba, 1973, 89 p. Tese (Livre Docência), Escola Superior de Agronomia Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1973.
- WEBB, E. K. Aerial microclimate. **Meteorological Monographs**, Boston, v. 6, n. 28, p. 27-58, 1965.