

BALANÇO DE ENERGIA EM CULTURA DE MILHO: ESTUDO DE CASOS

Gilberto R. Cunha⁽¹⁾; Homero Bergamaschi⁽²⁾; Moacir A. Berlato^{(1), (2)} e Ronaldo Matzenauer⁽¹⁾

(1) Seção de Ecologia Agrícola-IPAGRO, Secretaria da Agricultura e Abastecimento/RS; Rua Gonçalves Dias, 570, 90.060 - Porto Alegre/RS.

(2) Faculdade de Agronomia/UFRGS.

INTRODUÇÃO

A necessidade de quantificação da evapotranspiração de culturas, em um nível de refinamento temporal da ordem de um dia, ou mesmo horário, tem sido suprida pelo emprego de métodos micrometeorológicos. Com essa finalidade, o método do balanço de energia foi utilizado por diversos autores ([1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9] e [10]).

Em sistemas cultivados, alguns componentes do balanço de energia podem ser desprezados, dependendo da representatividade temporal e espacial ([1], [2], [11] e [12]), resultando na seguinte equação geral:

$$R_n + LE + H + S = 0 \quad (1)$$

A solução desta equação pode ser obtida através da medição do saldo de radiação (R_n) e do fluxo de calor no solo (S) e da estimativa do fluxo de calor sensível na atmosfera (H) pela razão de Bowen ($\beta = H/LE$) ([13]).

Em termos de limitações do método do balanço de energia pode-se destacar os erros devidos à sensibilidade e à calibração instrumental, erros inerentes às suposições teóricas utilizadas para o cálculo da razão de Bowen (β) e erros causados pela advecção de energia ([2], [14] e [15]).

Nesse contexto, realizou-se um estudo de natureza micrometeorológica com a cultura do milho, visando quantificar os componentes do balanço de energia, em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura e em condições diferentes de demanda eva-

porativa atmosférica.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na Estação Experimental Fito-técnica de Taquari-RS, pertencente ao IPAGRO, com coordenadas de 29°48'15"S de latitude, 51°49'30"W de longitude, 76 m de altitude e clima do tipo fundamental Cfa segundo Köppen, durante o ano agrícola 1986/87.

O ensaio constou de uma unidade experimental de 6561 m² (81m X 81m), cultivada com milho híbrido SAVE-342, semeado em 21/11/86, com espaçamento entre linhas de 0,9 m, com vistas a uma população de 50.000 plantas.ha⁻¹.

1- Determinações micrometeorológicas

Foram feitas em intervalos espaçados de 30 min, durante um período compreendido das 7h às 18h30min de cada dia de observação, com o instrumental disposto próximo ou ao longo de um mastro instalado no interior da parcela experimental. Os sensores foram acoplados a um sistema de medição, composto de uma chave comutadora e um milivoltímetro marca Engro, modelo 2100, com resolução de 0,01 mV, para medição de:

- a) Saldo de radiação: saldo-radiômetro Phillip-Schenk, de constante 6,138 mV por cal.cm⁻².min⁻¹, instalado a uma altura fixa de 4 m acima do solo;
- b) Fluxo de calor no solo: placa medidora de fluxo de calor no solo Middleton, de constante 16,8 mV por cal.cm⁻².min⁻¹, localizada a 0,225 m da fileira de plantas e a 0,01 m de profundidade;
- c) Temperatura do ar: psicrômetros de pares termo-elétricos de cobre-constantan número 22 AWG (um seco e um umedecido por uma gaze embebida em água destilada, medindo T e TU, respectivamente), montados em micro-abrigos de PVC branco e instalados ao nível do topo da cultura e a 0,9 m acima da mesma.

A partir do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor no solo (S), das diferenças de temperaturas entre os dois níveis, entre os termopares úmidos (ΔTU) e secos (ΔT) e da relação $(s + \gamma) / \gamma$, obtida em função da temperatura úmida média dos dois

níveis, foram calculados:

(a) Razão de Bowen (β): -1

$$\beta = \left[\frac{(s+\gamma)/\gamma}{\Delta T_U/\Delta T} - 1 \right] \quad (2)$$

(b) Fluxo de calor latente (LE):

$$LE = - (R_n + S) / (1 + \beta) \quad (3)$$

(c) Fluxo de calor sensível (H):

$$H = - (R_n + LE + S) \quad (4)$$

2- Determinações biológicas

Compreenderam a fenologia pela escala de Hanway (1966) e o índice de área foliar (IAF) obtido em plantas marcadas (6 segmentos de $0,66\text{m} = 0,59\text{m}^2$), sendo a superfície de uma folha obtida pelo método de Montgomery (1911).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os componentes do balanço de energia, para alguns dias do ciclo de desenvolvimento de uma cultura de milho, encontram-se na Tabela 1. Observa-se que houve variação no aporte energético, representado pelo saldo de radiação (entre $12,2 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e $17,9 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), o qual, interagindo com o estágio de desenvolvimento da cultura foi fracionado diferenciadamente.

1- Fluxo de calor na atmosfera

Particularizando, serão discutidos os casos do dia 19/12/86 e 26/02/87.

a) 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, à profundidade de 0,15 m, a um potencial matricial de $-0,042 \text{ MPa}$, que pode ser caracterizada como água facilmente disponível à maioria das culturas agrícolas.

Na Figura 1 observa-se que a razão de Bowen foi positiva durante todo o período considerado, tendo apresentado valores superiores à unidade, chegando 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 as

11h e 13h, bem como por volta das 16h e 17h. Fluxo de calor sensível superior ao fluxo de calor latente, em dado instante do dia, também foi observado em outros trabalhos ([6], [9] e [16]).

Pela Tabela 2, 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% em LE e 40% em H.

Analisando através da razão de Bowen (Figura 1), não ficou evidenciada a transferência de energia do meio para o sistema cultivado, pois não se verificaram valores de β negativos.

b) Dia 26/02/87

Essa data também se caracterizou pela presença de água facilmente disponível no solo, com potenciais matriciais superiores a $-0,029$ MPa (profundidade de 0,15 m como referência).

A razão de Bowen foi igual a -1 às 7h, sendo inferior a zero no período entre as 8h e 9h30min, resultando em valores de H positivos (Figura 2). Os valores de β inferiores a zero, no período próximo ao início da manhã, são explicados pela existência de inversão térmica imediatamente acima da cultura. Este fenômeno 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, haveria transferência de calor sensível do meio para o sistema cultivado em um processo de origem não necessariamente advectiva, conforme hipótese levantada por alguns autores ([2], [4] e [9]).

Na Tabela 2 observa-se que, a exemplo dos demais dias de observação em que a cultura apresentava IAF maior do que 1, a disponibilidade energética para fluxos atmosféricos ($R_n + S$) apresentou alta proporção de uso na forma de calor latente (LE), somando 86% da mesma, nesta data.

2. 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 entre 3% e 12%, estando inversamente relacionado com o IAF (Tabela 2). Essa variação está de acordo com a faixa obtida para a cultura do milho em outros trabalhos ([7] e [17]).

Pela Figura 1, verificou-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 determinados em feijoeiro ([10]), milho ([7]) e em soja ([9] e [16]).

3. Considerações sobre a razão de Bowen

O emprego do método da razão de Bowen, para a estimativa de fluxos turbulentos na atmosfera, pode apresentar dificuldades não apenas em períodos de pequena troca de calor, conforme apontam diversos autores ([1], [18] e [19]).

No presente estudo foram descartados 3 dias de observação por apresentarem problemas, em vários horários do período diurno, como valores de β igual a -1 ou valores absolutos elevados, determinando fluxos de calor extremamente imprecisos.

Outro ponto destacável é quanto à distância de separação vertical dos psicrômetros, pois ficou evidenciado, através de tentativas de cálculo de β , que as medições envolvendo os níveis do topo da cultura, 0,3 m e 2,0 m acima da mesma acentuaram, com frequência, os problemas discutidos acima. Portanto,, denotou-se a importância da interação entre a sensibilidade instrumental e as características aerodinâmicas da superfície.

CONCLUSÕES

1. O fluxo de calor latente de evaporação (LE) foi superior ao fluxo de calor sensível na atmosfera (H), aumentando a diferença entre ambos com o desenvolvimento da cultura.
2. Transferência de calor sensível do meio para o sistema cultivado, no início da manhã e no final da tarde, esteve associada a inversões no gradiente térmico vertical.
3. Em média, o fluxo de calor latente de evaporação correspondeu a 80% do saldo de radiação, o fluxo de calor sensível na atmosfera a 14% e o fluxo de calor no solo a 6%.
4. A magnitude do fluxo de calor no solo e o índice de área foliar da cultura apresentaram uma relação inversa, sendo que a transferência de calor no solo acompanhou a disponibilidade

de energética na superfície, representada pelo saldo de radiação.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- [1] - TANNER, C.B. Energy Balance Approach to Evapotranspiration from Crops. Soil Science of America Proceedings, Madison, 24(1):1-9, 1960.
- [2] - VILLA NOVA, N.A. Estudos Sobre o Balanço de Energia em Cultura de Arroz. Piracicaba, ESALQ. 89f. Tese, Liv. Doc., 1973.
- [3] - PERRIER, A.; ITIER, B.; BERTOLONI, J.M.; KATERJI, N. New Device for Continuous Recording of the Energy Balance of Natural Surfaces. Agric. Meteor., Amsterdam, 16:71-84, 1976.
- [4] - PEDRO JÚNIOR, M.J. Balanço de Energia em Soja (Glycine max (L.) Merr.). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 82f. Tese Mestr. Solos e Nutrição de Plantas, 1977.
- [5] - ANDRÉ, R.G.B. Um Estudo dos Transportes Verticais de Momentum, Calor Sensível e Vapor d'Água Sobre Superfície Vegetada nos Trópicos. São José dos Campos. INPE. 112f. Tese Dout. Meteorologia, 1981.
- [6] - NISHIMURA, T.; ALMEIDA, A.; ANDRÉ, R.G.B.; VOLPE, C.A.; DELLA LIBERA, C.L.F.; MALHEIROS, E.E. Balanço de Energia numa Cultura de Milho (Zea mays L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 4., Londrina, 7-12 julho, 1985. Anais ... Campinas, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, IAPAR. p.83-92, 1986.
- [7] - ALFONSI, R.R.; SANTOS FILHO, B.G.; PEDRO JÚNIOR, M.J.P.; BRUNINI, O.; CAMARGO, M.B.P. Balanço de Energia em Milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 21 (12):1233-35, 1986.

- [8] - PRATES, J.E.; COELHO, D.T.; STEINMETZ, S.; SEDIYAMA, G. C.; VIANELLO, R.L. 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, 5., Belém, 5-11 Julho, 1987. Coletânea de Trabalhos Apresentados... Belém, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia. p. 333-36, 1987.
- [9] - FONTANA, D.C. Balanço de Radiação e Balanço de Energia em Soja (Glycine max (L.) Irrigada e não Irrigada. Porto Alegre, UFRGS, Faculdade de Agronomia. 121f. Diss. Mestr. Agronomia, Fitotecnia, 1987.
- [10] - BERGAMASCHI, H.; OMETTO, J.C.; VIEIRA, H.J.; ANGELOCCI, L.R.; LIBARDI, P.L. Deficiência Hídrica em Feijoeiro. II. Balanço de Energia. Pesquisa Agropecuária Brasileira; Brasília, 27(7):745-57, 1988.
- [11] - TANNER, C.B. & LEMON, E.R. Radiant Energy Utilized in Evapotranspiration. Agronomy Journal, Madison, 54:207-12, 1962.
- [12] - W.M.O. Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration. Geneva. 121p. (Technical Note, 83); 1971.
- [13] - BOWEN, I.S. The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from any Water Surface. Physical Review, New York, 27:779-87, 1926.
- [14] - FUCHS, M. & TANNER, C.E. Erros Analysis of Bowen Ratios Measured by Differential Psychrometry. Agric. Meteorol., 7:329-34, 1970.
- [15] - ANGUS, D.E. & WATTS, P.J. Evapotranspiration - How Good is the Bowen Ratio Method. In: SHARMA, M.L. ed. Evapotranspiration from Plant Communities. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V. p.133-50, 1984.
- [16] - ANDRÉ, R.G.B. & VISWANADHAM, Y. Distribuição de Energia numa Cultura de Soja (Glycine max (L.) Merrill). Revista Brasileira de Meteorologia, Brasília, 1:20-37, 1986.

- [17] - KOWAL, J.M. & KASSAM, A.H. Water Use, Energy Balance and Growth of Maize at Samaru, Northern Nigeria. Agric. Meteorol., Amsterdam, 12:391-406, 1973.
- [18] - BERLATO, M.A. & MOLION, L.C.B. Evaporação e Evapotranspiração. Porto Alegre, IPAGRO, Secretaria da Agricultura RS. 95p. (Boletim Técnico, 7), 1981.
- [19] - OHMURA, A. Objective Criteria for Rejecting Data for Bowen Ratio Flux Calculations. Journal of Applied Meteorology, Boston, 21:595-8, 1982.
- [20] - GOMES, J. & KARAZAWA, M. Como a Planta de Milho se Desenvolve. In: IAPAR. O Milho no Paraná. Londrina, p.33-49. (Circular IAPAR, 29), 1982.

TABELA 1. Componentes do balanço de energia, estágio fenológico, número de dias após a emergência e índice de área foliar em uma cultura de milho, cv. SAVE-342. Taquari - RS, 1986/87.

| Data | Estádio (*) | DAE | IAF | MJ . m ⁻² . dia ⁻¹ | | | |
|----------|-------------|-----|------|------------------------------------------|----------|---------|---------|
| | | | | R _n | LE | H | S |
| 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 |

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

TABELA 2. Relações derivadas do balanço de energia, estágio fenológico, número de dias após a emergência e índice de área foliar em uma cultura de milho, cv. SAVE-342. Taquari - RS, 1986/87.

| Data | Estádio (*) | DAE | IAF | Relações adimensionais | | | |
|----------|-------------|-----|------|------------------------|------------------------|------------------|------------------|
| | | | | LE/R _n | LE/(R _n +S) | H/R _n | S/R _n |
| 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 |

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

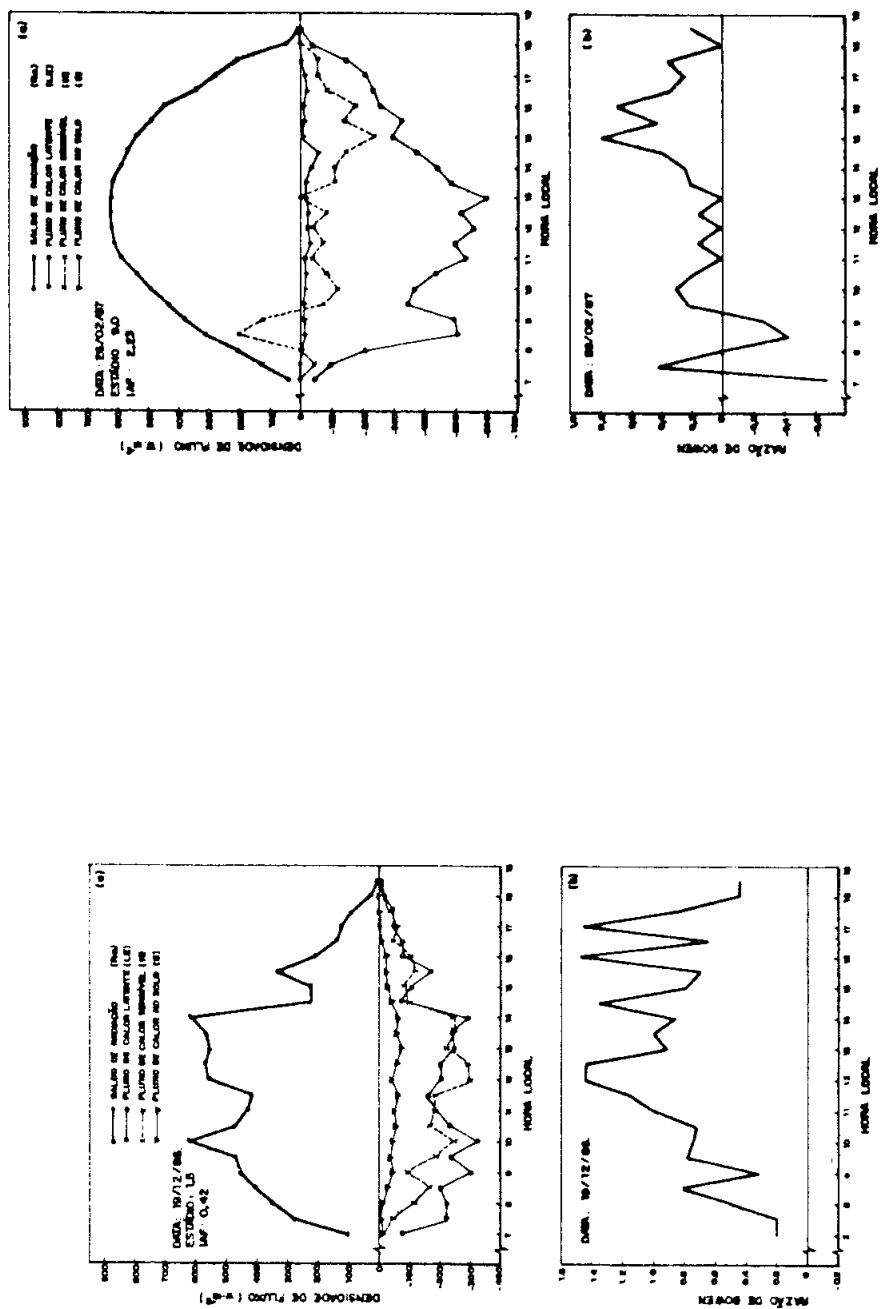


FIGURA 1. Componentes do balanço de energia ($W.m^{-2}$) em cultura de milho, cv. SAVE-342 (a) e razão de Bowen. Taquari-RS, 1986/87.