

BALANÇO DE ENERGIA EM SOJA  
*(Glycine max (L.) Merr.)*

MÁRIO JOSÉ PEDRO JUNIOR

Orientador: NILSON AUGUSTO VILLA NOVA

*Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Solos e Nutrição de Plantas.*

PIRACICABA  
Estado de São Paulo - Brasil  
Junho - 1977

A minha esposa,

À minha mãe,

Ao meu pai,

Aos meus sogros.

## AGRADECIMENTOS

*Ao Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova, professor do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ, pela sua incansável orientação e amizade dedicadas a mim durante o curso de graduação e pós-graduação e no desenvolvimento deste trabalho.*

*Aos Engenheiros Agrônomos: Altino Aldo Ortolani, Hilton Silveira Pinto, Rogério Remo Alfonsi, Angelo Paes de Camargo, Antonio Roberto Pereira, Orivaldo Brunini, Luis Roberto Angelocci da Seção de Climatologia Agrícola do Instituto Agronômico - Campinas, pelo excelente ambiente de trabalho, amizade e sugestões apresentadas.*

*Aos Engenheiros Agrônomos: Otávio Tisseli Filho e Hipólito Antonio Assunção Mascarenhas, da Seção de Leguminosas, pelo zelo com o campo experimental.*

*Ao Instituto Agronômico, na pessoa de seu Diretor Geral, Dr. Lourival Carmo Monaco, pelas facilidades oferecidas e constante estímulo no desenvolvimento do trabalho.*

*Ao Centro Experimental de Campinas, na pessoa de seu Chefe, Dr. Reinaldo Forster, pelas facilidades oferecidas.*

*Aos professores: Dr. José Carlos Ometto, Dr. Jesus Marden dos Santos e Dr. Afonso Decico do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ, pelo constante apoio e estímulo.*

*Ao Engenheiro Agrônomo Milton Fuzatto, pela revisão dos textos e sugestões.*

*Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e Projeto FAPESP 73/1170.*

*Aos Srs. Edmirson Borrozzino, Luiz André Macedo, Mauro Ganzarolli, Adamastor Polastro, José Carlos Fabri, Benedito A. P. Gomes e Umberto Bonato, da Seção de Climatologia Agrícola, pelo auxílio no desenvolvimento dos trabalhos de campo, sem o que não seria possível realizar este trabalho.*

*À desenhista Liliana Solha, da Seção de Climatologia Agrícola, pelo esmero na confecção das figuras.*

*À Heloísa Sampaio Ferraz, da Seção de Climatologia, pela datilografia.*

## ÍNDICE

	Página
1. RESUMO .....	1
2. INTRODUÇÃO .....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	5
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	11
4.1. Material .....	11
4.1.1. Caracterização das condições do ex- perimento .....	11
4.1.1.1. Local .....	11
4.1.1.2. Solo e cultura .....	11
4.1.1.3. Época das observações ..	12
4.1.1.4. Condições pluviométricas das épocas de observação	12
4.1.2. Instrumental .....	12
4.1.2.1. Psicrômetros .....	12
4.1.2.2. Radiômetro líquido .....	13
4.1.2.3. Placas medidoras do fluxo de calor no solo .....	13
4.1.2.4. Sistema de registro e lei- tura direta .....	15
4.2. Método .....	16
4.2.1. Balanço de energia vertical .....	16
4.2.2. Método do balanço de energia .....	17
4.2.3. Aplicação do método para a determi- nação dos parâmetros hídricos e ae- rodinâmicos de uma cobertura vege- tal: resistência e resistência crí- tica .....	21

4.2.3.1.	Conceituação e significação da resistência própria da cultura .....	21
4.2.3.2.	Estimativa da resistência crítica da cobertura vegetal .....	23
4.2.3.3.	Estimativa da resistência da cobertura vegetal ...	24
4.2.3.4.	Estimativa da resistência aerodinâmica .....	25
4.2.3.5.	Adaptação das equações de estimativa da resistência crítica e da resistência aerodinâmica .....	25
5.	RESULTADOS .....	28
5.1.	Balanco de energia em cultura de soja ....	28
5.2.	Resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água ( $r_a$ ) .....	28
5.3.	Resistência crítica da cultura da soja ao transporte de vapor d'água ( $r_{vc}$ ) .....	29
5.4.	Resistência da cultura da soja ao transporte de vapor d'água ( $r_v$ ) .....	29
6.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	60
6.1.	Balanco de energia .....	60
6.1.1.	Interpretação dos sinais .....	60
6.1.2.	Distribuição da energia solar recebida por cultura de soja .....	60
6.1.3.	O valor do fluxo de calor no solo	62
6.1.4.	Relações entre $R_n$ , LE e H .....	63
6.1.5.	Considerações sobre o valor de $\beta$ ..	64

6.2.	Resistência ao transporte de vapor d'água .	65
6.2.1.	Resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água ( $r_a$ ) .....	65
6.2.2.	Resistência crítica ao transporte de vapor d'água ( $r_{vc}$ ) .....	66
6.2.3.	Resistência da cultura ao transporte de vapor d'água ( $r_v$ ) .....	67
6.2.4.	Relações entre $r_v$ e $r_{vc}$ .....	68
7.	CONCLUSÕES .....	70
8.	SUMMARY .....	72
9.	LITERATURA CITADA .....	74
10.	APÊNDICE .....	80

## 1. RESUMO

O conhecimento das necessidades hídricas de cada cultura é essencial no planejamento da irrigação, assim como no estabelecimento das melhores condições ecológicas para seu desenvolvimento.

O método do balanço de energia permite estimar essas necessidades, através da medida da energia disponível a um sistema natural, possibilitando separá-la em diferentes processos, dentre os quais a evapotranspiração. Permite, ainda, estimar a resistência oferecida pelo sistema planta-atmosfera ao transporte de vapor d'água.

No presente estudo utilizou-se o método do balanço de energia para determinar:

1. a distribuição da radiação solar incidente em evapotranspiração e aquecimento do ar e do solo;
2. a resistência ao transporte de vapor oferecida pela cultura e pela camada de ar adjacente.



Dados microclimatológicos foram usados para se estimar a resistência da cultura; a resistência crítica e a resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água. Esses parâmetros permitem quantificar as limitações do processo evaporativo devidas à estrutura e fisiologia da cultura.

A resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água foi cerca de 10 s/m no período entre 9 e 16 horas. A variação na resistência crítica ao transporte de vapor d'água foi alta (200-300 s/m) de manhã e à tarde, sendo baixa quando a radiação líquida era alta. A resistência da cultura ao transporte de vapor d'água variou de 40 a 60 s/m durante os períodos de alta radiação líquida.

## 2. INTRODUÇÃO

Qualquer comunidade vegetal, para realizar seu ciclo biológico, necessita de determinada quantidade de água que é utilizada, predominantemente, nos processos de evaporação e transpiração.

O conhecimento dessa demanda contribui para um planejamento racional da técnica de irrigação e fornece subsídios básicos à regionalização das áreas com condições ecológicas mais adequadas ao seu desenvolvimento.

Além disso, a avaliação da quantidade de água exigida pelas culturas é importante, principalmente, em condições tropicais, onde as fases críticas de crescimento vegetativo, florescimento e maturação, e, conseqüentemente, a própria produtividade, são mais limitadas pelo fator hídrico do que pela recepção da radiação solar.

O método do balanço de energia permite estimar

essas necessidades, medindo a energia disponível a um sistema natural permitindo, separá-la em diferentes processos, dentre os quais a evaporação.

Possibilita também estimar a resistência imposta pelo sistema planta-atmosfera, ao transporte de vapor de água (resistência aerodinâmica, resistência própria do vegetal e resistência crítica).

Esses parâmetros quantificam, em determinado meio ambiente, a restrição ao processo evaporativo de uma comunidade vegetal, em função de sua estrutura e fisiologia, permitindo a avaliação de índices de controle fisiológico da perda d'água das plantas, importantes no desenvolvimento de pesquisas que visam caracterizar a resistência à seca, de culturas agrícolas.

Levando em consideração o que foi exposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos para o presente trabalho:

- a) determinar a repartição da energia solar incidente em uma cultura de soja nos diferentes processos, de evapotranspiração e de aquecimento do ar e do solo;
- b) determinar a resistência ao transporte de vapor d'água, promovida pela cobertura vegetal e pelo ar adjacente ao topo da cultura.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

A utilização da energia solar por uma cobertura vegetal, foi analisada por GOSSE (1976) como tendo duas grandes aplicações de interesse agrônômico:

a) a produção de matéria seca por intermédio dos fenômenos fotossintéticos;

b) o consumo d'água, que é o resultado da evaporação e da transpiração, sendo ambas englobadas no conceito da evapotranspiração.

Existe um grande número de métodos destinados a medir ou a estimar a evapotranspiração de comunidades vegetais, e na classificação realizada por TANNER (1968) o método do balanço de energia é o que se destina a determinações horárias.

BOWEN (1926) introduziu o conceito da razão entre os fluxos de calor latente e sensível, emitidos por uma superfície d'água (razão de Bowen), durante o processo da eva

poração, em função dos gradientes de pressão de vapor e temperatura, observados na superfície. De acordo com VILLA NOVA (1973), denomina-se método do balanço de energia todo aquele que utiliza a razão de Bowen para o cálculo dos fluxos de vapor e calor sensível.

O método do balanço de energia, de acordo com PERRIER *et alii* (1975), é utilizado classicamente para determinar os fluxos de calor latente e sensível, a partir de medidas da radiação líquida, do fluxo de calor no solo dos gradientes de vapor d'água e da temperatura do ar, acima da cultura.

A evapotranspiração pode ser estimada a partir da energia disponível na superfície da cultura em estudo, e segundo SUOMI e TANNER (1958), TANNER (1960) e McILROY (1971), a precisão das medidas é suficientemente grande quando se usa o balanço de energia.

A conclusões semelhantes chegou BERNARD (1965) que analisou o método e concluiu que, ao nível micrometeorológico, era o que dava melhores resultados. Da mesma forma, BLACKWELL (1965) verificou experimentalmente que o método do balanço de energia e o método aerodinâmico davam ótimos resultados, quando feitas correções devidas a instabilidade atmosférica.

Segundo VILLA NOVA (1973), o desenvolvimento e posterior produção comercial de radiômetros líquidos, como os de FUNK (1959), TANNER (1960) e HARPER (1972) e de medidores de fluxo de calor no solo, como os usados por DEACON (1950) e MONTEIRO (1968), foi um dos fatores que permitiu uma maior aplicação do método.

O uso simplificado do método, de acordo com PERRIER (1975), mostrou-se bastante útil ao estudo, em condi

ções de campo, da transformação da energia radiante, em particular de sua utilização para a vaporização d'água, o que o caracteriza como um método importante em estudos de ecologia.

SUOMI e TANNER (1958) usaram amostradores rotativos para determinações dos parâmetros necessários para o cálculo da razão de Bowen e TANNER (1960), comparando medidas da evapotranspiração em alfafa, através do método do balanço de energia e de lisímetros, encontrou divergência muito pequena nos dados.

MONTEITH (1963 e 1965), propôs um modelo de análise do balanço de energia em comunidades vegetais, que considerava as trocas integrais de calor, vapor d'água e momento entre a comunidade e o ar acima dela. Esse modelo, porém, mostrou-se válido, somente, para culturas de porte baixo.

SLATYER e McILROY (1961) usaram o método do balanço de energia para pastagens, DENMEAD (1966) aplicou-o em trigo, enquanto KALMA e STANHILL (1969), utilizaram-no para laranja.

BROWN e COVEY (1966), em estudos realizados com milho, verificaram como se repartia a energia solar recebida em: radiação líquida, transpiração e evaporação do solo, fluxo de calor sensível e fluxo de calor no solo.

Por outro lado, KNOERR e GAY (1965) utilizaram o método para medidas mais detalhadas, através de determinações em folhas de *Quercus velutina*, *Magnolia grandiflora* e *Prunus caroliniana*, encontrando valores diferentes da razão de Bowen quando comparados aos determinados para a floresta como um todo.

O balanço de energia já foi utilizado também para se verificar o efeito do espaçamento na evapotranspira-

ção. CHIN CHOY e KANEMASU (1974), trabalhando com sorgo, concluíram que a evapotranspiração pode ser reduzida utilizando-se espaçamentos menores.

Nas condições climáticas de Campinas, Estado de São Paulo, VILLA NOVA (1973) e VILLA NOVA *et alii* (1975) estudaram a cultura do arroz de sequeiro, usando o método do balanço de energia para determinar a distribuição da radiação líquida entre os diferentes componentes do balanço, na presença e na ausência de advecção.

PERRIER *et alii* (1975), em estudo semelhante para milho, em Paris, mostrou também o comportamento diário dos quatro termos que compoe o balanço de energia.

O método do balanço de energia muitas vezes sofreu adaptações, podendo-se citar o trabalho de GOSSE (1976), que realizando estudos com grama batatais, adaptou-o para as condições da Costa do Marfim.

De acordo com vários autores, o transporte advectivo de calor representa uma dificuldade para aplicação do método, pois a advecção é uma fonte de energia e pode causar erros na determinação da evapotranspiração.

ABDEL-AZIZ *et alii* (1964) e JACKSON (1967), afirmam que a advecção pode contribuir no processo evaporativo com uma grande quantidade de energia, além daquela advinda do balanço de energia vertical.

De acordo com HANKS *et alii* (1971), a advecção tem energia suficiente para aumentar em cerca de 30%, a energia usada para evapotranspiração em canteiros irrigados. CHIN CHOY e KANEMASU (1974), relatam que para condições de terra seca, 21% do total de energia transformada em transpiração era derivada da advecção. Este problema é, por vezes, tão sério,

que LANG (1973), sugeriu medidas de gradientes horizontais, de temperatura e umidade do ar quando da utilização do método do balanço de energia em condições de advecção.

A aplicação das medidas do balanço de energia, para determinação do balanço hídrico é imediata, além de, segundo PERRIER *et alii* (1975), permitir exprimir em função dos valores da razão de Bowen, uma resistência, ou seja uma reação da cobertura vegetal às condições instantâneas da alimentação hídrica.

Modelos de estimativa da evapotranspiração que usam o balanço de energia e a resistência do ar ao transporte de momento, tem sido desenvolvidos e testados, como citam HEILMAN e KANEMASU (1976), e as diferenças encontradas na determinação da evapotranspiração, usando o conceito da resistência, são pequenas quando comparadas às medidas lisimétricas.

De acordo com van BAVEL (1965), o processo da transpiração pode ser descrito, fisicamente, em termos de resistência ao fluxo turbulento de vapor que resulta da geometria interna da folha, do estômato, e da resistência à difusão do vapor d'água através da cutícula. Esse mesmo autor assinala que a resistência da folha pode ser conhecida quando se mede a evaporação desta ou da cultura, através de determinações de parâmetros do meio ambiente.

Existem muitos métodos para a determinação da resistência ao fluxo de calor latente. RASCHKE (1960), propôs um método para medida indireta da resistência da folha, através de determinações simultâneas da transpiração, temperatura e balanço de radiação da folha, e da temperatura e pressão de vapor ambiente. Este método, porém, segundo van BAVEL (1965), não se mostrou prático.



MONTEITH (1963), MONTEITH (1973) e STONE e HORTON (1974) apresentaram uma equação para cálculo da resistência da camada de ar adjacentes à cultura, cuja aplicação, segundo VERMA *et alii* (1976), necessitava da medida de uma série de parâmetros microclimáticos que estavam sujeitos a erros e eram válidos apenas para estimativas em períodos de tempo muito curtos.

A importância na determinação da resistência do ar, da resistência da cobertura vegetal e, ainda, do valor crítico dessa resistência (resistência crítica), através do método do balanço de energia, foi levantada por PERRIER *et alii* (1975), servindo de base para este trabalho.

## 4. MATERIAL E MÉTODO

### 4.1. Material

#### 4.1.1. Caracterização das condições do experimento.

##### 4.1.1.1. Local

O experimento foi conduzido no Centro Experimental de Campinas, do Instituto Agrônômico, localizado na cidade de Campinas (SP), situada a  $22^{\circ}53'S$ ,  $47^{\circ}04'W$ , a uma altitude de 706 m. A cultura utilizada para o estudo ocupava uma área aproximada de  $30.000 \text{ m}^2$ , e destinava-se à produção de sementes de soja.

##### 4.1.1.2. Solo e cultura

O solo da área experimental é caracterizado como Latossolo Roxo (série Chapadão).

A cultura utilizada para desenvolvimento do método foi estabelecida com a variedade de soja Santa Rosa, plantada em 30 de novembro de 1975. O espaçamento utilizado foi de 0,70 m entre linhas, colocando-se cerca de 30 sementes por metro linear.

#### 4.1.1.3. Época das observações

As observações foram efetuadas durante 6 dias, sendo selecionadas para efeito de análise as dos dias: 30/01/76, 11/02/76, 12/03/76, 16/03/76 e 17/03/76, respectivamente 61, 73, 102, 106 e 107 dias após o plantio, por que havia necessidade de chuvas antes das observações para uniformização das condições de medidas.

#### 4.1.1.4. Condições pluviométricas das épocas de observação

As condições pluviométricas que antecederam cada uma das datas de observação foram as seguintes:

- a) chuva de 95,8 mm nos 4 dias anteriores à observação feita em 30/01/76;
- b) chuva de 92,7 mm nos 5 dias anteriores à observação realizada em 11/02/76;
- c) chuva de 36,2 mm nos 4 dias anteriores às observações feitas em 12/03/76, 16/03/76 e 17/03/76, tendo ocorrido no primeiro desses dias, uma chuva de 1,4 mm, no período da tarde.

#### 4.1.2. Instrumental

##### 4.1.2.1. Psicrômetros

Os psicrômetros utilizados constavam de termo-

pares de ferro-constantan, construídos com condutores de diâmetro 0,2 mm, e serviram para a determinação do gradiente de temperaturas secas e úmidas.

Os termopares foram colocados em micro-abrigos, construídos com tela (malha de 1 mm) pintada de branco, com a finalidade de não se expor os elementos sensíveis diretamente à radiação solar.

A figura 1 mostra em detalhe o tipo de micro-abrigo utilizado e a figura 2 dá uma visão geral do campo experimental e do gradiente de temperaturas secas e úmidas medidas a diferentes alturas, das quais se aproveitaram determinações feitas a 1,20 m e 1,75 m, por serem as que mais se adaptavam ao desenvolvimento do método.

#### 4.1.2.2. Radiômetro líquido

Para as determinações do fluxo de radiação líquida foi utilizado um radiômetro líquido tipo "Net Pyrradiometer" número 740, de fabricação Middleton & Co. Pty. Ltd., da Austrália, com constante de resposta de  $30,85 \pm 2,5\%$  mV/cal cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>.

O aparelho foi mantido a cerca de 1,0 m de altura acima do topo da cultura e para facilidade dos trabalhos substituiu-se o sistema para inflar a cúpula do radiômetro, por uma bomba de aquário, de maneira semelhante à utilizada por LOURENCE e PRUITT (1971) e por VILLA NOVA (1973).

#### 4.1.2.3. Placas medidoras do fluxo de calor no solo

Para o estudo do fluxo de calor no solo, foram montadas quatro placas de fluxo a 0,01 m de profundidade no



Fig. 1. Detalhe do micro-abrigo utilizado nas determinações das temperaturas secas e úmidas na cultura de soja.



Fig. 2. Vista geral do campo experimental, mostrando o equipamento utilizado nas medidas microclimáticas na cultura de soja.

solo, na projeção do radiômetro líquido e posicionadas nas linhas e nas entre-linhas da cultura. Essas placas eram de fabricação Middleton & Co. Ltd., da Austrália, com as dimensões de  $1\frac{7}{8}$ " x  $1\frac{1}{8}$ " x  $\frac{3}{16}$ ", e com as seguintes respostas:

a) F-253 -  $18,74 \pm 3\%$  mV/cal.cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>;

b) F-223 -  $18,91 \pm 3\%$  mV/cal.cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>;

c) F-247 -  $19,05 \pm 3\%$  mV/cal.cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>;

d) F-225 -  $18,36 \pm 3\%$  mV/cal.cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>;

Como as placas foram ligadas em paralelo, a resposta média do conjunto tornou-se  $18,76 \pm 3\%$  mV/cal.cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>.

#### 4.1.2.4. Sistemas de registro e leitura direta

Os sistemas de registro foram instalados em abrigo especial, conforme se verifica na Fig. 2, e constituíam-se de:

a) potenciôgrafo do radiômetro líquido, do tipo "Flatbed Recorder" modelo BD7, de fabricação holandesa, marca Kipp & Zonen".

b) potenciôgrafo das placas de fluxo de calor no solo, do tipo "Labograph" E-428 N° 3/60, com fundo de escala 0-10 ou 0-50 mV, de fabricação suíça, marca "Metrohm Herisau".

c) potenciômetro de pares termo-elétricos, tipo "Milivolt potentiometer", fabricação em Philadelphia (U.S.A.), marca "Leeds & Northrup Co., modelo 8690.

## 4.2. Método

O método utilizado neste trabalho levou em conta resultados e considerações feitas anteriormente por diversos autores.

### 4.2.1. Balanço de energia vertical

De acordo com LEMON (1963), o entendimento dos principais processos físicos que controlam o meio ambiente no qual as plantas vivem e se desenvolvem, pode ser alcançado com boa aproximação pelos micrometeorologistas, mediante a aplicação da lei da conservação da energia no balanço de energia das superfícies das plantas e do solo.

O balanço de energia completo leva em consideração todos os fluxos de energia existentes numa superfície vegetada, incluindo os fluxos de radiação, de calor sensível, de calor latente, de calor no solo, convectivos e armazenamentos. Segundo TANNER (1968), embora o balanço bi ou tridimensional seja desejável, o simples balanço de energia vertical pode ser usado sem perda de detalhes.

O balanço de energia de uma superfície vegetada pode ser, portanto, expresso em termos dos fluxos verticais, de acordo com LEMON (1963), TANNER (1968), LOURENCE *et alii* (1970), SLAVIK (1974) e VILLA NOVA *et alii* (1975), segundo o modelo:

$$R_n + G + LE + H + P \approx 0 \dots\dots\dots (1)$$

onde:

$R_n$  = radiação líquida disponível à superfície;

$G$  = fluxo de calor para o solo;

LE = fluxo convectivo de calor latente;  
 H = fluxo convectivo de calor sensível;  
 P = energia utilizada nos processos fotossintéticos.

Segundo LEMON (1963), TANNER (1960) e VILLA NOVA *et alii* (1975), a energia química envolvida na fotossíntese raramente excede 2-5% da radiação líquida, podendo, portanto, ser desprezada sem acarretar erros significativos.

Assim sendo, a equação do balanço de energia vertical pode ser apresentada sob a forma:

$$R_n + G + LE + H \approx 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

#### 4.2.2. Método do balanço de energia

Nota-se pela equação (2) que a energia disponível à superfície, isto é,  $(R_n + G)$ , se reparte entre os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE).

BOWEN (1926), expressou esses termos em forma de uma razão (razão de Bowen):

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad \dots\dots\dots (3)$$

De acordo com VILLA NOVA *et alii* (1975), desde que os fluxos de calor sensível e latente sejam do tipo convectivo forçado (fluxo turbulento em condições de atmosfera neutra), eles podem ser estimados em função dos gradientes médios da temperatura (T) e da umidade específica (q) do ar, de acordo com as equações:

$$H = - \rho C_p K_h \left( \frac{\partial T}{\partial Z} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$



e,

$$LE = - \rho L K_e \left( \frac{\partial q}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (5)$$

onde:

$\rho$  = densidade do ar úmido;

$C_p$  = calor específico à pressão constante do ar úmido;

$L$  = calor latente de vaporização da água;

$K_h$  = coeficiente de transferência turbulenta de calor;

$K_e$  = coeficiente de transferência turbulenta de vapor d'água.

Segundo PASQUILL (1949), SWIN BANCK (1951) e RIDER (1954), citados por VILLA NOVA (1973), em condições de atmosfera próxima da neutralidade, os valores dos coeficientes de transferência turbulenta tendem a se igualar:

$$K_h \approx K_e \dots\dots\dots (6)$$

Portanto, substituindo-se as equações (4) e (5) na equação (3), tem-se:

$$\beta = \frac{C_p}{L} \frac{\Delta T}{\Delta q} \dots\dots\dots (7)$$

Considerando-se a definição de umidade específica (q):

$$q = 0,622 \frac{e}{P} \dots\dots\dots (8)$$

onde:

e = tensão de vapor

P = pressão atmosférica

o valor de  $\Delta q$  da expressão (7) fica sendo:

$$\Delta q = q_2 - q_1 \dots\dots\dots (9)$$

Substituindo-se (8) em (9):

$$\Delta q = \frac{0,622}{p} (e_2 - e_1) \dots\dots\dots (10)$$

onde  $e_2$  e  $e_1$  são tensões de vapor a diferentes alturas.

Através da equação psicrométrica:

$$e_2 = e'_2 - \gamma (T_2 - Tu_2) \dots\dots\dots (11)$$

$$e_1 = e'_1 - \gamma (T_1 - Tu_1) \dots\dots\dots (12)$$

sendo:

$e'_2$  e  $e'_1$  = tensões de saturação nos níveis 2 e 1, respectivamente;

$T_2$  e  $T_1$  = temperaturas de bulbo seco nos níveis 2 e 1;

$Tu_2$  e  $Tu_1$  = temperaturas de bulbo úmido nos níveis 2 e 1;

$\gamma$  = constante psicrométrica.

O valor de  $(e_2 - e_1)$  utilizando-se as equações (11) e (12), torna-se:

$$e_2 - e_1 = e'_2 - e'_1 - \gamma (T_2 - Tu_2) + \gamma (T_1 - Tu_1) \dots (13)$$

A tangente à curva de tensão de vapor sobre a água, em função da temperatura ( $s$ ), para os dois níveis de referência (1 e 2), é por definição:

$$s = \frac{e'_2 - e'_1}{Tu_2 - Tu_1} \dots\dots\dots (14)$$

$$e'_2 - e'_1 = s (Tu_2 - Tu_1) \dots\dots\dots (15)$$

Substituindo-se (15) em (13):

$$e_2 - e_1 = s (Tu_2 - Tu_1) - \gamma (T_2 - Tu_2) + \gamma (T_1 - Tu_1) (16)$$

$$e_2 - e_1 = (s + \gamma) (Tu_2 - Tu_1) - \gamma (T_2 - T_1) \dots \dots \quad (17)$$

Substituindo-se (17) em (10):

$$\Delta q = \frac{0,622}{P} (s + \gamma) (Tu_2 - Tu_1) - \gamma (T_2 - T_1) \dots \quad (18)$$

Considerando-se:

$$Tu_2 - Tu_1 = \Delta Tu \dots \dots \dots \quad (19)$$

$$T_2 - T_1 = \Delta T \dots \dots \dots \quad (20)$$

Colocando-se as equações (19) e (20) na equação (18):

$$\Delta q = \frac{0,622}{P} (s + \gamma) \Delta Tu - \gamma \Delta T \dots \dots \dots \quad (21)$$

Inserindo-se a equação (21) na (7):

$$\beta = \frac{C_p P}{L 0,622} \frac{\Delta T}{(s + \gamma) \Delta Tu - \gamma \Delta T} \dots \dots \dots \quad (22)$$

Como a constante psicrométrica ( $\gamma$ ) vale:

$$\gamma = \frac{C_p P}{L 0,622} \dots \dots \dots \quad (23)$$

Substituindo-se (23) em (22) tem-se:

$$\beta = \frac{\gamma \Delta T}{(s + \gamma) \Delta Tu - \gamma \Delta T}$$

$$\beta = \frac{1}{\left(\frac{s + \gamma}{\gamma}\right) \left(\frac{\Delta Tu}{\Delta T}\right) - 1} \dots \dots \dots \quad (24)$$

A equação (24) foi usada por WEBB (1965) para determinações da razão de Bowen.

Conhecida a razão de Bowen há necessidade, ain

da, de se obter os valores de LE e H, o que é possível substituindo-se (3) em (2):

$$LE = - \frac{R_n + G}{1 + \beta} \dots\dots\dots (25)$$

As equações (3), (24) e (25) constituem a formação do método do balanço de energia, e permitem estimar os fluxos turbulentos de calor latente e de calor sensível sobre uma superfície natural evaporante, desde que, segundo VILLA NOVA (1973), se conheçam:

$R_n$  = radiação líquida medida ao nível  $Z_2$ ;

$G$  = fluxo de calor no solo;

$\Delta T_u = T_{u_2} - T_{u_1}$  = diferença entre as temperaturas de termômetros úmidos nos níveis  $Z_2$  e  $Z_1$ ;

$\Delta T = T_2 - T_1$  = diferença entre as temperaturas de termômetros secos nos níveis  $Z_2$  e  $Z_1$ ;

$s$  = tangente à curva de tensão de saturação de vapor sobre água no ponto de temperatura média úmida, ou seja, o valor médio entre  $T_{u_2}$  e  $T_{u_1}$ .

$\gamma$  = constante psicrométrica reduzida.

4.2.3. Aplicação do método para a determinação dos parâmetros hídricos e aerodinâmicos de uma cobertura vegetal: resistência e resistência crítica.

4.2.3.1. Conceituação e significação da resistência própria da cultura.

Segundo PERRIER *et alii* (1975), o método do balanço de energia permite avaliar parâmetros que traduzem a reação do vegetal às condições de alimentação hídrica.

Os parâmetros considerados são: a resistência da cobertura vegetal ao transporte de vapor d'água ( $r_v$ ) e a resistência crítica ( $r_{vc}$ ), ou seja, o valor crítico da resistência da cobertura vegetal que depende dos valores instantâneos de determinados elementos climáticos.

A equação proposta por PENMAN (1948), que permite conhecer a evapotranspiração potencial teórica de uma cobertura vegetal, é:

$$ETP = \frac{s (R_n + G) + \gamma E_a}{s + \gamma} \dots \dots \dots (26)$$

$$E_a = \frac{LM}{RT} s \left( \frac{T_1 - T_r}{r_a} \right) \dots \dots \dots (27)$$

onde

ETP = evapotranspiração potencial,

s = derivada da tensão de vapor saturante para  $\frac{T_1 + T_r}{2}$  ;

T = temperatura de termômetro seco no nível Z acima da cultura;

T<sub>r</sub> = temperatura do ponto de orvalho no nível Z.

E<sub>a</sub> = evaporação que teria a cobertura vegetal à temperatura do ar T<sub>1</sub>.

r<sub>a</sub> = a resistência aerodinâmica ao transporte de vapor de água entre a superfície da cobertura e um nível de referência.

De acordo com PERRIER *et alii* (1975), ao se exprimir a evapotranspiração real (ETR) em função de ETP, de ve-se definir uma resistência suplementar  $r_v$ .

Esta resistência se aplica ao percurso do vapor d'água da câmara estomática ao exterior da folha, sendo,

portanto, estreitamente ligada ao grau de abertura dos estômatos, que depende da regulação hídrica da cobertura vegetal.

Logo,  $r_v$  exprime a resistência global oferecida pela massa vegetal à difusão de água ao nível superior da cobertura, de tal forma que:

$$ETR = \frac{s (R_n + G) + \gamma E_a}{s + \gamma \left( \frac{r_a + r_v}{r_a} \right)} \dots\dots\dots (28)$$

Esta relação pode ser escrita:

$$ETR = \frac{ETP}{1 + \frac{\gamma}{s + \gamma} \cdot \frac{r_v}{r_a}} \dots\dots\dots (29)$$

A equação (29) é a mesma que foi obtida por Penman, McIlroy e Monteith, citados por TANNER (1968).

#### 4.2.3.2. Estimativa da resistência crítica da cobertura vegetal

Derivando-se a equação (28) em função de  $r_a$  pode-se obter um valor crítico da resistência da cobertura vegetal que é determinado por:

$$r_{vc} = \frac{LM}{RT} \frac{(s + \gamma)(T_1 - T_r)}{R_n + G} \dots\dots\dots (30)$$

O conhecimento do valor de  $r_{vc}$  é necessário para a estimativa da resistência da cobertura vegetal ao transporte de vapor d'água.

#### 4.2.3.3. Estimativa da resistência da cobertura vegetal

As equações (27) e (29) mostram que é possível se determinar  $r_v$  sem se conhecer, simultaneamente, os valores de ETP e ETR.

Portanto, de acordo com PERRIER *et alii* (1975), o método do balanço de energia permite se chegar ao valor de  $r_v$  sem se determinar a evapotranspiração potencial (ETP).

Para isso é necessário, novamente o conceito da razão de Bowen, onde as equações (2) e (3) permitem escrever a relação:

$$\beta = - \frac{(R_n + G + LE)}{LE} \dots\dots\dots (31)$$

Substituindo-se LE (LE = -ETR) por seu valor na equação (28) e exprimindo  $E_a$  em função de  $r_{vc}$  a partir das equações (27) e (30), tem-se:

$$E_a = \frac{r_{vc}}{r_a} - \frac{s}{s + \gamma} (R_n + G) \dots\dots\dots (32)$$

sendo que a equação (31) fica:

$$\beta = \frac{s + \gamma + \gamma \frac{r_v}{r_a}}{s + \gamma \frac{s}{s + \gamma} \frac{r_{vc}}{r_a}} - 1 \dots\dots\dots (33)$$

Segundo PERRIER *et alii* (1975), a equação (33) pode ser escrita da seguinte forma:

$$r_v = r_a \left( \frac{s}{\gamma} \beta - 1 \right) + r_{vc} \frac{s}{s + \gamma} (\beta + 1) \dots\dots (34)$$

O valor de  $r_v$  pode assim ser calculado a partir de dados do balanço de energia, tais como, do LE e H, da resistência crítica e da temperatura do ar a um nível superior da cultura, suscetível de se calcular  $r_a$  (resistência aerodinâmica existente entre o topo da cultura e o nível de referência).

#### 4.2.3.4. Estimativa da resistência aerodinâmica

Existem várias equações propostas para a estimativa da resistência aerodinâmica ao transporte do vapor d'água.

As mais utilizadas são as propostas por MONTEITH (1965), van BAVEL e EHRLER (1968), STONE e HORTON (1974) e KANEMASU (1976). Porém, de acordo com VERMA *et alii* (1976), o método utilizado pelos referidos autores, necessitam medidas do parâmetro da rugosidade e usam o conceito da igualdade dos coeficientes de troca de calor e transferência de momento.

A estimativa do parâmetro da rugosidade está sujeita a grandes erros, portanto, equações de estimativa da resistência aerodinâmica que não se baseiam nos parâmetros anteriores são desejáveis.

Segundo PERRIER *et alii* (1975) a resistência aerodinâmica pode ser medida pela equação:

$$r_a = \rho C_p \left( \frac{T_1 - T_2}{H} \right) \dots \dots \dots (35)$$

#### 4.2.3.5. Adaptação das equações de estimativa da resistência crítica e da resistência aerodinâmica.



As equações (30) e (35) foram adaptadas para um sistema de unidades, necessário para se ter valores de resistência em segundos por metro.

Assim sendo, a equação (30) passou a:

$$r_{vc} = \frac{989}{T + 273} \cdot \left( \frac{s + 0,47}{R_n + G} \right) (T_1 - T_r) \dots\dots\dots (36)$$

onde  $T = \frac{T_1 + T_r}{2}$  em °C

s = derivada da tensão de vapor saturante para T, em mmHg/°C,

γ = valor da constante psicrométrica para pressão média de 710 mmHg (= 0,47 mmHg/°C);

R<sub>n</sub> = radiação líquida em cal/cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>;

G = fluxo de calor para o solo em cal/cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>;

T<sub>1</sub> = temperatura de termômetro seco medida a um nível (z) acima da cultura em °C;

T<sub>r</sub> = temperatura de ponto de orvalho no nível (z) em °C;

r<sub>vc</sub> = resistência crítica ao transporte de vapor d'água em s/m.

Por outro lado, a equação (35) ficou:

$$r_a = \frac{1,76 (T_1 - T_2)}{H} \dots\dots\dots (37)$$

onde

H = fluxo de calor sensível em cal/cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>;

r<sub>a</sub> = resistência aerodinâmica ao transporte de vapor em s/m.

O conjunto das equações (34), (36) e (37) constituiu a base do método utilizado para a determinação das resistências ao transporte de vapor d'água pelo ar e pela cultura.

## 5. RESULTADOS

De acordo com as datas referidas no ítem 4.1.1.3 foram feitas determinações do balanço de energia em cultura de soja, obtendo-se os resultados a seguir expostos.

### 5.1. Balanço de energia em cultura de soja

Os resultados referentes a gradiente psicrométrico, radiação líquida, fluxo de calor no solo e demais componentes do balanço de energia, obtidos através das equações (3), (24) e (25), estão relacionadas nas Tabelas 1 a 5 e representados graficamente nas Figuras 3 a 7.

### 5.2. Resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água ( $r_a$ )

Levando-se em consideração as determinações do gradiente térmico acima do topo da cultura da soja, e a esti-

mativa do fluxo de calor latente, apresentados nas tabelas 1 a 5, foi possível, através da equação (37), calcular-se a resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água, em base horária para os seis dias de leituras. Os resultados encontram-se nas tabelas 6 a 10. Os valores de  $r_a$  não foram representados graficamente, por serem necessários apenas como intermediários no cálculo da resistência vegetal.

### 5.3. Resistência crítica da cultura da soja ao transporte de vapor d'água ( $r_{vc}$ )

Os valores determinados, em condições de campo, de temperatura de termômetros seco e úmido, em determinado nível, de radiação líquida e fluxo de calor no solo, permitiram, através da equação (36), estimar a resistência crítica da cobertura vegetal, ao transporte de vapor d'água. Esses valores acham-se nas tabelas 11 a 15, e são representados graficamente nas figuras 8 a 12.

### 5.4. Resistência da cultura da soja ao transporte de vapor d'água ( $r_v$ )

Através dos valores de resistência aerodinâmica, da resistência crítica e da razão de Bowen, pode-se estimar, pela equação (34), os valores horários da resistência da cobertura vegetal (soja) ao transporte de vapor d'água.

Os resultados de resistência da cobertura vegetal encontram-se nas tabelas 16 a 20, tendo sido representados graficamente nas figuras 8 a 12.

Tabela 1. Valores médios horários do gradiente psicrométrico observado ( $^{\circ}\text{C}$ ) e da distribuição dos componentes do balanço de energia ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) em soja no dia 30/01/76, em Campinas.

HORA	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	$\Delta T$	Tu <sub>2</sub>	Tu <sub>1</sub>	$\Delta Tu$	$\frac{\Delta Tu}{\Delta T}$	TuM	$\frac{s+y}{y}$	R <sub>n</sub>	G	H	LE	$\beta$
6-7	20,3	20,5	-0,2	18,3	18,5	-0,2	1,00	18,4	3,13	-0,007	0,058	-0,016	-0,035	0,469
7-8	23,0	23,1	-0,1	19,9	20,2	-0,3	3,00	20,1	3,34	0,216	0,004	-0,022	-0,198	0,111
8-9	24,5	24,9	-0,4	21,0	21,4	-0,4	1,00	21,2	3,49	0,414	-0,033	-0,109	-0,272	0,402
9-10	25,7	25,8	-0,1	22,0	22,2	-0,2	2,00	22,2	3,63	0,616	-0,095	-0,071	-0,449	0,159
10-11	27,7	28,2	-0,5	23,5	23,9	-0,4	0,80	23,7	3,84	0,813	-0,146	-0,217	-0,450	0,483
11-12	28,5	28,9	-0,4	23,2	23,6	-0,4	1,00	23,4	3,79	0,891	-0,181	-0,187	-0,523	0,358
12-13	27,6	28,1	-0,5	22,1	23,3	-1,2	2,40	22,7	3,70	0,796	-0,145	-0,073	-0,578	0,127
13-14	26,9	26,8	0,1	20,8	21,0	-0,2	-2,00	20,9	3,44	0,333	-0,043	0,042	-0,332	-0,127
14-15	25,8	25,6	0,2	21,1	21,2	-0,1	-0,50	21,2	3,49	0,186	-0,001	0,106	-0,291	-0,364
15-16	25,3	25,2	0,1	21,1	21,6	-0,5	-5,00	21,4	3,50	0,188	-0,035	0,009	-0,161	-0,054
16-17	24,9	24,6	0,3	20,7	20,8	-0,1	-0,33	20,8	3,44	0,131	-0,041	0,079	-0,169	-0,468
17-18	23,3	23,5	-0,2	20,1	20,0	0,1	-0,50	20,1	3,34	0,121	-0,063	0,035	-0,093	-0,374
18-19	22,3	22,6	-0,3	19,5	19,7	-0,2	0,67	19,7	3,29	-0,025	-0,055	0,041	0,049	0,830

Tabela 2. Valores médios horários do gradiente psicrométrico observado ( $^{\circ}\text{C}$ ) e da distribuição dos componentes do balanço de energia ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) em soja no dia 11/02/76, em Campinas.

HORA	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	$\Delta T$	Tu <sub>2</sub>	Tu <sub>1</sub>	$\Delta Tu$	$\frac{\Delta Tu}{\Delta T}$	TuM	$\frac{s+\gamma}{\gamma}$	R <sub>n</sub>	G	H	LE	$\beta$
6-7	16,7	17,4	-0,7	15,3	14,9	0,4	-0,57	15,1	2,78	0,023	0,017	0,025	-0,065	-0,387
7-8	20,9	21,8	-0,9	18,2	18,0	0,2	-0,22	18,1	3,10	0,245	-0,091	0,225	-0,379	-0,594
8-9	21,3	22,0	-0,7	18,9	18,7	0,2	-0,29	18,8	3,18	0,496	-0,129	0,398	-0,765	-0,520
9-10	23,3	23,1	0,2	19,4	19,6	-0,2	-1,00	19,5	3,26	0,650	-0,150	0,154	-0,654	-0,235
10-11	24,2	24,3	-0,1	19,8	20,0	-0,2	2,00	19,9	3,31	0,852	-0,210	-0,097	-0,545	0,178
11-12	25,9	26,1	-0,2	20,8	21,0	-0,2	1,00	20,9	3,44	0,940	-0,233	-0,205	-0,502	0,409
12-13	25,4	25,3	0,1	20,1	20,4	-0,3	-3,00	20,3	3,37	0,878	-0,244	0,063	-0,697	-0,090
13-14	26,3	26,1	0,2	20,5	21,1	-0,6	-3,00	20,8	3,44	0,790	-0,235	0,053	-0,608	-0,088
14-15	26,0	25,5	0,5	19,8	20,3	-0,5	-1,00	20,1	3,34	0,549	-0,220	0,098	-0,427	-0,230
15-16	25,9	26,2	-0,3	19,7	20,3	-0,6	2,00	20,0	3,33	0,577	-0,169	-0,061	-0,347	0,177
16-17	24,5	24,6	-0,1	18,9	19,6	-0,7	7,00	19,3	3,23	0,266	-0,132	-0,006	-0,128	0,046
17-18	22,8	22,7	0,1	18,8	18,7	0,1	1,00	18,8	3,18	0,065	-0,082	0,006	0,012	0,459
18-19	21,5	21,3	0,2	17,8	17,6	0,2	1,00	17,7	3,05	-0,068	0,005	0,021	0,042	0,488

Tabela 3. Valores médios horários do gradiente psicrométrico observado ( $^{\circ}\text{C}$ ) e da distribuição dos componentes do balanço de energia ( $\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{min}$ ) em soja, no dia 12/03/76.

HORA	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	$\Delta T$	Tu <sub>2</sub>	Tu <sub>1</sub>	$\Delta Tu$	$\frac{\Delta Tu}{\Delta T}$	TuM	$\frac{s+\gamma}{\gamma}$	R <sub>n</sub>	G	H	LE	$\beta$
6-7	18,9	18,3	0,6	18,2	17,5	0,7	1,17	17,9	3,07	-0,033	0,079	-0,013	-0,033	0,386
7-8	22,5	22,2	0,3	20,2	20,0	0,2	0,67	20,1	3,34	0,116	0,013	-0,057	-0,071	0,808
8-9	23,7	24,3	-0,6	21,0	21,4	-0,4	0,67	21,2	3,49	0,329	-0,032	-0,127	-0,170	0,747
9-10	24,4	24,8	-0,4	21,4	22,0	-0,6	1,50	21,7	3,55	0,487	-0,073	-0,078	-0,336	0,231
10-11	26,2	27,0	-0,8	22,1	22,8	-0,7	0,88	22,5	3,66	0,709	-0,119	-0,183	-0,407	0,450
11-12	28,4	28,7	-0,3	23,7	24,0	-0,3	1,00	23,9	3,87	0,687	-0,122	-0,146	-0,419	0,348
12-13	29,8	30,4	-0,6	24,4	25,1	-0,7	1,17	24,8	4,02	0,777	-0,159	-0,131	-0,487	0,270
13-14	31,1	32,7	-1,6	24,4	25,3	-0,9	0,56	24,9	4,02	0,776	-0,181	-0,264	-0,331	0,799
14-15	30,5	31,1	-0,6	23,7	24,2	-0,5	0,83	24,0	3,90	0,682	-0,129	-0,171	-0,382	0,447
15-16	30,4	30,5	-0,1	23,3	23,9	-0,6	6,00	23,6	3,82	0,498	-0,083	-0,018	-0,397	0,046
16-17	29,5	30,2	-0,7	23,2	23,8	-0,6	0,86	23,5	3,81	0,194	-0,012	-0,055	-0,126	0,439
17-18	27,3	27,2	0,1	23,1	23,9	-0,8	-8,00	23,5	3,81	0,086	0,009	0,003	-0,098	-0,032
18-19	25,8	25,0	0,8	22,4	22,9	-0,5	-0,63	22,7	3,70	-0,021	0,036	0,006	-0,021	-0,300

Tabela 4. Valores médios horários do gradiente psicrométrico observado ( $^{\circ}\text{C}$ ) e da distribuição dos componentes do balanço de energia ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) em soja, no dia 16/03/76, em Campinas.

HORA	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	$\Delta T$	Tu <sub>2</sub>	Tu <sub>1</sub>	$\Delta Tu$	$\frac{\Delta Tu}{\Delta T}$	TuM	$\frac{s+Y}{Y}$	R <sub>n</sub>	G	H	LE	$\beta$
6-7	19,8	19,6	0,2	18,3	17,9	0,4	2,00	18,1	3,10	-0,060	0,076	-0,003	-0,013	0,192
7-8	22,0	22,2	-0,2	19,6	19,5	0,1	-0,50	19,6	3,28	0,124	0,045	0,103	-0,272	-0,379
8-9	23,8	24,0	-0,2	20,7	20,4	0,3	-1,50	20,6	3,42	0,385	-0,008	0,073	-0,450	-0,163
9-10	25,2	25,4	-0,2	21,2	20,9	0,3	-1,50	21,1	3,47	0,582	-0,063	0,100	-0,619	-0,161
10-11	27,4	27,5	-0,1	22,6	22,2	0,4	-4,00	22,4	3,65	0,761	-0,145	0,042	-0,658	-0,064
11-12	28,2	28,3	-0,1	22,7	22,9	-0,2	2,00	22,8	3,70	0,849	-0,187	-0,089	-0,573	0,156
12-13	30,9	30,7	0,2	24,1	24,4	-0,3	-1,50	22,3	3,63	0,907	-0,172	0,135	-0,869	-0,155
13-14	29,5	28,8	0,7	22,6	23,4	-0,8	-1,14	23,0	3,74	0,702	-0,220	0,113	-0,595	-0,190
14-15	32,0	32,5	-0,5	24,6	25,3	-0,7	1,40	25,0	4,03	0,653	-0,159	-0,088	-0,407	0,215
15-16	30,9	31,3	-0,4	22,4	23,6	-1,2	3,00	23,0	3,74	0,511	-0,057	-0,040	-0,413	0,098
16-17	30,0	30,4	-0,4	23,0	25,1	-2,1	5,25	24,1	3,90	0,315	-0,029	-0,014	-0,272	0,051
17-18	28,0	28,1	-0,1	22,6	23,2	-0,6	6,00	22,9	3,74	0,090	0,018	-0,005	-0,103	0,047
18-19	25,2	25,8	-0,6	20,2	19,8	0,4	-0,67	20,0	3,33	-0,036	0,016	-0,009	0,029	-0,309



Tabela 5. Valores médios horários do gradiente psicrométrico observado ( $^{\circ}\text{C}$ ) e da distribuição dos componentes do balanço de energia ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) em soja, no dia 17/03/76, em Campinas.

HORA	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	$\Delta T$	Tu <sub>2</sub>	Tu <sub>1</sub>	$\Delta Tu$	$\frac{\Delta Tu}{\Delta T}$	TuM	$\frac{s+y}{y}$	R <sub>n</sub>	G	H	LE	$\beta$
6-7	19,8	19,3	0,5	17,9	17,7	0,2	0,40	17,8	3,07	-0,065	0,068	-0,004	-0,001	4,386
7-8	22,6	22,8	-0,2	19,3	19,6	-0,3	1,50	19,5	3,26	0,080	0,014	-0,019	-0,074	0,257
8-9	25,9	26,3	-0,4	22,1	22,4	-0,3	0,75	22,3	3,63	0,312	-0,049	-0,096	-0,166	0,581
9-10	26,8	27,0	-0,2	22,8	22,0	-0,8	4,00	22,4	3,65	0,506	-0,094	-0,028	-0,384	0,073
10-11	28,0	28,4	-0,4	24,3	24,7	-0,4	1,00	24,5	3,95	0,709	-0,155	-0,140	-0,413	0,339
11-12	30,4	30,1	-0,3	24,6	24,9	-0,3	1,00	24,8	4,02	0,844	-0,199	-0,161	-0,485	0,331
12-13	31,9	32,0	-0,1	25,2	25,4	-0,2	2,00	25,3	4,08	0,801	-0,168	-0,078	-0,555	0,140
13-14	31,2	31,0	0,2	24,4	24,7	-0,3	-1,50	24,6	3,98	0,666	-0,142	0,087	-0,611	-0,143
14-15	31,1	31,2	-0,1	23,8	25,2	-1,4	14,00	24,5	3,95	0,461	-0,093	-0,007	-0,362	0,018
15-16	30,3	30,4	-0,1	22,4	23,6	-1,2	12,00	23,0	3,74	0,254	-0,051	-0,005	-0,198	0,023
16-17	26,8	26,3	0,5	22,1	21,8	0,3	0,60	22,0	3,60	0,055	0,030	-0,011	-0,013	0,862
17-18	24,7	24,5	0,2	21,6	21,5	0,1	0,50	21,6	3,53	0,032	0,028	-0,003	-0,002	1,307
18-19	23,8	23,6	0,2	21,6	21,2	0,4	2,00	21,4	3,50	-0,003	0,029	-0,004	-0,022	0,167

Tabela 6. Valores médios horários do gradiente de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), do fluxo de calor sensível ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) e da resistência aerodinâmica ( $\text{s}/\text{m}$ ), em cultura de soja, no dia 30/01/76.

HORA	$T_1$	$T_2$	$\Delta T$	H	$r_a$
6 - 7	20,3	20,5	-0,2	-0,016	22,0
7 - 8	23,0	23,1	-0,1	-0,022	8,0
8 - 9	24,5	24,9	-0,4	-0,109	6,5
9 - 10	25,7	25,8	-0,1	-0,071	2,5
10 - 11	27,7	28,2	-0,5	-0,217	4,1
11 - 12	28,5	28,9	-0,4	-0,187	3,8
12 - 13	27,6	28,1	-0,5	-0,073	12,1
13 - 14	26,9	26,8	0,1	0,042	4,2
14 - 15	25,8	25,6	0,2	0,106	3,3
15 - 16	25,3	25,2	0,1	0,009	19,6
16 - 17	24,9	24,6	0,3	0,079	6,7
17 - 18	23,3	23,5	-0,2	0,035	-10,1
18 - 19	22,3	22,6	-0,3	0,041	-12,9

Tabela 7. Valores médios horários do gradiente de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), do fluxo de calor sensível ( $\text{cal}/\text{cm}^2.\text{min}$ ) e da resistência aerodinâmica ( $\text{s}/\text{m}$ ), em cultura de soja, no dia 11/02/76.

HORA	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\Delta T$	H	r <sub>a</sub>
6 - 7	16,7	17,4	-0,7	0,025	-49,3
7 - 8	20,9	21,8	-0,9	0,225	- 7,0
8 - 9	21,3	22,0	-0,7	0,398	- 3,1
9 - 10	23,3	23,1	0,2	0,154	2,3
10 - 11	24,2	24,3	-0,1	-0,097	1,8
11 - 12	25,9	26,1	-0,2	-0,205	1,7
12 - 13	25,4	25,3	0,1	0,063	2,8
13 - 14	26,3	26,1	0,2	0,053	6,6
14 - 15	26,0	25,5	0,5	0,098	9,0
15 - 16	25,9	26,2	-0,3	-0,061	8,7
16 - 17	24,5	24,6	-0,1	-0,006	29,3
17 - 18	22,8	22,7	0,1	0,006	29,3
18 - 19	21,5	21,3	0,2	0,021	16,8

Tabela 8. Valores médios horários do gradiente de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), do fluxo de calor sensível ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) e da resistência aerodinâmica ( $\text{s}/\text{m}$ ), em cultura de soja, no dia 12/03/76.

HORA	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\Delta T$	H	r <sub>a</sub>
6 - 7	18,9	18,3	0,6	-0,013	-81,2
7 - 8	22,5	22,2	0,3	-0,057	- 9,3
8 - 9	23,7	24,3	-0,6	-0,127	8,3
9 - 10	24,4	24,8	-0,4	-0,078	9,0
10 - 11	26,2	27,0	-0,8	-0,183	7,7
11 - 12	28,4	28,7	-0,3	-0,146	3,6
12 - 13	29,8	30,4	-0,6	-0,131	8,1
13 - 14	31,1	32,7	-1,6	-0,264	10,7
14 - 15	30,5	31,1	-0,6	-0,171	6,2
15 - 16	30,4	30,5	-0,1	-0,018	9,8
16 - 17	29,5	30,2	-0,7	-0,055	22,4
17 - 18	27,3	27,2	0,1	0,003	58,7
18 - 19	25,8	25,0	0,8	0,006	234,7

Tabela 9. Valores médios horários do gradiente de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), do fluxo de calor sensível ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) e da resistência aerodinâmica ( $\text{s}/\text{m}$ ), em cultura de soja, no dia 16/03/76.

HORA	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	$\Delta T$	H	r <sub>a</sub>
6 - 7	19,8	19,6	0,2	-0,003	-117,3
7 - 8	22,0	22,2	-0,2	0,103	- 3,4
8 - 9	23,8	24,0	-0,2	0,073	- 4,8
9 - 10	25,2	25,4	-0,2	0,100	- 3,5
10 - 11	27,4	27,5	-0,1	0,042	- 4,2
11 - 12	28,2	28,3	-0,1	-0,089	2,0
12 - 13	30,9	30,7	0,2	0,135	2,6
13 - 14	29,5	28,8	0,7	0,113	10,9
14 - 15	32,0	32,5	-0,5	-0,088	10,0
15 - 16	30,9	31,3	-0,4	-0,040	17,6
16 - 17	30,0	30,4	-0,4	-0,014	50,3
17 - 18	28,0	28,1	-0,1	-0,005	35,2
18 - 19	25,2	25,8	-0,6	-0,009	117,3

Tabela 10. Valores médios horários do gradiente de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), do fluxo de calor sensível ( $\text{cal}/\text{cm}^2.\text{min}$ ) e da resistência aerodinâmica ( $\text{s}/\text{m}$ ), em cultura de soja, no dia 17/03/76.

HORA	$T_1$	$T_2$	$\Delta T$	H	$r_a$
6 - 7	19,8	19,3	0,5	-0,004	-220,0
7 - 8	22,6	22,8	-0,2	-0,019	18,5
8 - 9	25,9	26,3	-0,4	-0,096	7,3
9 - 10	26,8	27,0	-0,2	-0,028	12,6
10 - 11	28,0	28,4	-0,4	-0,140	5,1
11 - 12	30,4	30,1	-0,3	-0,161	3,3
12 - 13	31,9	32,0	-0,1	-0,078	2,3
13 - 14	31,2	31,0	0,2	0,087	4,0
14 - 15	31,1	31,2	-0,1	-0,007	25,1
15 - 16	30,3	30,4	-0,1	-0,005	35,2
16 - 17	26,8	26,3	0,5	-0,011	-80,0
17 - 18	24,7	24,5	0,2	-0,003	-117,3
18 - 19	23,8	23,6	0,2	-0,004	- 88,0

Tabela 11. Valores médios horários de temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) acima do topo da cultura, de tensões do ar (mmHg), de radiação líquida e fluxo de calor no solo (cal/cm<sup>2</sup>.min) e da resistência crítica (s/m) em soja, no dia 30/01/76.

HORA	T <sub>1</sub>	Tu <sub>1</sub>	$\Delta T$	$\gamma \Delta T$	e's	e	Tr	T	Rn	G	s	r <sub>vc</sub>
6-7	20,5	18,5	2,0	0,94	15,97	15,00	17,5	19,0	-0,007	0,058	1,03	298,9
7-8	23,1	20,2	2,9	1,36	17,75	16,39	18,9	21,0	0,216	0,004	1,14	103,4
8-9	24,9	21,4	3,5	1,65	19,11	17,46	19,9	22,4	0,414	-0,033	1,23	74,7
9-10	25,8	22,2	3,6	1,69	20,07	18,38	20,8	23,3	0,616	-0,095	1,29	56,4
10-11	28,2	23,9	4,3	2,02	22,24	20,22	22,3	25,3	0,813	-0,146	1,44	55,9
11-12	28,9	23,6	5,3	2,49	21,85	19,36	21,6	25,3	0,891	-0,181	1,44	65,1
12-13	28,1	23,3	4,8	2,26	21,45	19,19	21,5	24,8	0,796	-0,145	1,40	62,9
13-14	26,8	21,0	5,8	2,73	18,65	15,92	18,4	22,6	0,333	-0,043	1,25	166,7
14-15	25,6	21,2	4,4	2,07	18,88	16,81	19,3	22,5	0,186	-0,001	1,24	194,8
15-16	25,2	21,6	3,6	1,69	19,35	17,66	20,1	22,7	0,188	-0,035	1,25	191,7
16-17	24,6	20,8	3,8	1,79	18,42	16,63	19,1	21,9	0,131	-0,041	1,20	342,2
17-18	23,5	20,0	3,5	1,65	17,54	15,89	18,4	21,0	0,121	-0,063	1,14	476,1
18-19	22,6	19,7	2,9	1,36	17,21	15,85	18,4	20,5	-0,025	-0,055	1,11	-279,5

Tabela 12. Valores médios horários de temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) acima do topo da cultura, de tensões do ar (mmHg), de radiação líquida e fluxo de calor no solo ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) e da resistência crítica (s/m) em soja, no dia 11/02/76.

HORA	$T_1$	$T_{ui}$	$\Delta T$	$\gamma \Delta T$	$e's$	$e$	$Tr$	$T$	$R_n$	$G$	$s$	$r_{vc}$
6-7	17,4	14,9	2,5	1,18	12,71	11,53	13,4	15,4	0,023	0,017	0,83	445,8
7-8	21,8	18,0	3,8	1,79	15,48	13,69	16,1	19,0	0,245	-0,091	1,03	188,0
8-9	22,0	18,7	3,3	1,55	16,17	14,62	17,1	19,6	0,496	-0,129	1,06	68,9
9-10	23,1	19,6	3,5	1,65	17,11	15,46	18,0	20,6	0,650	-0,150	1,12	54,6
10-11	24,3	20,0	4,3	2,02	17,54	15,52	18,0	21,2	0,852	-0,210	1,15	53,3
11-12	26,1	21,0	5,1	2,40	18,65	16,25	18,8	22,5	0,940	-0,233	1,24	58,9
12-13	25,3	20,4	4,9	2,30	17,97	15,67	18,2	21,8	0,878	-0,244	1,19	62,2
13-14	26,1	21,1	5,0	2,35	18,77	16,42	18,9	22,5	0,790	-0,235	1,24	74,2
14-15	25,5	20,3	5,2	2,44	17,86	15,42	17,9	21,7	0,549	-0,220	1,19	128,5
15-16	26,2	20,3	5,9	2,77	17,86	15,09	17,6	21,9	0,577	-0,169	1,20	118,0
16-17	24,6	19,6	5,0	2,35	17,11	14,76	17,2	20,9	0,266	-0,132	1,14	298,8
17-18	22,7	18,7	4,0	1,88	16,17	14,29	16,7	19,7	0,065	-0,082	1,07	-1834,7
18-19	21,3	17,6	3,7	1,74	15,09	13,35	15,7	18,5	-0,068	0,005	1,00	-442,7



Tabela 13. Valores médios horários de temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) acima do topo da cultura, de tensões do ar (mmHg), de radiação líquida e fluxo de calor no solo ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) e da resistência crítica (s/m) em soja, no dia 12/03/76.

HORA	$T_1$	$T_{u1}$	$\Delta T$	$\gamma \Delta T$	e's	e	$T_r$	T	Rn	G	s	$r_{vc}$
6-7	18,3	17,5	0,8	0,38	15,00	14,62	17,1	17,7	-0,033	0,079	0,95	125,7
7-8	22,2	20,0	2,2	1,03	17,54	16,51	19,0	20,6	0,116	0,013	1,12	132,6
8-9	24,3	21,4	2,9	1,36	19,11	17,75	20,2	22,3	0,329	-0,032	1,23	74,4
9-10	24,8	22,0	2,8	1,31	19,83	18,52	20,9	22,9	0,487	-0,073	1,26	80,8
10-11	27,0	22,8	4,2	1,97	20,82	18,85	21,2	24,1	0,709	-0,119	1,35	59,5
11-12	28,7	24,0	4,7	2,21	22,38	20,18	22,3	25,5	0,687	-0,122	1,45	71,9
12-13	30,4	25,1	5,3	2,49	23,90	21,41	23,3	26,9	0,777	-0,159	1,56	76,8
13-14	32,7	25,3	7,4	3,48	24,18	20,70	22,7	27,7	0,776	-0,181	1,62	115,4
14-15	31,1	24,2	6,9	3,24	22,65	19,41	21,7	26,4	0,682	-0,129	1,52	111,4
15-16	30,5	23,9	6,6	3,10	22,24	19,14	21,4	26,0	0,498	-0,083	1,49	142,1
16-17	30,2	23,8	6,4	3,00	22,11	19,11	21,4	25,8	0,194	-0,012	1,47	308,6
17-18	27,2	23,9	3,3	1,55	22,24	20,69	22,7	25,0	0,086	0,009	1,41	158,3
18-19	25,0	22,9	2,1	0,99	20,94	19,95	22,1	23,6	-0,021	0,036	1,31	1146,8

Tabela 14. Valores médios horários de temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) acima do topo da cultura, de tensões do ar (mmHg), de radiação líquida e fluxo de calor no solo ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) e da resistência crítica (s/m) em soja, no dia 16/03/76.

HORA	$T_1$	$T_{u1}$	$\Delta T$	$\gamma \Delta T$	$e's$	e	$T_r$	T	$R_n$	G	s	$r_{vc}$
6-7	19,6	17,9	1,7	0,80	15,38	14,58	17,1	18,4	-0,060	0,076	0,99	773,8
7-8	22,2	19,5	2,7	1,27	17,00	15,73	18,3	20,3	0,124	0,045	1,10	121,0
8-9	24,0	20,4	3,6	1,69	17,97	16,28	18,8	21,4	0,385	-0,008	1,17	76,0
9-10	25,4	20,9	4,5	2,11	18,54	16,43	19,0	22,2	0,582	-0,063	1,22	68,6
10-11	27,5	22,2	5,3	2,49	20,07	17,58	20,0	23,8	0,761	-0,145	1,33	72,5
11-12	28,3	22,9	5,4	2,53	20,94	18,41	20,8	24,6	0,849	-0,187	1,38	69,5
12-13	30,7	24,4	6,3	2,96	22,92	19,96	22,1	26,4	0,907	-0,172	1,52	76,7
13-14	28,8	23,4	5,4	2,54	21,58	19,04	21,4	25,1	0,702	-0,220	1,42	95,7
14-15	32,5	25,3	7,2	3,38	24,18	20,80	22,8	27,7	0,653	-0,159	1,62	134,0
15-16	31,3	23,6	7,7	3,62	21,85	18,23	20,6	26,0	0,511	-0,057	1,49	152,2
16-17	30,4	25,1	5,3	2,49	23,90	21,41	23,3	26,9	0,315	-0,029	1,56	166,0
17-18	28,1	23,2	4,9	2,30	21,32	19,02	21,3	24,7	0,090	0,018	1,40	390,8
18-19	25,8	19,8	6,0	2,82	17,32	14,50	17,0	21,4	-0,036	0,016	1,17	-2424,1

Tabela 15. Valores médios horários de temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) acima do topo da cultura, de tensões do ar (mmHg), de radiação líquida e fluxo de calor no solo ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) e da resistência crítica (s/m) em soja, no dia 17/03/76.

HORA	$T_1$	$T_{u1}$	$\Delta T$	$\gamma \Delta T$	e's	e	Tr	T	Rn	G	s	$r_{vc}$
6-7	19,3	17,7	1,6	0,75	15,19	14,44	16,9	18,1	-0,065	0,068	0,98	3940,7
7-8	22,8	19,6	3,2	1,50	17,11	15,61	18,1	20,5	0,080	0,014	1,11	266,1
8-9	26,3	22,4	3,9	1,83	20,32	18,49	20,8	23,6	0,312	-0,049	1,31	124,0
9-10	27,0	22,0	5,0	2,35	19,83	17,48	20,0	23,5	0,506	-0,094	1,31	100,4
10-11	28,4	24,7	3,7	1,74	23,34	21,60	23,4	25,9	0,709	-0,155	1,49	57,9
11-12	30,1	24,9	5,2	2,44	23,62	21,18	23,1	26,6	0,844	-0,199	1,54	71,6
12-13	32,0	25,4	6,6	3,10	24,33	21,23	23,1	27,6	0,801	-0,168	1,61	96,0
13-14	31,0	24,7	6,3	2,96	23,34	20,38	22,5	26,8	0,666	-0,142	1,55	106,6
14-15	31,2	25,2	6,0	2,82	24,04	21,22	23,1	27,2	0,461	-0,093	1,58	148,6
15-16	30,4	23,6	6,8	3,20	21,85	18,65	21,0	25,7	0,254	-0,051	1,46	295,7
16-17	26,3	21,8	4,5	2,11	19,59	17,48	20,0	23,2	0,055	0,030	1,29	435,4
17-18	24,5	21,5	3,0	1,41	19,23	17,82	20,3	22,4	0,032	0,028	1,23	397,9
18-19	23,6	21,2	2,4	1,13	18,88	17,75	20,2	21,9	-0,003	0,029	1,20	732,0

Tabela 16. Valores de resistência aerodinâmica (s/m), resistência crítica (s/m), temperatura ( $^{\circ}$ C), razão de Bowen e resistência da soja ao transporte de vapor d'água (s/m), no dia 30/01/76.

HORA	$r_a$	T	s	$\frac{s}{\gamma}$	$\beta$	$r_{vc}$	$\frac{s}{s+\gamma}$	$(\beta+1)$	$r_v$
6-7	22,0	19,0	1,03	2,19	0,469	298,9	0,69	1,469	302,1
7-8	8,0	21,0	1,14	2,43	0,111	103,4	0,71	1,111	75,5
8-9	6,5	22,4	1,23	2,62	0,402	74,7	0,72	1,402	76,1
9-10	2,5	23,3	1,29	2,74	0,159	56,4	0,73	1,159	46,5
10-11	4,1	25,3	1,44	3,06	0,483	55,9	0,75	1,483	64,5
11-12	3,8	25,3	1,44	3,06	0,358	65,1	0,75	1,358	67,0
12-13	12,1	24,8	1,40	2,98	0,127	62,9	0,75	1,127	45,5
13-14	4,2	22,6	1,25	2,66	-0,127	166,7	0,73	0,873	100,1
14-15	3,3	22,5	1,24	2,64	-0,364	194,8	0,73	0,636	83,4
15-16	19,6	22,7	1,25	2,66	-0,054	191,7	0,73	0,946	109,4
16-17	6,7	21,9	1,20	2,55	-0,468	342,2	0,72	0,532	116,1
17-18	-10,1	21,0	1,14	2,43	-0,374	476,1	0,71	0,626	230,3
18-19	-12,9	20,5	1,11	2,36	0,830	-279,5	0,70	1,830	-371,7

Tabela 17. Valores de resistência aerodinâmica (s/m), resistência crítica (s/m), temperatura (°C), razão de Bowen e resistência da soja ao transporte de vapor d'água (s/m), no dia 11/02/76.

HORA	$r_a$	T	s	$\frac{s}{\gamma}$	$\beta$	$r_{vc}$	$\frac{s}{s+\gamma}$	$(\beta+1)$	$r_v$
6-7	-49,3	15,4	0,83	1,77	-0,387	445,8	0,64	0,613	257,5
7-8	-7,0	19,0	1,03	2,19	-0,594	188,0	0,82	0,406	68,5
8-9	-3,1	19,6	1,06	2,26	-0,520	68,9	0,83	0,480	29,6
9-10	2,3	20,6	1,12	2,38	-0,235	54,6	0,84	0,765	25,8
10-11	1,8	21,2	1,15	2,45	0,178	53,3	0,84	1,178	43,6
11-12	1,7	22,5	1,24	2,64	0,409	58,9	0,85	1,409	60,3
12-13	2,8	21,8	1,19	2,53	-0,090	62,2	0,84	0,910	37,1
13-14	6,6	22,5	1,24	2,64	-0,088	74,2	0,85	0,912	40,9
14-15	9,0	21,7	1,19	2,53	-0,230	128,5	0,84	0,770	56,7
15-16	8,7	21,9	1,20	2,55	0,177	118,0	0,84	1,177	95,0
16-17	29,3	20,9	1,14	2,43	0,046	298,8	0,84	1,046	195,3
17-18	29,3	19,7	1,07	2,28	0,459	-1834,7	0,83	1,459	-1858,5
18-19	16,8	18,5	1,00	2,13	0,488	-442,7	0,82	1,488	-447,5

Tabela 18. Valores de resistência aerodinâmica (s/m), resistência crítica (s/m), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), razão de Bowen e resistência da soja ao transporte de vapor d'água (s/m), no dia 12/03/76.

HORA	$r_a$	T	s	$\frac{s}{\gamma}$	$\beta$	$r_{vc}$	$\frac{s}{s+\gamma}$	$(\beta+1) \sim$	$r_v$
6-7	-81,2	17,7	0,95	2,02	0,386	125,7	0,67	1,386	134,4
7-8	-9,3	20,6	1,12	2,38	0,808	132,6	0,70	1,808	160,3
8-9	8,3	22,3	1,23	2,62	0,747	74,4	0,72	1,747	101,9
9-10	9,0	22,9	1,26	2,68	0,231	80,8	0,73	1,231	69,0
10-11	7,7	24,1	1,35	2,87	0,450	59,5	0,74	1,450	66,2
11-12	3,6	25,5	1,45	3,09	0,348	71,9	0,76	1,348	73,5
12-13	8,1	26,9	1,56	3,32	0,270	76,8	0,77	1,270	74,1
13-14	10,7	27,7	1,62	3,44	0,799	115,4	0,76	1,799	179,7
14-15	6,2	26,4	1,52	3,23	0,447	111,4	0,76	1,447	125,9
15-16	9,8	26,0	1,49	3,17	0,046	142,4	0,76	1,046	104,9
16-17	22,4	25,8	1,47	3,13	0,439	308,6	0,76	1,439	344,8
17-18	58,7	25,0	1,41	3,00	-0,032	158,3	0,75	0,968	50,6
18-19	234,7	23,6	1,31	2,79	-0,300	1146,8	0,74	0,700	159,8

Tabela 19. Valores de resistência aerodinâmica (s/m), resistência crítica (s/m), temperatura (°C), razão de Bowen e resistência da soja ao transporte de vapor d'água (s/m), no dia 16/03/76.

HORA	r <sub>a</sub>	T	s	$\frac{s}{Y}$	$\beta$	r <sub>vc</sub>	$\frac{s}{s+Y}$	( $\beta+1$ )	r <sub>v</sub>
6-7	-117,3	18,4	0,99	2,11	0,192	773,8	0,68	1,192	695,3
7-8	-3,4	20,3	1,10	2,34	-0,379	121,0	0,70	0,621	59,1
8-9	-4,8	21,4	1,17	2,49	-0,163	76,0	0,71	0,837	52,1
9-10	-3,5	22,2	1,22	2,60	-0,161	68,6	0,72	0,839	46,5
10-11	-4,2	23,8	1,33	2,83	-0,064	72,5	0,74	0,936	55,1
11-12	2,0	24,6	1,38	2,94	0,156	69,5	0,75	1,156	58,8
12-13	1,7	26,4	1,52	3,23	-0,155	76,7	0,76	0,845	47,0
13-14	10,9	25,1	1,42	3,02	-0,190	95,7	0,75	0,810	41,1
14-15	10,0	27,7	1,62	3,45	0,215	134,0	0,78	1,215	123,6
15-16	17,6	26,0	1,49	3,17	0,098	152,2	0,76	1,098	114,9
16-17	50,3	26,9	1,56	3,32	0,051	166,0	0,77	1,051	92,3
17-18	35,2	24,7	1,40	2,98	0,047	390,8	0,75	1,047	281,7
18-19	117,3	21,4	1,17	2,49	-0,309	-2424,1	0,71	0,691	-1402,5

Tabela 20. Valores de resistência aerodinâmica (s/m), resistência crítica (s/m), temperatura (°C), razão de Bowen e resistência da soja ao transporte de vapor d'água (s/m), no dia 17/03/76.

HORA	r <sub>a</sub>	T	s	$\frac{s}{y}$	β	r <sub>v</sub> c	$\frac{s}{s+y}$	(β+1)	r <sub>v</sub>
6-7	-220,0	18,1	0,98	2,09	4,386	3940,7	0,68	5,386	12552,9
7-8	18,5	20,5	1,11	2,36	0,257	266,1	0,70	1,257	227,7
8-9	7,3	23,6	1,31	2,79	0,581	124,0	0,74	1,581	148,8
9-10	12,6	23,5	1,31	2,79	0,073	100,4	0,74	1,073	69,2
10-11	5,1	25,9	1,49	3,17	0,339	57,9	0,76	1,339	59,3
11-12	3,3	26,6	1,54	3,28	0,331	71,6	0,77	1,331	73,3
12-13	2,3	27,6	1,61	3,43	0,140	96,0	0,77	1,140	83,5
13-14	4,0	26,8	1,55	3,29	-0,143	106,6	0,77	0,857	64,2
14-15	25,1	27,2	1,58	3,36	0,018	148,6	0,77	1,018	93,0
15-16	35,2	25,7	1,46	3,11	0,023	295,7	0,76	1,023	196,1
16-17	-80,0	23,2	1,29	2,74	0,862	435,4	0,73	1,862	484,9
17-18	-117,3	22,4	1,23	2,62	1,307	397,9	0,72	2,307	380,2
18-19	-88,0	21,9	1,20	2,55	0,167	732,0	0,72	0,875	664,3



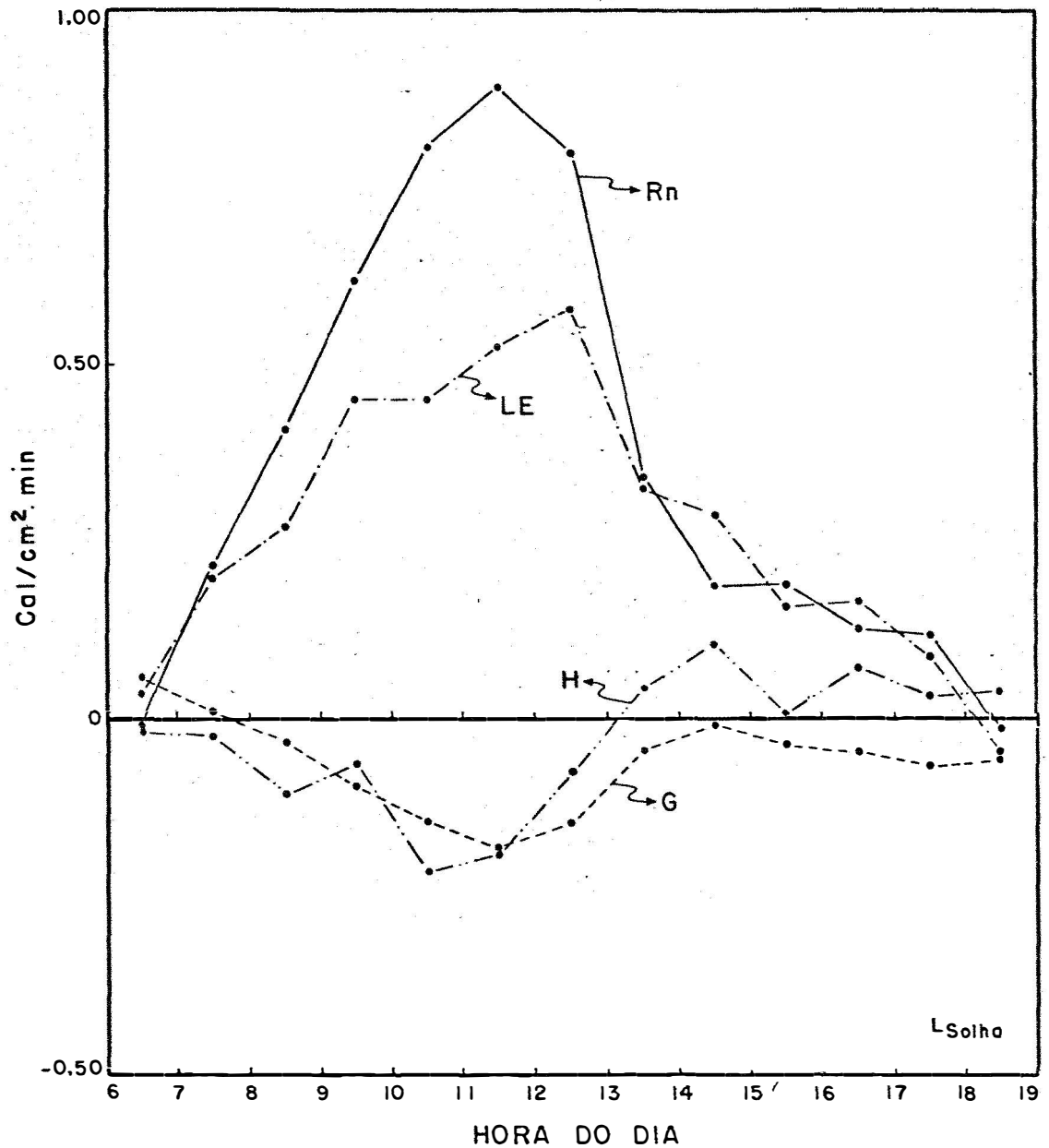


Fig.3. - Variação horária da radiação líquida ( $R_n$ ), do fluxo de calor no solo ( $G$ ), do fluxo de calor sensível ( $H$ ) e latente ( $LE$ ), em cultura de soja, no dia 30/1/76.

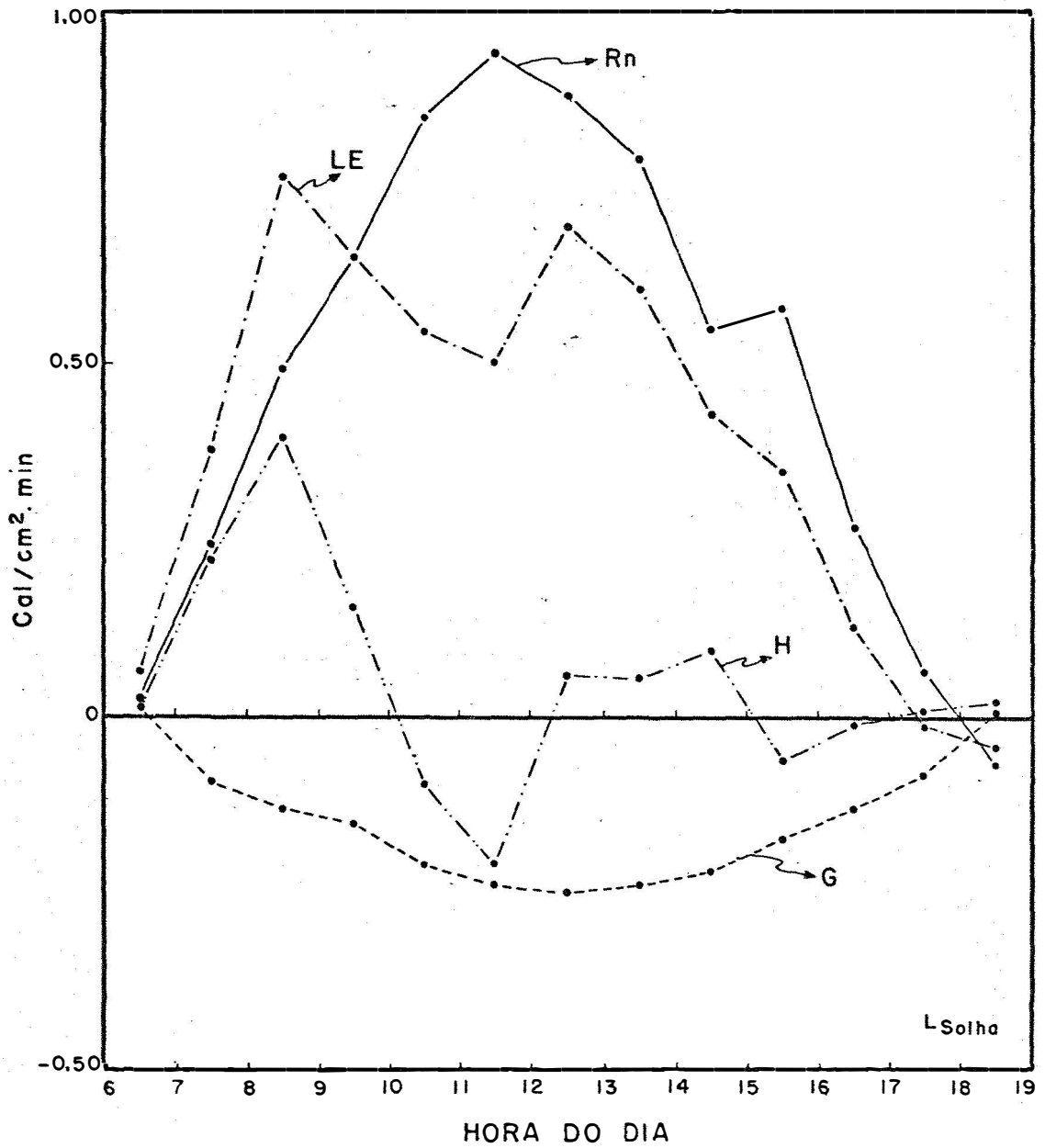


Fig.4 - Variação horária da radiação líquida (Rn), do fluxo de calor no solo (G), do fluxo de calor sensível (H) e latente (LE), em cultura de soja, no dia 11/2/76.

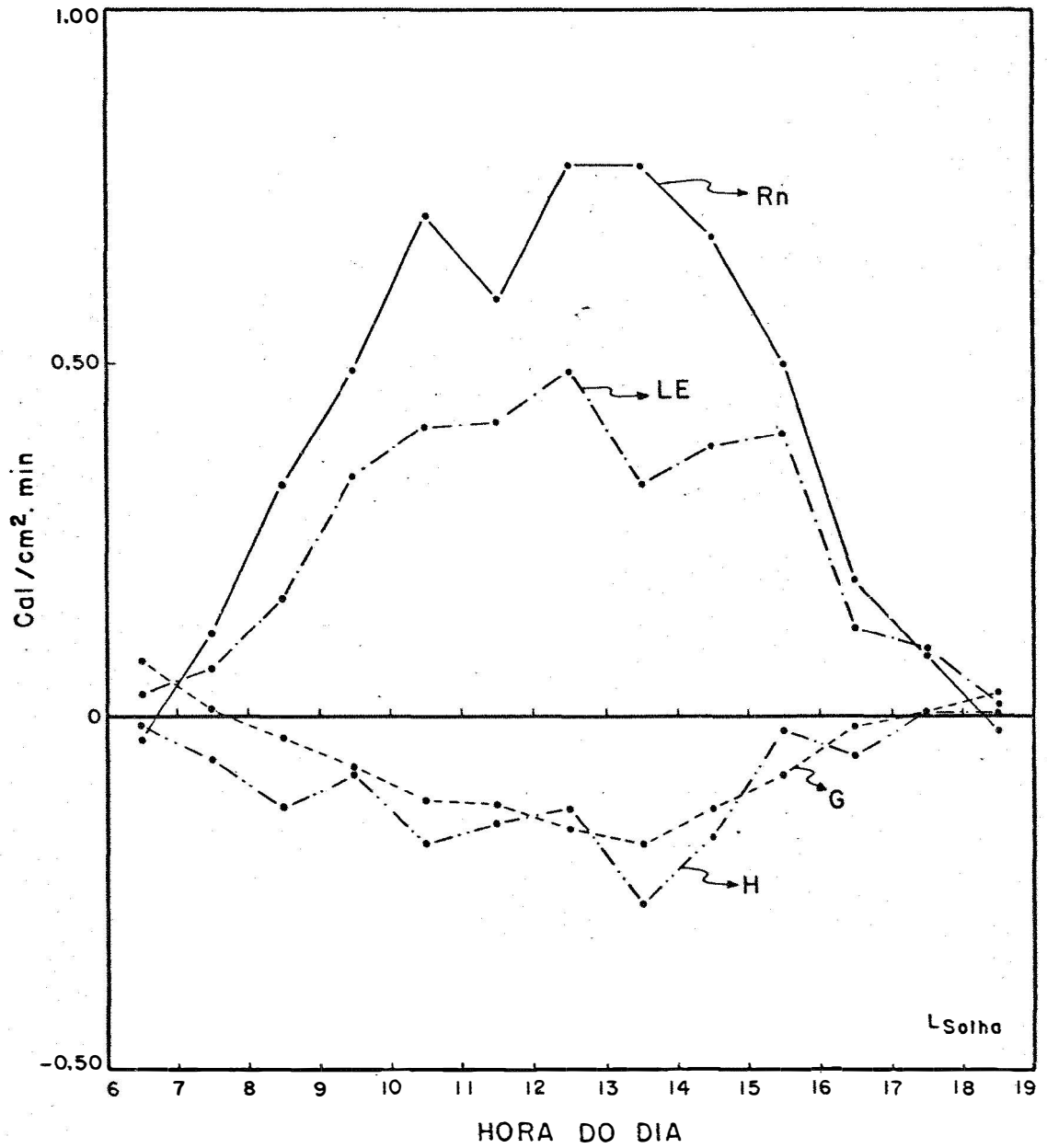


Fig.5. — Variação horaria da radiação líquida (Rn), do fluxo de calor no solo (G), do fluxo de calor sensível (H) e latente (LE), em cultura de soja, no dia 12/3/76.

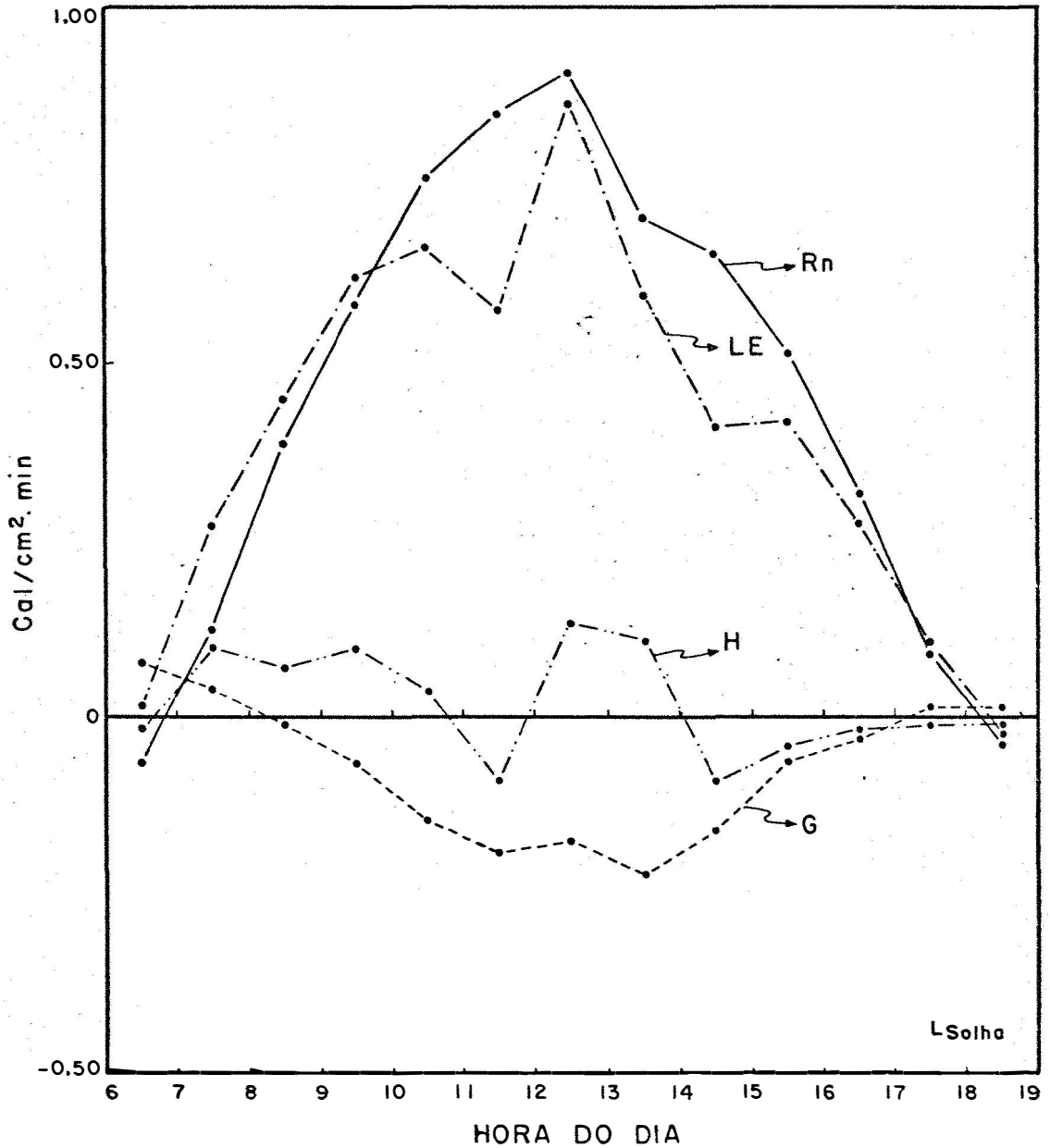


Fig. 6. — Variação horaria da radiação líquida (Rn), do fluxo de calor no solo (G), do fluxo de calor sensível (H) e latente (LE), em cultura de soja, no dia 16/3/76.

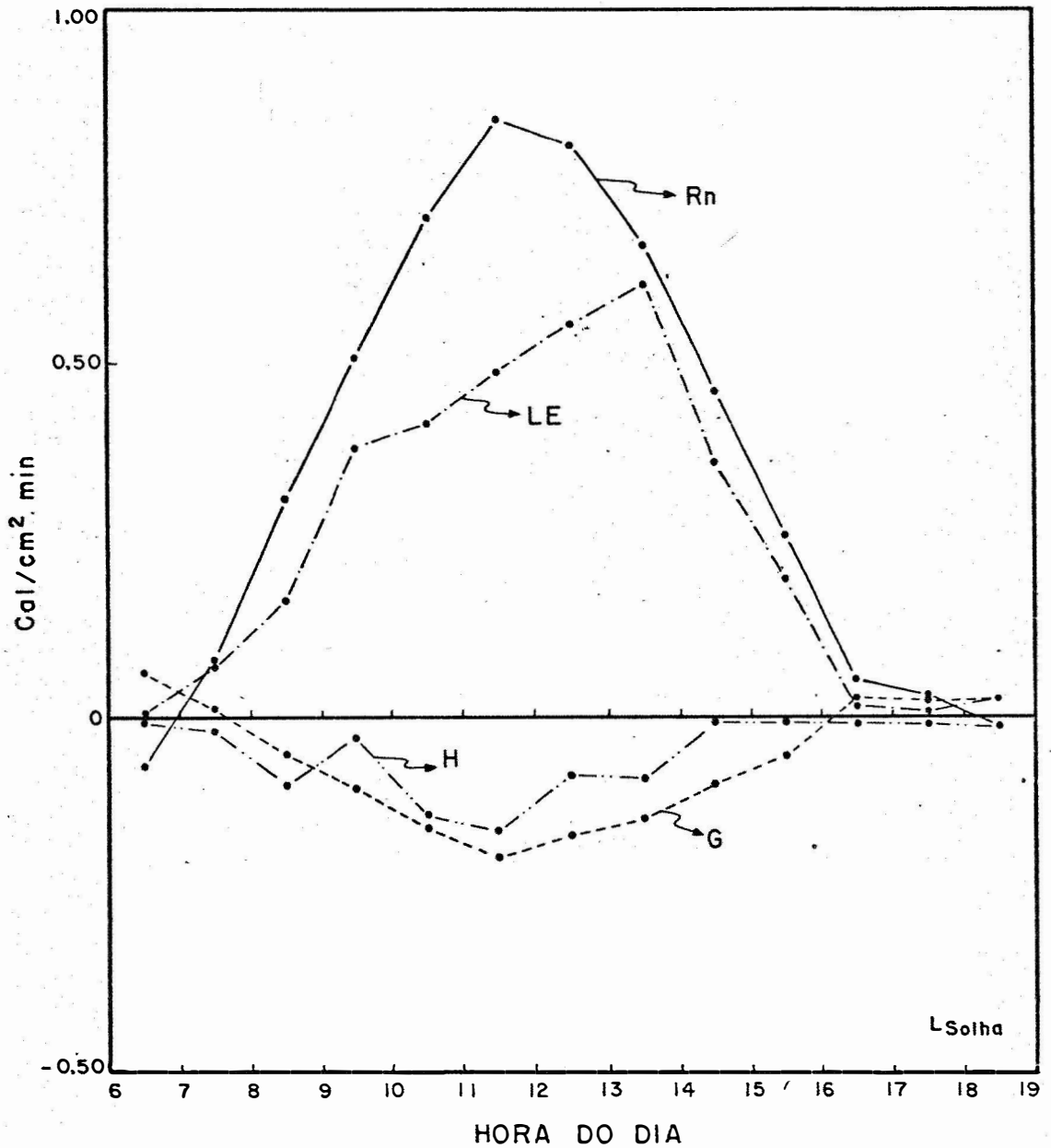


Fig. 7. — Variação horária da radiação líquida (Rn), do fluxo de calor no solo (G), do fluxo de calor sensível (H) e latente (LE), em cultura de soja, no dia 17/3/76.

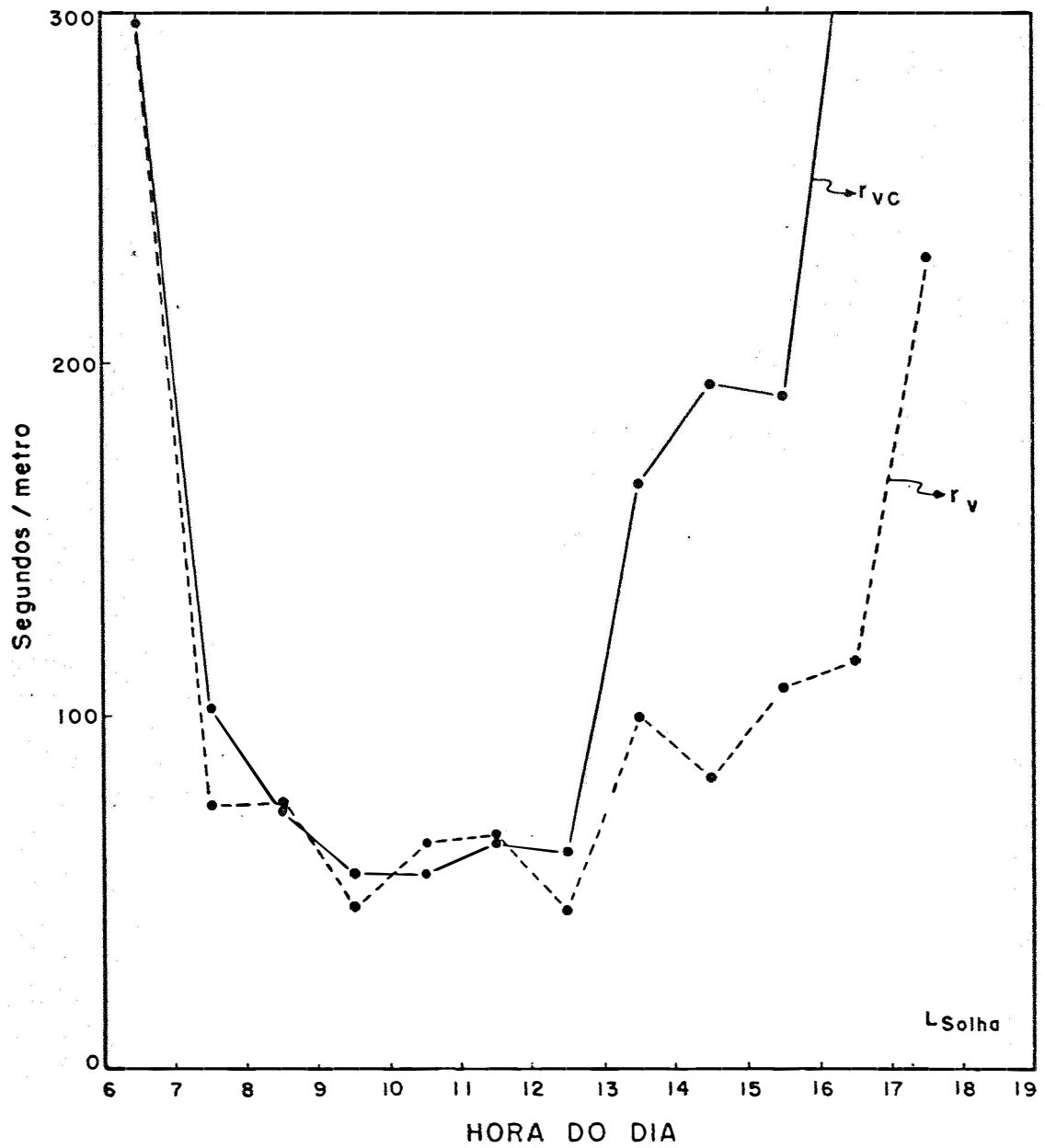


Fig. 8. Variação horária da resistência ( $r_v$ ) e da resistência crítica ( $r_{vc}$ ), da cultura de soja, ao transporte de vapor d'água no dia 30/1/76.

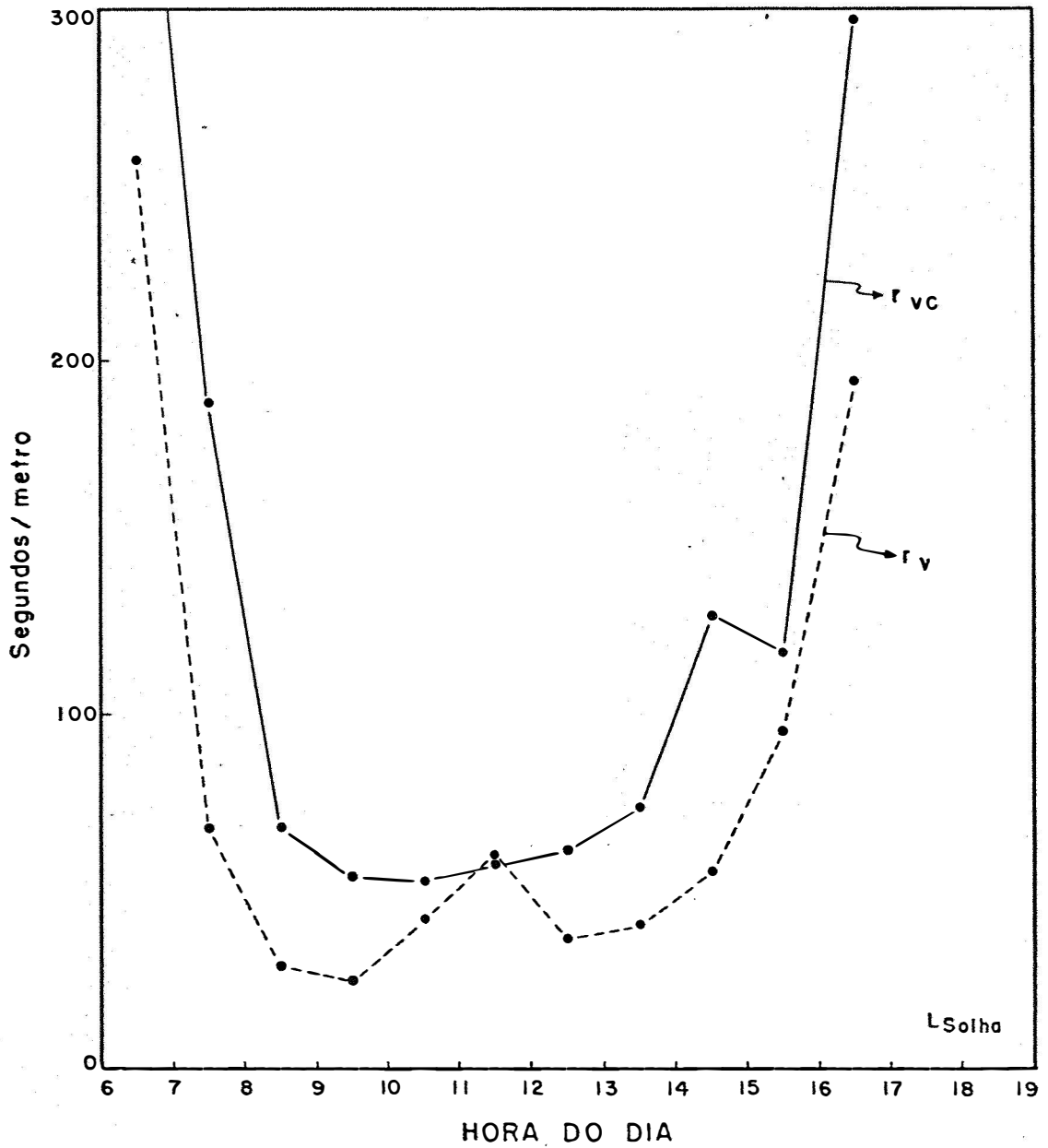


Fig. 9. Variação horária da resistência ( $r_v$ ) e da resistência crítica ( $r_{vc}$ ), da cultura de soja, ao transporte de vapor d'água no dia 11/2/76.

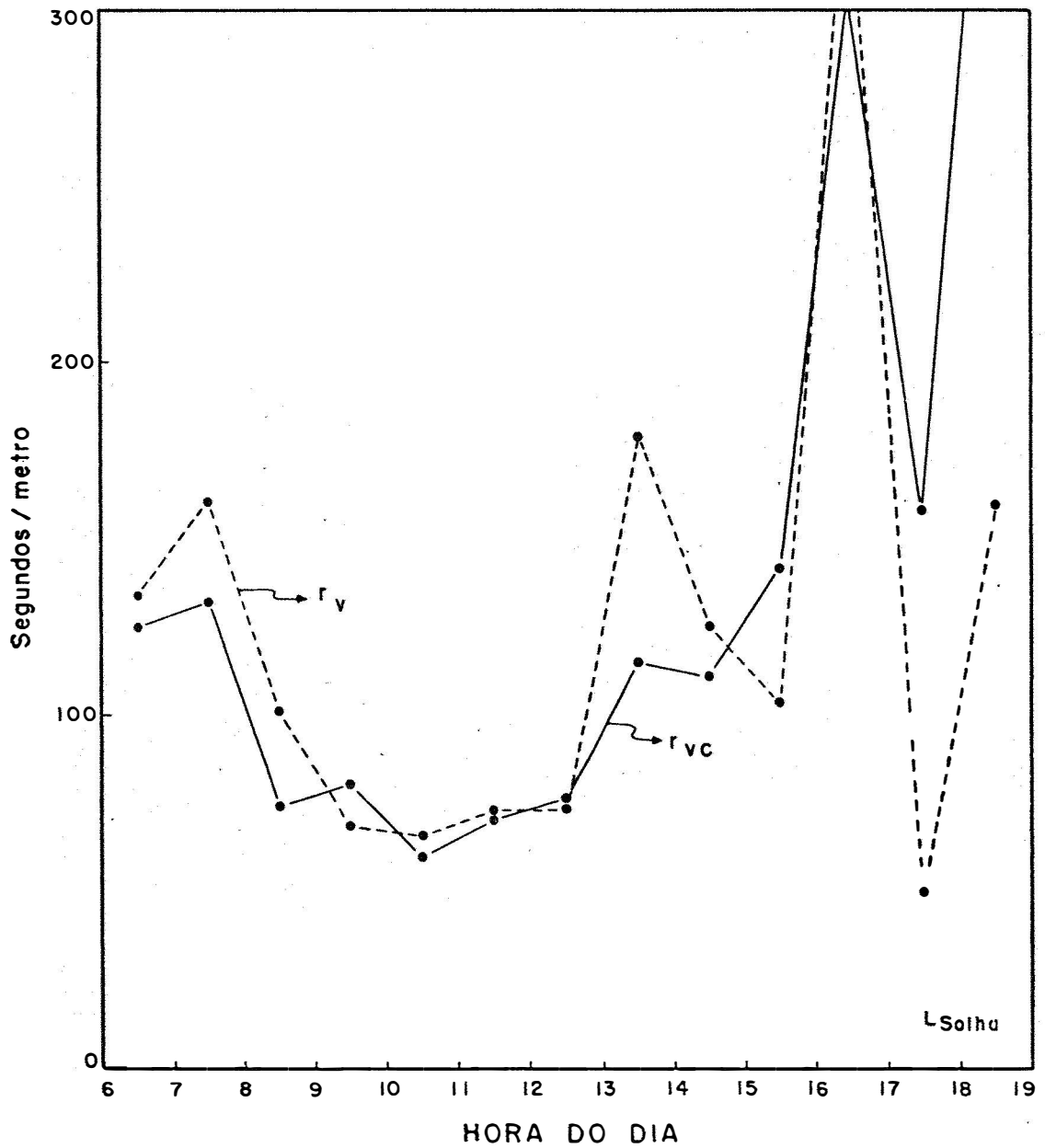


Fig.10. Variação horária da resistência ( $r_v$ ) e da resistência crítica ( $r_{vc}$ ), da cultura de soja, ao transporte de vapor d'água no dia 12/3/76.



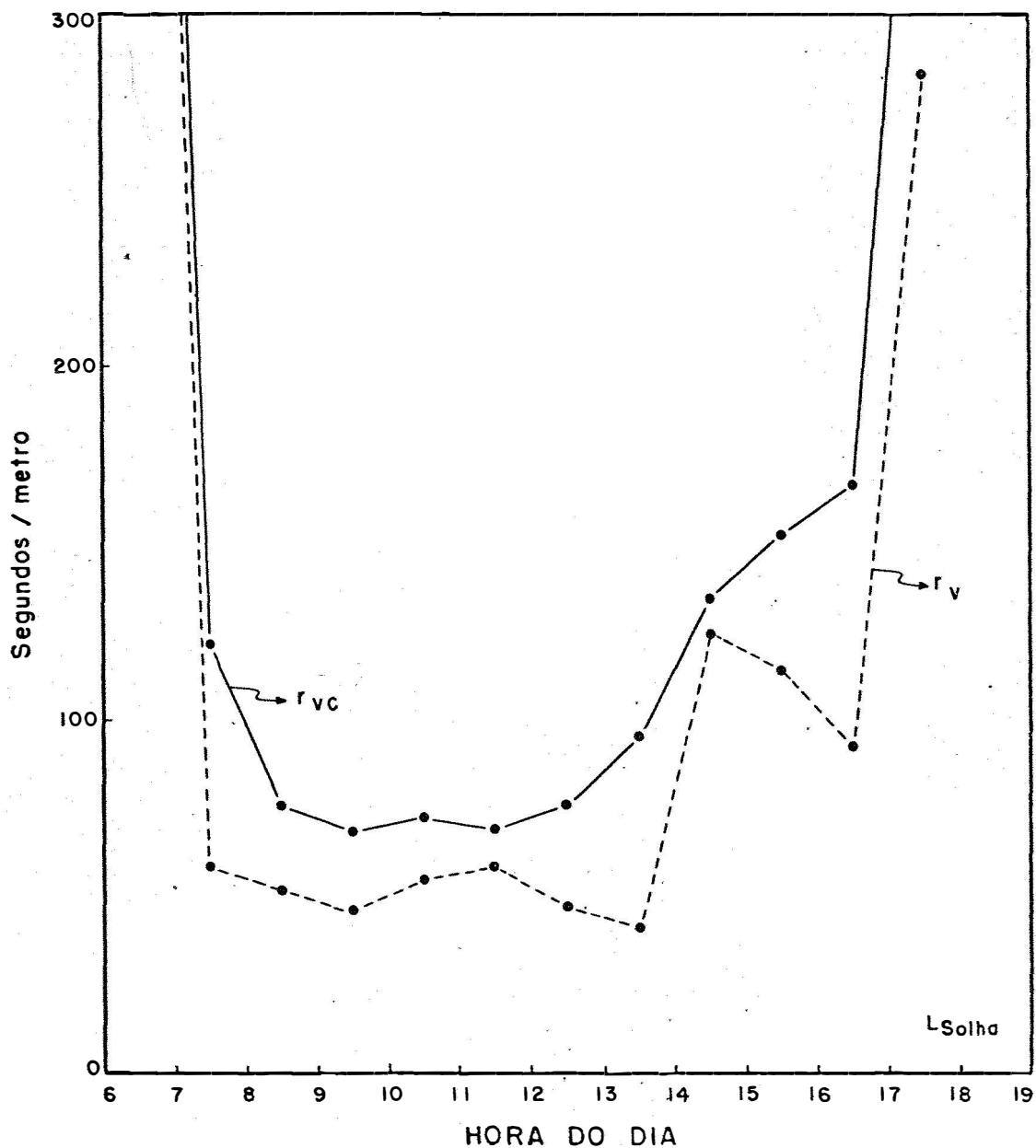


Fig. 11. Variação horária da resistência ( $r_v$ ) e da resistência crítica ( $r_{vc}$ ), da cultura de soja, ao transporte de vapor d'água no dia 16/3/76.

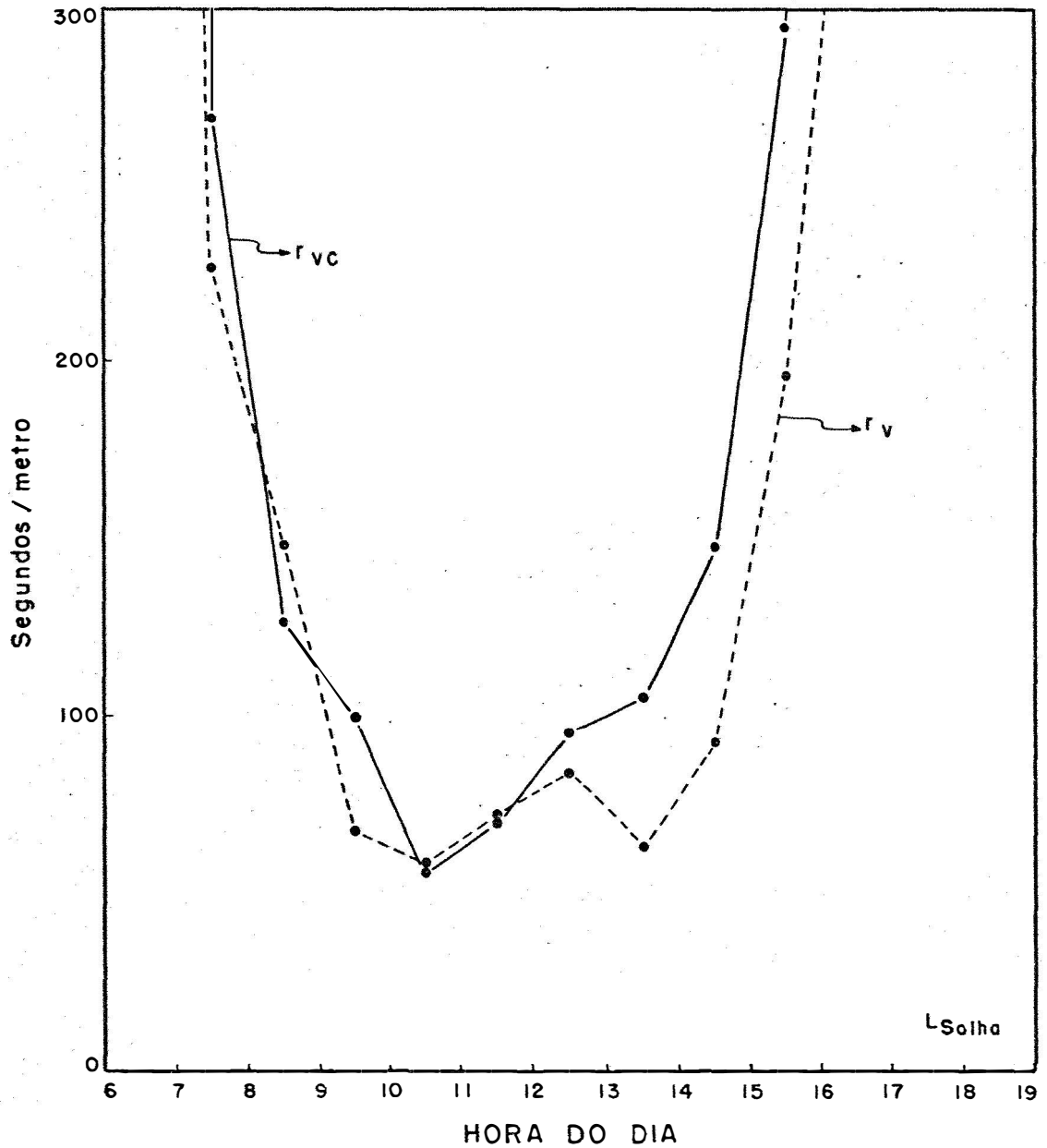


Fig.12.-Variação horária da resistência ( $r_v$ ) e da resistência crítica ( $r_{vc}$ ), da cultura de soja, ao transporte de vapor d'água no dia 17/3/76.

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1. Balanco de energia

#### 6.1.1. Interpretação dos sinais

O critério adotado para desenvolvimento do método do balanço de energia, baseou-se na convenção de se considerar como positivos, os fluxos que entram no sistema, e como negativos, os que dele saem.

Nos dados observados é constante a alternância de sinais de LE, H e G, que têm o seguinte significado:

- H (-) = fluxo de calor sensível para a atmosfera;
- H (+) = fluxo de calor sensível para o sistema, contribuindo para aumentar a taxa de evaporação;
- LE (-) = fluxo de vapor (evaporação);
- LE (+) = condensação;
- G (-) = fluxo de calor para o interior do solo;
- G (+) = fluxo de calor do interior do solo para a superfície.

#### 6.1.2. Distribuição da energia solar recebida por cultura de soja

As Tabelas 1 a 5 mostram os valores dos componentes do balanço de energia, e permitem, de maneira geral, obter-se valores, para a soja, da distribuição da energia solar recebida.

Considerando-se o valor da radiação líquida como sendo 100%, para dias em que não houve contribuição ad-

vectiva de energia, a sua repartição em diferentes processos é mostrada na Figura 13.

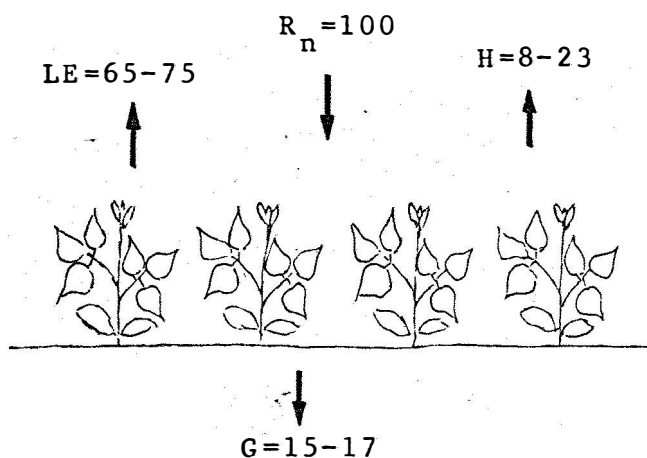


Fig. 13. Esquema da distribuição da energia solar recebida, em diferentes processos, para a cultura de soja, em dias sem advecção.

Nos dias 11/02/76 e 16/03/76, houve uma pequena contribuição da energia advectiva para aumentar a evaporação, do que resulta a distribuição da energia mostrada na Figura 14.

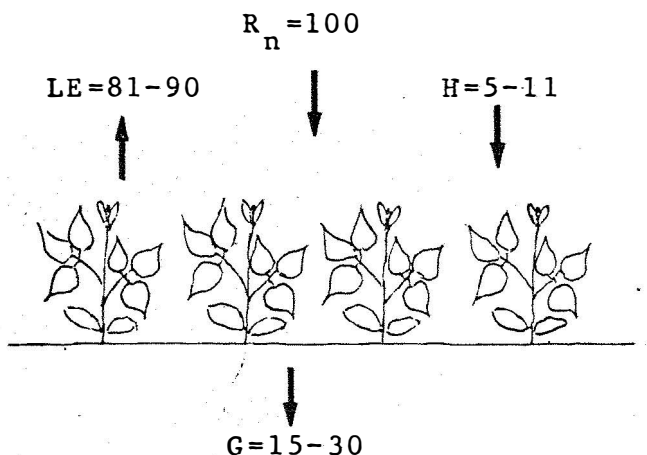


Fig. 14. Esquema da distribuição da energia solar recebida, em diferentes processos, para a cultura de soja, em dias com pequena advecção.

Nota-se que as porcentagens de LE e G aumentaram em relação aos dias sem advecção, pois este processo contribui para incremento da energia recebida pelo sistema, que é representada pela inversão do fluxo de calor sensível.

### 6.1.3. O valor do fluxo de calor no solo

O fluxo de calor no solo é função da densidade de cobertura, do valor absoluto de  $R_n$  e das propriedades físicas do solo.

No dia 30/01/76 o fluxo do calor no solo teve seu valor afetado, por ter a  $R_n$  diminuído, verificando-se que houve uma defasagem de uma hora da influência de  $R_n$  em G, por não ter, a soja, coberto totalmente o solo.

No caso das demais datas de observação, como a cultura já estivesse fechada, as folhas funcionaram como cobertura, o que homogeneizou e atenuou as perdas de radiação, como se pode verificar nas figuras 4 a 7.

De acordo com outros autores os valores extremos de fluxo de calor no solo, para diversas culturas, foram de 0,30 a 0,40 cal/cm<sup>2</sup>.min, para arroz (LOURENCE *et alii* (1970)); 0,19 cal/cm<sup>2</sup>.min, para arroz de sequeiro (VILLA NOVA *et alii* (1975)); 0,20 cal/cm<sup>2</sup>.min, para alfafa (van BAVEL e EHRLER (1968)); 0,10 a 0,15 cal/cm<sup>2</sup>.min, para alfafa (TANNER (1960)) e, também, FUCHS (1973).

Pela análise desses valores verifica-se que os dados obtidos com soja no presente trabalho, foram de 0,24 cal/cm<sup>2</sup>.min, e estão coerentes com a ordem de grandeza dos valores extremos de fluxo de calor no solo, obtidos por outros autores. A princípio, este valor, ocorrido no dia 11/02/76, parecia muito alto, perfazendo 30% da radiação líquida incidente.

#### 6.1.4. Relações entre $R_n$ , LE e H

Os valores de evapotranspiração contidos nas Tabelas 1 a 5 podem ser admitidos como sendo em mm/hora, desde que 59 cal/cm<sup>2</sup> correspondem a 1 mm de evaporação.

Nota-se que não há uma perfeita concordância de fase entre LE e  $R_n$ , pelo fato de LE depender primordialmente do balanço de energia da superfície vegetada, que é defasado de seu valor à altura de 100 cm, onde é medida a  $R_n$ .

Mesmo quando não ocorre advecção, o calor sensível (H) pode contribuir para aumentar a LE. Este caso ocorre nas primeiras horas da manhã e às vezes à tarde, quando há uma inversão de gradiente. Por exemplo, no dia 11/02/76, conforme representado na figura 4, e no dia 16/03/76, como se verifica na figura 6, durante o período da manhã houve uma contribuição da transferência de calor para o ar, ocorrendo um incremento em LE.

No período da tarde a inversão de gradiente variou em relação à hora de ocorrência, fazendo o fluxo de H tornar-se positivo, normalmente a partir das 17-18 horas.

O incremento do valor de LE, quando o fluxo H não contribuiu para seu aumento, foi da ordem de 0,10 a 0,15 mm/hora, nas condições do experimento, tendo os valores mais elevados de LE variado de 0,50 a 0,75 mm/hora. A relação LE/ $R_n$  pode representar uma boa estimativa da evapotranspiração em função da radiação líquida, para dias sem advecção.

Nas condições do presente experimento e considerando as sucessivas datas de observação, foram obtidos, respectivamente os seguintes valores de LE/ $R_n$ : 0,75, 0,81, 0,62, 0,90 e 0,71 com um valor médio para os cinco dias de 0,76.

Os valores mais altos (0,81 e 0,90) ocorridos em 11/02/76 e 16/03/76, foram devidos à contribuição de energia ao sistema, decorrente da inversão do gradiente de temperatura no período da manhã, fazendo com que o fluxo de calor sensível (H), promovesse um aumento no fluxo de calor latente (LE).

O valor mais baixo (0,62) ocorrido em 12/03/76, deveu-se, provavelmente, à uma restrição do processo evaporativo pela comunidade vegetal, resultando numa diminuição do fluxo LE em relação à disponibilidade de energia, representada por  $R_n$ .

O fator médio (0,76) encontrado na relação LE/ $R_n$ , para a cultura de soja, corresponde ao valor observado para a maioria das culturas, que se encontra em torno de 0,75.

#### 6.1.5. Considerações sobre o valor de $\beta$

O valor de  $\beta$  é negativo, durante o processo evaporativo, quando o fluxo H é positivo. Isto acontece nos casos de transferência de energia do ar para o sistema, que pode ocorrer em duas circunstâncias:

a) inversão de temperatura: no presente caso, isso ocorreu nas primeiras horas da manhã quando houve inversão do gradiente (11/02/76 e 16/03/76), pois havia orvalho nas folhas da soja. Ao se iniciar o processo evaporativo, o orvalho contribuiu para uma diminuição da temperatura das folhas, fazendo com que o fluxo de calor fosse do ar para o sistema. À tarde, normalmente, ocorreu a inversão de temperatura, pois, as folhas se resfriaram mais depressa do que o ar.

b) advecção: quando há transporte horizontal

de energia pela ação do vento, gradientes elevados de temperatura ocorrem acima da superfície, transferindo grandes quantidades de energia para o sistema. Esta condição ocorre em áreas irrigadas, quando o solo na circunvizinhança está seco. Como as observações foram feitas após dias chuvosos, essa condição especial não foi notada, o que não evitou, porém, a ocorrência, em pequena escala, do processo advectivo nos dias 11/02/76 e 16/03/76.

Segundo TANNER (1960), valores de  $\beta$  entre  $-0,5$  e  $-1,5$  levam à obtenção de valores de LE, calculados segundo a equação (25), e não devem ser considerados consistentes. E quando  $\beta \rightarrow -1$  a equação (25) torna-se indeterminada, porém, esta condição só ocorre em horas em que a troca de calor é baixa, tais como, no nascer e no por do sol e, ocasionalmente, durante à noite.

Nas condições do presente experimento, os valores de  $\beta$  anteriormente mencionados não ocorreram, exceto no dia 11/02/76, quando  $\beta$  foi igual a  $-0,594$  e  $-0,520$ , às 8 e 9 horas, respectivamente e no dia 17/03/76, os valores:  $4,386$  e  $1,307$ .

## 6.2. Resistência ao transporte de vapor d'água

### 6.2.1. Resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água ( $r_a$ )

A resistência aerodinâmica é um parâmetro intermediário no cálculo da resistência da cultura ao transporte de vapor d'água.

Segundo MONTEITH (1973) a resistência do ar é, normalmente calculada com base na velocidade do vento, da qual é uma função inversa. Porém, para fins práticos, como as resistências do ar ao transporte de vapor d'água e ao transpor-



te de calor são numericamente iguais, usou-se, neste trabalho, a equação baseada no gradiente de temperatura e no fluxo de calor sensível acima do topo da cultura.

Os valores de  $r_a$  encontrados por VERMA *et alii* (1976) para sorgo, foram da ordem de 10 a 13 s/m, alcançando em outros dias 20 s/m. PLAUT e MORESHET (1973), citam trabalho de Stanhill e Moreshet, no qual, para a cultura do algodão, foi determinado  $r_a = 20$  s/m.

Esses valores são da mesma ordem de grandeza daqueles encontrados para a soja no presente trabalho, no período das 9 às 16 horas.

Durante a manhã e à tarde foram encontrados valores muito altos, que às vezes apareciam com sinal negativo, significando inversão do sentido do fluxo.

#### 6.2.2. Resistência crítica ao transporte de vapor d'água ( $r_{vc}$ ).

Quando há deficiência de água, a resistência do vegetal ao transporte de vapor aumenta, em razão do fechamento dos estômatos, fazendo com que a evapotranspiração diminua, embora continue havendo influência da velocidade do vento, no sentido de aumentar o consumo d'água pelas plantas.

Os estômatos podem se fechar até prover uma resistência, na qual a velocidade do vento não mais influencia a evapotranspiração, através da  $r_a$ . Essa é a resistência crítica do vegetal ao transporte de vapor d'água, que determina o ponto de evapotranspiração potencial mínima.

A variação da  $r_{vc}$  no curso do dia, de acordo com os resultados obtidos por GOSSE (1976), trabalhando com grama, foi a seguinte: era mínima na maior parte do dia, quando

$R_n$  era máximo e era máxima de manhã e à tarde, quando  $R_n$  era muito baixo. Os valores encontrados para  $r_{vc}$  foram de 100-150 s/m, durante o amanhecer e entardecer, e de 40-70 s/m das 9 as 15 horas.

Nas condições do presente experimento conseguiu-se a mesma variação horária de  $r_{vc}$ , porém, os valores encontrados foram: da ordem de 200-300 s/m, no início e fim do dia e de 60-80 s/m, nas horas com  $R_n$  mais elevada.

### 6.2.3. Resistência da cultura ao transporte de vapor d'água ( $r_v$ )

Esta resistência é devida à estrutura e fisiologia da planta e ocorre no percurso do vapor d'água da câmara estomática ao exterior da folha, estando, portanto, estreitamente ligada ao grau de abertura dos estômatos, que por sua vez depende, essencialmente, das condições de umidade da cobertura vegetal.

A resistência da cultura exprime a resistência oferecida globalmente pela massa vegetal à difusão do vapor d'água, a um determinado nível superior da cobertura.

Logo, sob determinadas condições, os estômatos podem se fechar rápida e completamente, ou eles podem exercer um refinado tipo de controle, no qual o fechamento resulta num balanceamento do ganho ou perda d'água. Nos dois casos, uma medida do valor de  $r_v$  é um método lógico que, segundo van BAVEL (1967), deve caracterizar a resposta da planta à perda de água.

Segundo BROWN e ROSEMBERG (1973), o valor da resistência da cultura excede de 5 a 7 vezes o valor de  $r_a$ , o que ocorreu, às vezes, com os valores encontrados para a soja neste trabalho.

A tabela de Cowan e Milthorpe, adaptada por PLAUT e MORESHET (1973), para valores mais baixos de  $r_v$  de diferentes espécies, apresenta os seguintes resultados:

<i>Beta vulgaris</i>	50 s/m
<i>Helianthus annuus</i>	70 s/m
<i>Medicago sativa</i>	80 s/m
<i>Solanum tuberosum</i>	90 s/m
<i>Gossypium hirsutum</i>	160 s/m
<i>Phaseolus vulgaris</i>	480 s/m

No presente trabalho, considerando os valores de resistência da cultura nas horas em que a  $R_n$  é maior, verifica-se que os valores de  $r_v$  variaram entre 40 e 60 s/m, o que demonstra estar a soja entre as espécies de plantas que não oferecem alta resistência vegetal ao transporte de vapor d'água. Entretanto, deve-se levar em conta que, nas presentes condições experimentais a cultura não apresentava deficiência de umidade muito elevada.

Deve-se lembrar que para se poder concluir que uma espécie ou variedade de planta apresenta maior resistência às condições de seca, é preciso comparar medições efetuadas nas mesmas condições ambientais e no mesmo horário.

#### 6.2.4. Relações entre $r_v$ e $r_{vc}$

A resistência crítica de uma cobertura vegetal determina a ocorrência de uma evapotranspiração potencial mínima, que depende da radiação líquida, do fluxo de calor no solo e da temperatura do ar, porém, é independente da velocidade do vento e da resistência aerodinâmica.

Se uma cobertura vegetal é caracterizada por uma resistência  $r_v$  inferior à resistência crítica do momento,

a evaporação cresce com o incremento da velocidade do vento e depende do fluxo de calor sensível.

Essa condição ocorreu a partir das 12 horas nos dias 30/01/76 e 17/03/76, e durante todo o dia em 11/02/76 e 16/03/76, não tendo ocorrido, praticamente, no dia 12/03/76.

Por outro lado, se essa resistência  $r_v$  é superior a  $r_{v_c}$ , o inverso acontece.

No presente trabalho, a restrição de  $r_v$  no processo evaporativo pode assim ser vista:

a) comparando-se as figuras 4 e 9, onde se nota que no período entre 11 e 12 horas houve uma elevação do nível de  $r_v$  para 60 s/m, fazendo com que a LE fosse diminuída.

b) comparando-se as figuras 5 e 10, onde se nota que  $r_v$  foi, normalmente, igual ou superior a  $r_{v_c}$ , atingindo valores altos, da ordem de 80 a 150 s/m. Nota-se que no dia 12/03/76, a razão  $LE/R_n$  alcançou seu nível mais baixo (0,62), pela restrição oferecida ao processo evaporativo.

A  $r_a$  e a  $r_v$  são resistências calculadas em função do fluxo de calor sensível ou em função da razão de Bowen, portanto, sempre que ocorrer advecção ou altos valores de  $\beta$ , positivos ou negativos, haverá erros nas estimativas de  $r_v$ ,  $r_a$  e  $r_{v_c}$ , pois, nessas condições, o balanço de energia possui limitações impostas pelo erro conceitual do método.

## 7. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos e de sua discussão tem-se as seguintes conclusões:

a) Nas condições experimentais, o valor mais elevado para LE foi de  $0,869 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$ .

b) O valor médio da razão  $LE/R_n$ , para a soja, foi de 0,76.

c) O valor médio da resistência da soja ao transporte de vapor d'água foi de 40 a 60 s/m, nas horas de maior radiação líquida.

d) Nas condições experimentais, a resistência da cultura ( $r_v$ ) mostrou-se mais importante do que a resistência do ar ( $r_a$ ) no controle da perda de água.

e) As estimativas de  $r_a$  e  $r_v$  não são consistentes quando ocorrem condições de advecção ou altos valores, negativos ou positivos, da razão de Bowen.

## 8. SUMMARY

The knowledge of the water requirement for each crop is essential to define the need for irrigation as well as to establish the best ecological condition for its development.

The energy balance method offers satisfactory conditions for an adequate estimation of the crop requirements and for the partitioning of the energy available to the system. It allows also the estimation of the resistance imposed by the plant-atmosphere system to the water vapor transport.

The present study was carried out using the energy balance method to determine:

1. the partitioning of the incident solar energy in to evapotranspiration and air and soil heating;
2. the resistance to the water vapor transport offered by the crop and by the air layer on top of the canopy.

Microclimatological data were used to estimate the crop, the critical and the aerodynamic resistances to water vapor transport. These parameters permit quantitative evaluation of the limitations to the evaporative process due to the crop structure and crop physiology.

Aerodynamic resistance to water vapor transport was close to 10 s/m during the period between 9 to 16 hours.

The variation on the critical resistance to water vapor transport was high (200-300 s/m) in the early or late hours of the day. The value was low close to noon when net radiation was high. Crop resistance to water vapor transport varied from 40 to 60 s/m during periods of higher net radiation.



## 9. LITERATURA CITADA

- ABDEL-AZIZ, M. H.; S. A. TAYLOR e G. L. ASHCROFT, 1964. Influence of advective energy on transpiration. *Agron. J.* Madison, 56:139-142.
- BERNARD, E. A., 1965. Theorie et mesure de l'evapotranspiration. UNESCO. (Arid zone Research, 25). Paris.
- BLACKWELL, M. J., 1965. Measurement of natural evaporation: comparison of gravimetric and aerodynamic methods. UNESCO. (Arid Zone Research, 25). Paris.
- BOWEN, I. S., 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev. Serv.* 2. Ithaca, 27:779-787.
- BROWN, K. W. e N. J. ROSEMBERG, 1973. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. *Agron. J.* Madison, 65:341-347.

- BROWN, K. W. e W. COVEY, 1966. The energy-budget evaluation of the micrometeorological transfer processes within a cornfield. *Agric. Meteorol.* Amsterdam, 3:73-96.
- CHIN CHOY, E. W. e E. T. KANEMASU, 1974. Energy balance comparisons of wide and narrow row spacings in sorghum. *Agron. J.* Madison, 66:98-100.
- DEACON, E. L., 1950. The measurement and recording of the heat flux into the soil. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* London, 76:479.
- DENMEAD, O. T., 1966. The energy balance of plant communities. In: *Agricultural Meteorology. Proceedings of the WMO seminar.* Australia. 1:71-105.
- FUCHS, M. 1973. Water transfer from the soil and vegetation to the atmosphere. In: YARON, B.; E. DANFORS e Y. VAADIA (ed.). *Arid zone Irrigation.* Springer, Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 434p.
- FUNK, J. P., 1959. Improved polythene - Shielded net radiometers. *J. Sci. Inst.* London, 36:267-270.
- GOSSE, G., 1976. Évaporation et caractéristiques d'échange d'un gazon en climat équatorial humide. *Ann. agron.* Paris, 27:141-163.
- HANKS, R. J.; L. H. ALLEN e H. R. GARDNER, 1971. Advection and evapotranspiration of wide-row sorghum in Central Great Plains. *Agron. J.* Madison, 63:520-527.
- HARPER, L. A., 1972. A miniature strip net radiometer. *Agron. J.* Madison, 64:403-405.
- HEILMAN, J. L. e E. T. KANEMASU, 1976. An evaluation of a resistance form of the energy balance to estimate evapotranspiration. *Agron. J.* Madison, 68:607-611.

- JACKSON, R. D., 1967. Effect of slope, aspect and albedo on potential evapotranspiration from hillslopes and catchments. *J. Hidrology*. Durreidin, 6:60-69.
- KALMA, J. D. e G. STANHILL, 1969. Transpiration, evaporation and deep drainage losses from an orange plantation. *Israel J. Agric. Res.*. Israel, 19:11-24.
- KNOERR, K. R. e L. W. GAY., 1965. Tree leaf energy balance. *Ecology*. Durham, 46:17-24.
- LANG, A. R. G., 1973. Measurement of evapotranspiration in the presence of advection, by means of a modified energy balance procedure. *Agric. Meteorol.* Amsterdam, 12:75-81.
- LEMON, E., 1963. Energy and water balance of plant communities. In: EVANS, L. T. (ed.). *Environmental control of plant growth*. Nova York, Londres. Academic Press. 449p.
- LOURENCE, F. J. e W. O. PRUITT, 1971. Energy balance and water use of rice grown in central California. *Agron. J.* Madison, 63:827-832.
- LOURENCE, F. J.; W. O. PRUITT e A. SERVIS, 1970. I. Energy balance and the crop water requirements of rice grown in California. *Water Science & Engeneering Papers* 9002. Davis, 44p.
- McILROY, I. C., 1971. An instrument for continuons recording of natural evaporation. *Agric. Meteorol.* Amsterdam, 9: 93-100.
- MONTEITH, J. L., 1963. Gas exchange in plant communities. In: *Environmental control of plant growth*. Academic Press, New York. 95-112.
- MONTEITH, J. L., 1965. Evaporation and environment. In: *The state and movement of water in living organisms. XIXth Symposium of the Society for Experimental Biology*, Swansea. 205-234.

- MONTEITH, J. L., 1968. The heat balance of soil beneath crops. UNESCO. Arid zone Res. Paris, 15:9-36.
- MONTEITH, J. L., 1973. *Principles of environmental physics*. William Clowes & Sons, Limited. London, 241p.
- PASQUILL, F., 1949. Eddy diffusion of water vapour and heat near the ground. *Proc. R. Soc. Ser. A.*, London, 198:116-122.
- PENNAN, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. Ser. A.* London, 193:120-145.
- PERRIER, A.; B. ITIER.; J. M. BERTOLINI e A. BLANCO de PABLOS, 1975. Mesure automatique du bilan d'energie d'une culture. Exemples d'application. *Ann. agron.* Paris, 26:19-40.
- PLAUT, Z. e S. MORE SHET, 1973. Transport of water in plant-atmosphere system. In: YARON, B.; E. DANFORS e Y. VAADIA (ed.). *Arid Zone Irrigation*. Springer, verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 434p.
- RASCHKE, K., 1960. Heat transfer between the plant and the environment. *Ann. Rev. Plant Physiol.* Palo Alto, 11:111-126.
- RIDER, N. E., 1954. Eddy diffusion of momentum water vapor and heat near the ground. *Phil. Trans. R. Soc.* London, 246:481-501.
- SLATYER, R. O. e I. C. McILROY, 1961. *Practical microclimatology*. UNESCO, CSIRO. Austrália, 310p.
- SLAVÍK, B., 1974. *Methods of studying plant water relations*. Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences. Praga. 449p.

- STONE, L. R. e M. L. HORTON, 1974. Estimating evapotranspiration using canopy temperatures: field evaluation. *Agron. J. Madison*, 66:450-454.
- SUOMI, V. E. e C. B. TANNER, 1958. Evapotranspiration estimates from heat - budget measurements over a field crop. *Trans. Am. Geophys. Union*. Washington, 39:298-304.
- SWIN BANK, W. C., 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor and momentum in the lower atmosphere with some results. *Jour. Meteorol.* 8:135-145.
- TANNER, C. B., 1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* Madison, 24:1-9.
- TANNER, C. B., 1968. Evaporation of water from plants and soil. In: KOSLOWSKI, T.T. (ed.). *Water deficits and plant growth*. Nova York, Londres. Academic Press. 390p.
- van BAVEL, C. H. M., 1967. Changes in canopy resistance to water loss from alfafa induced by soil water depletion. *Agric. Meteorol.* Amsterdam, 4:165-176.
- van BAVEL, C. H. M.; F. S. NAKAYAMA e W. L. EHRLER, 1965. Measuring transpiration resistance of leaves. *Plant Physiol.* Kutztown, 40:535-540.
- van BAVEL, C. H. M. e W. L. EHRLER, 1968. Water loss from a sorghum field and stomatal control. *Agron. J.* Madison, 60:84-86.
- VERMA, S. B.; N. J. ROSEMBERG; B. L. BLAD e M. W. BARADAS, 1976. Resistance energy balance method for predicting evapotranspiration: Determination of boundary layer resistance and evaluation of errors effects. *Agron. J.* Madison, 68:776-782.

- WILLA NOVA, N. A., 1973. Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz. Tese de livre-docência. Piracicaba, E.S.A.L.Q. - USP. 77p.
- VILLA NOVA, N. A.; A. R. PEREIRA e M. J. PEDRO JUNIOR, 1975. Balanço de energia numa cultura de arroz em condições de sequeiro. *Bragantia*. Campinas, 34:171-176.
- WEBB, E. K., 1965. Aerial microclimate. *Met. Monogr.* Boston, 6:27-58.

## 10. APÊNDICE

Símbolos e unidades utilizadas:

- $T_2$  = temperatura de termômetro seco no nível  $z_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_1$  = temperatura de termômetro seco no nível  $z_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $Tu_2$  = temperatura de termômetro úmido no nível  $z_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $Tu_1$  = temperatura de termômetro úmido no nível  $z_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $Tu_M$  = temperatura média úmida ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $R_n$  = radiação líquida ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ )  
 $G$  = fluxo de calor no solo ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ )  
 $H$  = fluxo de calor latente ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ )  
 $LE$  = fluxo de calor sensível ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ )  
 $\beta$  = razão de Bowen (adimensional)  
 $r_a$  = resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água ( $\text{s}/\text{m}$ )

- $\gamma$  = constante psicrométrica. Valor médio para pressão barométrica (710 mmHg), utilizado sendo de 0,47 mmHg/°C.
- $e'_s$  = tensão de saturação à temperatura de ponto de orvalho (mmHg)
- $e$  = tensão de vapor d'água (mmHg)
- $T_r$  = temperatura de ponto de orvalho (°C)
- $T$  = temperatura média ( $\frac{T_1 + T_r}{2}$ ) (°C)
- $s$  = tangente à curva de tensão de vapor sobre a água em função da temperatura (mmHg/°C)
- $r_{vc}$  = resistência crítica da cobertura vegetal ao transporte de vapor d'água (s/m)
- $r_v$  = resistência da cobertura vegetal ao transporte de vapor d'água (s/m)
- $\rho$  = densidade do ar úmido (g/cm<sup>3</sup>)
- $C_p$  = calor específico à pressão constante do ar úmido (cal/g.°C)
- $L$  = calor latente de vaporização da água (cal/g)
- $K_h$  = coeficiente de transferência turbulenta de calor (cm<sup>2</sup>/s)
- $K_e$  = coeficiente de transferência turbulenta de vapor d'água (cm<sup>2</sup>/s)
- $e$  = tensão de vapor (mmHg)
- $P$  = pressão atmosférica (mmHg)
- $q$  = umidade específica (g vapor/g ar)
- $e_2$  = tensão atual de vapor no nível  $z_2$  (mmHg)
- $e_1$  = tensão atual de vapor no nível  $z_1$  (mmHg)
- $e'_2$  = tensão de saturação no nível  $z_2$  (mmHg)
- $e'_1$  = tensão de saturação no nível  $z_1$  (mmHg)



$E_a$  = evaporação a temperatura do ar  $T_1$  ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ )

ETR = evapotranspiração real ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ )

ETP = evapotranspiração potencial ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ )

R = constante de Stefan-Boltzman ( $\text{mmHg} \cdot \text{cm}^3 / \text{mol}^{\circ}\text{K}$ )