

Maio e Junho

VOL.XXXVI

N.º 205

Viçosa — Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**MOLHAMENTO FOLIAR — UMA INVESTIGAÇÃO
PARA A CULTURA DO CAFÉ^{1/}**

Vicente de Paula Lelis ^{2/}
Rubens Leite Vianello ^{3/}

1. INTRODUÇÃO

Dos fatores que influem na epidemiologia da ferrugem do cafeiro destacam-se a quantidade e a duração do molhamento foliar (1).

Muitas técnicas têm sido utilizadas na previsão do período de molhamento foliar, Pmf. Em muitos casos, os aparelhos, como o aspergígrafo e o orvalhógrafo, não se têm mostrado eficientes, havendo divergência nas interpretações dos que os utilizam quanto ao início e término do fenômeno (1, 11).

O uso de parâmetros agrometeorológicos tem sido de fundamental importância para a previsão de doenças em plantas cultivadas (1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12), embora parâmetros mais simples, como a temperatura do ar e a umidade relativa, não tenham sido bem explorados.

O balanço de radiação é técnica bem difundida (6, 9), embora não seja acessível ao agricultor.

Neste trabalho, apresenta-se um modelo físico-matemático, para a obtenção do período de molhamento em folhas do cafeiro, investiga-se a influência da umidade relativa na duração do molhamento foliar e compara-se o Pmf registrado em aspergígrafo com os obtidos por meio de observações visuais e do modelo supracitado.

^{1/} Este trabalho faz parte da tese de mestrado do primeiro autor.

Aceito para publicação em 26-8-1988.

^{2/} Departamento de Física da UFV. 36570 Viçosa, MG.

^{3/} Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. 36570 Viçosa, MG.

2. TEORIA

As plantas, como os animais, precisam ter sua temperatura regulada, para funcionarem com um ótimo de eficiência fisiológica. Isso é conseguido pelos fenômenos físicos de radiação, transpiração e convecção.

Durante o dia, a transpiração é o principal mecanismo de perda de calor para o ambiente; durante a noite, não há perda de calor por transpiração, uma vez que os estômatos se fecham. Na escuridão, a folha normalmente emite mais energia do que recebe, tornando-se mais fria que o ar circundante.

Quando a temperatura da folha (T_f) torna-se igual ou inferior à temperatura do ponto de orvalho do ar (T_d), inicia-se, em sua superfície, a condensação, que é interrompida tão logo a temperatura da folha atinja valores superiores.

O período de molhamento foliar é constituído pelo número de horas em que a temperatura da folha se mantém abaixo da temperatura do ponto de orvalho e pelo tempo de evaporação da água da superfície da folha (4).

LELIS (4) propôs o seguinte modelo para estimar o período de molhamento:

$$P_{mf} = \sum_{n=1}^N H_n + P, \quad \text{eq. 1}$$

sendo P o período necessário para que a água da superfície da folha se evapore completamente e H_n o número de horas em que a condição $(T_d - T_f) > 0$ é satisfeita.

A água condensada na superfície foliar passa para a forma de vapor por meio de fluxos de calor sensível e de calor latente.

Os coeficientes de transporte de calor sensível são derivados de números adimensionais. Para a convecção forçada e convecção natural, esses coeficientes são calculados por meio das equações que se seguem, respectivamente, de acordo com PEDRO JÚNIOR (9):

$$Nu = \beta 0,68 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{eq. 2}$$

e

$$Nu = 0,59 (Gr.Pr)^{1/3}, \quad \text{eq. 3}$$

sendo

Nu = número de Nusselt;

Re = número de Reynolds;

Pr = número de Prandtl;

Gr = número de Grasshof.

A equação 2 é válida para $Re < 5 \times 10^5$ e $Pr > 0,6$, enquanto para a equação 3 a condição de validade é, segundo Ede, citado por PEDRO JÚNIOR (9):

$$10^4 < Gr.Pr < 10^9.$$

Para níveis baixos de turbulência, associada com o orvalho, o valor de β é igual a 1. Usando as definições dos números adimensionais e os parâmetros desses números para o ar atmosférico, à temperatura de 20°C, chega-se às equações de

cálculo dos coeficientes de transferência de calor sensível, ou seja:

$$h_c = 40 \left(\frac{V}{D} \right)^{1/2} \quad \text{eq. 4}$$

e

$$h_n = 7,1 (\Delta T)^{1/3}, \quad \text{eq. 5}$$

em que

h_c = coeficiente de transporte de calor sensível por convecção forçada ($\text{Wm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$);

V = velocidade do vento (ms^{-1});

D = comprimento efetivo da folha na direção do vento (cm);

h_n = coeficiente de transporte de calor sensível por convecção natural ($\text{Wm}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$);

ΔT = diferença entre as temperaturas do ar e da folha ($^{\circ}\text{C}$).

Ainda de acordo com o último pesquisador citado, o coeficiente de transporte de calor latente pode ser expresso por

$$h_w = 1,07 h_c L/C_p, \quad \text{eq. 6}$$

em que

L = calor latente de evaporação da água (J g^{-1});

C_p = calor específico do ar, para pressão constante ($\text{J g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Conhecendo a temperatura foliar, é possível calcular os fluxos de calor latente e calor sensível, respectivamente, pelas equações

$$LE = - \left(\frac{0,622}{p} \right) 2 h_w (e_{sf} - e) \quad \text{eq. 7}$$

e

$$H = h_n \Delta T, \quad \text{eq. 8}$$

em que

LE = fluxo de calor latente (Wm^{-2});

P = pressão atmosférica (mb);

e_{sf} = pressão de saturação de vapor à temperatura da folha (mb);

e = pressão atual de vapor (mb);

H = fluxo de calor sensível (Wm^{-2}).

LELIS (4) chegou às seguintes equações para calcular o tempo de evaporação da água condensada na superfície da folha do café:

$$P = \frac{L \lambda}{6 LE} \quad \text{eq. 9}$$

e

$$P = \frac{L \lambda}{6 (\overline{LE} + \overline{H})}, \quad \text{eq. 10}$$

em que

λ = quantidade de água na superfície foliar (mg cm^{-2});

\overline{LE} = fluxo médio de calor latente (Wm^{-2});

\overline{H} = fluxo médio de calor sensível (Wm^{-2}).

A equação 9 é aplicada nos períodos em que a convecção forçada predomina sobre a natural. A equação 10 é válida para os períodos em que ocorrem convecção natural e convecção forçada.

3. MATERIAL E MÉTODO

Coletaram-se os dados no campo, de 23 a 27 de julho de 1985, com intervalos de 15 minutos. Mediram-se as temperaturas de bulbo seco e úmido, em psicrómetro-padrão, e a velocidade do vento, em um anemômetro de hélice. Instalaram-se dois termoigrógrafos em um abrigo meteorológico. As medições foram realizadas no interior de um cafezal localizado no campus da UFV, em talhão de 60 x 45 m. Foram utilizadas 32 linhagens, com espaçamento de 1,80 m x 2,80 m, com 15 anos de idade e altura média de dois metros.

A temperatura foliar foi registrada por um milivoltímetro ECB-RB 102, com escala de 0,02 mV e dois canais, fabricado pela «Equipamentos Científicos do Brasil Indústria e Comércio Ltda». Foram fixados dois termopares de cromel-constantâ, com fios de diâmetro de 0,8 mm, na face dorsal da folha do cafeeiro. Tornaram-se dois ramos no terço médio da planta, instalando-se um termopar em uma folha sombreada e outro em uma folha exposta. Colocou-se um circuito elétrico (Figura 1), constituído de dois conectores, na superfície inferior da folha. Ligando os conectores, colocaram-se pequenos fios de algodão, para absorver as gotículas de água condensada na superfície foliar. Quando a condensação iniciava, o microamperímetro detectava a passagem de uma corrente elétrica entre os dois terminais. Foi empregado também o aspergígrafo, que detectava a umidade nas folhas. Foram feitas observações visuais do dossel e das folhas sombreadas e expostas, para determinar o período de molhamento foliar.

Com os dados das temperaturas do psicrómetro, calcularam-se o ponto de orvalho e a umidade relativa. Comparando a temperatura foliar com o ponto de orvalho, foram determinados o início e o término da condensação na superfície foliar.

Desenvolveram-se equações de regressão para calcular as temperaturas da folha, do bulbo seco e dos termoigrógrafos, indiretamente.

A quantidade de água condensada por unidade de área foliar foi estimada pelo processo de pesagem, em laboratório. Calcularam-se os fluxos de calor sensível e calor latente, empregando-se os coeficientes de transporte. Esses fluxos foram utilizados no cálculo do tempo para a evaporação total da água condensada na superfície foliar.

O período de molhamento foliar foi, portanto, a soma do número de horas em que ocorria a condensação com o tempo gasto para que a água condensada se evaporasse totalmente na superfície foliar. Dessa maneira, calculou-se o P_{mf} para a temperatura da folha sombreada, T_f , e para a temperatura foliar, obtida indiretamente dos registros dos termoigrógrafos, T_{f1} e T_{f2} . Os P_{mf} foram obtidos por meio de observações visuais, no aspergígrafo e no circuito elétrico.

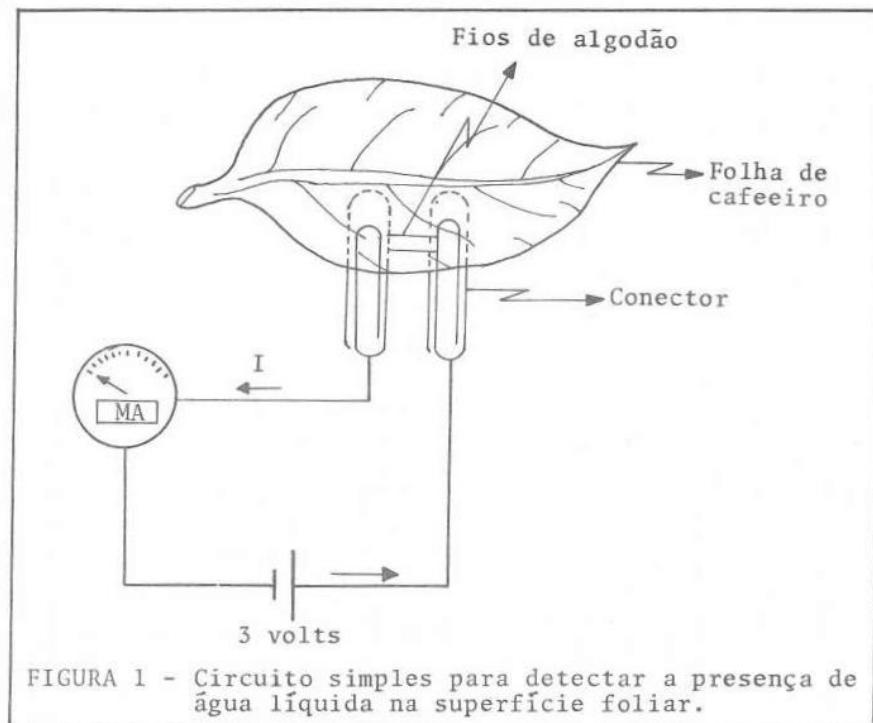


FIGURA 1 - Circuito simples para detectar a presença de água líquida na superfície foliar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para calcular a temperatura foliar a partir da temperatura do ar, a equação de regressão foi

$$T_{f_S} = 2,788 + 1,062 T_a, \quad r^2 = 0,95, \quad \text{eq. 11}$$

em que

T_{f_S} e T_a são as temperaturas de folhas sombreadas e do ar, respectivamente ($^{\circ}\text{C}$).

Desenvolveram-se duas equações de regressão, correlacionando a temperatura do ar com as temperaturas registradas nos dois termoigráficos, T_{TH_1} e T_{TH_2} , ou seja:

$$T_a = 0,709 + 0,989 T_{TH_1}, \quad r^2 = 0,97 \quad \text{eq. 12}$$

$$T_a = 0,264 + 0,918 T_{TH_2}, \quad r^2 = 0,96 \quad \text{eq. 13}$$

O Quadro 1 mostra os resultados do período de molhamento foliar, obtidos por meio de diversos métodos, sendo T_{f_1} e T_{f_2} as temperaturas foliares, calculadas por meio dos registros dos termoigráficos.

QUADRO 1 - Período de molhamento foliar, em horas, para a cultura do café, obtido por meio de diversos métodos

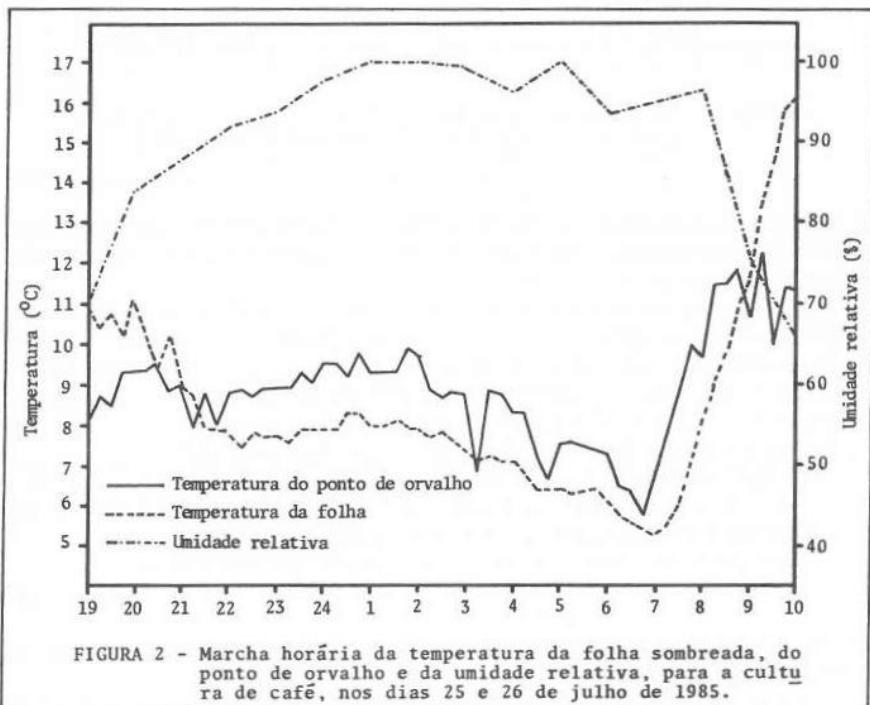
Dia	Observações visuais			Calculado			Círculo	Aspergígrafo
	Dossel	Folha sombreada	Folha exposta	T_{fs}	T_{f_1}	T_{f_2}		
23-24	Início	2:45	2:45	5:00	3:30	3:30	2:45	3:30
	Término	9:05	9:05	9:56	9:17	9:18	7:45	8:45
	Período	6:20	6:20	5:45	4:56	5:47	5:00	5:15
24-25	Início	20:30	20:30	20:30	21:30	20:00	-	21:00
	Término	10:40	8:55	9:06	9:24	9:13	-	8:30
	Período	14:10	12:25	12:36	11:54	13:13	-	11:30
25-26	Início	20:30	20:30	20:30	20:30	20:30	21:00	21:00
	Término	10:40	10:30	10:19	8:51	9:00	8:30	8:50
	Período	14:10	14:00	13:49	12:21	12:30	11:30	11:50
26-27	Início	21:30	21:30	19:45	20:00	20:00	21:30	21:30
	Término	10:30	9:45	10:22	9:45	9:15	7:30	8:15
	Período	13:00	11:45	12:52	14:00	13:15	13:51	10:00

Comparando os P_{mf} obtidos em T_{fs} , T_f e T_{f2} , observa-se concordância entre os resultados.

O circuito elétrico e o aspergígrafo apresentaram valores do P_{mf} sempre inferiores aos observados. É importante notar que esses dois processos foram coerentes no início do molhamento e indicaram o término sempre antes dos outros métodos. Esse fato era esperado, uma vez que os sensores dos aparelhos apresentam características físicas muito diferentes das presentes nas folhas.

Fez-se uma análise de variância dos valores do P_{mf} observados na folha sombreada, dos calculados, dos observados no circuito e dos registrados no aspergígrafo. Pelo teste F, os tratamentos diferiram significativamente, a 5%. Pelo teste de Tukey, a média das observações visuais diferiu apenas da média dos dados do circuito, também a 5% de significância.

As Figuras 2 e 3 mostram a variação da temperatura da folha sombreada, do ponto de orvalho e da umidade relativa, para dois períodos estudados. No instante em que T_{fs} tornava-se inferior à T_d , iniciava-se o processo de condensação na folha; T_{fs} voltava a ser superior à T_d somente ao amanhecer. Essas figuras evidenciam também a relação entre a umidade relativa e a formação de orvalho. A condensação iniciava-se sempre que a umidade relativa ultrapassava 80%.



5. RESUMO E CONCLUSÕES

O experimento foi realizado em parcela experimental, no campus da Universidade Federal de Viçosa, no mês de julho. Mediram-se as temperaturas de bulbo seco e úmido e a velocidade do vento, registrando-se a temperatura foliar por meio

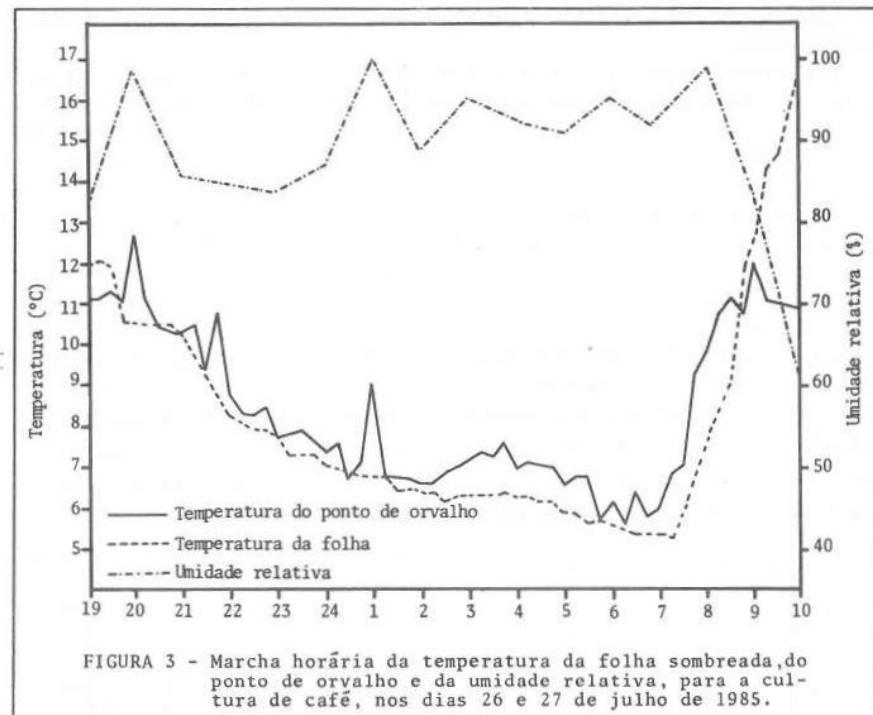


FIGURA 3 - Marcha horária da temperatura da folha sombreada, do ponto de orvalho e da umidade relativa, para a cultura de café, nos dias 26 e 27 de julho de 1985.

de dois termopares instalados em duas folhas: uma sombreada e outra exposta. Em abrigo meteorológico, colocado no interior da parcela experimental, instalaram-se ainda dois termoigrógrafos.

O período de molhamento foliar foi observado de três maneiras: visualmente, através do circuito elétrico e através de um aspergígrafo.

Os dados foram submetidos à formulação teórica, do que resultou um modelo físico-matemático para a obtenção do período de molhamento foliar. As observações foram utilizadas para ajustar e validar o modelo teórico.

Após uma análise dos resultados, pôde-se concluir o seguinte:

- O aspergígrafo mostrou-se eficiente para detectar o início do molhamento foliar. Entretanto, o processo de evaporação foi sempre mais rápido que nas folhas, o que indicou um P_{mf} menor que o observado.
- O circuito elétrico teve tendência semelhante à do aspergígrafo.
- O fluxo de calor latente tornava-se sempre positivo quando $T_f < T_d$, e negativo quando $T_f > T_d$, o que confere com o fenômeno físico da evaporação e da condensação.

— Os termoigrógrafos apresentaram resultados satisfatórios, sendo recomendável o desenvolvimento de uma equação de calibração específica para cada aparelho, antes de se efetuarem as medidas no campo, utilizando um psicrómetro-padrão.

— É possível calcular a temperatura foliar indiretamente, pela leitura em termômetros ou pelo registro da temperatura do ar em termógrafos.

— O período de molhamento foliar dependeu diretamente da umidade relativa:

sempre que esta ultrapassava 80%, iniciava-se a condensação; quando se encerrava o P_{mf} , a umidade relativa estava por volta de 70%.

6. SUMMARY

(COFFEE CROP LEAF WETTING)

The experiment was conducted in a coffee plantation at the Universidade Federal de Viçosa. Wet and dry-bulb temperatures, leaf temperature, wind speed, and leaf surface wetness were measured.

A physico-mathematical model of leaf wetness duration was developed. In this model, leaf surface wetness depends on the number of hours during which the temperature is lower than the dew point temperature of the air and on the time for evaporation of all condensed water on the surface of the leaf.

The final model predicts the period of leaf wetting using only data from a psychrometer or a thermograph.

7. LITERATURA CITADA

1. AKUTSU, M. *Relação de funções climáticas e bióticas com a taxa de infecção de ferrugem do cafeiro. Hemileia vastatrix*. Berk. et Br., Viçosa, Imprensa Universitária, 1980. 63 p. (Tese MS).
2. CHAVES, G.M.; FILHO, J.C.; CARVALHO, M.C.; MATSUOKA, K.; COELHO, D.T. & SHIMOYA, C. A ferrugem do cafeiro (*Hemileia vastatrix*), revisão de literatura com observações e comentários sobre a enfermidade no Brasil. *Seiva*, 20:1-75, 1970 (Edição Especial).
3. KUSHALAPPA, A.C. Modelos de regressão e de «path» para a taxa de desenvolvimento da ferrugem do cafeiro. *Fitopatologia Brasileira*, 5:411, 1980.
4. LELIS, V.P. *Molhamento foliar — Uma investigação para a cultura do café*. Viçosa, Imprensa Universitária, 1986. 76 p. (Tese M S).
5. MONTHEITH, J.L. & BUTLER, D.R. Dew and thermal lag: a model for cocoa pods. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*. 105:207-215, 1979.
6. MONTHEITH, J.L. Dew. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*. 83: 322-341, 1957.
7. MONTOYA, R.H. & CHAVES, G.M. Influência da temperatura e da luz na germinação, infectividade e período de geração de *Hemileia vastatrix*. Berk. et Br. *Experientiae*, 18:240-266, 1974.
8. MOTA, F.S. & FAGUNDES, M.O.O. Uso de higrógrafo na avaliação do período de molhamento de plantas em séries climatológicas históricas. In: CONGRESO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2.º, Pelotas, 1981. Anais, Pelotas, 1981. p. 219-225.
9. PEDRO Jr., M.J. & GILLESPIE, T.J. Estimating dew duration utilizing micro-

- meteorological data. *Agricultural Meteorology*, 25:283-296, 1982.
10. TERRONES, T.A.H. *Avaliação de modelo de previsão da ferrugem do cafeeiro para determinar épocas de aplicação de fungicida*. Viçosa, Imprensa Universitária, 1984. 68 p. (Tese MS).
11. VALLECILLO, S.H.O. *Efeitos de fatores biológicos e climáticos sobre o desenvolvimento da ferrugem (Hemileia vastatrix Berk. et Br.) do cafeeiro*. Viçosa, Imprensa Universitária, 1980. 57 p. (Tese M S).
12. VENTURA, J.A. *Modelos de previsão de mal de sigatoka em bananeiras da cultivar prata*. Viçosa, Imprensa Universitária, 1984. 92 p. (Tese M S).