

**DESEMPENHO DE MODELO MATEMÁTICO AGROMETEOROLÓGICO DE  
ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE PARA A CULTURA DO CAFÉ  
NO ESTADO DE SÃO PAULO**

**Angélica Giarolla PICINI <sup>(1)</sup>, Marcelo B. Paes de CAMARGO <sup>(2)</sup>, Luiz Carlos FAZUOLI <sup>(3)</sup>,  
Paulo Boller GALLO <sup>(4)</sup>, Altino Aldo ORTOLANI <sup>(5)</sup>**

**RESUMO**

Um modelo matemático agrometeorológico aditivo que relaciona a fenologia, a bienalidade e a produtividade do cafeeiro, foi adaptado, parametrizado e testado para os municípios paulistas de Campinas, Gália e Mococa, a partir de série de dados de produtividade de cafeeiros adultos, variedade Mundo Novo. O modelo baseia-se na penalização da produtividade potencial em função da produtividade do ano anterior e das relações ER/EP (evapotranspiração real e potencial) derivados de balanços hídricos decendiais. A penalização é feita à medida que haja restrição hídrica durante três diferentes estádios fenológicos, considerando coeficientes de resposta da cultura (Ky) ao suprimento hídrico, incorporados numa função aditiva. O melhor desempenho do modelo nas três regiões foi obtido para Mococa, que apresentou maiores magnitudes dos coeficientes de sensibilidade durante os períodos fenológicos correspondentes ao final da dormência das gemas florais e florescimento, seguido pelo período final do florescimento e início da formação do grão. O resultado do teste para Mococa demonstrou o melhor desempenho do modelo, com coeficiente de determinação de 0,93 e índice de concordância (d) de 0,98. A produtividade do cafeeiro é altamente dependente da produção do ano anterior e particularmente sensível ao estresse hídrico durante o estágio fenológico do “final da dormência das gemas/ florescimento” e do estágio “final do florescimento/início da formação do grão”.

Palavras-chave: café, balanço hídrico, modelagem agrometeorológica, estimativa de produtividade.

---

<sup>(1)</sup> MS. Eng. Agr. Centro de Ecofisiologia e Biofísica, IAC. Caixa Postal 28, 13001-970, Campinas, SP. E-mail:angelp@cec.iac.br.

<sup>(2)</sup> Pesquisador Científico. Centro de Ecofisiologia e Biofísica, IAC. Caixa Postal 28, 13001-970, Campinas, SP. E-mail: mcamargo@cec.iac.br. Bolsista do CNPq.

<sup>(3)</sup> Pesquisador Científico. Centro de Café e Plantas Tropicais, IAC. Bolsista do CNPq.

<sup>(4)</sup> Pesquisador Científico. Estação Experimental de Agronomia de Mococa, IAC.

<sup>(5)</sup> Pesquisador Científico. Centro de Ecofisiologia e Biofísica, IAC. Bolsista do CNPq.

## INTRODUÇÃO

O cafeeiro arábica é afetado nos seus diversos estádios fenológicos pelas condições meteorológicas, em especial pela disponibilidade hídrica, a qual se constitui no principal fator condicionante da sua produtividade. Modelos agrometeorológicos que relacionam o rendimento das culturas com variáveis hídricas podem auxiliar na estimativa de produtividade e na identificação de materiais genéticos mais tolerantes ao déficit hídrico.

Picini (1998) desenvolveu um modelo agrometeorológico para a estimativa da produtividade do cafeeiro, a partir da disponibilidade hídrica do solo derivados de balanços hídricos decendiais ocorridos durante diferentes estádios fenológicos da cultura e considerando também a produtividade do ano anterior. A penalização é feita à medida que haja restrição hídrica para a planta considerando coeficientes de resposta da cultura (Ky) ao suprimento hídrico, incorporados numa função aditiva.

Considerando-se que a deficiência hídrica é um dos fatores principais que interferem na produtividade do cafeeiro, funcionando como um fator de eficiência, o presente estudo teve como objetivo testar o modelo agrometeorológico matemático de estimativa de produtividade do cafeeiro arábica parametrizado por Picini (1998), para diferentes regiões do Estado de São Paulo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para o teste do modelo, utilizou-se dados anuais de produtividade de café (kg café beneficiado.ha<sup>-1</sup>) de *Coffea arabica* L. variedade Mundo Novo, sem interferência de geadas e podas, obtidos de lavouras experimentais e comerciais em três locais representativos de regiões cafeeicultoras tradicionais do Estado de São Paulo. As produtividades foram provenientes de cafeeiros adultos, com idade superior a quatro anos a partir da data de plantio em todos os locais analisados.

Em Campinas (lat. 22° 54' S, long. 47° 05' W e alt. 669 m) os dados foram obtidos de experimento conduzido pelo Instituto Agrônomo (Carvalho et al., 1984), em Latossolo Roxo eutrófico, espaçamento 3,30 x 2,0 m e área aproximada de 1 ha. Foram consideradas nas análises as produtividades de doze anos agrícolas: 1951/52 a 1962/63, sendo o ano de plantio correspondente a 1943.

As produtividades referentes a Gália (Lat. 22° 18'S, long. 49° 33'W e alt. 522 m) foram fornecidos pela Fazenda São Carlos. Os talhões foram plantados em 1977, em área média de 3,36 ha, em solo Podzólico Vermelho Amarelo, com espaçamento 4,0 x 2,0 m. As produtividades foram provenientes de dez anos agrícolas: 1983/84 a 1992/93.

Os dados de café pertencentes a Mococa (lat. 21°28' S, long. 47°01'W e alt. 665 m) foram provenientes de experimento (Gallo, 1995) conduzido pelo Instituto Agrônomo de Campinas. O experimento foi instalado em 1964, em Latossolo Vermelho Escuro distrófico, em área de 0,76 ha e espaçamento 3,5 x 2,0 m. As produtividades utilizadas foram referentes à oito anos agrícolas: de 1966/67 a 1973/74.

As adubações utilizadas e os tratos culturais foram os usuais recomendados para a cultura do café para todos os locais.

Para a estimativa da disponibilidade hídrica do solo utilizou-se o modelo do balanço hídrico proposto por Thornthwaite & Mather (1955), em nível decenal. A capacidade de água disponível (CAD) utilizada foi 100 mm, em função dos tipos de solos referentes a cada local. A profundidade média de exploração das raízes de um cafeeiro adulto nas condições do Estado de São Paulo é aproximadamente 1 metro. Partindo-se do princípio de que o café é uma cultura perene e que a produtividade utilizada nas análises desse estudo são provenientes de cafeeiros adultos, o valor de  $K_c$  adotado no cálculo do balanço hídrico se iguala à unidade ( $K_c = 1$ ). As variações de porcentagem de cobertura do terreno pela folhagem da cultura é muito pequena para culturas adultas (Camargo & Pereira, 1994).

O modelo agrometeorológico testado foi desenvolvido por Picini (1998), baseado no modelo original de Stewart et al. (1976) e Doorenbos & Kassam (1979), sendo incorporada a produtividade do ano anterior, conforme é demonstrado abaixo:

$$\frac{Y_r}{Y_p} = K_{y0} \left( \frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) + \sum_{i=1}^n K_{yi} \left( \frac{ER}{EP} \right)$$

em que:  $Y_r$  é a produtividade estimada ( $\text{kg café beneficiado} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $Y_p$  é a produtividade potencial da cultura ( $\text{kg café beneficiado} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $Y_r/Y_p$  é a produtividade relativa;  $Y_{aa}$  é a produtividade do cafeeiro do ano anterior ( $\text{kg café beneficiado} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $ER$  é a evapotranspiração real (mm),  $EP$  é a evapotranspiração potencial (mm),  $ER/EP$  é a evapotranspiração relativa;  $k_{y0}$  é o coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior;  $k_{yi}$  é o coeficiente de resposta da cultura ao suprimento de água para os sucessivos estádios fenológicos do cafeeiro. O modelo aditivo considera, assim, os efeitos da deficiência hídrica ( $ER/EP$ ) sobre a produtividade como um somatório nos diferentes estádios fenológicos da cultura.

Considerou-se três estádios fenológicos no modelo: I) “estádio final de dormência das gemas florais/florescimento” (ago/set/out); II) “estádio final de florescimento/início de formação dos grãos” (nov/dez/jan) e III) “estádio de granação/início de maturação” (fev/mar/abr). O quadro 1 apresenta os valores parametrizados dos coeficientes utilizados neste trabalho. A parametrização

detalhada do modelo pode ser encontrada em Picini (1998).

A avaliação dos modelos foi feita através de análises de regressão envolvendo coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e o índice “d” (índice de concordância), proposto por Willmot et al. (1985) com dados independentes de produtividade. Quando se relacionam valores observados estimados com valores observados pela regressão, pode-se obter informações da precisão e da exatidão, que conjuntamente indicam a consistência dos dados estimados com os medidos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes referentes à produtividade do ano anterior ( $ky_0$ ) foram maiores comparados aos coeficientes relativos às relações ER/EP dos estádios fenológicos (Quadro 1), indicando que o ciclo bienal do cafeeiro tem grande influência sobre a produtividade da cultura.

O grau de importância dos coeficientes “Ky” varia, em relação à influência da deficiência hídrica, em ordem decrescente de grandeza: valores positivos de “Ky” promovem maior penalização da produtividade dependendo da fase fenológica na qual a cultura se encontra. Valores próximos de zero tendem a causar menor penalização da produtividade, enquanto que os coeficientes negativos indicam que o estágio fenológico não está sendo prejudicado com a baixa reserva hídrica no solo, ao contrário, é beneficiado pelos períodos secos, como é o caso do estágio final de formação do grão e maturação do cafeeiro. Conforme pode ser observado no Quadro 1, a penalização em função da deficiência hídrica obtida pelo modelo concentrou-se durante o florescimento e formação do grão (valores positivos) para as três localidades, demonstrando que o período posterior (maturação), não é prejudicado com a falta de água.

O modelo agrometeorológico apresentou bom desempenho nos testes, especialmente para a localidade de Mococa, com altos valores de coeficiente de determinação e de índice-d, superiores a 0,90 e apresentando baixos erros sistemáticos ( $E_s$ ) e aleatórios ( $E_a$ ), inferiores a 0,08 (Quadro 2). Analisando-se os erros EAM,  $E_s$  e  $E_a$  para Campinas e Gália, nota-se valores maiores, indicando um desempenho inferior do modelo parametrizado.

Para a região de Mococa, obteve-se  $Ky_1$  com valor +1,06 maior que  $Ky_2$  (+0,40), demonstrando ser o estágio do início do florescimento mais importante quanto ao aspecto hídrico em relação ao final do florescimento e formação do grão. Os modelos parametrizados para Campinas e Gália, por outro lado, apresentaram valores altos de  $Ky_2$ , superiores a unidade, no estágio final do florescimento e início da granação. Os coeficientes parametrizados para Mococa, com ênfase maior no estágio "final da dormência das gemas/florescimento" e menor no estágio "final do florescimento/início da granação" estão de acordo com a literatura cafeeira. Segundo Carvajal (1972), o período de repouso ou dormência das gemas florais apresenta grande influência

na produtividade do cafeeiro, já que esta fase corresponde à formação do botão floral. A floração, propriamente dita, é provocada pelas primeiras chuvas da estação, após o período seco (Rena & Maestri, 1985). A ocorrência de deficiência hídrica no período inicial da formação de grãos pouco afeta a produção do cafeeiro, mas reduz o tamanho dos frutos. (Camargo et al., 1984).

## CONCLUSÕES

A produtividade do ano anterior deve ser considerada em modelos agrometeorológicos aplicados para o cafeeiro, já que o ciclo bienal interfere sobre o efeito das condições meteorológicas.

Os testes demonstraram melhor desempenho do modelo para Mococa, o qual apresentou magnitude do valor de  $Ky_1$  superior ao  $Ky_2$ , confirmando que a produtividade do cafeeiro é particularmente sensível ao estresse hídrico durante os estádios fenológicos de “final da dormência das gemas/florescimento”, seguido do “final do florescimento/início da formação do grão”.

## BIBLIOGRAFIA

CAMARGO, A. P; GROHMANN, L.; DESSIMONI, M. L.; TEIXEIRA, A. A. Efeitos na produção de café de épocas de rega e de supressão da água, por meio de cobertura transparente (barcaça). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 11, Londrina, 1984. **Resumos**. Londrina: IBC, 1984. P. 62 – 64.

CAMARGO, A. P. ; PEREIRA, A. R. **Agrometeorology of the coffee crop**. Geneve: World Meteorological Organization, 1994. 96p. (Agricultural Meteorology CaM Report, 58).

CARVAJAL, J. F. Cafeto: cultivo y fertilización. Berna: Instituto Internacional de La Potasa, 1972, 141 p.

CARVALHO, A.; MONACO, L. C.; FAZUOLI, L. C.; COSTA, W.M.; MEDINA FILHO, H. P. Variabilidade na produção em progênies do cafeeiro “Mundo Novo”. **Bragantia**, v. 43, n.2, p. 509-517, 1984.

DOORENBOS, J. ; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 197 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).

GALLO, P. B. Comportamento de progênie de café Mundo Novo (*C. arabica* L.) em Mococa – SP. Piracicaba, 1995. 53 p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

PICINI, A. G. Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo. Piracicaba, 1998. 132 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. **Informe Agropecuário**, v. 11, n. 126, p. 26-40, 1985.

STEWART, J. I.; HAGAN, R. M.; PRUITT, W. O. **Production functions and predicted irrigation programmes for principal crops as required for water resources planning and increased water use efficiency: final report.** Washington: U.S. Department of Interior, 1976. 80 p.

THORNTHWAITE, C. W. ; MATHER, J. R. **The water balance.** Centerton, N. J. 1955, 104 p. (Publications in Climatology. vol 8, n.1).

WILLMOT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K. M. ; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal Geo. Research**, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

Quadro 1. Valores de Ky0 (coeficiente relativo à produtividade do ano anterior) e Ky (coeficiente de resposta da cultura ao suprimento hídrico) obtidos na parametrização do modelo agrometeorológico.

LOCAL	Ky0 Produtividade Ano anterior	Ky1 dorm/inícioflor. ago/set/out	Ky2 flor./form.grão nov/dez/jan	Ky3 Form. grão/mat fev/mar/abr
Campinas	-1,22	-0,62	+1,48	-0,04
Gália	-1,05	+0,49	+1,11	-0,49
Mococa	-1,16	+1,06	+0,40	-0,28

Fonte: Picini (1998).

Quadro 2. Resultados estatísticos da análise do teste do modelo agrometeorológico para Campinas, Gália e Mococa (SP).

LOCAL	R <sup>2</sup>	d	EAM	Es	Ea
Campinas	0,85	0,50	0,18	0,09	0,14
Gália	0,46	0,78	0,16	0,16	0,12
Mococa	0,93	0,98	0,06	0,08	0,03

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; d: índice “d” de concordância; EAM: erro absoluto médio; Es: erro sistemático; Ea: erro aleatório.