

# X. AGROMETEOROLOGIA

## DESENVOLVIMENTO E TESTE DE MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS PARA A ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DO CAFEIRO <sup>(1)</sup>

ANGÉLICA GIAROLLA PICINI <sup>(2)</sup>, MARCELO BENTO PAES DE CAMARGO <sup>(2,5)</sup>, ALTINO ALDO  
ORTOLANI <sup>(2,5)</sup>, LUIZ CARLOS FAZUOLI <sup>(3,5)</sup> & PAULO BOLLER GALLO <sup>(4)</sup>

### RESUMO

Modelos matemáticos agrometeorológicos que relacionam a fenologia, a bienalidade e a produtividade do cafeeiro, foram desenvolvidos e testados para Mococa (SP), a partir de série de dados de produtividade de cafeeiros adultos, variedade Mundo Novo, correspondente ao período de 1966/67 a 1973/74. Os modelos baseiam-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 seqüenciais durante os estádios fenológicos, considerando 16 combinações diferentes. A penalização é feita à medida que haja restrição hídrica para a planta durante os diferentes estádios fenológicos, considerando coeficientes de resposta da cultura ao suprimento hídrico, incorporados numa função aditiva ou multiplicativa. O modelo com penalização aditiva apresentou melhor desempenho na parametrização dos coeficientes em relação ao multiplicativo. Os melhores ajustes entre dados observados e estimados foram obtidos com modelo aditivo que relaciona o fator hídrico durante os trimestres (combinação D1) jun./jul./ag.; set./out./nov. e dez./jan./fev., os quais apresentaram coeficientes de resposta da cultura ao suprimento hídrico (ky) de +0,38 (ky1), +0,61 (ky2) e +0,18 (ky3), respectivamente, para os estádios fenológicos da dormência das gemas/início do florescimento, florescimento/formação do grão e formação do grão/maturação.

---

<sup>(1)</sup> Parte da Dissertação apresentada pelo primeiro autor como requisito para a obtenção do título de Mestre em Agrometeorologia (ESALQ/USP). Recebido para publicação em 6 de outubro de 1998 e aceito em 17 de fevereiro de 1999.

<sup>(2)</sup> Centro de Ecofisiologia e Biofísica, Instituto Agrônomo (IAC), Caixa Postal 28, 13001-970 Campinas (SP).

<sup>(3)</sup> Centro de Café e Plantas Tropicais (IAC).

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

<sup>(5)</sup> Com bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq.

As magnitudes dos valores de  $ky_1$  e  $ky_2$  revelam que a produtividade do cafeeiro é particularmente sensível ao estresse hídrico durante os estádios fenológicos do florescimento e formação do grão. O teste do modelo apresentou boas estimativas, com coeficientes de determinação de 0,93 e índice de concordância ( $d$ ) de 0,98.

**Termos de indexação:** café, estádios fenológicos, balanço hídrico, modelagem agrometeorológica, estimativa de produtividade.

## ABSTRACT

### TEST AND ANALYSIS OF AGROMETEOROLOGICAL MODELS FOR PREDICTING COFFEE YIELD

This paper describes a new method to reliably monitor and assess drought impact on coffee yields just before the beginning of the maturation growth stage. A good model requires the evaluation of the sensitive indices and test for a specific variety and region. Phenological and yield data for Mundo Novo cultivar were taken from experiments conducted at the Instituto Agrônômico Experimental Station located in Mococa (lat. 21°28'S, long. 47°01'W, alt. 665 m), São Paulo State, Brazil, during 1967 to 1974. The models tested are based in the penalization of the crop yield potential according the previous yield and the ER/EP relation (actual/potential evapotranspiration), derived by 10-day soil water balance occurred during different growth stages. These ratios were weighted by derivation of crop phase yield-response coefficients ( $ky$  values) in additive and multiplicative type models. Based on the model's statistics, the additive type model presented better performance than the multiplicative one. The additive model which considers the crop phases combination D1: bud dormancy/ flowering beginning (Jun/Jul/Aug), flowering/grain formation (Sep/Oct/Nov) and grain formation/maturation (Dec/Jan/Feb) presented the best performance. An analysis of the  $ky$  values shows that this combination D1 gives higher weight to the water relations during the flowering and grain formation (fruit set), with  $R^2$  of 0.93 and  $d$ -index agreement of 0.98.

**Index terms:** coffee, soil water balance, crop phase, agrometeorological models, coffee yield.

## 1. INTRODUÇÃO

O cafeeiro arábica é afetado, nos seus diversos estádios fenológicos, pelas condições meteorológicas, em especial pela disponibilidade hídrica, que constitui o principal fator que afeta sua produtividade biológica e econômica. Além desse tipo de condicionamento, o clima interfere na bionalidade produtiva, na qualidade do produto e na sustentabilidade da planta.

Embora se constata grande variabilidade local e regional da produtividade no Estado de São Paulo e de alguns fatores negativos de produção, existem re-

giões com agrossistemas de café mais produtivos e mais sustentáveis, como o da Alta Mojiana. Isso se deve a solos mais adequados, maior adoção de tecnologia, maior renovação do parque cafeeiro, melhor qualidade de bebida e, fundamentalmente, a melhores condições climáticas ao cultivo do café arábica.

Modelos agrometeorológicos que relacionam o rendimento das culturas com variáveis hídricas podem auxiliar na previsão de safra e na identificação de material genético mais tolerante ao déficit hídrico (Matzenauer, 1994). Segundo Boyer (1969), o déficit

hídrico ocupa uma posição de destaque entre os fatores limitantes da produção do cafeeiro, pois altera o metabolismo da planta e é um fenômeno que ocorre em grandes áreas cultiváveis.

O estudo das interações clima-produção pode ser desenvolvido com o uso de modelos que procuram quantificar os efeitos das variações do clima sobre o comportamento vegetal (Robertson, 1983). O estudo do efeito do clima na produção vegetal é classificado em três tipos de modelos: “empírico-estatístico”, “matemático-mecanístico” e “conceitual” (Acock & Acock, 1991). O “empírico-estatístico” é o mais simples e descreve as relações entre as variáveis, sem considerar os processos, apresentando muitas restrições para a extrapolação de resultados. No Brasil, modelos específicos para café foram desenvolvidos por Silva (1956), Tosello & Arruda (1962), IPEA (1972), Camargo et al. (1984), Silva et al. (1986,1987), Liu & Liu (1988) e Weill (1990).

O modelo “conceitual”, o mais complexo, requer grande número de informações dos processos físicos e biológicos envolvidos, como é o de simulação de crescimento, maturação e produtividade para a cultura da laranja, proposto por Ben Mechlia & Carrol (1989). Neste trabalho, foi utilizado o modelo “matemático-mecanístico”: mais simples que o conceitual, descreve matematicamente a casualidade ou a relação entre os processos envolvidos durante o ciclo da cultura, possuindo menores restrições em relação à extrapolação de resultados do que o empírico-estatístico (Acock & Acock, 1991).

Considerando-se que a deficiência hídrica é um dos condicionantes principais da produtividade do cafeeiro, funcionando como um fator de eficiência, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e testar modelos agrometeorológicos do tipo “matemático-mecanístico” para a estimativa de produtividade do cafeeiro arábica, em função da medida do suprimento hídrico, representada pela razão da evapotranspiração real e potencial (ER/EP) ocorrida durante diferentes estádios fenológicos da cultura, visando à obtenção de um modelo mais consistente para servir de suporte para os prognósticos de produtividade.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material

Utilizaram-se, para a análise do modelo, dados de produtividades anuais de café ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de café beneficiado) provenientes de experimento (Gallo, 1995) na Estação Experimental de Mococa (latitude  $21^{\circ}28' \text{ S}$ , longitude  $47^{\circ}01' \text{ W}$  e altitude 665 m), do Instituto Agronômico, Campinas (SP). O experimento foi instalado em 1964, sendo cada parcela constituída de uma única cova e nove repetições, em Latossolo Vermelho-Escuro Distrófico, em 0,76 ha e espaçamento de 3,5 x 2,0 m. As adubações e os tratos culturais foram os recomendados para a cultura do café, sendo as produtividades utilizadas referentes a oito anos agrícolas, de 1966/67 a 1973/74.

Os períodos de dados das parametrizações e testes não apresentaram anos com geadas e podas, já que o modelo considerado nas análises penalizou a produtividade exclusivamente pelo efeito de deficiências hídricas.

Os valores diários de chuva (mm) e de temperaturas máxima e mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ) foram obtidos junto aos arquivos do Centro de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agronômico (IAC), dados esses coletados no posto agrometeorológico da Estação Experimental de Mococa.

### 2.2 Métodos

Para a estimativa da disponibilidade hídrica do solo, empregou-se o modelo do balanço hídrico proposto por Thornthwaite & Mather (1955), em nível decendial, sendo o cálculo desse balanço realizado pelo programa para microcomputador desenvolvido por Barbieri et al. (1991). A capacidade de água disponível (CAD) utilizada foi de 100 mm, em função do tipo de solo, considerando: capacidade de campo (30%); ponto de murcha permanente (21%); densidade global do solo ( $1,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), conforme Alfonsi et al. (1990). A profundidade média de exploração das raízes de um cafeeiro adulto, segundo Franco & Inforzato (1946), nas condições do Estado de São Paulo, é, aproximadamente, de um metro.

Partindo 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 ( $K_c = 1$ ), assumindo-se, assim, plena cobertura do terreno pelas plantas adultas (Camargo & Pereira, 1994).

Consideraram-se três estádios fenológicos no desenvolvimento do modelo: (I) estágio de dormência das gemas florais/início do florescimento; (II) estágio de florescimento/início de formação dos grãos, e (III) estágio de formação dos grãos/início de maturação.

A duração desses estádios é determinada pelas condições térmicas, e no Estado de São Paulo, com pequenas variações anuais, ocorre da seguinte forma (Camargo, 1986): estágio I: julho-agosto-setembro; estágio II: outubro-novembro-dezembro; estágio III: janeiro-fevereiro-março.

O modelo aditivo foi desenvolvido originalmente, por Stewart et al. (1976) e proposto por Doorenbos & Kassam (1979), incorporando-se a produtividade do ano anterior, da seguinte forma:

$$\frac{Y_r}{Y_p} = 1 - \left[ ky_0 \left( \frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) + \sum_{i=1}^n ky_i \left( 1 - \frac{ER}{EP} \right) \right] \quad (\text{modelo 1})$$

em que:  $Y_r$  = produtividade estimada ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de café beneficiado);  $Y_p$  = produtividade potencial da cultura ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de café beneficiado);  $Y_r/Y_p$  = produtividade relativa;  $Y_{aa}$  = produtividade do cafeeiro do ano anterior ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de café beneficiado);  $ER$  = evapotranspiração real (mm);  $EP$  = evapotranspiração potencial (mm),  $ER/EP$  = evapotranspiração relativa;  $ky_0$  = coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior;  $ky_i$  = coeficiente de resposta da cultura à disponibilidade hídrica para os sucessivos estádios fenológicos do cafeeiro.

O modelo considera, assim, os efeitos da deficiência hídrica ( $ER/EP$ ) sobre a produtividade como um somatório nos diferentes estádios fenológicos da

cultura. As combinações de duração dos estádios utilizados encontram-se na Figura 1.

O modelo multiplicativo usado foi desenvolvido por Rao et al. (1988) e proposto por Doorenbos & Kassam (1979); nesse caso, também foi incorporada a produtividade do ano anterior:

$$\frac{Y_r}{Y_p} = \left[ 1 - ky_0 \left( \frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) \right] * \prod_{i=1}^n \left[ 1 - ky_i \left( \frac{1 - ER}{EP} \right) \right] \quad (\text{modelo 2})$$

em que:  $Y_r$  = a produtividade estimada ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de café beneficiado);  $Y_p$  = produtividade potencial da cultura ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de café beneficiado);  $Y_r/Y_p$  = produtividade relativa;  $Y_{aa}$  = produtividade do cafeeiro do ano anterior ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de café beneficiado);  $ER$  = evapotranspiração real (mm),  $EP$  = evapotranspiração potencial (mm);  $ER/EP$  = evapotranspiração relativa;  $ky_0$  = coeficiente de penalização relativo à produtividade do ano anterior;  $ky_i$  = coeficiente de resposta da cultura ao suprimento de água para os sucessivos estádios fenológicos do cafeeiro. As combinações de duração dos estádios usados encontram-se na Figura 1.

O modelo considera, como resultado final, o produtório das relações  $ER/EP$  com redução da produtividade conforme se acentua o efeito da deficiência hídrica sobre os estádios fenológicos do cafeeiro, principalmente os mais sensíveis.

Segundo Pereira et al. (1997), evapotranspiração potencial corresponde à água utilizada por uma extensa superfície vegetada, em crescimento ativo e cobrindo totalmente o terreno, estando este bem suprido de umidade. Corresponde, portanto, ao processo oposto à chuva.

A evapotranspiração real é aquela que ocorre em uma superfície vegetada, sem imposição de qualquer condição de contorno. A relação  $ER/EP$  menor do que 1 indica que está havendo deficiência hídrica (Camargo, 1984).

A produtividade potencial ( $Y_p$ ) revela o nível tecnológico aplicado à lavoura, sendo, portanto, um

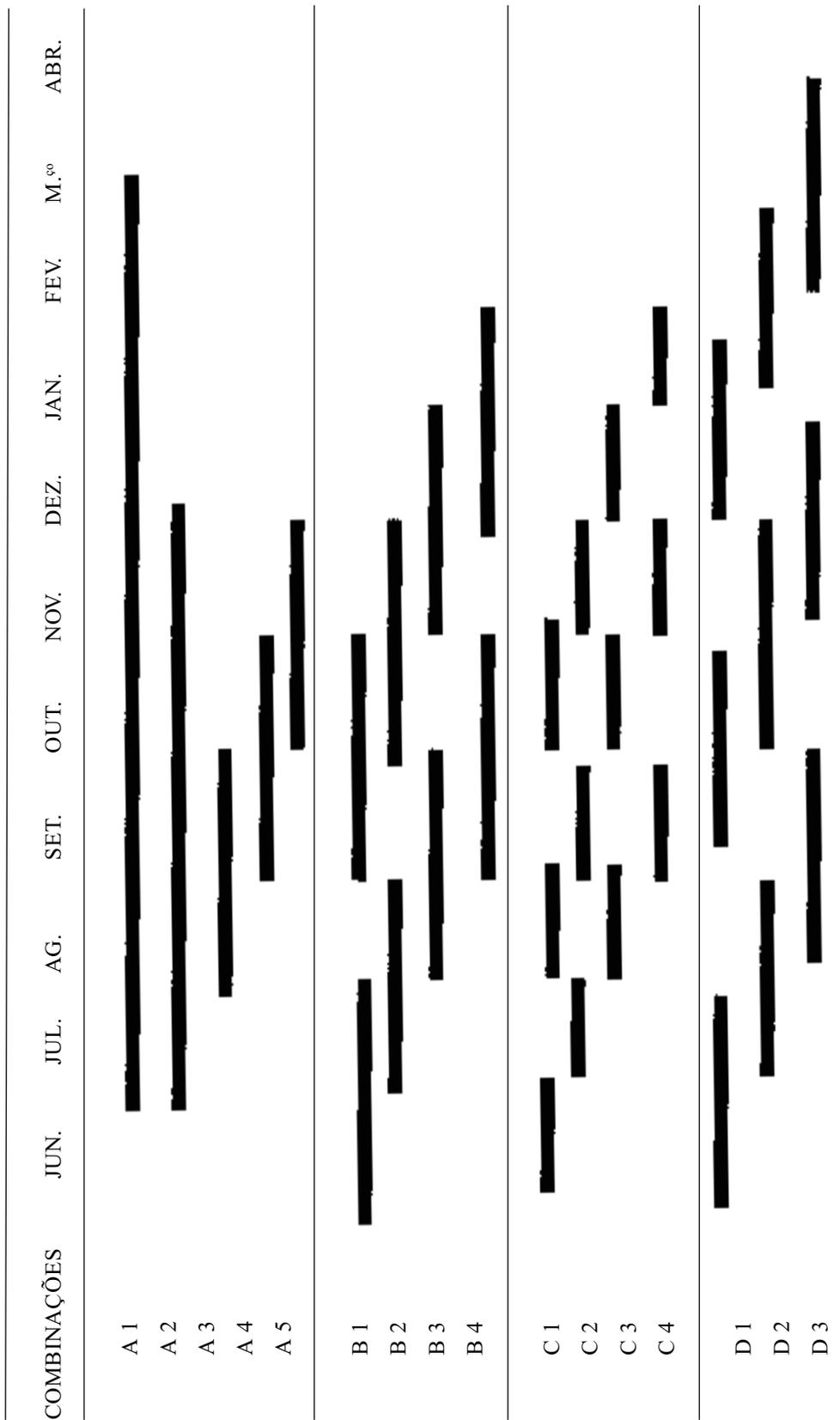


Figura 1. Diferentes combinações das durações dos períodos considerados nas análises dos efeitos das relações ER/EP<sup>(1)</sup> utilizadas na parametrização e teste dos modelos agrometeorológicos aditivo e multiplicativo para Mococa (SP). <sup>(1)</sup> ER = evapotranspiração real (mm); EP = evapotranspiração potencial (mm); ER/EP = evapotranspiração relativa.

valor máximo estabelecido para as condições de cultivo, desde que não ocorra nenhuma restrição climática. Adotou-se, assim, o valor da mais alta produtividade obtida na série e acrescentou-se 10%, com o objetivo de eliminar qualquer efeito do ambiente que pudesse interferir sobre o potencial de produtividade, conforme propõe Kanemasu (1983).

### 2.3 Teste do modelo

Para o teste do modelo, consideraram-se os coeficientes  $ky_0$  e  $ky_i$  parametrizados juntamente com a produtividade potencial ( $Y_p$ ). As relações ER/EP, no entanto, foram as mesmas utilizadas nas parametrizações, já que não houve possibilidade de obtenção de dados de produtividade de café de diferentes anos agrícolas no município de Mococa, sem ocorrência de podas e geadas. Produtividades de outros talhões foram consideradas para o teste.

Dados independentes utilizados para teste são considerados componentes essenciais para o desenvolvimento de modelos, segundo Hoogenboom & Boote (1992). O teste geralmente é definido como a comparação da previsão do modelo com dados experimentais, os quais não foram anteriormente usados para desenvolvimento e calibração, sendo, portanto, dados independentes.

A avaliação dos modelos foi feita mediante 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, por análise de regressão, valores estimados com valores observados, pode-se obter informações da precisão e da exatidão, que, conjuntamente, indicam a consistência dos dados estimados com os medidos.

A precisão, ou seja, o grau de dispersão dos valores em torno da média, é dada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Indica apenas o grau de dispersão dos dados obtidos, o erro aleatório, não considerando o erro sistemático. O Índice "d" quantifica

numericamente a exatidão, que é um coeficiente de concordância.

O modelo de avaliação de Willmot et al. (1985) fornece também outras importantes informações, tais como erro sistemático ( $Es$ ) e não sistemático ou aleatório ( $Ea$ ) e erro absoluto médio ( $EAM$ ), que é a medida de magnitude média das diferenças entre os valores estimados e observados.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Desempenho das parametrizações dos modelos

Observa-se, pela Figura 2, uma bienalidade bem caracterizada da produtividade utilizada na parametrização para o local considerado, com amplitudes bastante pronunciadas. Os valores mais altos de produtividade estão próximos de  $4.500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de café beneficiado e os menores picos não ultrapassam  $1.000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de café beneficiado.

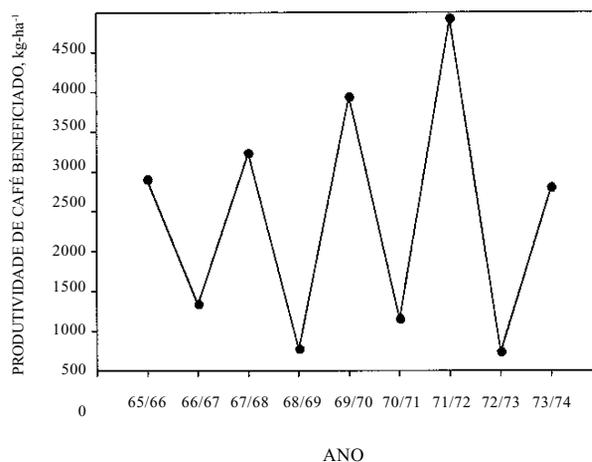


Figura 2. Produtividades anuais de café ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de café beneficiado) da variedade Mundo Novo, no município de Mococa (SP).

Com a inclusão da produtividade do ano anterior (coeficiente  $ky_0$ ), pode-se notar bom desempenho do modelo na parametrização, com valores de  $R^2$  médios de 0,90 para o modelo aditivo e 0,88 para o multiplicativo (Quadros 1 e 2). Os coeficientes referentes à produtividade do ano anterior ( $ky_0$ ) apresentaram valores mais altos, comparados aos concernentes às relações ER/EP das respectivas fases fenológicas, na maioria das combinações para o modelo aditivo. Isso indica que o ciclo bienal do cafeeiro tem grande influência sobre a produtividade da cultura.

Já o modelo multiplicativo apresentou fraco desempenho na parametrização, mesmo com os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) elevados. Os coeficientes  $ky$  extrapolaram limites considerados confiáveis para a aplicação do modelo. Pode-se observar - Quadro 2 - como exemplo, que os coeficientes obtidos chegaram a penalizar acentuadamente a deficiência hídrica nos meses de dezembro/fevereiro, janeiro/março e fevereiro/abril, correspondentes aos coeficientes  $ky_3$  das combinações D1, D2 e D3 respectivamente.

Quadro 1. Valores dos coeficientes de resposta da cultura à disponibilidade hídrica no solo ( $ky$ ) e de determinação ( $R^2$ ) obtidos na parametrização do modelo 1 (aditivo), considerando a produtividade do ano anterior para Mococa (SP), em função das combinações com diferentes durações dos períodos das relações ER/EP

Combinações	$ky_0$	$ky_1$	$ky_2$	$ky_3$	$ky_T$	$R^2$
A 1 .....	0,96	-	-	-	1,46	0,90
A 2 .....	0,98	-	-	-	1,03	0,91
A 3 .....	1,04	-	-	-	0,70	0,89
A 4 .....	1,05	-	-	-	1,21	0,89
A 5 .....	1,08	-	-	-	1,99	0,72
B 1 .....	0,95	0,40	0,60	-	-	0,92
B 2 .....	1,01	0,50	0,61	-	-	0,92
B 3 .....	1,00	0,68	0,47	-	-	0,90
B 4 .....	1,00	1,16	0,40	-	-	0,90
C 1 .....	0,92	0,35	0,25	0,56	-	0,92
C 2 .....	1,00	0,25	0,49	0,23	-	0,91
C 3 .....	1,01	0,38	0,82	0,09	-	0,90
C 4 .....	0,99	0,82	-0,20	0,98	-	0,92
D 1 .....	0,94	0,38	0,61	0,18	-	0,92
D 2 .....	0,99	0,49	0,74	-0,24	-	0,91
D 3 .....	1,02	0,83	0,32	-1,33	-	0,91

Nota:  $ky_0$ : coeficiente relativo à produtividade do ano anterior;  $ky_1$ : coeficiente relativo ao estágio I;  $ky_2$ : coeficiente relativo ao estágio II;  $ky_3$ : coeficiente relativo ao estágio III;  $ky_T$ : coeficiente relativo ao ciclo total.

### 3.2 Análise das relações entre os coeficientes e a fenologia do cafeeiro

Embora trabalhos desenvolvidos para culturas anuais, como o de Camargo (1993), Matzenauer (1994), Moraes (1998), entre outros, mostrem que modelos fundados em produtórios podem representar a resposta das plantas à disponibilidade hídrica de forma satisfatória, não pode assumir que sejam aplicáveis para a cultura cafeeira. As variáveis Yaa/Yp e ER/EP interligadas por produtório tendem a acentuar o efeito da oscilação de altas e baixas produções.

O modelo aditivo testado não apresentou a tendência de acentuar o peso da produtividade do ano anterior, indicando ser mais apropriado ao cafeeiro.

O grau de importância do coeficiente ky varia, em relação à influência da falta hídrica, em ordem decrescente de grandeza: dependendo da fase fenológica na qual a cultura se encontra, valores positivos de ky podem promover acentuada penalização da produtividade. Isso pode ser atribuído ao fato de a deficiência estar ocorrendo justamente em períodos críticos para a planta quanto à exigência hídrica; valores próximos de zero tendem a causar pouca varia-

Quadro 2. Valores dos coeficientes de resposta da cultura à disponibilidade hídrica no solo (ky) e de determinação ( $R^2$ ) obtidos na parametrização do modelo 2 (multiplicativo), considerando a produtividade do ano anterior para Mococa (SP), em função das combinações com diferentes períodos considerados nas relações ER/EP

Combinações	ky0	ky1	ky2	ky3	kyT	$R^2$
A 1 .....	1,10	-	-	-	1,85	0,87
A 2 .....	1,11	-	-	-	1,29	0,87
A 3 .....	1,16	-	-	-	0,81	0,83
A 4 .....	1,15	-	-	-	1,52	0,86
A 5 .....	1,13	-	-	-	4,00	0,82
B 1 .....	1,05	1,22	-0,91	-	-	0,89
B 2 .....	1,12	-0,44	1,07	-	-	0,90
B 3 .....	1,10	0,76	2,31	-	-	0,85
B 4 .....	1,07	1,30	3,84	-	-	0,89
C 1 .....	1,02	1,23	-0,18	1,16	-	0,95
C 2 .....	1,14	-0,39	1,24	2,92	-	0,88
C 3 .....	1,09	0,38	1,65	1,67	-	0,87
C 4 .....	1,10	0,93	2,49	0,77	-	0,88
D 1 .....	1,02	1,02	-0,49	2,59	-	0,90
D 2 .....	1,18	0,54	3,62	-7,92	-	0,92
D 3 .....	1,13	1,40	3,07	-12,50	-	0,94

ky0: coeficiente relativo à produtividade do ano anterior; ky1: coeficiente relativo ao estágio I; ky2: coeficiente relativo ao estágio II; ky3: coeficiente relativo ao estágio III; kyT: coeficiente relativo ao ciclo total.

ção da produtividade no que se refere ao fator hídrico; valores negativos demonstram que a fase fenológica não está sendo prejudicada com a baixa reserva de água no solo; ao contrário, muitas vezes é necessário haver períodos mais secos durante o ciclo da cultura. É o caso, por exemplo, da fase de maturação do café, ou mesmo a fase de dormência das gemas para favorecer a florada uniforme.

A combinação D1, que compreende os períodos: jun./jul./ag.; set./out./nov. e dez./jan./fev. foi a que apresentou melhores resultados na parametrização e teste. A penalização em função da deficiência hídrica

obtida pelo modelo para essa combinação, concentrou-se durante o florescimento e formação do grão, demonstrando que o período posterior (maturação) não é prejudicado com a falta de água (Quadro 1). O coeficiente relativo à maturação (ky3) apresentou valor mais baixo em relação ao das outras fases.

### 3.3 Resultados do teste dos modelos

As análises estatísticas resultantes do teste do modelo do tipo 1, com dados independentes de pro-

Quadro 3. Resultados estatísticos da análise do teste do modelo 1 (aditivo) com a inclusão da produtividade do ano anterior para Mococa (SP), em função das combinações com diferentes durações dos períodos considerados nas relações ER/EP

Combinações	R <sup>2</sup>	d	EAM	Es	Ea
A 1 .....	0,91	0,97	0,07	0,08	0,04
A 2 .....	0,92	0,98	0,07	0,08	0,05
A 3 .....	0,91	0,97	0,08	0,08	0,06
A 4 .....	0,90	0,97	0,08	0,09	0,04
A 5 .....	0,84	0,94	0,13	0,14	0,08
B 1 .....	0,93	0,98	0,06	0,07	0,04
B 2 .....	0,92	0,98	0,06	0,08	0,03
B 3 .....	0,91	0,97	0,08	0,08	0,06
B 4 .....	0,90	0,97	0,08	0,09	0,05
C 1 .....	0,93	0,98	0,06	0,07	0,03
C 2 .....	0,92	0,98	0,07	0,08	0,03
C 3 .....	0,91	0,97	0,07	0,08	0,04
C 4 .....	0,92	0,98	0,07	0,08	0,04
D 1 .....	0,93	0,98	0,06	0,07	0,04
D 2 .....	0,92	0,98	0,07	0,08	0,04
D 3 .....	0,93	0,98	0,07	0,07	0,04

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

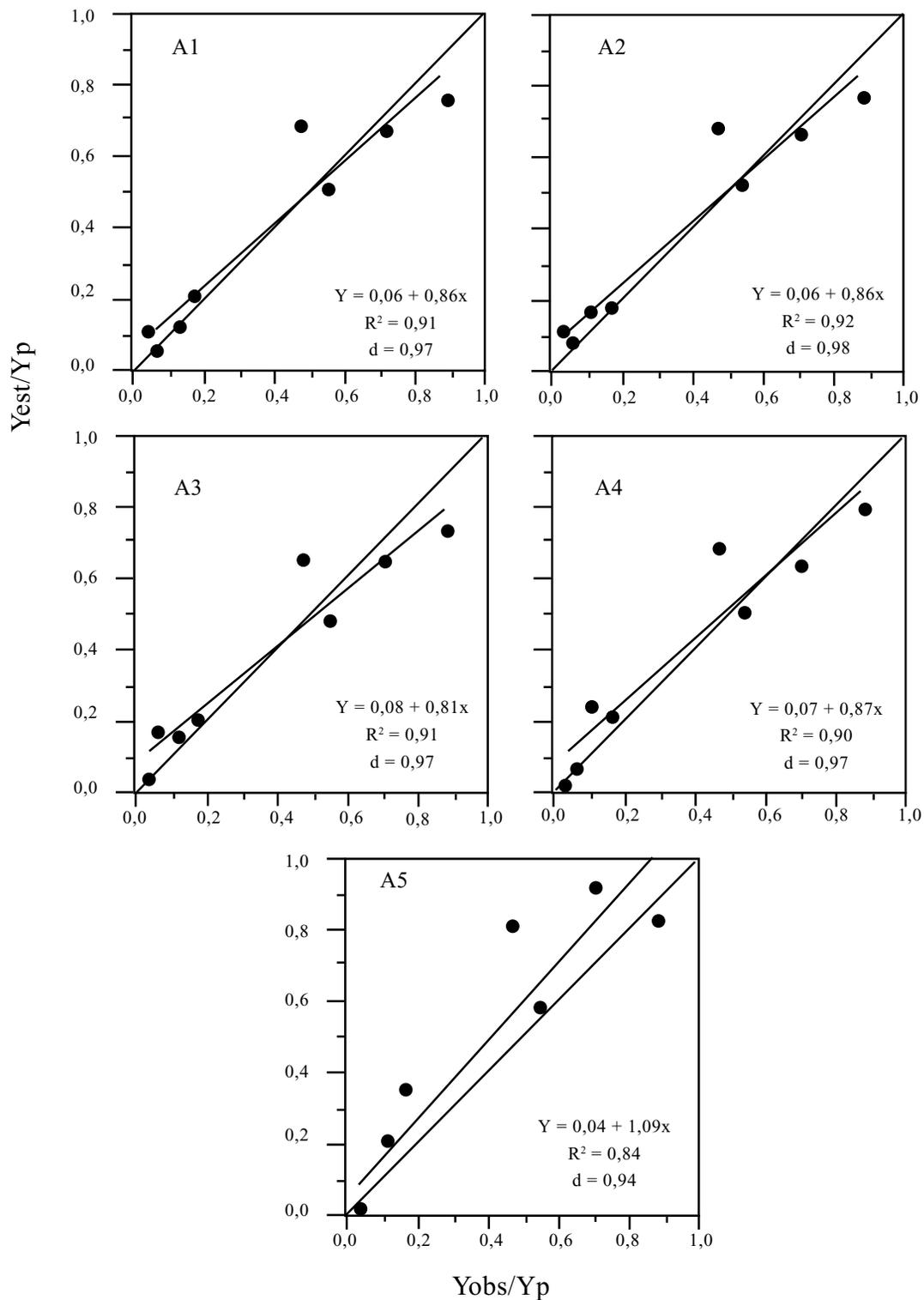


Figura 3. Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo aditivo para Mococa, referentes às combinações do tipo A.

atividade, encontram-se no Quadro 3. Não foi realizado teste para o modelo do tipo 2, em vista de seu insatisfatório desempenho na parametrização.

O modelo aditivo apresentou bom desempenho nos testes, praticamente, em todas as combinações. Os erros absolutos médios (EAM), sistemáticos (Es) e aleatórios (Ea) foram bastante baixos, re-

sultando, portanto, em altos valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e índice "d" de concordância superiores a 0,90.

As Figuras 1 a 4 apresentam os valores de produtividade relativa observada ( $Y_r/Y_p$ ) e produtividade relativa estimada ( $Y_{est}/Y_p$ ) pelo modelo aditivo para todas as combinações em Mococa (SP).

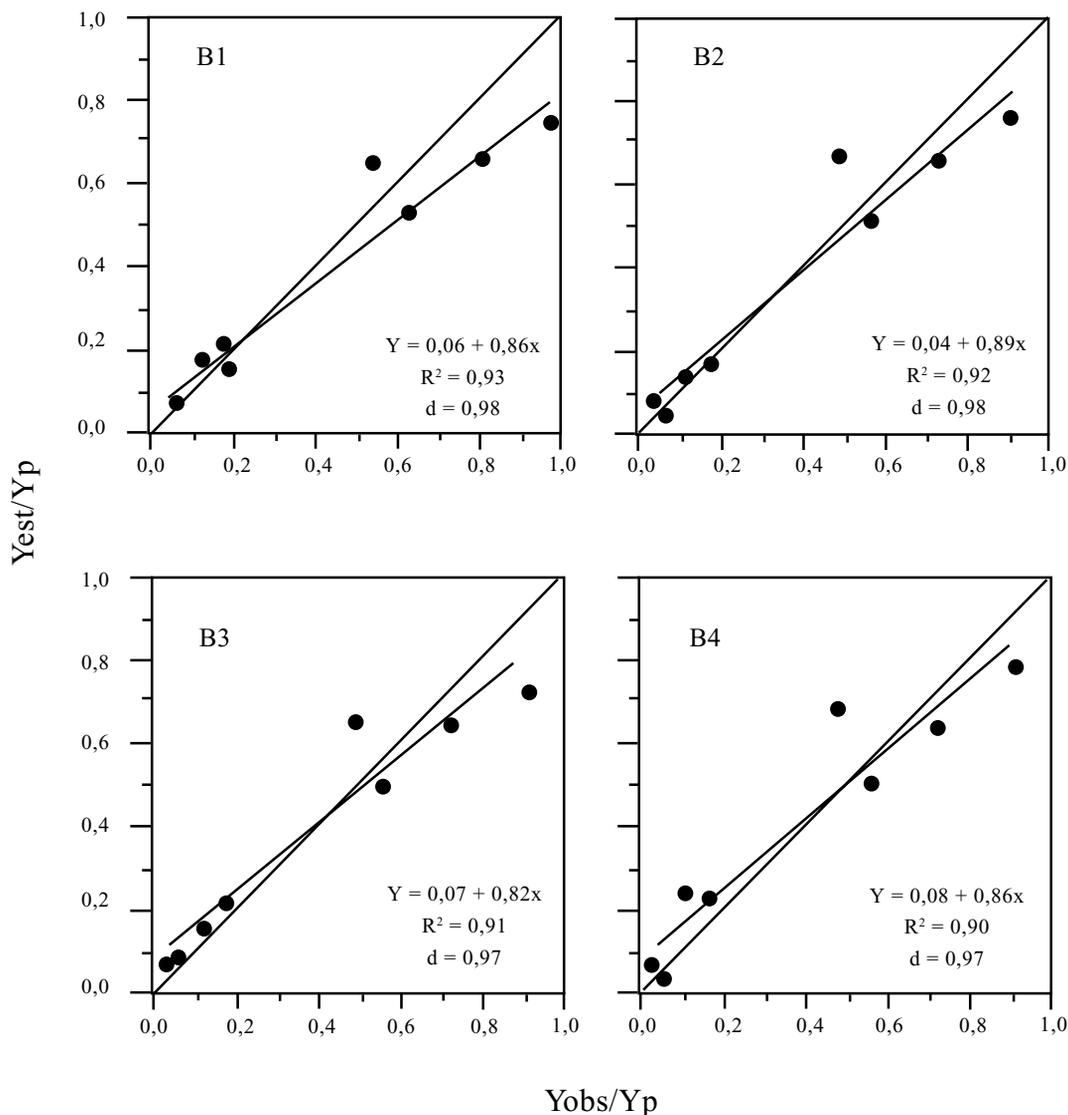


Figura 4. Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo aditivo para Mococa, referentes às combinações do tipo B.

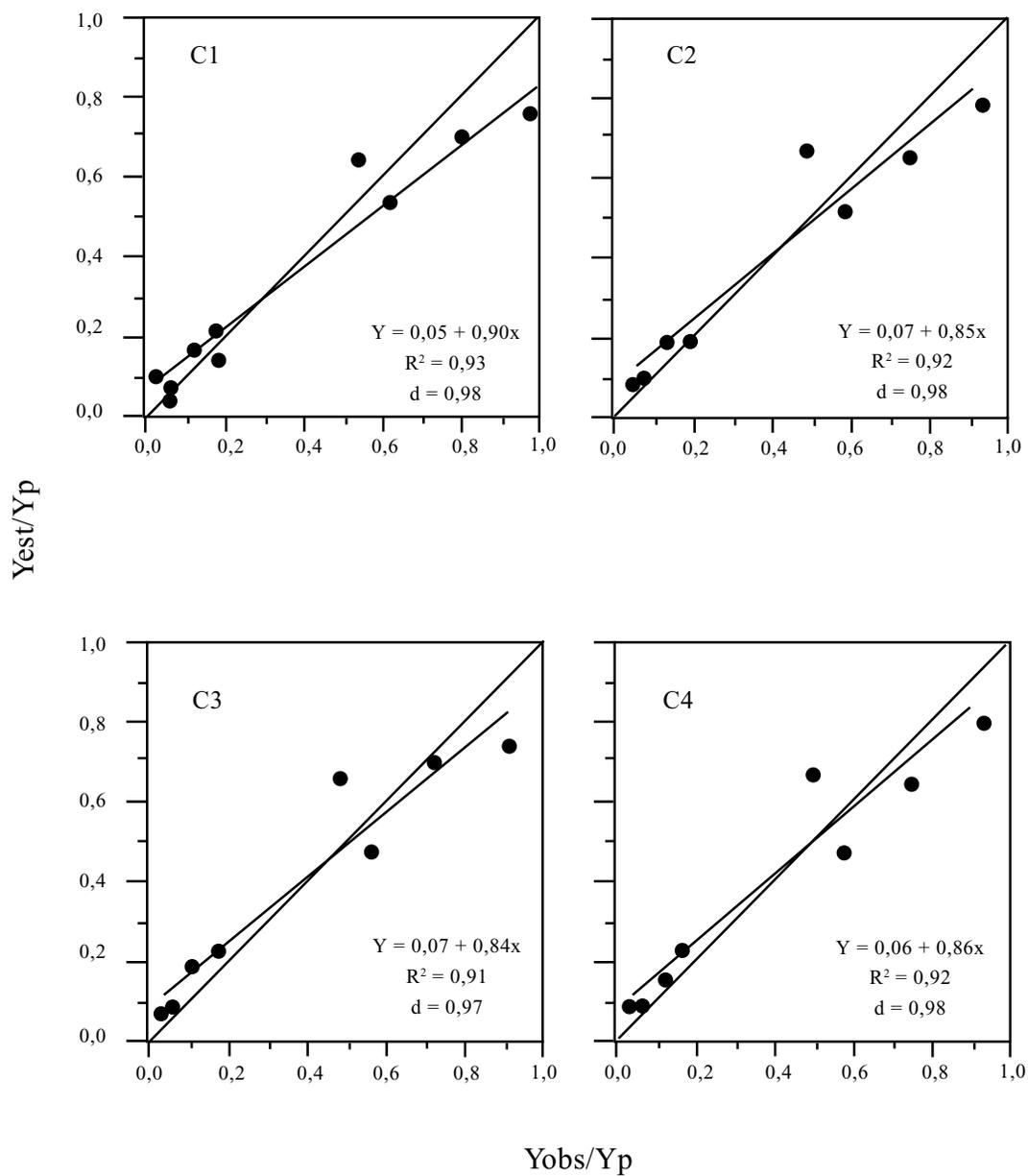


Figura 5. Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo aditivo para Mococa, referentes às combinações do tipo C.

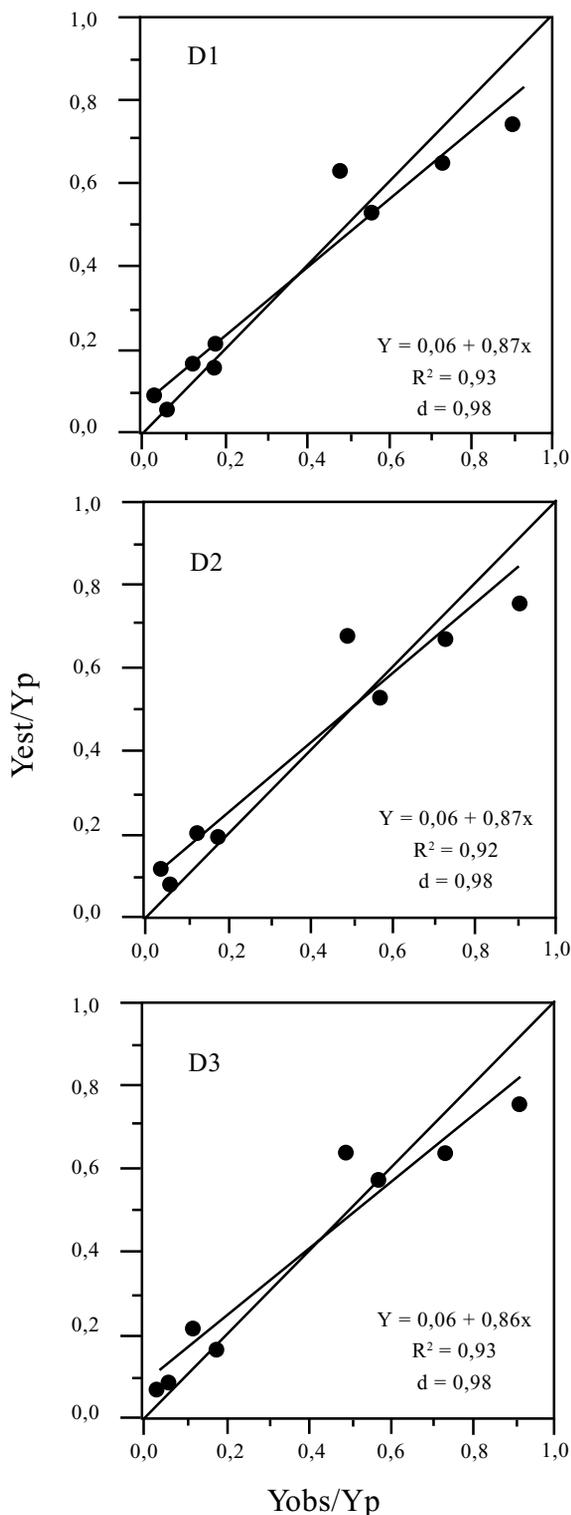


Figura 6. Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo aditivo para Mococa, referentes às combinações do tipo D.

#### 4. CONCLUSÕES

1. 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 coeficientes relativos à produtividade do ano anterior apresentaram grande influência sobre a produtividade, na maioria das combinações.

2. O modelo aditivo foi o mais apropriado para o cafeeiro, comparado ao multiplicativo.

3. A combinação D1, que compreende os trimestres: jun./jul./ag. (dormência das gemas florais/início do florescimento); set./out./nov. (florescimento/formação do grão); dez./jan./fev. (formação do grão/maturação) apresentou os melhores resultados na parametrização e teste em relação às demais.

4. As magnitudes determinadas dos coeficientes (kys) de resposta da cultura ao suprimento hídrico, revelam que a produtividade do cafeeiro é particularmente sensível ao estresse hídrico durante os estádios fenológicos de florescimento e de formação do grão.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOCK, B. & ACOCK, M. C. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. *Agronomy Journal*, Madison, **83**:56-61, 1991.
- ALFONSI, R.R.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; ARRUDA, F. B.; ORTOLANI, A.A.; CAMARGO, M. B. P. & BRUNINI, O. *Métodos agrometeorológicos para controle da irrigação*. Campinas, Instituto Agrônomo, 1990. 62p. (Boletim Técnico, 133)
- BARBIERI, V.; TUON, R. L. & ANGELOCCI, L. R. Programa para microcomputador do balanço hídrico (Thornthwaite & Mather, 1955) para dados mensais e decendiais, normais e seqüenciais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 7., Viçosa, 1991. *Resumos*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1991. p.297-299.
- BEN MECHLIA, N. & CARROL, J. J. Agroclimatic modeling for simulation of phenology, yield and quality of crop production. I. Citrus response formulation. *International Journal of Biometeorology*, Heidelberg, **33**:33-36, 1989.
- BOYER, J. Étude expérimentale des effets du régime d'humidité du sol sur la croissance végétative, la floraison et la frutification du caféier Robusta. *Café, Cacao, Thé*, Paris, **13**:187-200, 1969.

- CAMARGO, A. P. Clima e fenologia. In: *Cultura de café no Brasil: pequeno manual de recomendações*. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Café, MIC, 1986. p.8-22,
- CAMARGO, A. P. & PEREIRA, A. R. *Agrometeorology of the coffee crop*. Geneve, World Meteorological Organization, 1994. 96p. (Agricultural Meteorology CaM Report, 58)
- CAMARGO, M. B. P. Exigências bioclimáticas e estimativa de produtividade para quatro cultivares de soja no Estado de São Paulo. Piracicaba, 1984. 96 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, 1984.
- CAMARGO, M. B. P. Determination of the water balance components and drought sensitivity indices for a sorghum crop. Lincoln, 1993. 131 p. Thesis (Ph.D) - University of Nebraska, 1993.
- CAMARGO, M. B. P.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; ORTOLANI, A. A.; ALFONSI, R. R. & PINTO, H. S. Relações entre a precipitação pluviométrica e a produtividade do cafeeiro. *Ecosistema*, Espírito Santo do Pinhal, **9**:166-171, 1984.
- DOORENBOS, J. & KASSAM, A. H. *Yield response to water*. Rome, FAO, 1979. 197p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33)
- FRANCO, C. M. & INFORZATO, R. O sistema radicular do cafeeiro nos principais tipos de solos do Estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, **6**:443-478, 1946.
- GALLO, P. B. Comportamento de progênie de café Mundo Novo (*C. arabica* L.) em Mococa – SP. Piracicaba, 1995. 53p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, 1995.
- HOOGENBOOM, J. W. & BOOTE, K. L. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using Soygro, Peanutgro, and Beangro: a review. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, **35**(6):2043-2056, 1992.
- INSTITUTO DE PLANEJAMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Variações climáticas e flutuações de oferta agrícola no Centro-Sul do Brasil*. Brasília, IPEA, 1972. 419 p. (Relatório de Pesquisa: Estudos para o Planejamento, 1)
- KANEMASU, E. T. Yield and water-use relationships: some problems of relating grain yield to transpiration. In: TAYLOR, H. M.; JORDAN, W. R. & SINCLAIR, T. R. eds. *Limitations to efficient water use in crop production*. Madison, American Society of Agronomy, 1983. cap. 9B, p. 413-417.
- LIU, W. T. H. & LIU, B. W. Y. Comparação de três modelos de previsão da safra de café no Estado de Minas Gerais. *Ciência e Cultura*, São Paulo, **40**(8):801-807, 1988.
- MATZENAUER, R. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994. 172p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia UFRS, 1994.
- MORAES, A. V. C. Desenvolvimento e análise de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto, SP. Piracicaba, 1998. 95 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, 1998.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N.A. & SEDIYAMA, G. C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba, FEALQ, 1997. 183 p.
- RAO, N. H.; SARMA, P.B.S. & CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, **13**:25-32, 1988.
- ROBERTSON, G. W. *Guidelines on crop-weather models*. Geneve, World Meteorological Organization, 1983. 115 p. (World Climate Application Programme, 50)
- SILVA, G. L. S. P.; VICENTE, J. R. & CASER, D. V. *Variações do tempo e produtividade agrícola: um subsídio à previsão de safras no Estado de São Paulo*. Campinas, Fundação Cargill, 1986. 148 p.
- SILVA, G. L. S. P.; VICENTE, J. R. & CASER, D. V. Avaliação de previsões de rendimento de culturas no Estado de São Paulo, fornecidas por modelos agrometeorológicos, anos agrícolas 1984/85 e 1985/86. *Informações Econômicas*, São Paulo, **17**(6):61-45, 1987.
- SILVA, H. LAINS e. Contribuição para o estudo das causas de variação anual de produção de café. *Revista do Café Português*, Lisboa, **3**(10):13-28, 1956.
- 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.
- THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. *The water balance*. Centerton, Drexel Institute of Technology-Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publ. in Climatology, v. 8, n.1)
- TOSELLO, R. N. & ARRUDA, H. V. de. Correlação entre estimativas oficiais de produção de café e precipitação pluviométrica, no Estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, **21**: 449-465, 1962.
- WEILL, M. A. M. Avaliação de fatores edafoclimáticos e do manejo na produção de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) na região de Marília e Garça, SP. Piracicaba, 1990. 182 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, 1990.
- WILLMOT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K. M. & KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, Washington, **90**:8995-9005, 1985.