



EULER CIPRIANI VICTORINO

**MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA
PARA A PREVISÃO DE PRODUTIVIDADES DE
CAFEIROS NA REGIÃO SUL DO ESTADO DE
MINAS GERAIS**

LAVRAS – MG

2015

EULER CIPRIANI VICTORINO

**MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA PARA A PREVISÃO DE
PRODUTIVIDADES DE CAFEIROS NA REGIÃO SUL DO ESTADO
DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Engenharia e Manejo de Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho

Coorientador

Dr. Daniel Furtado Ferreira

LAVRAS – MG

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Victorino, Euler Cipriani.

Modelagem agrometeorológica para a previsão de produtividade
de cafeeiros na região sul do Estado de Minas Gerais / Euler
Cipriani Victorino. – Lavras : UFLA, 2015.

67 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2015.

Orientador: Luiz Gonsaga de Carvalho.

Bibliografia.

1. Modelagem agrometeorológica. 2. Produtividade. 3. Cafeeiro.
4. Déficit hídrico. 5. Seleção backward. I. Universidade Federal de
Lavras. II. Título.

EULER CIPRIANI VICTORINO

**MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA PARA A PREVISÃO DE
PRODUTIVIDADES DE CAFEZEIROS NA REGIÃO SUL DO ESTADO
DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Engenharia e Manejo de Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 12 de junho de 2015.

Dr. Daniel Furtado Ferreira UFLA

Dr. Rubens José Guimarães UFLA

Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho
Orientador

LAVRAS – MG

2015

Aos meus pais Marcondes e Ana Maria pela educação e amor familiar que recebi, e irmãos Ranieri, Lucas e Mariana por sempre representarem um porto seguro em momentos de dificuldade, e proporcionarem os melhores momentos.

A minha namorada Rochele por me amar e estar sempre ao meu lado.

Aos meus avós, pelo espírito de família e amor que disseminaram e depositaram em mim e em toda a família.

Aos grandes amigos da República Taverna, por representarem uma segunda família

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Engenharia, principalmente ao setor de Engenharia de Água e Solo pela oportunidade de cursar o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos durante o mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio conforme Processo 306204/2012-6.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo financiamento do projeto - Processo CAG-APQ 01670/13.

A todos os professores com quem tive o prazer de estudar, pelos ensinamentos transmitidos.

Ao Professor Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho, pela orientação, paciência e compreensão durante a realização desse trabalho.

Ao Dr. Wezer Lismar Miranda, pelo auxílio e companheirismo durante esse período

A todos os colegas do programa, pelo conhecimento trocado e companheirismo durante horas de estudo.

RESUMO

O conhecimento de técnicas eficazes de previsão de safras é de grande importância para o mercado cafeeiro, possibilitando melhor planejamento e tornando a atividade mais sustentável. Modelos agrometeorológicos de previsão de safras podem ser desenvolvidos a partir da relação entre as variações climáticas, principalmente a disponibilidade hídrica no solo e as fases fenológicas do cafeeiro, uma vez que essas relações impactam diretamente na produtividade e qualidade final do café. Sendo assim, este trabalho teve por objetivo desenvolver um modelo de previsão da produtividade do cafeeiro, baseado na disponibilidade hídrica, para as cidades de Lavras e Varginha, no sul de Minas Gerais. Os modelos foram gerados a partir da regressão linear múltipla da quebra de produtividade (Y_e/Y_p) em função da produtividade do ano anterior (Y_a/Y_p) e do déficit hídrico em diferentes fases fenológicas (ETR/ETP)_i. As variáveis (ETR/ETP)_i foram calculadas como médias trimestrais e bimestrais gerando 12 sequências fenológicas diferentes (7 bimestrais e 5 trimestrais). Durante as parametrizações, foram obtidos os coeficientes de resposta ao déficit hídrico (K_{y_i}) e o coeficiente relativo à produção do ano anterior (K_{y_0}) para cada sequência. Por meio da metodologia de seleção backward, foram obtidos modelos que apresentassem apenas coeficientes significativos. Nesse processo, na maioria dos casos, os modelos apresentaram grande sensibilidade ao período mais chuvoso (novembro a abril), e variáveis referentes a períodos importantes, como o de florescimento, não apresentaram significância. Ao final das parametrizações, foi concluído que os modelos apresentam bom potencial para a previsão de safras de cafeeiro. Nestes a produtividade do ano anterior deve ser considerada e a sequência fenológica que apresentou melhor desempenho foi Set./Out, Nov./Dez., Jan./Fev., Mar./Abr.

Palavras-chave: Modelagem agrometeorológica. Produtividade. Cafeeiro. Déficit hídrico. Seleção backward.

ABSTRACT

The knowledge of effective crop forecasting techniques is of great importance for the coffee market, enabling better planning and making this activity more sustainable. Agrometeorological crop forecasting models can be developed based on the relations of climate changes, especially soil water availability, with coffee phenological phases, given that these relations directly impact productivity and the final quality of coffee. Therefore, this study aimed at developing a predictive model for coffee yield based on water availability, for the municipalities of Lavras and Varginha, in southern Minas Gerais, Brazil. The models were generated from the multiple linear regression of productivity loss (Y_e/Y_p) as a function of the previous year productivity (Y_a/Y_p) and water deficit in the different phenological phases, represented by relative evapotranspiration (ETR/ETP)_i. The (ETR/ETP)_i variables were calculated as quarterly and bimonthly averages, generating 12 different phenological sequences (7 bimonthly and 5 quarterly). During the parameterization, we obtained the water deficit response coefficients (K_y) and the previous year production coefficient (K_{y0}) for each sequence. Non-significant coefficients were then excluded by means of backward selection methodology, until the models presented only significant coefficients. During this process, in general, the models were highly sensitive to the rainy season (from November to April), and variables related to important periods, such as flowering, were not significant. At the end of parameterization, we concluded that the models have good potential for coffee crop forecasting. Yields of previous years should be considered. The phenological sequence with best performance was Sep./Oct, Nov./Dec., Jan./Feb., Sep. /Apr.

Keywords: Agrometeorological modeling. Yield. Coffee. Water deficit. Backward selection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Esquemática das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica, durante 24 meses, nas condições climáticas tropicais do Brasil. ...	20
Figura 2	Extrato do balanço hídrico, no período de 2007 a 2013, para o município de Lavras, MG	36
Figura 3	Extrato do balanço hídrico, no período de 2007 a 2013, para o município de Varginha, MG	36
Figura 4	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B1 para as condições de Lavras, MG	41
Figura 5	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B3 para as condições de Lavras, MG	41
Figura 6	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B2 para as condições de Lavras, MG	42
Figura 7	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B6 para as condições de Lavras, MG	42
Figura 8	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B4 para as condições de Lavras, MG	42
Figura 9	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T1 para as condições de Lavras, MG	43

Figura 10	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B5 para as condições de Lavras, MG	43
Figura 11	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B7 para as condições de Lavras, MG	43
Figura 12	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T2 para as condições de Lavras, MG	44
Figura 13	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T3 para as condições de Lavras, MG	44
Figura 14	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T4 para as condições de Lavras, MG	44
Figura 15	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T5 para as condições de Lavras, MG	45
Figura 16	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B2 para as condições de Varginha, MG.....	50
Figura 17	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B1 para as condições de Varginha, MG.....	50
Figura 18	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B3 para as condições de Varginha, MG.....	50

Figura 19	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B4 para as condições de Varginha, MG.....	51
Figura 20	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B5 para as condições de Varginha, MG.....	51
Figura 21	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B6 para as condições de Varginha, MG.....	51
Figura 22	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B7 para as condições de Varginha, MG.....	52
Figura 23	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T1 para as condições de Varginha, MG.....	52
Figura 24	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T2 para as condições de Varginha, MG.....	52
Figura 25	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T3 para as condições de Varginha, MG.....	53
Figura 26	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T5 para as condições de Varginha, MG.....	53
Figura 27	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T4 para as condições de Varginha, MG.....	53

Figura 28	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando os bimestres set/out, nov/dez, jan/fev, para as condições de Lavras, MG	54
Figura 29	Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando os bimestres set/out, nov/dez, jan/fev para as condições de Varginha, MG	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Coeficientes de desempenho “C” conforme Camargo e Sentelhas (1997).....	33
Tabela 2	Coeficientes de regressão e respectivos parâmetros estatísticos dos modelos de regressão linear múltipla para o município de Lavras, MG	38
Tabela 3	Erros relativos percentuais entre as produtividades observadas e estimativas pelos modelos para o cafeeiro, em Lavras, MG	45
Tabela 4	Coeficientes de correlação (R), índices de concordância (d), índice confiança (C) e classificação do desempenho dos modelos agrometeorológicos testados para Lavras, MG	46
Tabela 5	Coeficientes de regressão e respectivos parâmetros estatísticos dos modelos de regressão linear múltipla para o município de Varginha, MG	48
Tabela 6	Coeficientes de correlação (R), índices de concordância (d), índice confiança (C) e classificação do desempenho dos modelos agrometeorológicos testados para Varginha, MG	56
Tabela 7	Erros relativos percentuais entre as produtividades observadas e estimativas pelos modelos para o cafeeiro, para Varginha, MG	56
Tabela 8	Coeficientes de regressão e respectivos parâmetros estatísticos dos modelos de regressão linear múltipla para o município de Varginha e Lavras (MG), considerando os bimestres set/out, nov/dez, jan/fev	59

Tabela 9	Coeficientes de correlação (R), índices de concordância (d), índice confiança (C) e classificação do desempenho dos modelos agrometeorológicos testados para Varginha e Lavras (MG), considerando os bimestres set/out, nov/dez e jan/fev59
----------	---

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Origem e histórico da cafeicultura no Brasil	18
2.2	Fenologia do cafeeiro	19
2.3	Influência do clima sobre o cafeeiro	21
2.4	Modelagem agrometeorológica	23
3	METODOLOGIA	26
3.1	Dados de produtividade de café	26
3.2	Produtividades potenciais	26
3.3	Dados de elementos climáticos	27
3.4	Balanco hídrico climatológico	27
3.4.1	Parametrização dos modelos	30
3.5	Períodos fenológicos considerados	32
3.6	Teste dos modelos	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Análise das condições climáticas	35
4.2	Parametrização dos modelos	36
4.2.1	Avaliação e validação cruzada dos modelos	40
4.3	Parametrização dos modelos	46
4.3.1	Avaliação e validação cruzada dos modelos	49
4.3.2	Visão geral sobre os resultados	57
5	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICES	66

1 INTRODUÇÃO

O café é um dos principais produtos agrícolas do mundo, tendo grande influência sobre o mercado internacional e brasileiro. No âmbito mundial representa o segundo maior gerador de divisas, ficando atrás apenas do petróleo (KOBAYASHI, 2007). O Brasil tem papel importante nesse mercado, contribuindo com 33,6% da produção mundial (seguido de Vietnã com 17,1%, Indonésia com 7,9% e Colômbia com 7,5%) e ocupando o segundo lugar entre os maiores consumidores do produto, atrás apenas dos Estados Unidos.

O País possui cerca de 287 mil produtores, com predominância de pequenos, presentes em 1900 municípios distribuídos em 15 Estados. O café gera receita para centenas de municípios, gerando mais de 8 milhões de empregos pelo País, evidenciando a grande importância econômica e social dessa atividade (Brasil). Nesse cenário, Minas Gerais se destaca contribuindo com 55% da produção nacional, sendo que aproximadamente metade da produção se concentra nas regiões sul e centro-oeste do Estado (BRASIL, 2013).

A atividade cafeeira evolui atravessando ciclos de expansão e retração. Em anos de alta nos preços ocorrem maiores investimentos por parte dos produtores, resultando em altas produtividades na safra seguinte. Com uma oferta maior de produto no mercado os preços apresentam quedas, reduzindo os investimentos e levando produtores até a abandonar lavouras. Com a redução da oferta os preços se elevam novamente, voltando a atrair investimentos. Além da “variação mercadológica” da produção, outros fatores que afetam diretamente a produtividade do cafeeiro são a bienalidade (característica fisiológica em que o cafeeiro alterna entre anos de baixa e alta produtividade) e as variações devido a fatores climáticos (CARVALHO, 2003).

A falta de métodos científicos, comprovadamente eficazes, para estimativa de produtividade do cafeeiro propicia o levantamento de especulações

que influenciam diretamente no preço do café no mercado. Como consequência, afeta negativamente a cadeia produtiva do agronegócio. Assim, a estimativa antecipada da produção cafeeira das diversas regiões produtoras é essencial para o estabelecimento da política cafeeira do País, servindo tanto a produtores, apoiando o planejamento de suas atividades agrícolas, garantindo assim uma melhor estabilidade, como ao governo na forma de ferramenta estratégica na orientação em ações referentes ao mercado interno e externo.

Atualmente, estimativas oficiais da safra cafeeira são realizadas pela CONAB em parceria com instituições parceiras, como a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais (EMATER), além de consultas a técnicos e escritórios do IBGE. São aplicados questionários e realizadas entrevistas junto a produtores e informantes previamente selecionados nos municípios produtores, a fim de reunir informações específicas sobre a cafeicultura no local. De posse desses dados são realizadas então análises estatísticas, que resultam nas estimativas (previsões) de safra para os Estados. Contudo, essas estimativas ainda são realizadas com base em informações que merecem aperfeiçoamento, pois advém principalmente da opinião de agentes do setor, não permitindo assim a apuração dos erros envolvidos. Diante disso, diversos trabalhos têm procurado mostrar o desenvolvimento de metodologias para este serviço.

Dentre as metodologias empregadas, têm-se desenvolvido modelos agrometeorológicos, os quais são alimentados principalmente por informações climáticas, correlacionando-as com a produtividade. Porém esses modelos ainda apresentam limitações quanto à aplicação, devido à complexidade da interação entre os elementos climáticos.

A parametrização de um modelo de previsão para o cafeeiro é dificultada ainda pelo grande número de variáveis que podem afetar a produtividade, tais como variedade cultivada, sistema de plantio, idade da

lavoura, tipo e fertilidade do solo e sistema de manejo. Além disso, a característica de bienalidade de produção do cafeeiro e a falta de um mapa temático com a distribuição espacial da área cultivada aumentam ainda mais a complexidade da estimativa da produtividade do café em grandes áreas territoriais por meio desses modelos (SANTOS; CAMARGO, 2006).

O principal fator meteorológico a afetar a produtividade do cafeeiro é a disponibilidade hídrica (PICINI et al., 1999) e uma das formas de realizar a estimativa de safras consiste em quantificar a quebra de rendimento da cultura a partir de modelos agrometeorológicos, que além de fornecer informações para os sistemas de previsão, permitem identificar o estresse hídrico ao longo do ciclo da cultura e analisar seus impactos na produtividade (ROSA et al., 2010).

Portanto, de acordo com o problema descrito e sob a hipótese de que é possível estimar a produção do cafeeiro por meio de um modelo agrometeorológico, o presente trabalho, desenvolvido sob a representatividade das condições hidroclimáticas da região Sul do Estado de Minas Gerais, foi realizado. O objetivo foi desenvolver e parametrizar um modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade do cafeeiro, com enfoque na penalização em função da deficiência hídrica, durante as diferentes fases fenológicas da cultura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Origem e histórico da cafeicultura no Brasil

Atualmente as duas espécies de interesse comercial mais plantadas no Brasil são o arábica (*Coffea arabica* L.) e o robusta (*Coffea canephora* L.). O cafeeiro arábica teve origem e é encontrado crescendo naturalmente como vegetação esparsa de sub-bosque em regiões altas (entre 1300 e 2800 m de altitude) do sudoeste da Etiópia, sudeste do Sudão e Quênia, onde a temperatura média anual oscila entre 18 e 20 °C e o regime de chuva total anual fica entre 1300 e 1800 mm, com uma estação seca de 4 a 5 meses. Já a espécie robusta tem sua origem em regiões mais baixas e quentes (até 1000 m de altitude) na região das florestas úmidas da bacia do Rio Congo, próximo ao Lago Victoria, onde as temperaturas atingem média anual entre 24 e 26 °C e a chuva total anual oscila entre 1200 e 2700 mm (PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008).

As primeiras mudas de café que chegaram ao Brasil foram trazidas pelo Sargento-Mor Francisco de Mello Palheta da Guiana Francesa, a pedido do governador do Maranhão e Grão Pará no ano de 1727 e começou a ser produzido no estado do Pará. Nessa época, o produto já possuía grande valor comercial e rapidamente se espalhou pelo País, concentrando-se em regiões onde as condições climáticas fossem favoráveis ao seu melhor desenvolvimento. Um século depois, o Brasil já se encontrava na posição de maior produtor, e na primeira metade do século XX já detinha 70% da produção mundial. Nessa época o café era o maior gerador de renda do País e alavancava seu desenvolvimento (ARÊDES, 2006).

A cafeicultura chegou a Minas Gerais introduzida na região da Zona da Mata por volta de 1830. Por muito tempo, a região foi responsável pela maior parte da produção no Estado e teve seu crescimento influenciado por essa

atividade. Com o tempo, essa atividade agrícola expandiu-se para outras partes do Estado, se estabelecendo com muito sucesso no Sul de Minas, principalmente nas divisas com as regiões cafeeiras de São Paulo. Posteriormente, sobretudo devido à prática da irrigação, a cultura avançou para o Cerrado brasileiro.

A extensão territorial no Brasil, na qual se cultiva o cafeeiro, é bastante ampla, o que submete a cafeicultura para diferentes formas de manejo, tipos de solo, clima, espaçamento de plantio e aos estresses ambientais. Das ocorrências climáticas que podem causar dano à cafeicultura as mais importantes são as altas temperaturas, geadas, ventos, veranicos frequentes, deficiências hídricas prolongadas e má distribuição de chuvas ao longo do ano, as quais influenciam no padrão sazonal de crescimento do cafeeiro. Além dessas, outros fatores, inerentes à planta, também influem no padrão de crescimento do cafeeiro, tais como idade, teores de reservas orgânicas e minerais, genética (variedade) e grau de depauperamento.

2.2 Fenologia do cafeeiro

A fenologia pode ser definida como os estudos dos eventos periódicos da vida de uma planta, em função da sua reação às condições do ambiente (FANCELLI; DOURADO NETO, 1997 apud PEZZOPANE, 2004). Diferente da maioria das plantas, que emitem inflorescência e frutificam no mesmo ano, o cafeeiro arábica (*Coffea arabica* L.) completa seu ciclo fenológico em dois anos. Esse ciclo foi descrito e dividido em seis fases vegetativas e reprodutivas, para as condições tropicais do Brasil, por Camargo e Camargo (2001).

Na primeira delas, durante o primeiro ano do ciclo, são formados os ramos vegetativos com gemas axilares, ocorrendo de setembro a março. São meses de dias longos e de fotoperíodo superando 12 horas. A segunda fase, indução e maturação de gemas florais, vai geralmente de abril a agosto. Nessa

fase, as gemas axilares são induzidas a se tornarem gemas reprodutivas (GOUVEIA, 1984 apud PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008), sendo esse fenômeno desencadeado pelo decréscimo no fotoperíodo durante esse período (CAMARGO, 1985). À medida que os dias vão ficando mais curtos, a partir de fevereiro, o crescimento das gemas florais é intensificado. No final dessa fase a planta entra em um estado de relativo repouso, encerrando assim o 1º ano fenológico da cultura.

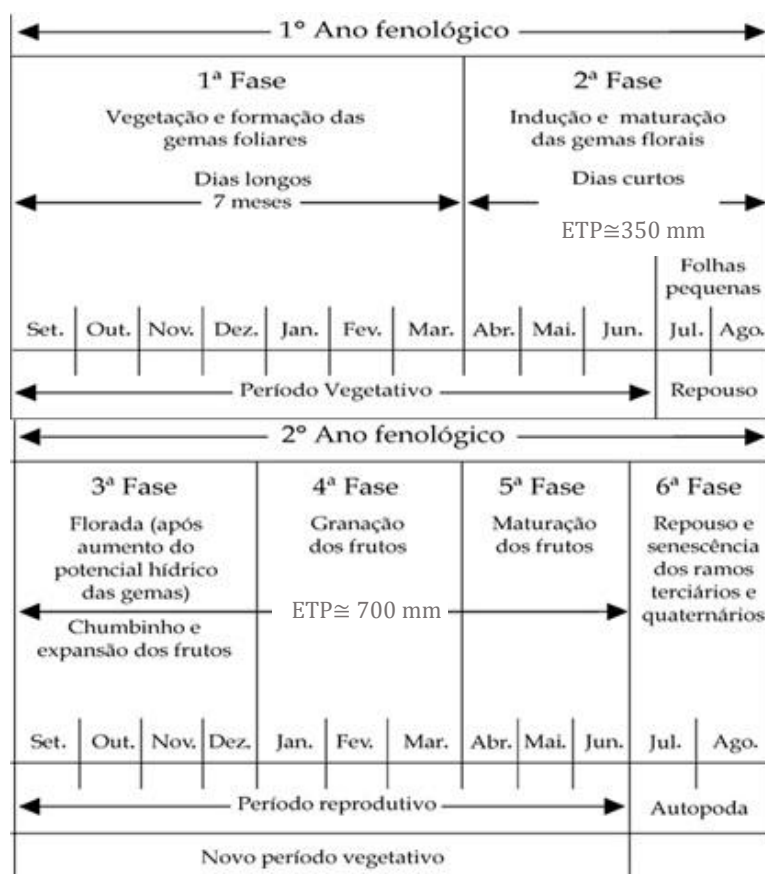


Figura 1 Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica, durante 24 meses, nas condições climáticas tropicais do Brasil.

Fonte: Adaptado de Camargo e Camargo (2001)

A terceira fase, chamada de florada, ocorre de setembro a dezembro, iniciando-se com o aumento do potencial hídrico das gemas florais que já estão maduras. Após a fecundação, há a formação dos “chumbinhos” e os frutos começam a sua expansão.

A quarta fase ocorre de janeiro a março com a granação dos frutos, quando os líquidos internos começam a se solidificar formando os grãos. A partir da quinta fase, inicia-se a maturação dos frutos, de abril a junho, época em que a evapotranspiração potencial cai significativamente. Essa fase encerra o período reprodutivo da planta (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

2.3 Influência do clima sobre o cafeeiro

Os elementos climáticos, individualmente, explicam a maior parte da variabilidade da produção do cafeeiro em comparação a fatores edáficos e biológicos (WEILL, 1990). Elementos como temperatura, umidade, vento, radiação solar e as relações hídricas têm grande influência sobre as fases fenológicas do cafeeiro, porém as interações entre esses elementos não são completamente conhecidas (OLIVEIRA, 2003).

Em relação à disponibilidade de água, a deficiência hídrica ao longo do ano pode ser tanto benéfica quanto prejudicial ao cafeeiro. O sincronismo entre os aspectos fenológicos e as condições hídricas é fundamental para se obter boa produtividade e qualidade final do produto (PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008).

Chuvas anuais de 1200 mm podem ser consideradas adequadas ao bom desenvolvimento do cafeeiro, desde que a deficiência hídrica anual não supere 150 mm (MATIELLO, 1991). O cafeeiro exige suprimento adequado de água desde o período da florada até o final da granação dos frutos. A ocorrência de um déficit hídrico elevado no período da florada causa o abortamento das flores,

podendo prejudicar o crescimento dos frutos. No período de granação a estiagem pode ocasionar frutos chochos e defeitos como grãos verdes pretos e ardidos (MEIRELES et al., 2007).

O ideal é que o déficit hídrico ocorra durante os períodos de maturação e de dormência das gemas florais do cafeeiro. Durante a maturação o excesso de umidade facilita a proliferação de microrganismos patogênicos nos grãos, reduzindo a qualidade destes. Durante o período de dormência das gemas florais, a deficiência hídrica permite que os botões iniciados em diferentes ocasiões possam alcançar o mesmo grau de desenvolvimento, estabelecendo uma melhor uniformização das floradas do cafeeiro (PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008; RENA; MAESTRI, 1986).

Em relação às exigências térmicas, a temperatura média anual ideal para o pleno desenvolvimento do café arábica está compreendida entre 18° a 21°C. Temperaturas acima de 34°C durante o florescimento podem causar atrofia floral (“estrelinha”), que se acentua com a ocorrência de déficit hídrico, reduzindo a produção (CARVALHO, 2003; SANTOS, 2005; SEDIYAMA et al., 2001).

O cafeeiro é sensível a temperaturas muito baixas, podendo ocorrer alterações fisiológicas no crescimento e se manifestar na formação dos frutos. O cafeeiro não suporta temperaturas inferiores a 5°C durante um longo período. Temperaturas iguais ou inferiores a 2°C no abrigo meteorológico implicam na ocorrência de geadas de radiação, podendo causar danos irreversíveis à planta. Temperaturas abaixo de -2°C na planta congelam os tecidos foliares e o caule podendo causar secagem das partes afetadas e morte da planta (CARVALHO, 2003; PEZZOPANE, 2004; ROSA, 2007; SANTOS, 2005; SEDIYAMA et al., 2001).

2.4 Modelagem agrometeorológica

O estudo das influências do clima sobre a produção pode ser desenvolvido por meio de modelos que buscam quantificar os efeitos das variações climáticas sobre o comportamento vegetal. Esses modelos agrometeorológicos consideram que cada fator climático exerce um certo controle sobre a produtividade final da cultura, agindo como uma espécie de fator de eficiência. A metodologia para estabelecer essa relação entre planta e clima vão desde simples correlação até modelos mais complexos, onde diferentes variáveis podem ser consideradas (CARVALHO, 2003; PICINI, 1998).

O modelo desenvolvido por Stewart, Hagan e Pruitt (1976) relaciona a quebra de produtividade da cultura ao somatório dos efeitos do déficit hídrico durante seu ciclo produtivo. A quebra de produtividade é representada pela relação entre a produtividade observada (Y_e) e a produtividade potencial (Y_p), sendo esta considerada como a que reflete o nível tecnológico aplicado à lavoura, sendo um valor máximo para as condições de cultivo desde que não ocorram restrições climáticas. O déficit hídrico, calculado para cada período fenológico da cultura, é representado pela relação entre evapotranspiração real (ETR) e a evapotranspiração potencial (ETP). O fator de penalização da produtividade (K_y) também é considerado para os diferentes estágios de desenvolvimento da cultura (Equação 1). Alguns trabalhos utilizaram esse modelo como base para a estimativa da produtividade de culturas como soja, cana, milho e sorgo, obtendo resultados satisfatórios (ASSAD et al., 2007; BERKA; RUDORFF; SHIMABUKURO, 2003; MARTIN et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; VOSSSEN, 1990). Outros modelos, como o desenvolvido por Camargo et al. (1999) para laranja, adaptaram o modelo proposto por Jensen (1968), que considera o produtório dos efeitos do déficit

hídrico sobre a produtividade e um índice de sensibilidade dependente do estágio fenológico (Equação 2).

$$\frac{Y_e}{Y_p} = 1 - \left[\sum_{i=1}^n k y_i \left(1 - \frac{ETR}{ETP} \right)_i \right] \quad (1)$$

$$\frac{Y_e}{Y_p} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ETP}{ETP} \right)_i^{\lambda_i} \quad (2)$$

em que,

Y_e – produtividade observada (kg de café beneficiado.ha⁻¹);

Y_p – produtividade potencial (kg de café beneficiado.ha⁻¹);

ETR – evapotranspiração real (mm);

ETP – evapotranspiração potencial (mm);

$K y_i$ – coeficiente de resposta da cultura ao déficit hídrico;

λ_i – índice de sensibilidade ao fator hídrico.

Especificamente para a cultura do café, Picini (1998) testou diferentes modelos agrometeorológicos para a estimativa da produtividade no Estado de São Paulo, considerando a disponibilidade hídrica no solo. O autor concluiu que o modelo aditivo adaptado de Stewart, Hagan e Pruitt (1976) apresentou melhores resultados e afirma que a produtividade do ano anterior deve ser considerada, uma vez que o ciclo bienal interfere no efeito da disponibilidade hídrica sobre o cafeeiro.

Carvalho (2003) teve como objetivo parametrizar um modelo de regressão linear múltipla a partir dos componentes principais mais significativos para a previsão de produtividade da cultura do café, utilizando um conjunto de variáveis além dos componentes hídricos propostos por Doorenbos e Kassam

(1979), no Sul de Minas Gerais. Concluiu que o método não se mostrou satisfatório, porém as variações das produtividades estimadas acompanharam as variações das produtividades observadas.

Segundo Santos e Camargo (2006), a identificação e parametrização dos coeficientes relacionados a fatores fenológicos, térmicos e hídricos são fundamentais para a obtenção de modelos agrometeorológicos de estimativa de quebra de produtividade, os quais são dependentes dos níveis hierárquicos de estimativa de produtividade, como para planta, talhão, município ou região. Os autores objetivaram parametrizar um modelo de quebra de produtividade do cafeeiro, em nível de talhão, para diferentes regiões de São Paulo. Consideraram além do componente hídrico, fatores relativos à temperatura e um componente fenológico para estimar o início do florescimento. Os autores concluíram que o modelo parametrizado teve desempenho consistente e observaram que os estágios de indução floral, florescimento e granação são importantes nas penalizações decendiais utilizadas no modelo.

Existem também na literatura trabalhos que buscam incorporar ferramentas de sensoriamento remoto aos modelos, utilizando informações espectrais expressas como índice de vegetação. Mkhabela et al. (2011), Rizzi (2004), Rosa et al. (2010), Rudorff e Batista (1990) e Sugawara (2002), e são alguns exemplos de trabalhos nessa linha. A grande limitação dessa metodologia está na delimitação das áreas produtoras de café, que se trata de uma atividade com grande participação de pequenos produtores, dificultando esse trabalho.

3 METODOLOGIA

3.1 Dados de produtividade de café

Os dados foram obtidos junto às instituições de extensão e pesquisa de Minas Gerais, EMATER-MG e EPAMIG respectivamente, Cooperativas de cafeicultores, empresas produtoras de café e produtores em geral nos municípios de Lavras e Varginha. Foi realizado um levantamento da disponibilidade de dados confiáveis de produtividades de lavouras cafeeiras da espécie arábica. Segundo os agentes consultados, o ideal seria que fossem dados a partir de 2008, quando o registro por parte dos produtores passou a ser mais rigoroso para fins de certificação. Em seguida foi realizada uma análise qualitativa dos dados, principalmente com base na caracterização da bienalidade de produção do cafeeiro, por ser esse fator bastante interferente na produção do ano seguinte em nível de talhões, procurando escolher aqueles talhões que apresentassem alternâncias anuais bem definidas em altas e baixas produtividades. Foram obtidos ao menos três talhões representativos de cada município para a parametrização dos modelos e concomitante a esses, foram obtidas produtividades de outros talhões das mesmas lavouras para os respectivos testes do desempenho dos modelos em sua capacidade preditiva de safras cafeeiras. Os dados de produtividades consistiram em séries anuais de produtividades (sacas de 60 kg de café beneficiado por hectare).

3.2 Produtividades potenciais

A exemplo de Carvalho (2003) e Picini (1998), as produtividades potenciais foram tomadas com base na recomendação de Kanemasu (1983) de se

acrescentar 10% ao maior valor da série de produtividade, objetivando reduzir efeitos ambientais.

3.3 Dados de elementos climáticos

Juntamente aos dados de produtividades cafeeiras foram levantados dados de elementos climáticos, concomitantes às séries anuais de produtividades, de estações meteorológicas instaladas próximas às lavouras. Foram obtidos dados de precipitação pluvial e temperaturas médias diárias necessários para o desenvolvimento dos balanços hídricos climatológicos (BHC).

3.4 Balanço hídrico climatológico

O balanço hídrico climatológico (BHC) foi aqui realizado com base na metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955), fornecendo informações de evapotranspiração potencial (ETP), estimativa da evapotranspiração real (ETR), armazenamento de água no solo (ARM), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC). Dessa maneira foi possível gerar o déficit de evapotranspiração relativa $[1 - ETR/ETP]$ permitindo quantificar o estresse hídrico.

A capacidade de água disponível no solo (CAD) adotada para o cálculo foi de 100 mm, sendo essa considerada como média para a maioria dos solos cultivados com cafeeiros no estado em Minas Gerais e já utilizada em diversos trabalhos (CAMARGO; PEREIRA, 1994; CARVALHO, 2003; MATIELLO, 1991; PICINI, 1998).

Os dados referentes aos elementos climáticos foram agrupados, em escalas decendiais, obtendo-se por intermédio do BHC a penalização hídrica

representada pela relação (ETR/ETP). A ETP foi estimada pelo método de Thornthwaite, citado por Pereira, Nova e Sedyama (1997) efetuando o devido ajuste para a sua representação na escala decencial mediante um fator de correção, conforme as equações abaixo.

$$ETpp = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (3)$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1,514} \quad (4)$$

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7.71 * 10^{-5} * I^2 + 1,7912 * 10^{-2} * I + 0,49239 \quad (5)$$

$$FC = \frac{ND}{30} * \frac{N}{12} \quad (6)$$

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a * FC \quad (7)$$

Em que,

ETpp - evapotranspiração potencial padrão para um mês típico de 30 dias e cada dia com de 12 horas de insolação máxima possível (mm);

T - temperatura média do mês (°C);

Tj – temperatura normal do mês “j”;

I - índice calorífico anual;

a - índice, obtido como uma função cúbica em I;

FC – fator de correção;

ND – número de dias do período considerado;

N – duração astronômica média dos dias no período considerado (h);

ETp – evapotranspiração potencial (mm).

A evapotranspiração da cultura (ETC) é normalmente estimada pela adoção do coeficiente de cultura (Kc) de acordo com a equação (8).

$$ETC = ETP * Kc \quad (8)$$

O coeficiente Kc varia com o crescimento e desenvolvimento, expressando quanto da superfície do solo é coberta pela vegetação, o que reflete no consumo de água pela planta. Segundo Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002), em culturas perenes, em razão do contínuo crescimento das plantas, o valor de Kc é crescente durante os anos que precedem a maturidade e, daí em diante, torna-se praticamente constante, com pequenas variações sazonais em função da variação do índice de área foliar. De acordo com Camargo e Pereira (1994) a cultura do café, na fase adulta, chega a cobrir cerca de 80% do terreno, podendo então o valor de Kc ser considerado aproximadamente igual a um. Nesse trabalho foi adotado o valor unitário para o Kc , sendo então a ETc do café a própria ETp estimada para o balanço hídrico.

Foram extraídos os componentes do BHC e em seguida calculadas as estimativas das evapotranspirações relativas (ETR/ETP) para as respectivas fases fenológicas de produção do cafeeiro, sendo ETR a evapotranspiração real da cultura. As variáveis ETR/ETP foram adotadas como penalizadores hídricos dos modelos.

3.4.1 Parametrização dos modelos

O modelo de Stewart, Hagan e Pruitt (1976) modificado por Picini (1998) pode ser decomposto da seguinte forma:

$$\frac{Ye}{Yp} = ky_0 \left(\frac{Ya}{Yp} \right) + \sum_{i=1}^n ky_i \left(\frac{ETR}{ETP} \right)_i \quad (9)$$

Em que,

Ye – produtividade observada (kg de café beneficiado.ha⁻¹);

Ya – produtividade do ano anterior (kg de café beneficiado.ha⁻¹);

Yp – a produtividade potencial (kg de café beneficiado.ha⁻¹);

$(ETR/ETP)_i$ – evapotranspiração relativa, representando a penalização hídrica;

Ky_0 – coeficiente de resposta à produtividade do ano anterior;

Ky_i – coeficiente de resposta (sensibilidade) ao estresse hídrico.

O modelo (9) pode ser expresso pelo modelo linear estatístico tradicional, em que as relações entre as variáveis será explicada na sequência:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e_i \quad (10)$$

Em que Y é a variável resposta, X_1, X_2, \dots, X_k são as variáveis regressoras ou covariáveis, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são os parâmetros da regressão e “ e_i ” representa o resíduo referente a fatores não mensurados, supostos normais e independentemente distribuídos com média 0 e variância comum σ^2 . Nesse

trabalho foi considerada reta passando pela origem, sendo o coeficiente linear (β_0) igual a zero.

De acordo com as expressões 9 e 10, a variável resposta Y é representada pela relação Y_e/Y_p , e as variáveis regressoras de entrada no modelo são representadas por Y_a/Y_p e $(ETR/ETP)_i$. O coeficiente de resposta relativo à produtividade do ano anterior (ky_0) e os de resposta da cultura às variáveis de penalizações hídricas (ky_i) foram obtidos por análise de regressão linear múltipla.

Inicialmente, foi realizada a análise de regressão linear simples para cada uma das variáveis regressoras individualmente, a fim de detectar se essas eram significantes, a nível de 5% de probabilidade, para o modelo em relação à variável Y_e/Y_p .

Em seguida foi realizada a análise de regressão linear múltipla. As variáveis que não apresentaram significância estatística a nível de 10% de probabilidade nesta análise foram eliminadas uma a uma, aplicando-se a metodologia de seleção backward, até que fossem obtidos modelos apenas com variáveis significativas.

Essa metodologia permite obter modelos que possuam apenas variáveis significativas, porém não indica que aquelas excluídas não sejam importantes no processo em si. O fato de alguma variável ser significativa no primeiro passo (regressão linear simples) mas excluída no segundo (regressão linear múltipla) pode refletir o efeito da multicolinearidade entre as variáveis. Os cálculos e análises estatísticas foram realizados utilizando-se o software MS Excel.

3.5 Períodos fenológicos considerados

Na fase de parametrização do modelo, a evapotranspiração relativa foi determinada para diferentes sequências fenológicas, visando identificar a influência do déficit hídrico em cada fase (Quadro 1).

As sequências foram definidas com base no ciclo fenológico proposto por Camargo e Camargo (2001) (Figura 1) e em sequências previamente testadas em trabalhos que seguiram a mesma linha de pesquisa, tais como os realizados por Carvalho (2003), Picini (1998) Santos e Camargo (2006). Foram consideradas doze sequências, sendo sete bimestrais e cinco trimestrais detalhadas no Quadro 1.

Assim, para cada sequência foram calculadas as evapotranspirações relativas médias $(ETR/ETP)_i$ como variáveis de entrada para o modelo e os fatores de resposta ao déficit hídrico (Ky_i) em cada um dos períodos foram estimados pela regressão linear múltipla.

	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
B1	Ky1		Ky2		Ky3		Ky4		Ky5			
B2		Ky1		Ky2		Ky3		Ky4		Ky5		
B3			Ky1		Ky2		Ky3		Ky4		Ky5	
B4	Ky1		Ky2		Ky3		Ky4					
B5		Ky1		Ky2		Ky3		Ky4				
B6			Ky1		Ky2		Ky3		Ky4			
B7				Ky1		Ky2		Ky3		Ky4		
T1	Ky1			Ky2			Ky3			Ky4		
T2	Ky1			Ky2			Ky3					
T3		Ky1			Ky2			Ky3				
T4			Ky1			Ky2			Ky3			
T5				Ky1			Ky2			Ky3		

Quadro 1 Sequências fenológicas bimestrais e trimestrais consideradas nas parametrizações dos modelos agrometeorológicos

3.6 Teste dos modelos

De posse dos coeficientes parametrizados, os modelos agrometeorológicos puderam ser montados, substituindo os valores de K_y calculados na equação 9, gerando uma equação para cada sequência fenológica considerada. As produtividades estimadas foram obtidas por meio do software MS Excel, utilizando a produção do ano anterior (Y_a/Y_p) e o déficit hídrico representado pela evapotranspiração relativa (ETR/ETP) correspondente a cada sequência fenológica.

Os desempenhos dos modelos foram avaliados com dados de produtividade observados de talhões das lavouras cafeeiras de cada município, diferentes dos utilizados na parametrização (validação cruzada), porém em condições tecnológicas semelhantes àsquelas utilizadas para a obtenção dos modelos, conforme indicaram Hoogenboom, Jones e Boote (1992) e Picini (1998).

Tabela 1 Coeficientes de desempenho “C” conforme Camargo e Sentelhas (1997)

Valor “C”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Regular
0,41 a 0,50	Ruim
< 0,40	Péssimo

Para a validação cruzada dos modelos, foram comparadas as produtividades estimadas e observadas, adotando indicadores estatísticos de

performance de modelos lineares, tais como o coeficiente de determinação (R^2), índice “d” de concordância de Willmott et al. (1985), além do erro relativo percentual (ERP). Associando os coeficientes de correlação “r” com o de concordância “d”, Camargo e Sentelhas (1997) desenvolveram o índice “C”, sendo $C = r * d$. Esse índice reflete o desempenho do modelo (Tabela 1), sendo também aplicado neste estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise das condições climáticas

Nas Figuras 2 e 3 são apresentadas as médias da precipitação pluvial, evapotranspiração real e evapotranspiração potencial (Prec, ETR e ETP) extraídas dos balanços hídricos para as regiões de Lavras e Varginha nos períodos considerados neste trabalho (2007 a 2013). As regiões apresentam clara similaridade quanto às condições climáticas. Ambas possuem queda expressiva nos índices pluviométricos a partir do mês de abril, fase em que se inicia a maturação dos frutos e período de colheita. A partir de setembro, nas duas regiões, os índices pluviométricos tornam a se elevar, coincidindo com o período da florada, em que as estiagens prolongadas podem prejudicar bastante a produtividade do cafeeiro. Apesar da semelhança, é possível notar pelas Figuras 2 e 3 que a região de Varginha apresentou uma ligeira melhor distribuição de chuvas, sendo que as precipitações superaram a demanda por evapotranspiração de outubro a abril, gerando (em média) excedente hídrico nesse período. Em Lavras isso ocorreu de outubro a março. Durante os meses restantes (de maio a setembro em Varginha e de abril a setembro em Lavras) o volume precipitado não superou as demandas, ocorrendo deficiência hídrica.

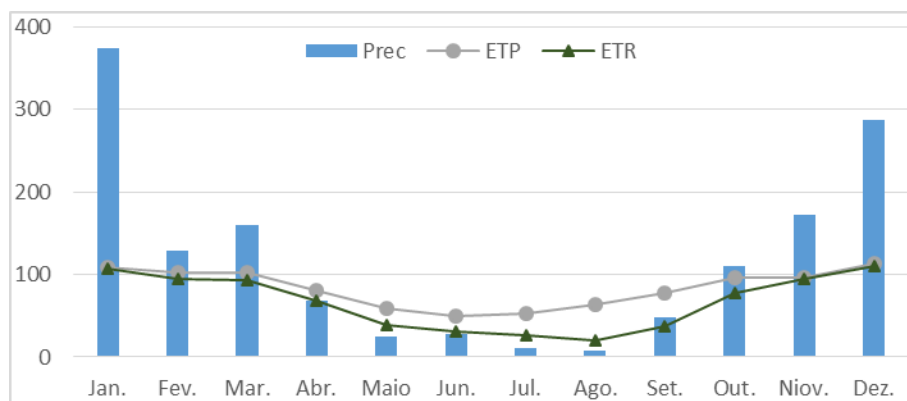


Figura 2 Extrato do balanço hídrico, no período de 2007 a 2013, para o município de Lavras, MG

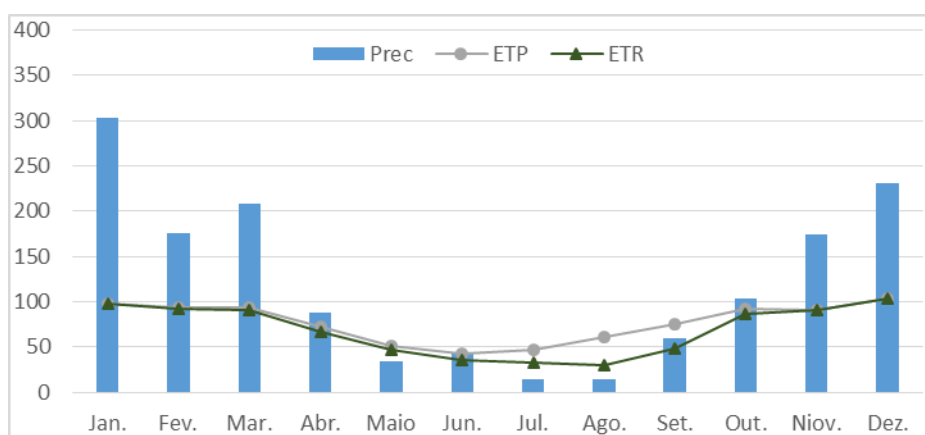


Figura 3 Extrato do balanço hídrico, no período de 2007 a 2013, para o município de Varginha, MG

4.2 Parametrização dos modelos

O Apêndice A apresenta os resultados estatísticos das regressões lineares simples calculadas para a variável Y_a/Y_p e para as variáveis ETR/ETP referentes a cada bimestre e trimestre considerados. Segundo os resultados, todas as variáveis estudadas foram, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t, individualmente significativas em relação à estimativa da produtividade. Isso

indica que todas as variáveis analisadas são de alguma forma importantes para o modelo estudado.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados estatísticos resumidos das regressões lineares múltiplas. Nessa Tabela são apresentados apenas os coeficientes parametrizados após a eliminação, por meio da seleção backward, daqueles não significativos estatisticamente para as diferentes sequências fenológicas testadas. Ao analisar os coeficientes de determinação (R^2), indicador da variação que é explicada pelo modelo, observa-se que os resultados foram satisfatórios, variando de 0,89 a 0,94. Como os modelos não possuem necessariamente o mesmo número de variáveis, o R^2 ajustado deve ser considerado, uma vez que este leva em consideração o número de variáveis utilizadas na parametrização. Da mesma forma, não foi observada grande diferença entre os resultados obtidos, sendo que R^2 ajustado variou de 0,81 a 0,84. Em termos práticos essas diferenças são muito pequenas e não devem ser significativas para a escolha do modelo mais adequado. Posteriormente a partir da validação dos modelos discutidos foi possível chegar a conclusões mais concretas.

Observando o Quadro 2 percebe-se que, em geral, o número de variáveis dos modelos foi reduzido a apenas duas, com exceção das sequências B3 (com quatro variáveis), T4 (três variáveis) e B2 (cinco variáveis), sendo que essa última deve ser desconsiderada devido aos valores assumidos pelos coeficientes extrapolarem limites confiáveis. Como todos os coeficientes foram significativos individualmente durante a regressão linear simples, a redução no número de variáveis indica uma redundância entre as mesmas. Isso não descarta a importância das variáveis removidas para o processo, mas indica que essas se tornaram insignificantes na presença das outras. Como consequência da redução do número de variáveis, alguns modelos se tornaram idênticos ou muito

parecidos já que para alguns deles os períodos considerados foram semelhantes. É o caso das sequências B4, B5, B7, T1, T2 e T5 e das sequências B1 e B6.

Tabela 2 Coeficientes de regressão e respectivos parâmetros estatísticos dos modelos de regressão linear múltipla para o município de Lavras, MG

	B1		B2		B3		B4	
R2	0,922		0,945		0,941		0,894	
R2 AJ.	0,839		0,822		0,834		0,809	
ER.PADRÃO	0,189		0,181		0,178		0,220	
	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*
KY0	-	-	-	-	-	-	-0,47	0,06
Ky1	-	-	79,38	0,01	1,68	0,04	-	-
Ky2	-	-	108,74	0,01	-	-	-	-
Ky3	-2,36	0,02	303,62	0,01	-4,38	0,01	-	-
Ky4	-	-	-623,12	0,01	2,84	0,01	0,88	0,00
KY5	3,19	0,01	176,94	0,01	1,37	0,07	-	-
	B5		B6		B7		T1	
R2	0,899		0,922		0,899		0,898	
R2 AJ.	0,814		0,839		0,814		0,813	
ER.PADRÃO	0,215		0,189		0,215		0,216	
	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*
KY0	-0,46	0,06	-	-	-0,46	0,06	-0,46	0,06
Ky1	-	-	-	-	-	-	-	-
Ky2	-	-	-2,36	0,02	-	-	-	-
Ky3	-	-	-	-	0,89	0,00	0,87	-
Ky4	0,89	0,00	3,19	0,01	-	-	-	0,00
	T2		T3		T4		T5	
R2	0,90		0,91		0,94		0,90	
R2 AJ.	0,81		0,83		0,84		0,81	
ER.PADRÃO	0,22		0,20		0,17		0,22	
	Coef.	Valor p*	Coef.	valor p	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*
KY0	-0,46	0,06	-	-	-	-	-0,46	0,06
Ky1	-	-	-	-	2,12	0,01	-	-
Ky2	-	-	-3,64	0,03	-4,94	0,00	0,87	0,00
Ky3	0,87	0,00	4,59	0,02	4,36	0,00	-	-

* para valor-p menor que 0,1 a variável é significativa ao nível de 10% de probabilidade pelo teste t.

	Ky0	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
B1						-2,36				3,19			
B2													
B3				1,68				-4,38		2,84		1,37	
B4	-0,47							0,88					
B5	-0,46								0,89				
B6						-2,36				3,19			
B7	-0,46								0,89				
T1	-0,46							0,87					
T2	-0,46							0,87					
T3							-3,64		4,59				
T4				2,12			-4,94			4,36			
T5	-0,46							0,87					

Quadro 2 Coeficientes de regressão do modelo de regressão linear múltipla para o município de Lavras, distribuídos de acordo com os períodos que representam

Os coeficientes relativos à produtividade do ano anterior (K_{y0}) foram significativos estatisticamente a nível de 10% de probabilidade em seis das doze sequências consideradas (B4, B5, B7, T1, T2 e T5). Nos seis casos foram obtidos valores negativos para K_{y0} . Esse resultado já era esperado, uma vez que um valor negativo para esse coeficiente penaliza mais acentuadamente a produtividade quanto maior for a produção alta no ano anterior, refletindo o que já é relatado na literatura a respeito da bienalidade do cafeeiro (BARROS, 1997; CAMARGO; CAMARGO, 2001; PICINI, 1998; RENA; MAESTRI, 1986).

Com relação aos coeficientes referentes ao déficit hídrico (K_y), observando o Quadro 2, nota-se que as variáveis significativas se concentraram, em geral, nos períodos entre dezembro e abril, que corresponde à fase de chumbinho até o início da maturação dos frutos. O suprimento hídrico inadequado nessa época pode ocasionar má formação do endosperma (chochamento dos frutos). Essa maior sensibilidade nesse período coincide com os resultados apresentados por Carvalho (2003) para São Sebastião do Paraíso e por Picini (1998) para Campinas e pode ser considerado um reflexo da

influência do alto índice pluviométrico, principalmente durante os meses de janeiro e fevereiro, no cálculo das médias de ETr/ETp.

Segundo Picini et al. (1999) coeficientes com valores positivos altos penalizam acentuadamente a produtividade, valores próximos a zero exercem pouca influência na produtividade e valores negativos indicam que o déficit naquele período pode beneficiar a produtividade da cultura. Alguns modelos apresentaram coeficientes negativos em meses como novembro, dezembro, janeiro e fevereiro (fases de chumbinho, expansão e granação dos frutos) apesar de a seca nessa fase prejudicar a produtividade final do cafeeiro (PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008). Esse resultado pode ser um reflexo do tamanho reduzido da série histórica considerada, resultando em pouca variabilidade do parâmetro de entrada ETR/ETP, conseqüentemente prejudicando a estimativa dos coeficientes. Resultados semelhantes nesse sentido foram relatados por Carvalho (2003) para o município de Alfenas, MG.

4.2.1 Avaliação e validação cruzada dos modelos

Os modelos foram validados com dados de glebas independentes, não consideradas na parametrização dos mesmos (validação cruzada). Para o município de Lavras, as glebas utilizadas foram “Bela Vista” e “Lado Esquerdo” da Fazenda Bela Vista. As Figuras de 4 a 15 ilustram graficamente as produtividades observadas e estimadas, bem como o diagrama de dispersão plotado a partir das produtividades relativas estimadas e observadas juntamente com os índices de desempenho estatístico de cada modelo

De acordo com a classificação pelo índice C proposto por Camargo e Sentelhas (1997), representada na Tabela 4, apenas as sequências B1 e B6 apresentaram desempenho “Ótimo”, sendo estatisticamente as mais indicadas. Ao observar a Tabela 3, indicando o erro relativo percentual (ERP) para cada

seqüência testada, percebe-se que em anos de produtividade muito abaixo da média, como nas safras de 2009/2010 e 2011/2012, o ERP atinge valores muito altos. Isso ratifica os resultados já relatados por Carvalho (2003), de que os modelos perdem precisão no caso de produtividades muito baixas

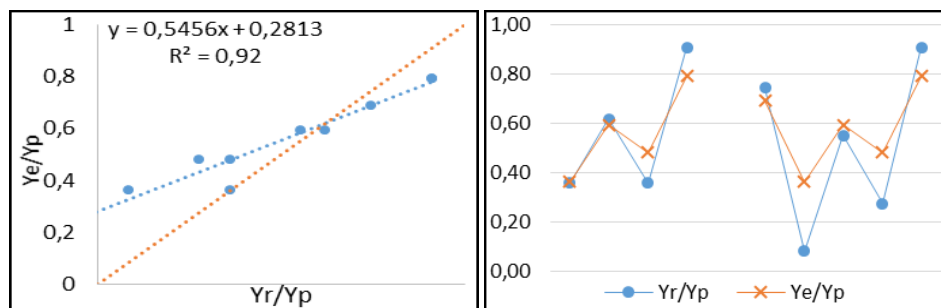


Figura 4 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a seqüência B1 para as condições de Lavras, MG

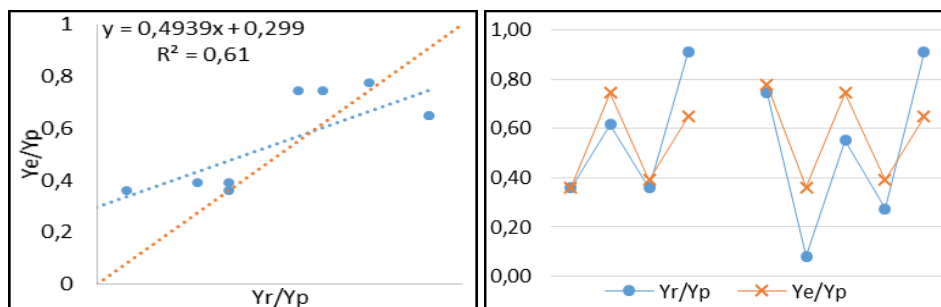


Figura 5 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a seqüência B3 para as condições de Lavras, MG

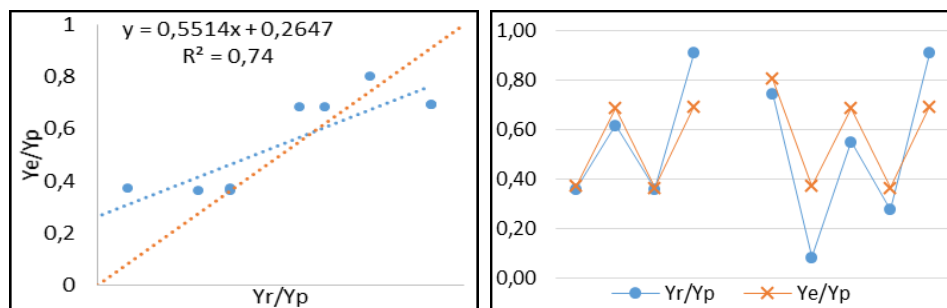


Figura 6 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B2 para as condições de Lavras, MG

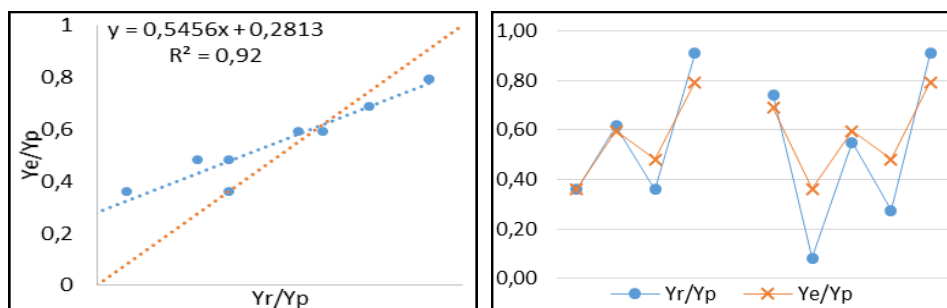


Figura 7 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B6 para as condições de Lavras, MG

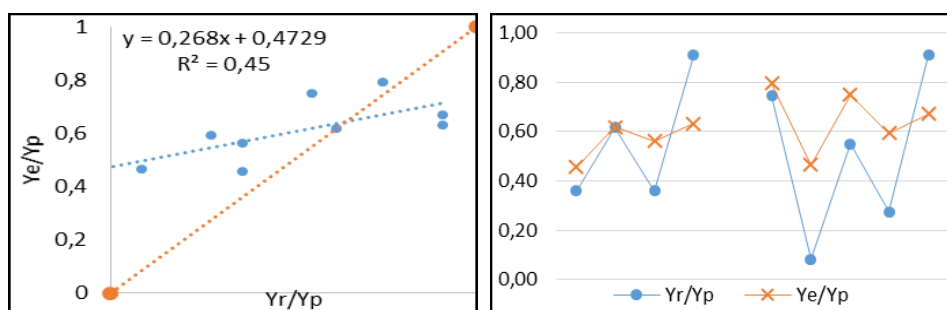


Figura 8 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B4 para as condições de Lavras, MG

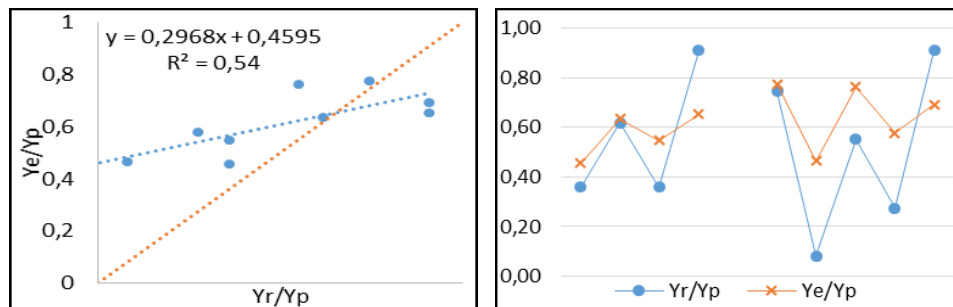


Figura 9 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T1 para as condições de Lavras, MG

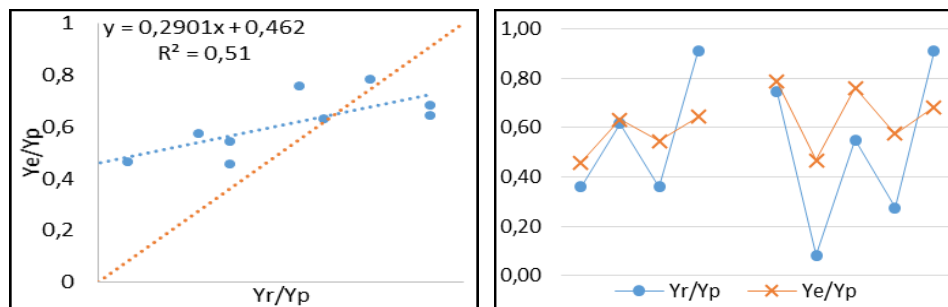


Figura 10 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B5 para as condições de Lavras, MG

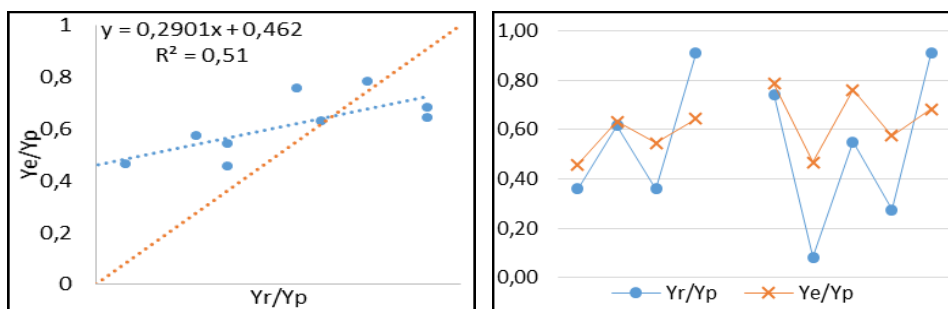


Figura 11 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B7 para as condições de Lavras, MG

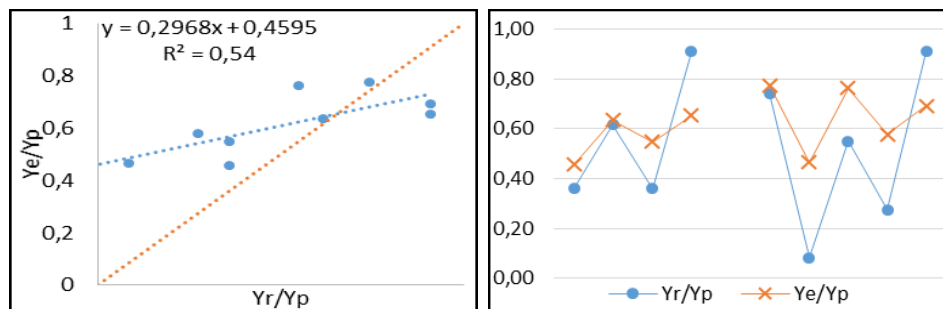


Figura 12 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T2 para as condições de Lavras, MG

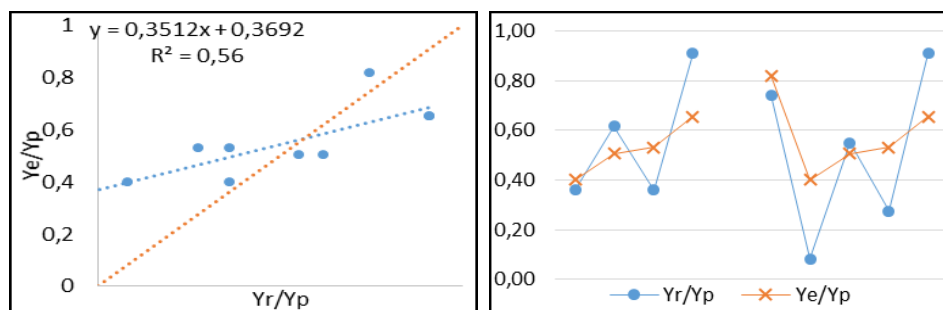


Figura 13 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T3 para as condições de Lavras, MG

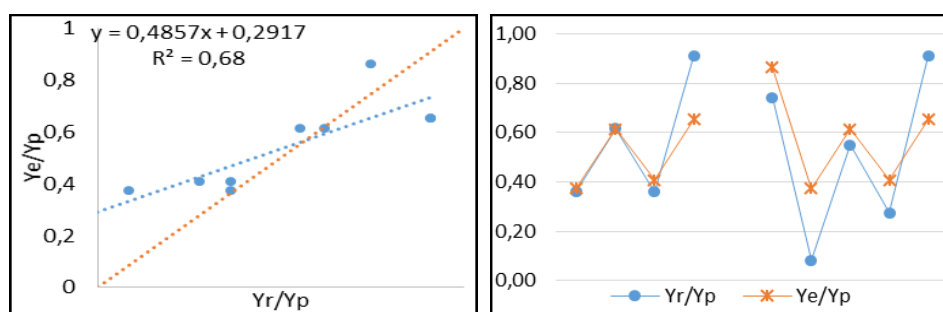


Figura 14 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T4 para as condições de Lavras, MG

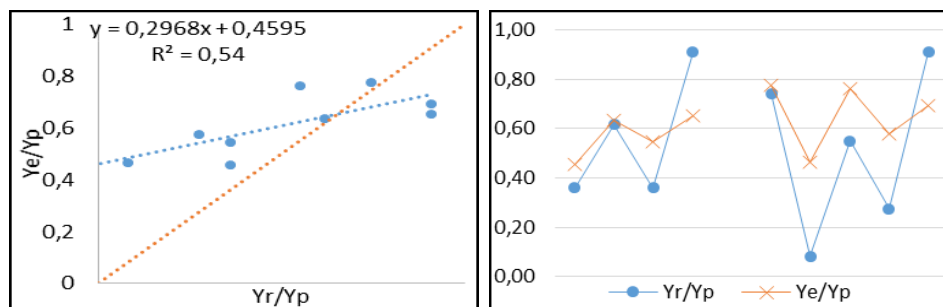


Figura 15 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T5 para as condições de Lavras, MG

Tabela 3 Erros relativos percentuais entre as produtividades observadas e estimativas pelos modelos para o cafeeiro, em Lavras, MG

Ano Agrícola	Yr	Erro Relativo Percentual						
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
2009/2010	21,0	0,8	3,1	0,3	26,6	27,4	0,8	27,4
2010/2011	36,0	3,6	11,0	20,6	0,1	2,3	3,6	2,3
2011/2012	21,0	33,8	1,4	8,4	56,1	51,2	33,8	51,2
2012/2013	53,0	12,9	23,7	28,7	30,5	29,1	12,9	29,1
Média	24,9							
Ano Agrícola	Yr	Erro Relativo Percentual						
		T1	T2	T3	T4	T5		
2009/2010	21,0	26,8	26,8	11,1	3,6	26,8		
2010/2011	36,0	2,8	2,8	18,0	0,6	2,8		
2011/2012	21,0	51,9	51,9	47,9	13,2	51,9		
2012/2013	53,0	28,2	28,2	27,8	28,1	28,2		
2008/2009	27,0	4,1	4,1	10,4	16,1	4,1		
2009/2010	3,0	463,4	463,4	384,4	351,6	463,4		
2010/2011	20,0	38,4	38,4	8,1	11,4	38,4		
2011/2012	10,0	109,7	109,7	93,4	48,0	109,7		
2012/2013	33,0	23,9	23,9	27,8	28,1	23,9		
Média	24,9							

Tabela 4 Coeficientes de correlação (R), índices de concordância (d), índice confiança (C) e classificação do desempenho dos modelos agrometeorológicos testados para Lavras, MG

Seq.	Parâmetros			
	d	R	C	Desempenho
B1	0,90	0,96	0,86	Ótimo
B2	0,87	0,86	0,75	Bom
B3	0,82	0,78	0,64	Mediano
B4	0,63	0,67	0,42	Ruim
B5	0,65	0,72	0,46	Ruim
B6	0,90	0,96	0,86	Ótimo
B7	0,65	0,72	0,46	Ruim
T1	0,66	0,74	0,48	Ruim
T2	0,66	0,74	0,48	Ruim
T3	0,73	0,75	0,55	Regular
T4	0,84	0,82	0,69	Bom
T5	0,66	0,74	0,48	Ruim

4.3 Parametrização dos modelos

Devido à indisponibilidade de dados diários para o cálculo do balanço hídrico em escala decendial, os cálculos foram realizados em escala mensal. Os resultados das regressões lineares simples calculadas para todas as variáveis individualmente são apresentados no Apêndice B. Como já observado para Lavras, de acordo com os resultados, todas as variáveis consideradas foram significativas, a nível de 5 % de probabilidade pelo teste t, em relação à estimativa da produtividade do cafeeiro, indicando a importância das mesmas para o modelo agrometeorológico

Como resultado da seleção backward, com exceção das sequências T2, T3 e T4, os modelos ajustados para Varginha tiveram seu número de variáveis reduzido a três por modelo (Tabela 5 e Quadro 3). Os resultados das regressões

lineares simples realizadas para cada variável considerada indicam que todas são significativas estatisticamente em relação à estimativa da produtividade do cafeeiro. Como já comentado nos itens anteriores, a redução do número de variáveis, apesar dos resultados das regressões lineares simples, pode ser um indicador de colinearidade entre as mesmas. Similar ao resultado observado para Lavras, com a remoção de variáveis não significativas, alguns modelos se tornaram idênticos aos de Varginha. É o caso dos modelos gerados a partir das sequências B1, B3 e B6, de sequências B2 e B7 e das sequências T1 e T5.

Em nove das sequências consideradas os coeficientes K_{y_0} foram estatisticamente diferentes de zero a nível de 10% de significância, comprovando a importância da produção do ano anterior como parâmetro de entrada dos modelos. Além disso, todos os coeficientes K_{y_0} parametrizados apresentaram valores negativos. Esses resultados confirmam as expectativas, uma vez que K_{y_0} negativo indica maior quebra de produtividade em caso de alta produção no ano anterior e está em concordância com os resultados encontrados por Carvalho (2003) e Picini (1998).

Quanto aos coeficientes de penalização relativos ao déficit hídrico, as variáveis significativas se concentraram nos períodos entre novembro e abril, semelhante ao observado para Lavras. Isso reforça a sensibilidade do modelo a esse período mais chuvoso. Para algumas sequências (B1, B3, B6 e T4), as variáveis referentes ao período de setembro a novembro (fase da florada) também foi significativa. Esse resultado reflete a importância em termos de disponibilidade hídrica desse período, correspondente à fase de florada, para o cafeeiro, porém os coeficientes parametrizados assumiram valores negativos. Isso pode ser resultado da correlação entre as variáveis, uma vez que esse período é considerado como uma fase de grande demanda hídrica pelo cafeeiro e coeficientes negativos penalizariam a ausência de déficit hídrico nesse período (PEREIRA; CAMARGO; CAMARGO, 2008).

Tabela 5 Coeficientes de regressão e respectivos parâmetros estatísticos dos modelos de regressão linear múltipla para o município de Varginha, MG

	B1		B2		B3		B4	
R2	0,892		0,859		0,892		0,849	
R2 AJ.	0,834		0,798		0,834		0,787	
ER.PADRÃO	0,183		0,209		0,183		0,216	
	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*
KY0	-	-	-0,61	0,00	-	-	-0,54	0,01
Ky1	-	-	-	-	-0,75	0,00	0,40	0,07
Ky2	-0,75	0,00	-	-	7,97	0,00	-	-
Ky3	7,97	0,00	-	-	-	-	-	-
Ky4	-	-	1,59	0,00	-7,04	0,00	0,44	0,01
KY5	-7,04	0,00	-0,95	0,03	-	-	-	-
	B5		B6		B7		T1	
R2	0,842		0,892		0,859		0,856	
R2 AJ.	0,780		0,834		0,798		0,795	
ER.PADRÃO	0,221		0,183		0,209		0,211	
	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*
KY0	-0,76	0,00	-	-	-0,61	0,00	-0,61	0,00
Ky1	-	-	-0,75	0,00	-	-	-	-
Ky2	-	-	7,97	0,00	-	-	-	-
Ky3	-4,37	0,12	-	-	1,59	0,00	1,47	0,00
Ky4	5,16	0,08	-7,04	0,00	-0,95	0,03	-0,84	0,03
	T2		T3		T4		T5	
R2	0,821		0,816		0,889		0,856	
R2 AJ.	0,767		0,762		0,823		0,795	
ER.PADRÃO	0,230		0,233		0,190		0,211	
	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*	Coef.	Valor p*
KY0	-0,62	0,00	-0,60	0,00	-0,35	0,07	-0,61	0,00
Ky1	-	-	-	-	-1,01	0,03	-	-
Ky2	-	-	0,69	0,00	4,08	0,00	1,47	0,00
Ky3	0,70	0,00	-	-	-2,73	0,00	-0,84	0,03

* para valor-p menor que 0,1 a variável é significativa a nível de 10% de probabilidade pelo teste t.

	Ky0	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
B1				-0,75		7,97					-7,04		
B2	-0,61								1,59		-0,95		
B3				-0,75		7,97					-7,04		
B4	-0,54	0,40						0,44					
B5	-0,76						-4,37		5,16				
B6				-0,75		7,97					-7,04		
B7	-0,61								1,59		-0,95		
T1	-0,61								1,47			-0,84	
T2	-0,62								0,70				
T3	-0,60					0,69							
T4	-0,35				-1,01		4,08				-2,73		
T5	-0,61								1,47			-0,84	

Quadro 3 Coeficientes de regressão do modelo de regressão linear múltipla para o município de Varginha, distribuídos de acordo com os período que representam

4.3.1 Avaliação e validação cruzada dos modelos

As glebas utilizadas nos testes dos modelos parametrizados para Varginha foram Maçaranduba e Mangueira, da Fazenda Córrego da Onça. A representação gráfica das produtividades relativas estimadas e observadas são apresentadas nas Figuras de 16 a 27. Nas mesmas figuras, é apresentado o gráfico de dispersão plotado a partir das produtividades relativas (observadas e estimadas) e os coeficientes de determinação (R^2) e o índice de concordância (d).

Em uma primeira observação dos gráficos, percebe-se que os modelos acompanharam as oscilações de produtividade características do cafeeiro, com exceção da última estimativa, que pode ter ocorrido justamente por se tratar de um resultado atípico, uma vez que pela sequência esperava-se uma produtividade menor que a do ano anterior. Esse resultado coincide com o relatado por Carvalho (2003), de que os modelos tem dificuldades em anos com produtividade atípica, ou condições adversas.

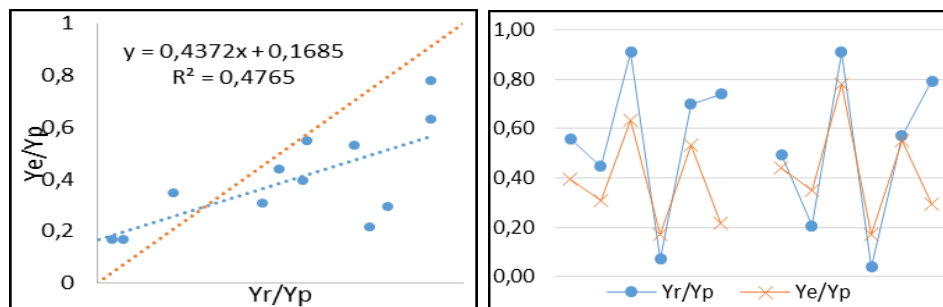


Figura 16 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B2 para as condições de Varginha, MG

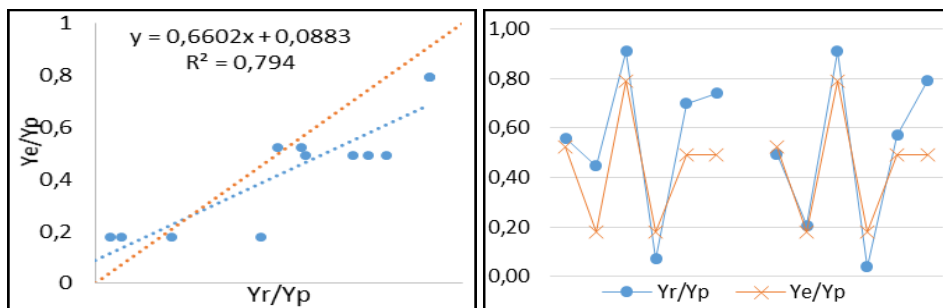


Figura 17 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B1 para as condições de Varginha, MG

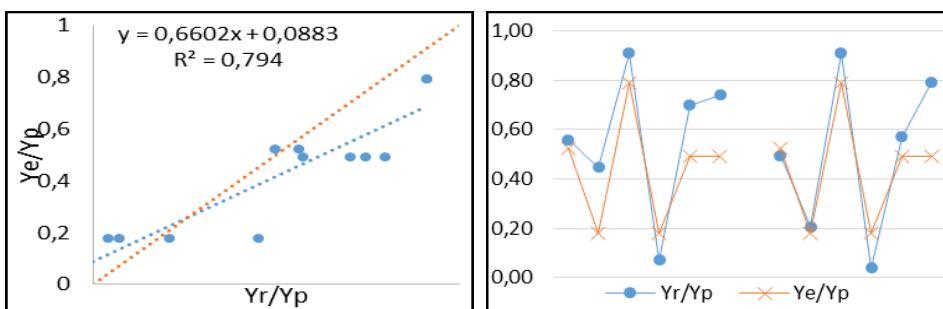


Figura 18 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B3 para as condições de Varginha, MG

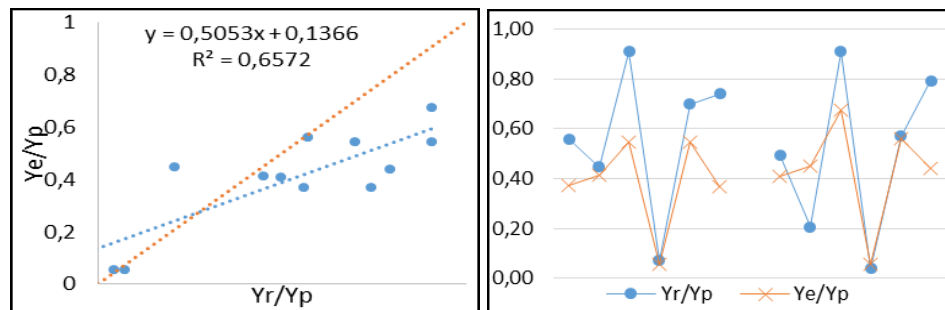


Figura 19 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B4 para as condições de Varginha, MG

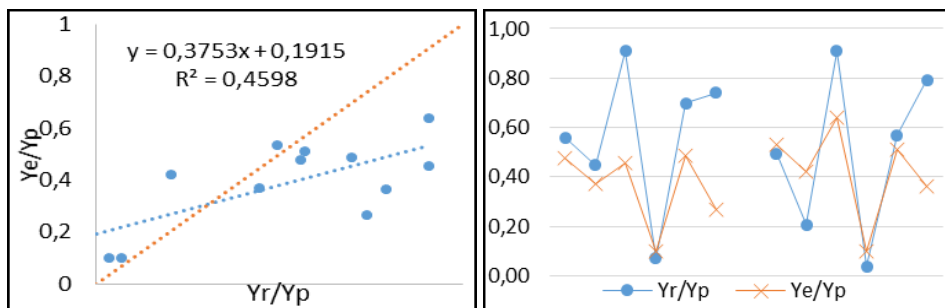


Figura 20 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B5 para as condições de Varginha, MG

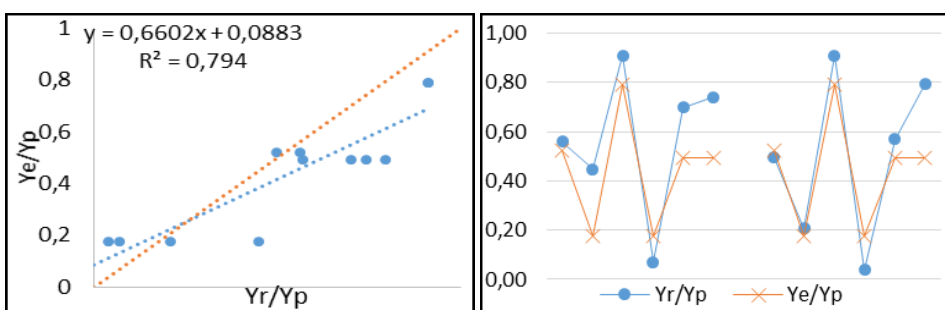


Figura 21 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B6 para as condições de Varginha, MG

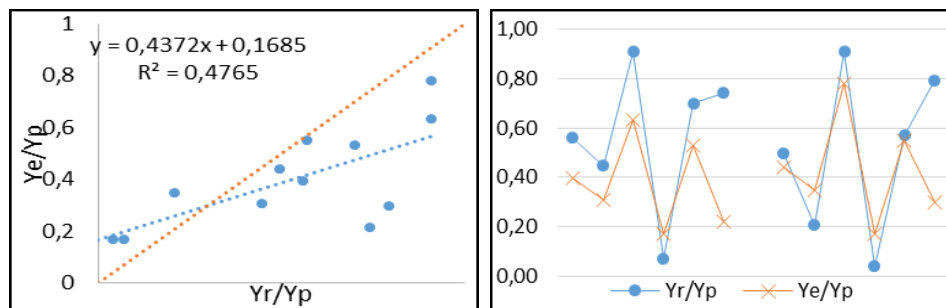


Figura 22 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência B7 para as condições de Varginha, MG

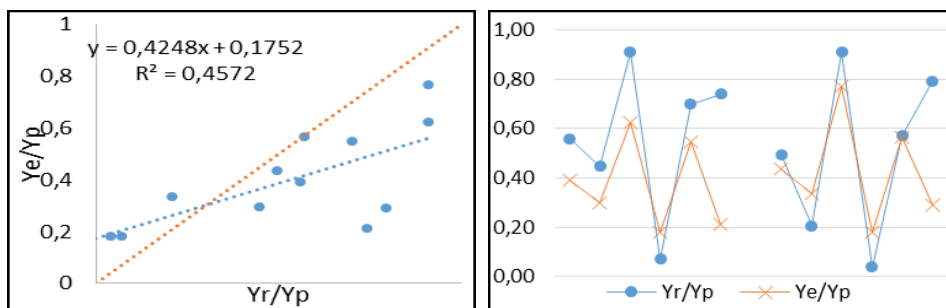


Figura 23 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T1 para as condições de Varginha, MG

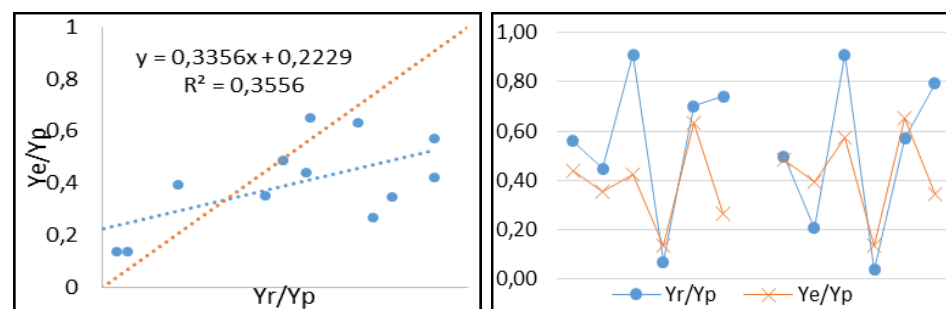


Figura 24 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T2 para as condições de Varginha, MG

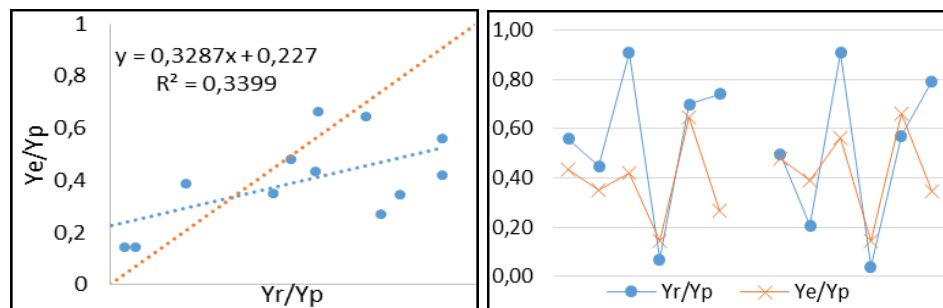


Figura 25 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T3 para as condições de Varginha, MG

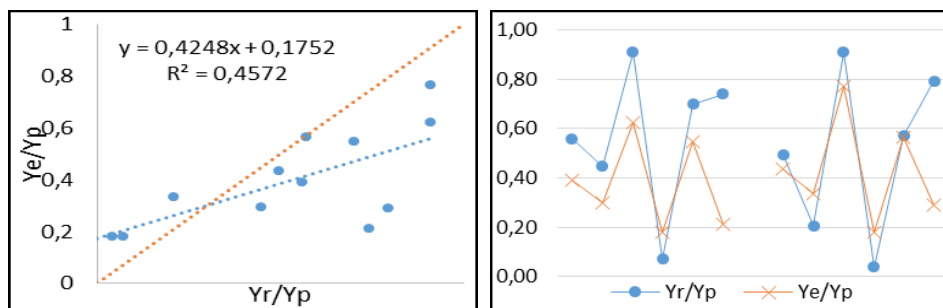


Figura 26 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T5 para as condições de Varginha, MG

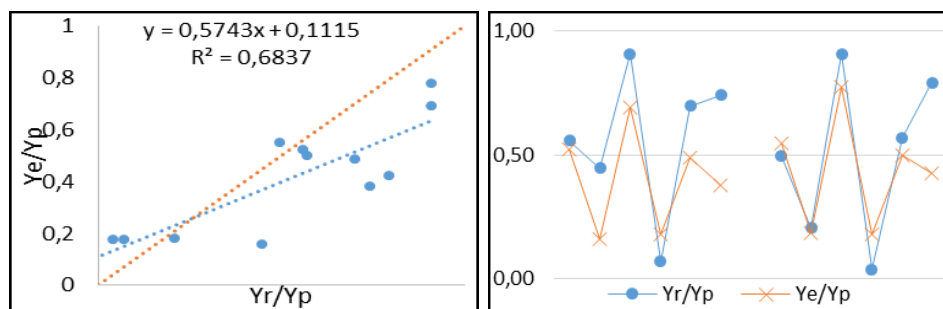


Figura 27 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando a sequência T4 para as condições de Varginha, MG

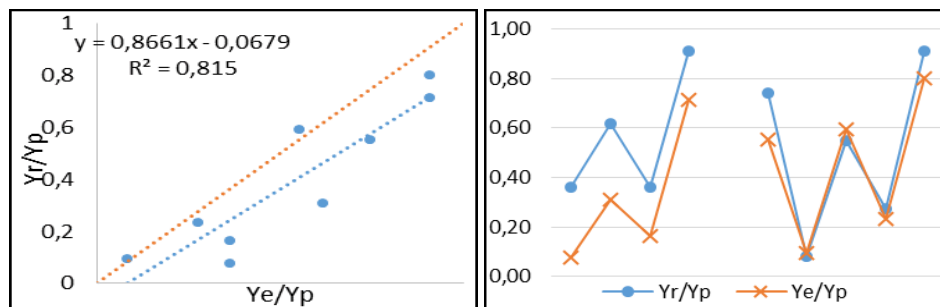


Figura 28 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando os bimestres set/out, nov/dez, jan/fev, para as condições de Lavras, MG

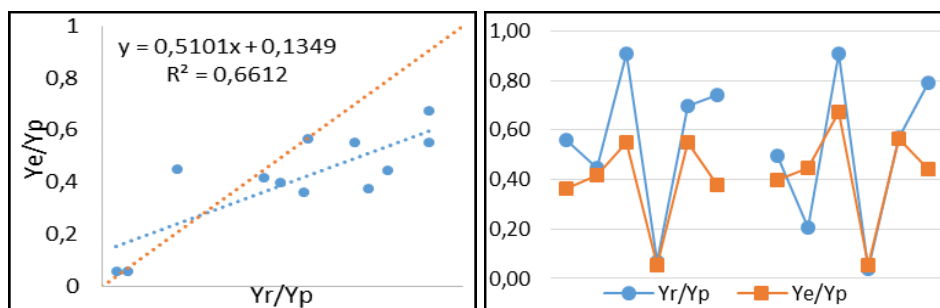


Figura 29 Produtividades relativas observadas e estimadas pelo modelo agrometeorológico considerando os bimestres set/out, nov/dez, jan/fev para as condições de Varginha, MG

Analisando os diagramas de dispersão, nota-se que os modelos parametrizados para Varginha tendem a subestimar as produtividades. De acordo com os coeficientes R^2 e d , dentre as sequências bimestrais o melhor desempenho foi apresentado por B1, B3 e B6 ($R^2 = 0,79$ e $d = 0,89$), e o pior por B2 e B7 ($R^2 = 0,48$ e $d = 0,75$). No caso dos trimestrais o melhor e o pior foram T4 ($R^2 = 0,68$ e $d = 0,84$) e T3 ($R^2 = 0,34$ e $d = 0,69$) respectivamente. Esse resultado está de acordo com o que foi observado para Lavras, onde as sequências B1 e B6 também tiveram o melhor desempenho estatístico.

Com base na classificação pelo índice “C” de Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 6), observa-se que as sequências bimestrais B1, B3 e B6 foram as únicas classificadas como “muito bom”, sendo as mais indicadas para Varginha. Esse resultado, das três sequências com desempenhos similares tanto para Lavras como para Varginha, pode ser consequência dos períodos considerados para essas sequências serem similares. A diferença entre as três está no fato de considerar ou não os bimestres de julho/agosto (no caso de B1) ou de maio/junho (no caso de B3), que segundo a literatura se tratam de meses em que o déficit hídrico não exerce grande influência sobre a produtividade do cafeeiro. Dentre as sequências trimestrais, apenas T4 apresentou resultado favorável, sendo classificada como “bom”.

Observando a Tabela 7, a exemplo de Lavras, os valores sofreram grande influência da produtividade muito baixa para as duas glebas testadas na safra 2010/2011, gerando altos valores de ERP. Porém, para a sequência B4 os valores de ERP no ano em questão foram inferiores às outras sequências. Apesar da estimativa mais precisa do ano de baixa produtividade, os resultados para o restante do conjunto de dados foram subestimados mais acentuadamente que as demais sequências, reduzindo o seu desempenho estatístico.

Tabela 6 Coeficientes de correlação (R), índices de concordância (d), índice confiança (C) e classificação do desempenho dos modelos agrometeorológicos testados para Varginha, MG

Seq.	Parâmetros			
	d	R	C	Desempenho
B1	0,89	0,89	0,79	Muito Bom
B2	0,75	0,69	0,52	Regular
B3	0,89	0,89	0,79	Muito Bom
B4	0,80	0,81	0,65	Mediano
B5	0,72	0,68	0,49	Ruim
B6	0,89	0,89	0,79	Muito Bom
B7	0,75	0,69	0,52	Regular
T1	0,75	0,68	0,50	Ruim
T2	0,69	0,60	0,41	Ruim
T3	0,69	0,58	0,40	Pessimo
T4	0,84	0,83	0,69	Bom
T5	0,75	0,68	0,50	Ruim

Tabela 7 Erros relativos percentuais entre as produtividades observadas e estimativas pelos modelos para o cafeeiro, para Varginha, MG

Ano Agrícola	Yr	Erro Relativo Percentual						
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
2007/2008	16,8	6,6	29,3	6,6	33,8	14,7	6,6	29,3
2008/2009	13,4	60,3	30,9	60,3	7,3	17,0	60,3	30,9
2009/2010	27,3	12,9	30,4	12,9	39,9	49,8	12,9	30,4
2010/2011	2,1	154,1	142,7	154,1	20,6	39,9	154,1	142,7
2011/2012	21,0	29,5	24,1	29,5	22,1	30,4	29,5	24,1
2012/2013	22,2	33,4	70,6	33,4	50,1	64,2	33,4	70,6
Média	15,3							
Ano Agrícola	Yr	Erro Relativo Percentual						
		T1	T2	T3	T4	T5		
2007/2008	16,8	29,9	21,4	22,2	6,5	29,9		
2008/2009	13,4	33,6	21,0	21,4	64,0	33,6		
2009/2010	27,3	31,4	53,5	54,0	23,9	31,4		
2010/2011	2,1	160,0	96,4	104,5	154,9	160,0		
2011/2012	21,0	21,7	9,6	8,0	30,1	21,7		
2012/2013	22,2	71,2	63,9	63,8	48,7	71,2		
2007/2008	13,2	11,9	2,2	3,4	10,7	11,9		
2008/2009	5,5	62,5	90,1	88,6	11,2	62,5		
2009/2010	24,3	15,3	37,2	38,2	14,5	15,3		
2010/2011	1,0	367,2	252,8	267,5	358,0	367,2		
2011/2012	15,2	0,7	14,2	16,1	12,4	0,7		
2012/2013	21,2	63,2	56,3	56,5	46,4	63,2		
Média	15,3							

4.3.2 Visão geral sobre os resultados

Considerando a classificação proposta por Camargo e Sentelhas (1997) empregada neste estudo, os modelos em geral não tiveram desempenho satisfatório, classificados em sua maioria abaixo de “mediano”. As exceções foram as sequências B1e B6 para Lavras (ótimo) e B1, B3 e B6 para Varginha (“muito bom”).

Em relação ao erro relativo percentual, os modelos apresentaram valores muito altos em alguns casos, principalmente nas baixas. Isso revela uma dificuldade já relatada por autores citados anteriormente, sendo possivelmente um reflexo de fatores adversos não considerados nos modelos aqui testados.

Os coeficientes K_{y_0} , relativos à produtividade do ano anterior, apresentaram significância estatística na maioria dos modelos em Varginha e em Lavras, confirmando a importância dessa variável para o desenvolvimento de modelos de previsão de produtividade de cafeeiro.

Em relação às sequências fenológicas consideradas, as sequências B1, B3 e B6 apresentaram os melhores resultados, porém a inclusão de bimestres de pouca demanda hídrica por parte do cafeeiro (julho/agosto em B1 e maio/junho em B3) parece ter gerado pouca influência sobre o modelo, uma vez que essas variáveis foram removidas após a parametrização, tanto para Lavras como para Varginha. Assim, a divisão do ano agrícola nos bimestres set/out, nov/dez, jan/fev e mar/abr (sequencia B6) foi a mais indicada na parametrização dos modelos agrometeorológicos.

Observando as representações gráficas, nota-se que os modelos acompanharam bem as oscilações de produtividade características do ciclo bienal do cafeeiro e que tenderam a superestimar as produtividades para Lavras e subestimá-las para Varginha.

A remoção de variáveis sabidamente importantes e os altos valores assumidos em alguns casos pelos coeficientes parametrizados sugerem que uma série histórica mais longa seria necessária, a fim de se obter maior variabilidade dos parâmetros hídricos durante o processo de parametrização.

Levando em consideração o objetivo de obter um modelo de previsão de safras que possa estimar a quebra de produtividade com certa antecedência ao período da colheita, foi parametrizado um modelo baseado na divisão do ano agrícola (citada anteriormente) que resultou nos melhores desempenhos. Sendo assim, a metodologia aplicada na parametrização e validação dos modelos foi aplicada novamente, considerando os bimestres até fevereiro durante as parametrizações, ou seja, K_{y_0} o coeficiente relativo a produtividade do ano anterior e K_{y_1} , K_{y_2} e K_{y_3} os coeficientes relativos ao déficit hídrico nos bimestres de set/out, nov/dez e jan/fev, respectivamente. Os resultados são exibidos nas Tabela 8 e 9 e nas Figuras 28 e 29. Os modelos de previsão perderam um pouco da qualidade, sendo classificados como “muito bom” e “mediano” para Lavras e Varginha respectivamente, e tenderam a subestimar as produtividades, porém os resultados ainda demonstram bom potencial para estudo como ferramenta de previsão de safra.

Em síntese, a parametrização de modelos agrometeorológicos de previsão, baseados na demanda hídrica, apresenta bom potencial para estudos mais aprofundados, porém, como já citado por Carvalho (2003), a modelagem por meio dessa metodologia deve-se aplicar melhor a dados experimentais, onde as condições de cultivo possam ser controladas, reduzindo a influência de outras fontes de variação, além de possibilitar um acompanhamento mais preciso da incidência de chuvas sobre a lavoura e a obtenção de séries históricas mais longas e confiáveis.

Tabela 8 Coeficientes de regressão e respectivos parâmetros estatísticos dos modelos de regressão linear múltipla para o município de Varginha e Lavras (MG), considerando os bimestres set/out, nov/dez, jan/fev

	Lavras		Varginha	
R2	0,96		0,85	
R2 AJ.	0,88		0,78	
ERRO PADRÃO	0,14		0,22	
	Coef.	Valor p**	Coef.	Valor p**
KY0*	-1,02	3,93E-06	-0,52	0,01
KY1*	0,79	4,20E-04	0,42	0,05
KY2*	-		-	-
KY3*	0,64	5,19E-06	0,41	0,02

Tabela 9 Coeficientes de correlação (R), índices de concordância (d), índice confiança (C) e classificação do desempenho dos modelos agrometeorológicos testados para Varginha e Lavras (MG), considerando os bimestres set/out, nov/dez e jan/fev

	Parâmetros			
	d	R	C	Desempenho
Lavras	0,89	0,90	0,79	Muito Bom
Varginha	0,80	0,81	0,65	Mediano

5 CONCLUSÃO

- a) Os modelos apresentaram bom potencial na previsão da produtividade do cafeeiro em nível de talhão nas condições do Sul de Minas Gerais;
- b) A produção do ano anterior deve ser considerada no desenvolvimento dos modelos;
- c) As sequências compreendendo os bimestres de setembro/outubro, novembro/dezembro, janeiro/fevereiro e março/abril foram as mais adequadas na parametrização do modelo.

REFERÊNCIAS

- ARÊDES, A. F. **Avaliação econômica da irrigação do cafeeiro em uma região tradicionalmente produtora**. 2006. 89 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.
- ASSAD, E. D. et al. Forecast system of soybean crop yield for Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 615-625, maio 2007.
- BARROS, I. D. **Produção das variedades Caturra e Mundo Novo de café em função do espaçamento, número de plantas por cova e condução das plantas**. 1997. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1997.
- BERKA, L. M. S.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 3, p. 433-440, 2003.
- BRASIL. **Acompanhamento da safra brasileira café: safra 2013: terceira estimativa, setembro/2013**. Brasília: CONAB, 2013. 24 p.
- CAMARGO, A. P. O clima e a cafeicultura no Brasil. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 126, p. 13-26, 1985.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.
- CAMARGO, A. P.; PEREIRA, A. R. **Agrometeorology of the coffee crop**. Geneva: World Meteorological Organization, 1994. 92 p. (CAGM Report, 58)
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, M. B. P. et al. Modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade para o cultivar de laranja Valência. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p. 171-178, 1999.

CARVALHO, L. G. **Modelos prognósticos de produtividade da cultura do café no Estado de Minas Gerais**. 2003. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. Yield response to water. **Irrigation and Drainage Paper**, New York, v. 33, p. 257, 1979.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.; BOOTE, K. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO: a review. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 35, n. 6, p. 2043-2056, 1992.

JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T. T. (Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York: Academic, 1968. v. 2, p. 1-22.

KANEMASU, E. Yield and water-use relationships: some problems of relating grain yield to transpiration. In: TAYLOR, H. M.; JORDAN, W. R.; SINCLAIR, T. R. (Ed.). **Limitations to efficient water use in crop production**. Madison: American Society of Agronomy, 1983. p. 413-417.

KOBAYASHI, E. S. **Consumo de água e produtividade de cafeeiros arábica na região de Mococa, SP**. 2007. 77 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais) - Instituto Agronômico, Campinas, 2007.

MARTIN, T. N. et al. Modified crop model estimation of depleted and potential soybean yield. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 34, n. 4, p. 369-378, 2012.

MATIELLO, J. B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. 320 p.

MEIRELES, E. J. L. et al. **Fenologia do cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico-ano agrícola 2002-2003**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica; EMBRAPA Café, 2007. 128 p.

MKHABELA, M. S. et al. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 151, n. 3, p. 385-393, Mar. 2011.

OLIVEIRA, L. A. M. **Desenvolvimento vegetativo e reprodutivo do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) irrigado em diferentes épocas do ano**. 2003. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

OLIVEIRA, R. A. et al. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando o método ZAE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 549-557, 2012.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PEREIRA, A. R.; CAMARGO, Â. P. D.; CAMARGO, M. B. P. D. **Agrometeorologia de cafezais no Brasil**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. 127 p.

PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo (transpi) razão**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEZZOPANE, J. R. M. **Avaliações microclimáticas, fenológicas e agrônômicas em café arábica cultivado a pleno sol e consorciado com banana 'Prata Anã'**. 2004. 136 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2004.

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.** 1998. 132 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1998.

PICINI, A. G. et al. Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p. 157-170, 1999.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 126, p. 26-40, 1986.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul.** 2004. 212 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

ROSA, V. G. C. D. **Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais.** 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

ROSA, V. G. C. D. et al. Coffee crop yield estimate using an agrometeorological-spectral model. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 12, p. 1478-1488, dez. 2010.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological spectral models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 33, n. 3, p. 183-192, Sept. 1990.

SANTOS, M. A. D. **Parametrização de coeficientes de sensibilidade e teste de modelos agrometeorológicos de estimativa de quebra de produtividade do cafeeiro (*Coffea arabica* L.).** 2005. 146 f. (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2005.

SANTOS, M. A. D.; CAMARGO, M. B. P. D. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 1, p. 173-183, 2006.

SEDIYAMA, G. C. et al. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 501-509, 2001.

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: US Department of Interior, 1976. 80 p.

SUGAWARA, L. M. **Avaliação de modelo agrometeorológico e imagens NOAA/AVHRR no acompanhamento e estimativa de produtividade da soja no Estado do Paraná**. 2002. 181 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

VOSSSEN, P. Comparative statistical validation of two ten-day water-use models and of three yield-reduction hypotheses for yield assessment in Botswana. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 51, n. 2, p. 177-195, 1990.

WEILL, M. D. A. M. **Avaliação de fatores edafoclimáticos e do manejo na produção de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) na região de Marília e Garça, SP**. 1990. 182 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1990.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

APÊNDICES

APENDICE A – Regressões lineares simples para Lavras, MG

	Jul. - Ago	Set. - Out.	Nov. - Dez.	Jan. - Fev.	Mar. - Abr.	Mai - Jun.
R2	0,73	0,83	0,86	0,86	0,88	0,83
ER. Padj	0,34	0,27	0,24	0,24	0,22	0,27
Ky	1,16	0,79	0,59	0,62	0,65	0,81
valor-p	2,3E-05	9,5E-07	2,3E-07	2,2E-07	6,7E-08	8,6E-07
	Ago. - Set.	Out. - Nov.	Dez. - Jan.	Fev. - Mar.	Abr. - Maio	
R2	0,78	0,84	0,86	0,87	0,88	
ER. Padj	0,31	0,26	0,24	0,24	0,23	
Ky	1,16	0,61	0,59	0,64	0,75	
valor-p	5,8E-06	6,7E-07	2,2E-07	1,7E-07	1,0E-07	
	Jul. - Set.	Out. - Dez.	Jan. - Mar.	Abr. - Jun.		
R2	0,79	0,85	0,87	0,86		
ER. Padj	0,30	0,26	0,24	0,24		
Ky	1,14	0,61	0,62	0,77		
valor-p	3,6E-06	4,6E-07	1,7E-07	2,0E-07		
	Ago. - Out.	Nov. - Jan.	Fev. - Abr.			
R2	0,83	0,86	0,88			
ER. Padj	0,27	0,24	0,23			
Ky	0,95	0,59	0,65			
valor-p	9,7E-07	2,1E-07	1,0E-07			
	Set. - Nov.	Dez. - Fev.	Mar. - Maio			
R2	0,85	0,86	0,88			
ER. Padj	0,25	0,24	0,23			
Ky	0,72	0,61	0,71			
valor-p	3,3E-07	2,3E-07	9,1E-08			

APENDICE B – Regressões lineares simples para Varginha, MG

	Ya/Yp					
R2	0,30					
ER. Padrão	0,45					
Ky	0,59					
valor-p	4,72E-03					
	Jul. - Ago	Set. - Out.	Nov. - Dez.	Jan. - Fev.	Mar. - Abr.	Mai - Jun.
R2	0,77	0,62	0,72	0,72	0,71	0,66
ER. Padrão	0,25	0,33	0,28	0,28	0,29	0,31
Ky	0,74	0,50	0,44	0,45	0,44	0,47
valor-p	6,84E-09	2,82E-06	7,19E-08	7,18E-08	1,47E-07	7,89E-07
	Ago. - Set.	Out. - Nov.	Dez. - Jan.	Fev. - Mar.	Abr. - Maio	
R2	0,58	0,71	0,72	0,72	0,68	
ER. Padrão	0,34	0,29	0,28	0,28	0,30	
Ky	0,62	0,45	0,44	0,45	0,46	
valor-p	9,7E-06	1,2E-07	7,2E-08	7,2E-08	4,6E-07	
	Jul. - Set.	Out. - Dez.	Jan. - Mar.	Abr. - Jun.		
R2	0,68	0,72	0,72	0,67		
ER. Padrão	0,30	0,28	0,28	0,30		
Ky	0,67	0,45	0,45	0,46		
valor-p	3,9E-07	9,7E-08	7,2E-08	5,5E-07		
	Ago. - Out.	Nov. - Jan.	Fev. - Abr.			
R2	0,67	0,72	0,71			
ER. Padrão	0,31	0,28	0,29			
Ky	0,60	0,44	0,45			
valor-p	6,4E-07	7,2E-08	1,2E-07			
	Set. - Nov.	Dez. - Fev.	Mar. - Maio			
R2	0,67	0,72	0,69			
ER. Padrão	0,30	0,28	0,29			
Ky	0,49	0,45	0,45			
valor-p	5,5E-07	7,2E-08	2,3E-07			