

AGNALDO ALVES DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM MODELO MECANÍSTICO
PARA A ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO
CAFEIRO.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de “ Magister Scientiae”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2002

Ao Onipotente Criador e ao Mestre maior Jesus Cristo.

Aos meus amados pais Antonio e Maria.

A meu irmão Ademir (“ in memoriam”)

A meus irmãos Almerindo, Almira, Ana, Aparecida, Adelina, Adenis, Anita, Benta e Maria de Lourdes.

A minha amada Simone Bazzani.

AGRADECIMENTO

A Deus, por simplesmente tudo.

Aos meus Protetores, pela dedicação, pela perseverança e pelo amor com têm desempenhado suas funções para comigo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola pelas oportunidades oferecidas durante o curso, e especialmente a Coordenação do curso de Meteorologia Agrícola, pela compreensão diante de determinados fatos e pelo empenho em auxiliar a conclusão do curso.

Ao meu orientador Luiz Cláudio Costa pela dedicação, inteligência, e competência com que conduziu o trabalho de orientação e pelo apoio pessoal e profissional que certamente contribuíram para que o curso fosse finalizado.

Aos conselheiros Professores Gilberto C. Sedyama e Aristides Ribeiro pelas valiosas sugestões que só contribuíram para o valor intelectual desse trabalho.

A todos os Professores do Departamento de Engenharia Agrícola e da Meteorologia.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial a Fernanda, Marcos e Edna, por terem auxiliado diretamente para que este trabalho se concretizasse.

Aos meus colegas de curso José Luiz, Bergson, Olívio, Silvia, Whashington, Meire e todos os demais pelo companheirismo e amizade.

Aos eternos mestres Prof. Augusto e Prof. Vilmar.

Aos meus amigos Eduardo Prado, Ginaldo Rocha Guimarães, Emerson Ventura, Sebastião Henrique, Daniela Romaninni, Michel Magalhães, e demais pelas alegrias e pelos êxitos e infortúnios que passamos nessa vida.

Aos senhores João Bazzani e Carmen Spitte Bazzani, a Carmem Bazzani Leneder, Roberto e Márcia Bazzani pelo apoio e pelo carisma a mim dispensados nessa vida.

A meus sobrinhos e sobrinhas, em especial Fátima e Elaine, tios tias, e todos os meus familiares que direta ou indiretamente contribuíram para o êxito desse trabalho.

A minha futura esposa Simone Bazzani, pelo apoio nas horas difíceis, pelo estímulo e pelo amor, carinho e atenção dispensados às questões que envolveram meus interesses.

Aos meus pais Antonio e Maria pela força, apoio, estímulo e altruísmo a mim dedicados que possibilitou atingir esta meta.

CONTEUDO

LISTA DE SIMBOLOS	vii
RESUMO	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Modelos - Classificação	4
2.2. Modelos aplicados a cultura do café	6
2.3. Interação entre temperatura e a cultura do café	7
2.4. Ação da radiação solar e respostas da cultura do café.....	8
2.5. Interação entre déficit hídrico e a cultura do café	9
2.6. Considerações finais.....	10
3. MATERIAIS E METODOS.....	11
3.1. Considerações sobre a cultura e o local	11
3.2. Definição do modelo	12
3.2.1. Estimativa da radiação solar.....	13
3.2.2. Interceptação da radiação	14
3.2.3. Estimativa da fotossíntese.....	14
3.2.4. Respiração total	15
3.2.5. Índice de área foliar	16
3.2.6. Estádios fenológicos do cafeeiro	17
3.2.7. Estimativas do déficit hídrico	18

3.2.8. Penalização da matéria seca total.....	19
3.2.9. Parametrização	20
4. RESULTADOS, DISCUSSÕES E ANÁLISE DOS ELEMENTOS CLIMÁTICOS ..	22
4.1. Caracterização dos elementos climáticos	22
4.1.1. Temperatura do ar	22
4.1.2. Precipitação	23
4.1.3. Radiação solar.....	24
4.2. Resultados da parametrização.....	25
4.3. Análise do crescimento do cafeeiro	27
4.3.1. Índice de área foliar - IAF	27
4.3.2. Matéria seca total	28
4.3.3. Taxas fotossintética e respiratória do cafeeiro adulto.....	28
4.3.3. Taxas fotossintética e respiratória do cafeeiro adulto.....	29
4.3.4. Comparação da produtividade estimada com a observada	32
5. CONCLUSÕES.....	34
6. RESUMO E CONCLUSÕES.....	35
7. RECOMENDAÇÕES	36
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
10. APÊNCIDE	43

LISTA DE SIMBOLOS

Dados de Entrada		
PAR	=	Radiação fotossinteticamente ativa interceptada, $W\ m^{-2}$;
P	=	Precipitação, mm
Tmed	=	Temperatura média, Celsius;
Insol	=	Brilho solar diário, h
Parâmetros das Equações		
α	=	Eficiência quântica da fotossíntese, $g\ J^{-1}$
κ	=	Coeficiente de extinção da radiação, adimensional
Fmax	=	Taxa de fotossíntese no ponto de saturação da luz, $g\ m^{-2}\ s^{-1}$
SLA	=	Área foliar específica, $m^2\ g^{-1}$
z	=	Profundidade de exploração radicular, cm
Dg	=	Densidade aparente do solo, $g\ cm^{-3}$
Tb	=	Temperatura base inferior, °C
PmP	=	Ponto de murcha permanente, %
Q ₁₀	=	Fator de variação da respiração, adimensional
Tr	=	Temperatura crítica inferior para o cafeeiro, °C

CC	=	Capacidade de campo do solo, %
Variáveis		
fa	=	Declinação solar, °
D	=	Duração do dia, h
N	=	Brilho solar máximo, h
Rg	=	Radiação solar global, $J m^{-2} s^{-1}$
Ro	=	Radiação no topo atmosfera, $J m^{-2} s^{-1}$
PAR	=	Radiação fotossinteticamente ativa, $J m^{-2} s^{-1}$
GD	=	Necessidades térmicas acumulada, °C
ED	=	Estádio de desenvolvimento, (0-2)
F_brut_day	=	Fotossíntese bruta diária, $g(CO_2) m^{-2}(solo) d^{-1}$
Resp_cresc	=	Respiração de crescimento, $g(CO_2) m^{-2}(solo) d^{-1}$
Resp_mant	=	Respiração manutenção, $g(CO_2) m^{-2}(solo) d^{-1}$
Resp_total	=	Respiração total, $g(CO_2) m^{-2}(solo) d^{-1}$
c	=	Parâmetro de McCree, adimensional
b	=	Parâmetro de McCree, adimensional
F_liq	=	Fotossíntese líquida diária, $g(CO_2) m^{-2}(solo) d^{-1}$
Rs	=	Radiação Incidente global, $mm d^{-1}$
Ra	=	Radiação no topo atmosfera (equivalente a lamina evaporada), $mm d^{-1}$
ETo	=	Evapotranspiração de referência, $mm d^{-1}$
ALT	=	Alteração diária da lâmina de água no solo, mm
Neg_Acu	=	Deficiência hídrica diária acumulada, mm
ARM	=	Lâmina de água armazenada no solo, mm
EP	=	Evapotranspiração potencial, $mm d^{-1}$
ER	=	Evapotranspiração real, mm
Dia	=	Número dias após última precipitação, d
Kyo	=	Coeficiente da produtividade do ano anterior, adimensional
Kyi	=	Coeficiente de sensibilidade da cultura, adimensional
Yp	=	Produtividade potencial, $sc ha^{-1}$
Yaa	=	Produtividade média dos anos anteriores, $sc ha^{-1}$

Penalty	=	Penalização devido ao déficit hídrico, adimensional
MS_folha_i	=	Partição de matéria seca para a folha no ano i, g m^{-2}
Per_Fruto_i	=	Partição de matéria seca para o fruto no ano i, g m^{-2}
Variáveis de Estado		
Yest	=	Produtividade estimada pelo modelo, sc ha^{-1}
Yf	=	Produtividade econômica, sc ha^{-1}
IAF	=	Índice de área foliar, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$
MS_total	=	Matéria seca total, g m^{-2} .

RESUMO

SANTOS, Agnaldo Alves dos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2002.

Desenvolvimento e avaliação de um modelo mecanístico para estimativa da produtividade da cultura do cafeeiro. Orientador: Luiz Cláudio Costa.

Conselheiros: Gilberto C. Sedyama e Aristides Ribeiro.

Desenvolveu-se um modelo mecanístico dinâmico de previsão de produtividade da cultura do cafeeiro baseando-se na integração de modelos matemáticos dos principais processos físicos e fisiológicos envolvidos no crescimento, desenvolvimento e produtividade do cafeeiro. O modelo considerou como dados de entrada as variáveis climáticas temperatura média, precipitação pluvial e radiação solar, e como variáveis de estado, ou dados de saída, as seguintes características da cultura: Índice de área foliar (IAF), taxas fotossintéticas bruta e líquida respectivamente (Fbrut e Fliq), bem como matéria seca final (MSfinal), produtividade econômica (Y_f), e produtividade estimada (Y_{est}). O modelo foi testado comparando-se os dados de produtividade de campo aos resultados de produtividade simulada. A média dos desvios percentuais entre os valores de produtividade simulada e produtividade observada foi de $-5,85$ e o desvio padrão foi de $1,80$. O teste objetivo do modelo com dados de produtividade colhidas em campo mostrou que o modelo foi capaz de prever com eficiência a produtividade da cultura, o que indica potencial do mesmo em ser útil na previsão da produtividade da cultura.

ABSTRACT

SANTOS, Agnaldo Alves dos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, July 2002.

Development and evaluation of a mechanistic model for the productivity estimation of coffee. Advisor: Luiz Cláudio Costa. Committee Members: Gilberto C. Sedyama and Aristides Ribeiro.

A mechanistic dynamic model of productivity estimation for the coffee was developed having as base the integration of mathematical models of the main physical and physiologic processes involved in the growth, development and productivity of the coffee. The model considered as input data the variables climatic medium temperature, pluvial precipitation and solar radiation, and as state variables, or output data, the following characteristics of the culture: Leaf Area Index (IAF), its rates rough and liquid photosynthetic (F_{brut} and F_{liq}), as well as matter evaporates final (MS_{final}), economic productivity (Y_f) and estimated productivity (Y_{est}). The model was tested comparing the data of field productivity to the results of simulate productivity. The mean of the percentile deviations between the values of simulate and observed productivity was of -5,85 and the standard deviation was of 1,80. The comparison of the model results against field productivity data showed that the model is capable to forecast with efficiency the productivity of the culture, what indicates potential of the same to be used in the forecast of the productivity of the culture.

1. INTRODUÇÃO

A geografia da cafeicultura brasileira apresentou grandes modificações durante os últimos séculos. No século XVII o café era cultivado em praticamente todo território nacional, enquanto que nos dias atuais o cultivo se concentra basicamente em Minas Gerais. No entanto, apesar de tais modificações, a cafeicultura continua sendo de expressiva importância econômica para o País, sendo que o total produzido no Brasil representa 30% da produção mundial, e suas exportações geraram US\$ 1,67 bilhões em 2000 e US\$ 1,45 bilhões em 2001, o que representa aproximadamente 2,7% do valor global das exportações brasileiras (Anuário Estatístico do IBGE, 2001). Assim, a cafeicultura é um dos setores da economia que contribui para a formação do PIB nacional, bem como para a formação ou incremento da renda do produtor. Apesar de sua importância econômica, a produtividade da cultura do café é afetada, por diferentes fatores, o que provoca sérias instabilidades no setor.

Fenômenos como geadas, estresse hídrico, pragas e doenças, nutrição e aspectos econômicos afetam sensivelmente a produtividade da cultura do café de ano para ano, causando bruscas oscilações de seus preços que comprometem a regularidade do abastecimento interno e das exportações.

Devido a sua grande variabilidade espacial e temporal, as condições climáticas, que apresentam estreita e complexa relação com a cultura, têm grande responsabilidade em tais flutuações da produtividade.

Assim, nos últimos anos diversos estudos vêm sendo desenvolvidos no sentido de buscar um melhor entendimento da complexa relação clima – cultura, e dos efeitos das variações climáticas sobre a produtividade cafeeira. Os primeiros modelos envolvendo os elementos climáticos e a produtividade cafeeira ocorreram a partir de 1960, quando TOSELLO e ARRUDA (1962) correlacionaram a produtividade da cultura com a ocorrência de déficit hídrico nos períodos críticos da cultura.

A partir de então, diversos modelos foram desenvolvidos objetivando melhor entendimento do impacto das variações de diversos elementos climáticos na produtividade do café.

A grande maioria dos modelos desenvolvidos tem buscado explicar os efeitos do clima sobre a produtividade da cultura do café, enfatizando fatores individuais, como por exemplo déficit hídrico, não contemplando a interação entre os fatores. Além disso, por serem de caráter empírico tais modelos apresentam restrições na extrapolação espacial e temporal dos resultados, ou seja, sua aplicabilidade é de alcance local.

O desenvolvimento de modelos objetivos que permitam a quantificação de perdas na produtividade da cultura do café provocadas por diferentes fatores ambientais, com base nos novos conceitos de modelagem e de sistemas de suporte a decisão agrícola constitui-se um avanço para atingir maior sustentabilidade da cultura.

Assim, nos dias atuais os modelos com base mecanística têm se apresentado como uma alternativa aos modelos de natureza empírica, na quantificação dos efeitos do clima na produtividade das culturas. Apesar de tais modelos apresentarem restrições originárias da carência de informações detalhadas sobre os diversos processos físicos e fisiológicos do sistema solo-planta-atmosfera, o potencial de suas aplicações na agricultura tem sido demonstrado em diversos trabalhos, BOOTE et al.(1996), FERREIRA (1997), COSTA E BARROS (2001).

Os modelos mecanísticos apresentam como uma de suas principais características a possibilidade da análise das interrelações entre os elementos envolvidos no crescimento e desenvolvimento da cultura, bem como dos efeitos integrados de tais elementos na produtividade.

Com base no exposto, o principal objetivo do presente trabalho foi desenvolver um modelo mecanístico de estimativa da produtividade considerando em seus diferentes

componentes os principais fatores físicos e fisiológicos que afetam crescimento e desenvolvimento da cultura do café.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Modelos - Classificação

A utilização de modelos objetivando quantificar os efeitos das variáveis ambientais no crescimento e desenvolvimento das culturas vem ocorrendo a cerca de 250 anos, tendo seu início quando Réamur em 1735 , estabeleceu uma relação quantitativa entre a temperatura e a taxa de desenvolvimento das culturas.

Uma grande contribuição científica para o entendimento quantitativo das relações entre o crescimento da planta e as variáveis ambientais foi iniciada por BLACKMAN (1919), que introduziu o conceito de taxa de crescimento relativo (TCR) e taxa de assimilação líquida (TAL). A partir daí, várias contribuições científicas relevantes foram dadas ao tema.

O trabalho do Prof. C.T. de Wit, da Universidade de Wageningen, em 1958, intitulado “Transpiration and Crop Yield” mostrava a importância da aplicação de modelos na agricultura. A literatura sobre o tema foi enriquecida em 1968 com outro trabalho do Prof. de Wit, “Photosynthesis of leaf canopies”. Após tal publicação, observou-se um crescente interesse pelo desenvolvimento e aplicação de modelos na agricultura.

O pleno entendimento da modelagem e seu uso na agricultura exige a definição de três termos: sistemas, modelos e simulação. Sistema é uma parte limitada da realidade que contém vários elementos inter-relacionados; modelo é uma

representação simplificada do sistema, e simulação é a arte de construir modelos matemáticos e de estudar suas propriedades em relação ao sistema (de WIT, 1982). A grande expansão no desenvolvimento e uso dos modelos observada nos últimos anos tornou necessária a organização e classificação dos mesmos. Atualmente a literatura científica mundial classifica os modelos em três tipos principais: modelos empíricos, modelos semi-empíricos e modelos mecanísticos.

Os modelos empíricos baseiam-se simplesmente na interação quantitativa entre a taxa de crescimento da cultura e um ou mais fatores que influenciam essa taxa, ou seja, descrevem as relações estatísticas apresentando a taxa de crescimento ou matéria seca como variável dependente e fatores como por exemplo o nitrogênio, a temperatura, a água evapotranspirada como variáveis independentes.

Os modelos empíricos não têm como objetivo o entendimento das interações entre a planta e o ambiente, mas simplesmente a relação quantitativa entre a produtividade e os fatores considerados. Apesar de suas limitações, os modelos empíricos vêm sendo utilizados com sucesso na determinação do crescimento das culturas (HUNT, 1981).

Os modelos empíricos apresentam a vantagem de serem simples no que tange aos dados de entrada e robustos quanto a sua resposta. Suas maiores restrições são o fato de não poderem ser extrapolados no tempo e no espaço, bem como a falta de significado físico e fisiológico de seus parâmetros (COSTA, 1988).

MONTEITH (1965) iniciou o estudo da relação entre a radiação interceptada e matéria seca produzida pela cultura, e alguns anos depois introduziu o conceito de uso eficiente da radiação (UER) que é a razão entre matéria seca produzida e a radiação interceptada, pelas culturas MONTEITH (1977). A introdução de tal conceito pode ser considerada como o início dos modelos semi-empíricos.

DE WIT (1970) introduziu o conceito dos modelos mecanístico. Tais modelos, baseiam-se no mecanismo do sistema a ser modelado, além de buscarem uma melhor compreensão dos processos que influenciam a taxa de crescimento das culturas. Tais modelos têm contribuído para o conhecimento do efeito do ambiente no crescimento e desenvolvimento das culturas.

Recentemente se observa uma tendência à simplificação dos modelos mecanísticos. No entanto, para que a simplificação possa ser feita em bases científicas, é

necessário que se busque amplo entendimento dos efeitos das variáveis ambientais no crescimento das culturas.

2.2. Modelos aplicados a cultura do café

O estudo da interação dos fatores ambientais e da cultura do café vem sendo desenvolvido a vários anos. O IPEA (1972) observou que baixos níveis de deficiência hídrica, índices de precipitação próximo ao normal, baixo número médio de meses secos na florada, elevada precipitação na granação e precipitação normal no início do período vegetativo estiveram associados ao máximo rendimento na safra de 1966/67 para o Estado de São Paulo.

As menores safras, sem presença de geadas, decorreram devido a presença de vários elementos adversos, tais como; máxima deficiência hídrica, baixos níveis de precipitação, máximo número de meses secos, altas temperaturas na época da florada, alta deficiência hídrica e mínima precipitação na fase de preparação e inicial.

O IPEA (1972) verificou ainda, durante todo o intervalo 1961/69, uma relação inversa entre a temperatura média na época do florescimento e o rendimento da cultura. O mesmo autor afirma que para o estado do Paraná o mínimo rendimento da safra 1963/64 é explicado não apenas pela geada severa de agosto de 1963, mas também pela máxima deficiência hídrica e a máxima temperatura na época do florescimento. O autor chegou ainda a conclusão que, de uma forma geral, as quedas no rendimento estão associadas a presença de geadas fortes.

TOSELLO e ARRUDA (1962) obtiveram um modelo relacionando o rendimento da cultura do café à precipitação e a deficiência hídrica. As utilizações de valores de deficiências hídricas forneceram resultados melhores que os de precipitação no período setembro a julho e piores que os do período abril-setembro.

Camargo et al. (1984), citados por PICINI (1998) utilizaram modelos de regressão linear para estudar o efeito da pluviosidade na produtividade de cafeeiros em duas localidades do Estado de São Paulo. Entre as combinações trimestrais, o período que apresentou boas correlações com a produtividade foi o de julho-agosto-

setembro, correspondente às fases de dormência das gemas e início do florescimento. Os autores concluem que os efeitos combinados de produtividade do ano anterior e parâmetros pluviométricos contribuíram significativamente para a variação observada na produtividade final obtida nos cafezais, e ressaltam a importância da inclusão da produção do ano anterior sobre a estimativa da produtividade do cafeeiro.

Liu & Liu (1988), citado por PICINI (1999) desenvolveram três modelos de previsão de safra do café para o Estado de Minas Gerais: modelo simples (em nível estadual), modelo bienal (com anos separados em pares e ímpares para caracterização da oscilação da produtividade) e modelo em nível microrregional. O modelo simples apresentou melhor resultado de previsão e o modelo bienal melhor desempenho estatístico.

PICINI et al. (1999) testaram um modelo parametrizado para penalização da produtividade do café com base na produtividade do ano anterior e do balanço hídrico, obtendo boas estimativas, com coeficiente de determinação de 0,93.

ARRUDA et. al.(2000) desenvolveram um modelo demonstrando que a consideração da produtividade do ano anterior explicou 69% da variação da produtividade da cultura do café. Os autores encontraram correlação positiva da produtividade com as variáveis precipitação dos meses de agosto a outubro e radiação solar em novembro. O modelo indicou correlação negativa da produtividade com a temperatura máxima em junho e com a temperatura mínima em novembro.

2.3. Interação entre temperatura e a cultura do café

A temperatura influencia o desenvolvimento da cultura do café em todas as fases, desde a germinação, crescimento, floração e produção de grãos. Além de sua influência no desenvolvimento, a temperatura afeta também os processo de respiração, fotossíntese e absorção de água e nutrientes (LUCHESE, 1987). Dessa maneira a temperatura é um fator determinante da produtividade final da cultura do café. NUNES et al. (1969) relatam que existe uma relação direta entre o decréscimo na taxa de fotossíntese em *Coffea Canephora* e as altas temperaturas.

KUMAR e TIESZAN (1980) encontraram taxa ótima de produção de biomassa do cafeeiro a 24 °C, sendo verificado um decréscimo para temperaturas abaixo de 18°C e acima de 32 °C. FRANCO (1958) verificou uma relação linear direta entre crescimento da planta do cafeeiro e temperatura das raízes, observando-se decréscimo no crescimento para temperaturas superiores a 23°C.

RENA e MAESTRI (1987), mostraram que a temperatura ótima para assimilação de CO₂ no cafeeiro, o que se traduz em maior produtividade, se encontra na faixa de 20 a 30°C.

A respiração do cafeeiro também sofre efeito da temperatura, sendo que apresenta elevada taxa respiratória a maiores temperaturas. Não existem estudos detalhados sobre a variação sazonal da respiração do cafeeiro. Porém, sabe-se que a mesma é reduzida nas fases de “descanso” da cultura, que coincidem com o período pós colheita, e elevada nas fases de produção de frutos. As taxas respiratórias foliar do cafeeiro podem variar de 0,2 a 0,7 mg (CO₂) dm⁻² h⁻¹, indicando que a respiração foliar pode consumir entre 1/17 a 1/6 da fotossíntese bruta.

2.4. Ação da radiação solar e respostas da cultura do café

A disponibilidade de radiação solar influi diretamente nos processos de crescimento e desenvolvimento das culturas (ROBLEDO, 1979). O nível da taxa fotossintética da cultura depende, entre outros aspectos, do ângulo de incidência da radiação, da transmissividade atmosférica, além da interação da radiação com a cultura, nos aspectos morfológicos e fisiológicos.

ARRILAGA e GOMEZ (1942) verificaram que, com o acréscimo da radiação solar o crescimento e a produtividade do café sofrem redução. Estudos desenvolvidos pelos autores mostraram que produtividade e crescimento são definitivamente maiores a 1/2 e 1/3 do que a 2/3 do total de plena radiação, não foram observadas diferenças significativas na produtividade entre os níveis de 1/2 e 1/3 de radiação. As altas intensidades luminosas, além de saturar o aparelho fotossintético do cafeeiro,

acarretam-lhe severa fotoinibição (NUNES et. al. 1993). Em estudo que buscava determinar o valor ótimo de IAF e a eficiência fotossintética, HUERTA et al.(1962) concluíram que a máxima eficiência fotossintética em plantas jovens de cafeeiro ocorra para um IAF de 6,4 com uma produtividade anual de matéria seca de 15,7 ton/ano.

2.5. Interação entre déficit hídrico e a cultura do café

A ocorrência de deficiência hídrica nas fases fenológicas mais sensíveis compromete o desenvolvimento do cafeeiro acarretando queda de produtividade. ARRUDA et. al. (2000), em seus estudos sobre a influência do déficit hídrico na produtividade cafeeira concluíram que a ocorrência de chuvas muito freqüentes na época do florescimento e início de formação dos grãos é prejudicial a produção. Magalhaes e Angelocci (1976), citado por SCHUCH e FUCHIGAMI (1992), observaram que houve quebra de dormência e indução de florescimento quando as plantas de café são submetidas a estresse hídrico, com uma tensão de água na folha de $-1,2$ MPa.

Camargo et al. (1984), citado por PICINI (1998), indicaram que embora o cafeeiro seja uma planta considerada relativamente tolerante a seca, sua produtividade é reduzida quando nas diferentes fases do ciclo, a disponibilidade hídrica é inadequada. Estudos desenvolvidos por PICINI et al. (1999) mostraram que o cafeeiro é sensível a deficiência hídrica durante os estádios fenológicos de final de dormência das gemas/florescimento e de final do florescimento/ início de granação.

SCHUCH e FUCHIGAMI (1992), observaram que os botões florais do cafeeiro, após período de estresse, apresentaram significativa expansão no terceiro dia após irrigação, mostrando-se o estresse necessário à quebra de dormência dos mesmos.

A diversidade de respostas do cafeeiro às diferentes condições ambientais citadas acima, e seus efeitos na produtividade, é um indicativo de quão complexa é a interação entre elementos climáticos e produtividade da cultura. A estratégia de maximização da captura de recursos e investimento de todo o carboidrato ganho no

processo de fotossíntese para formação estrutural típica de culturas anuais, contrastando com as culturas perenes, as quais armazenam grande parte deste carboidrato, é um exemplo adicional da complexidade da inter-relação clima-cultura.

O cafeeiro apresenta ainda um fenômeno intrínseco a sua fisiologia, o fenômeno da bienalidade, que é decorrente da alternância de funções vegetativas e produtivas, que gera oscilações anuais na produtividade. Sendo assim, a produtividade cafeeira, em determinado ano, é altamente dependente da produtividade do ano anterior.

2.6. Considerações finais

A compreensão dos processos citados nos itens anteriores e de outros processos fisiológicos individuais tais como interceptação e absorção da radiação, fotossíntese, respiração, armazenagem e distribuição de carboidratos para as diferentes partes da planta, devem ser considerados no estudo das inter-relações planta - ambiente climático, para se determinar a produtividade da cultura.

A produção de biomassa pela cultura do café, em condições de campo, não ocorre em nível potencial, dada as restrições impostas pelo meio físico. Dessa forma é imprescindível que tais considerações estejam presentes nos modelos integrados de produtividade da cultura do café. Os resultados obtidos por NUNES et al.(1968) e KUMAR e TIESZAN (1980) indicam a necessidade de penalizar a fotossíntese devido a excesso ou deficiência térmica, e também penalizar a produção final de matéria seca devido a ocorrência de déficit hídrico durante as fases fenológicas críticas da cultura conforme pode ser constatado em BIERHUIZEN et al. (1969), IPEA (1972), TOSELLO e ARRUDA (1962), RENA & MAESTRI (1985), SCHUCH et al. (1992), MAGALHAES e ANGELOCCI (1976) e PICINI et al. (1998).

3. MATERIAIS E METODOS

3.1. Considerações sobre a cultura e o local

Os dados climáticos utilizados no presente trabalho são da cidade de Viçosa, situada na região da Zona da Mata, Estado de Minas Gerais, latitude 20°45' S e longitude 42°51' W, e compreendem um período de onze anos, de 01 de janeiro de 1987 a 31 de dezembro de 1997, sendo pertencentes ao INMET.

Os dados do período de 01 de janeiro de 1987 a 31 de dezembro de 1992 foram utilizados para fins de parametrização, e de 01 de janeiro de 1993 a 31 de dezembro de 1997 para teste do modelo.

Os elementos climáticos considerados na execução do modelo foram: temperatura, precipitação e brilho solar diário diários. A data de plantio considerada para simulação foi a de 01 de janeiro de 1987. A inclinação do terreno considerada foi 0°, não sendo levado em conta sua orientação nem extensão. Os dados fisiológicos da cultura utilizados no modelo se referem a variedade Coffea arábica.

Os dados de produtividade observada foram obtidas da base de dados do IBGE.

3.2. Definição do modelo

No presente trabalho, o sistema modelado constitui-se dos elementos climáticos precipitação pluvial, temperatura média e radiação solar, bem como dos principais processos físicos e fisiológicos envolvidos no crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do cafeeiro e além dos processos de entrada e saída de água no solo. Para construir o modelo parte-se do pressuposto de que cada um dos elementos exerce determinada influência em tais processos, sendo a produtividade final determinada pela interação da cultura com os elementos climáticos.

Dessa forma, foram considerados na simulação os seguintes mecanismos: fotossíntese bruta, respiração total, interceptação da radiação solar, acúmulo de matéria seca e crescimento de área foliar.

Os parâmetros, relativos a planta e ao solo, envolvidos em cada um dos processos físicos e fisiológicos são apresentados na seção Lista de Símbolos.

Os dados climáticos de entrada do modelo são temperatura média (T_{med}), brilho solar diário ($Insol$) e precipitação (P). O modelo apresenta como dados de saída, ou variáveis de estado, os seguintes fatores: matéria seca total (M_{stotal}), Índice de Área Foliar (IAF), e produção econômica de frutos (M_{sfruto}).

Descreve-se as interações entre os elementos considerados no sistema na seguinte ordenação: a radiação é capturada e utilizada pela planta, que a transforma em fotossintetizados, os quais são utilizados nos diversos processos fisiológicos tais como respiração de manutenção e crescimento, sendo que os fotossintetizados remanescentes são acumulados na forma de matéria seca total, sendo então parte dos fotossintetizados subdivididos para as folhas e para os frutos.

A matéria seca final é penalizada considerando o déficit hídrico ocorrido nas fases fenológicas mais críticas da cultura, bem como a variação sazonal da temperatura. Para tanto considerou-se os processos evapotranspirométricos na definição do nível de deficiência hídrica a que a planta esteve sujeita.

Os Graus -dia acumulados, foram estimados utilizando-se os valores de temperatura média diária e temperatura basal inferior. Os Graus-Dias acumulados originaram os

estádios de desenvolvimento, que por sua vez definiram a partição da matéria seca para os diversos órgãos da planta.

A Figura 3.2 apresenta o fluxograma da estrutura básica do modelo que foi desenvolvido utilizando-se software Model Maker versão 2.0. Uma visualização de forma detalhada da estrutura do modelo, pode ser vista no Apêndice A.

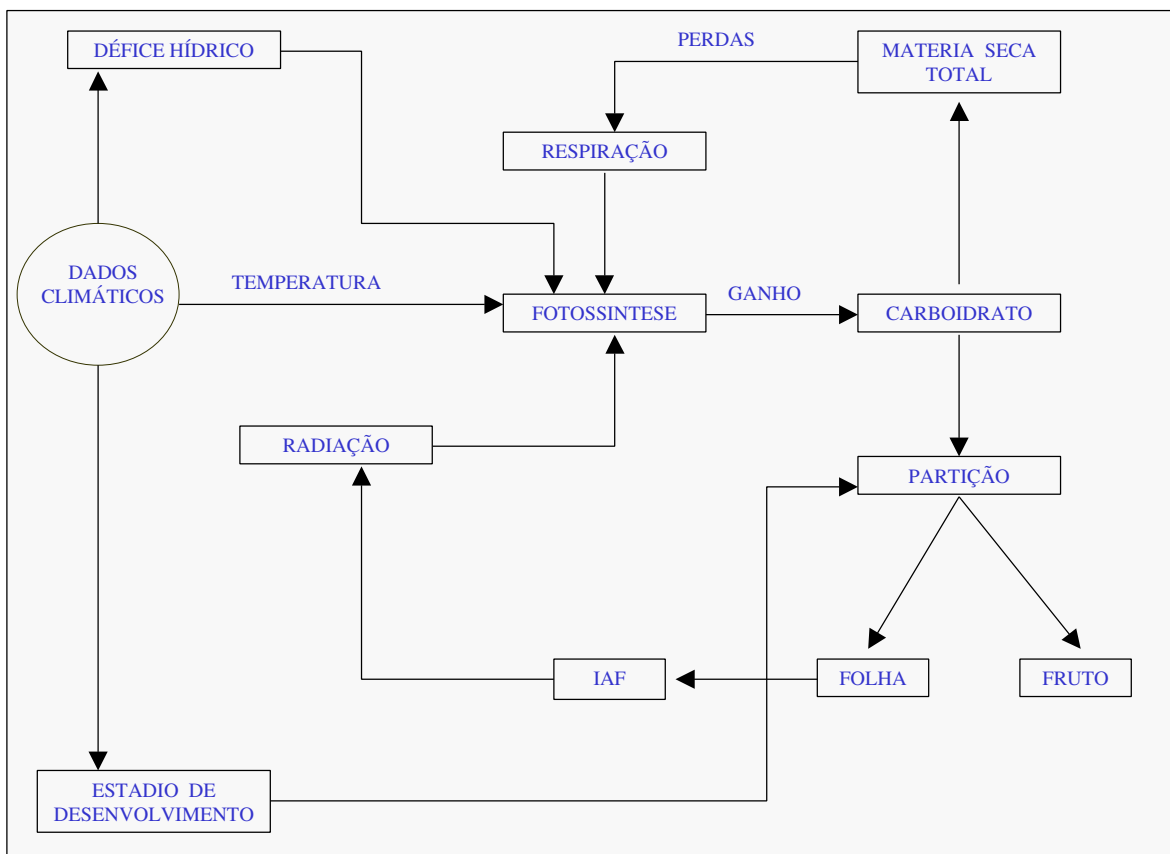


Figura 3.2 - Fluxograma da inter-relação dos principais componentes do modelo.

3.2.1. Estimativa da radiação solar

A radiação solar foi estimada utilizando-se o modelo o método proposto por Angstrom e modificada por Prescott (VIANELLO e ALVES, 1991):

$$R_G = R_0 \cdot (a + d \cdot n/N) \quad (1)$$

em que R_G é a radiação solar global em $W m^{-2}$, R_0 a radiação no topo da atmosfera em $W m^{-2}$, a e d parâmetros empíricos, cujos valores médios para Viçosa são

respectivamente 0,29 e 0,52. N e n são respectivamente brilho solar máximo e brilho solar diário, em horas.

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foi obtida de acordo com PENNING DE VRIES et al.(1989):

$$PAR = 0,5 \cdot R_G \quad (2)$$

em que a PAR é expressa em $W m^{-2}$.

3.2.2. Interceptação da radiação

A radiação interceptada pela cultura do café é estimada no presente modelo utilizando-se a equação apresentada por MONSI e SAEKI (1953):

$$R = R_g \cdot e^{-k \cdot IAF} \quad (3)$$

em que R e R_g são radiação solar abaixo e acima do dossel respectivamente, k o coeficiente de extinção da luz e IAF o índice de área foliar. A equação (2) já é incorporada na equação (4) de estimativa da fotossíntese, conforme descrita a seguir, não sendo necessário a utilização direta da equação. O valor do parâmetro k utilizado no presente modelo foi de 0,75, conforme RODRIGUEZ et al. (1997).

3.2.3. Estimativa da fotossíntese

A estimativa da taxa fotossintética do dossel foi obtida utilizando-se o modelo hiperbólico apresentado por GOUDRIAAN (1986):

$$F_{bruta} = \frac{F_{max}}{k} \ln \left(\frac{F_{max} + a \cdot k \cdot PAR}{F_{max} + a \cdot k \cdot PAR \cdot e^{-k \cdot IAF}} \right) \quad (4)$$

em que,

- F_bruta = Fotossíntese bruta instantânea, $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$;
- F_max = Fotossíntese máxima a 20 °C, $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$;
- k = coeficiente de extinção da luz, adimensional;
- α = eficiência quântica da fotossíntese, g.J^{-1} ;
- PAR = Radiação fotossinteticamente ativa, W.m^{-2} ;
- IAF = Índice de área foliar, $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$.

Os valores dos parâmetros F_max e α utilizados foram $5.10^{-5} \text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ e $6.10^{-6} \text{g J}^{-1}$, de acordo com estudos realizados por SILVA (2000) e MATTA (1995).

A fotossíntese bruta diária (F_brut_cor) foi corrigida para os valores diários de temperatura de acordo com a equação apresentada por THORNLEY e JOHNSON (1990):

$$F_{\text{bruta_cor}} = F_{\text{bruta}} \cdot \left(\frac{T_{\text{med}} - T_{\text{c}}}{T_{\text{r}} - T_{\text{c}}} \right) \quad (5)$$

em que, T_{r} é a temperatura de referência (20°C), T_{c} a temperatura crítica em que a fotossíntese cessa (8 °C, de acordo com CARVALHO, 1997), e T_{med} é a temperatura média diária.

3.2.4. Respiração total

A respiração foi dividida em respiração de manutenção e respiração de crescimento. A respiração de crescimento é definida como sendo a produção de novos compostos orgânicos, enquanto que a de manutenção consiste na simples relocação de outros compostos existentes e está relacionada com o consumo de energia para promover a organização estrutural da planta (McCREE, 1974). O modelo utilizado para estimar a respiração é o descrito por McCREE (1970), e apresentado por THORNLEY e JOHNSON (1990):

$$R_{\text{TOTAL}} = b \cdot F_{\text{day}} + c \text{ MS}_{\text{total}} \quad (6)$$

em que,

F_{day} = fotossíntese bruta diária, $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$;

MS_{total} = matéria seca total, g .

O primeiro e o segundo termos dizem respeito a respiração de crescimento, e respiração de manutenção, respectivamente. Os parâmetros b e c foram ajustados de acordo com MENDES (1987).

3.2.5. Índice de área foliar

A área foliar acrescida ao dossel do cafeeiro, ao longo do tempo, foi estimada levando-se em consideração a área foliar específica (SLA) e a partição de matéria seca para folhas:

$$IAF = SLA \cdot P_1 \quad (7)$$

em que P_1 é a partição de matéria seca para a folha (dec), ajustada de acordo com CIETTO (1988), e SLA a área foliar específica ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$), e cujo valor utilizado foi de 0,012 (CAMPOSTRINI, 1994).

Devido as perdas de área foliar que ocorre com a cultura do cafeeiro durante o inverno local, no presente modelo, durante esse período, o índice de área foliar (IAF) sofreu redução, a partir de um fator (m) baseado na magnitude das perdas durante o referido período (RENA e MAESTRI, 1987) e no IAF médio do cafeeiro adulto obtido da literatura (GUTIERREZ e MEINZER, 1994), de acordo com equação seguinte:

$$TX_{IAF} = m \left(\frac{IAF_{\text{med}}}{SLA \cdot I_n} \right) \quad (7.1)$$

em que m é a fração das folhas perdidas no inverno (-0,2 a -0,5), IAF_{MED} é o IAF médio ($6,4 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), In é a duração do inverno em dias, e TX_{IAF} a taxa de redução do IAF em $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

3.2.6. Estádios fenológicos do cafeeiro

Os estádios fenológicos do cafeeiro foram determinados com base nas necessidades térmicas da cultura, ou seja, graus - dia. Para atingir determinado estágio de desenvolvimento a cultura necessita de acúmulo de um número determinado de graus dia. Este índice é obtido pela diferença entre a temperatura média diária e a temperatura basal inferior da cultura. Para atingir o florescimento o cafeeiro necessita de aproximadamente 8850 graus - dia e em torno de 2250 graus - dia para atingir a maturação (IAFFE et al. 2001).

Considerou-se os seguintes estádios fenológicos dentro da execução do modelo:

- i-) estágio de crescimento vegetativo;
- ii-) estágio de desenvolvimento dos botões florais;
- iii-) estágio de crescimento lento dos frutos
- iv-) estágio de crescimento rápido dos frutos;
- v-) estágio de maturação dos frutos.

Equação utilizada até o florescimento do cafeeiro:

$$ED = GD / 8550 \quad (8)$$

em que,

ED = Estádio de desenvolvimento da cultura, 0 a 1.

GD = Graus-Dia acumulados, °C;

8550 = Graus-Dia necessário para atingir o florescimento, °C.

Equação utilizada do florescimento a maturação.

$$ED = \frac{GD - 8550}{2250} + 1 \quad (9)$$

em que,

ED = Estádio de desenvolvimento da cultura, 1 a 2.

GD = Graus-dia acumulados para do plantio a maturação, °C.

3.2.7. Estimativas do déficit hídrico

Na estimativa da disponibilidade hídrica do solo, realizou-se o balanço hídrico seqüencial diário, conforme descrito a seguir. Para tanto, utilizou-se o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955). Tal método permite monitorar o armazenamento de água no solo partindo-se do suprimento de água originário das chuvas (P), da demanda atmosférica simbolizada pela evapotranspiração potencial (EP) da capacidade de água disponível no solo (CAD). O balanço hídrico fornece estimativas da evapotranspiração real (ER) além da variação (ALT) e do armazenamento de água no solo (ARM).

Em função das características físicas dos solos considerados, estimou-se a capacidade de água disponível da seguinte forma (BERNARDO, 1995).

$$CAD = 0,1 \cdot (CC\% - PMP\%) \cdot dg \cdot z \quad (10)$$

em que, CAD é a capacidade de armazenamento de água do solo, em mm; CC% capacidade de campo, em porcentagem; PMP% ponto de murcha permanente, em porcentagem; dg é a densidade aparente média, em g cm⁻³ dos solos da região em questão, e z a profundidade de exploração de 80% das raízes do cafeeiro, em cm. De acordo com BERNARDO (1995), os valores de CC, PM e dg, para os solos

Viçosa são em torno de 32%, 20% e 1,18 g cm⁻³, respectivamente. De acordo com PICINNI (1998) o valor de z é em torno de 80 cm.

A evapotranspiração potencial diária é estimada por meio da seguinte equação:

$$EP = \left(\frac{10 \cdot T_{med}}{I} \right)^A \quad (11)$$

em que I o índice térmico anual estimado utilizando-se os valores de temperatura, e A é um parâmetro estimado de acordo com uma equação empírica expressa em função de I.

o valor da ARM é estimado pela seguinte equação:

$$ARM = CAD e^{\left(\frac{Neg_Acum}{CAD} \right)} \quad (12)$$

em que, Neg_ACUM é a deficiência hídrica diária acumulada, estimada de acordo com a equação seguinte.

$$Neg_ACUM = CAD \ln \left(\frac{ARM}{CAD} \right) \quad (13)$$

O parâmetro ALT é estimado pela diferença entre ARM do dia e ARM do dia anterior. A ER é estimada pela soma de P e valor absoluto de ALT.

As estimativas de ARM, Neg_ACUM e ER seque as condições de contorno, ou seja, dependem da diferença entre P e EP.

3.2.8. Penalização da matéria seca total

O procedimento de penalização na matéria seca deu-se por meio da penalização direta da fotossíntese bruta diária (F_bruta_cor), de acordo com a ocorrência de déficit hídrico. A penalização da fotossíntese implica em penalização indireta da matéria seca:

$$F_bruta_pen = F_bruta_cor \cdot \frac{ER}{EP} \quad (14)$$

em que,

F_{bruta_pen} = fotossíntese bruta penalizada, $g\ m^{-2}\ d^{-1}$;

ER/EP = fator de penalização devido a ocorrência de déficit hídrico,

3.2.9. Parametrização

A fração da matéria seca destinada para a folha P_1 (dec), bem como a fração da matéria seca destinada aos frutos (P_{FRUTO}) foram parametrizadas baseando-se nos resultados experimentais de partição de fotoassimilados para as diferentes partes da planta do cafeeiro, obtidos por CIETTO(1988), com o objetivo de obter a fração da fotossíntese líquida destinada as folhas e aos frutos.

O parâmetro c de estimativa da taxa de respiração do cafeeiro foi corrigido para a variação sazonal da temperatura utilizando-se a equação de Arrhenius apresentada por THORNLEY e JOHNSON (1990) e descrita a seguir:

$$c = c(20) \cdot Q_{10}^{\frac{T-Tr}{10}} \quad (15)$$

em que, $c(20)$ é a fração da matéria seca total destinada a respiração de manutenção a temperatura de 20°C e Q_{10} é o fator de variação de $c(20)$ para uma variação de 10 °C. Os parâmetros b , $c(20)$ e Q_{10} foram ajustados baseando-se nos resultados experimentais de taxas respiratória para o cafeeiro, obtidas por MENDES (1987).

O modelo aditivo modificado por Stewart et al. (1976) e parametrizado por PICINI (1998), foi incorporado e adaptado ao presente modelo devido ao fato de os resultados de produtividade simulados pelo modelo, considerando apenas o efeito dos elementos climáticos, estarem bastante divergentes dos dados de produtividade observados, com tendência a superestimativa.

$$F = K_{yo} \left(\frac{Y_{aa}}{Y_p} \right) + \sum_i^n K_{yi} \left(\frac{ER}{EP} \right) \quad (16)$$

em que,

Y_p = produtividade potencial, sc há⁻¹;

Y_{aa} = produtividade média dos anos anteriores, sc há⁻¹;

ER = evapotranspiração real diária, mm

EP = evapotranspiração potencial diária, mm

F = fator de penalização da produtividade econômica, dec.

Os parâmetros K_{y0} , coeficiente da produtividade do ano anterior, e K_{yi} , coeficiente de sensibilidade da cultura foram ajustados visando obter um melhor ajuste dos resultados simulados pelo presente modelo.

Os resultados de produtividade econômica (Y_f) foram multiplicada por $(1-F)$, obtendo-se então a produtividade estimada (Y_{est}).

4. RESULTADOS, DISCUSSÕES E ANÁLISE DOS ELEMENTOS CLIMÁTICOS

4.1. Caracterização dos elementos climáticos

4.1.1. Temperatura do ar

A Figura 4.1.1. ilustra o comportamento da temperatura média do ar ao longo dos 11 anos considerados no presente trabalho. Os dados do gráfico ilustram claramente os pontos em que ocorrem valores mais altos e mais baixos desse elemento climático, caracterizando as estações quente e fria do ano, respectivamente. Uma situação atípica ocorreu nos meses de dezembro de 1993 e janeiro de 1994, quando os valores de temperatura média mensal apresentaram-se abaixo da média desses meses nos demais anos.

Os maiores valores de temperatura média situaram-se em torno de 25°C, e os menores valores em torno de 15°C, mostrando uma amplitude térmica anual de aproximadamente 10°C. As médias mensais abaixo de 18°C, desfavoráveis a cultura do café, ocorrem apenas três vezes ao ano, o que demonstra que segundo suas exigências térmicas, tal cultura não sofre grandes restrições.

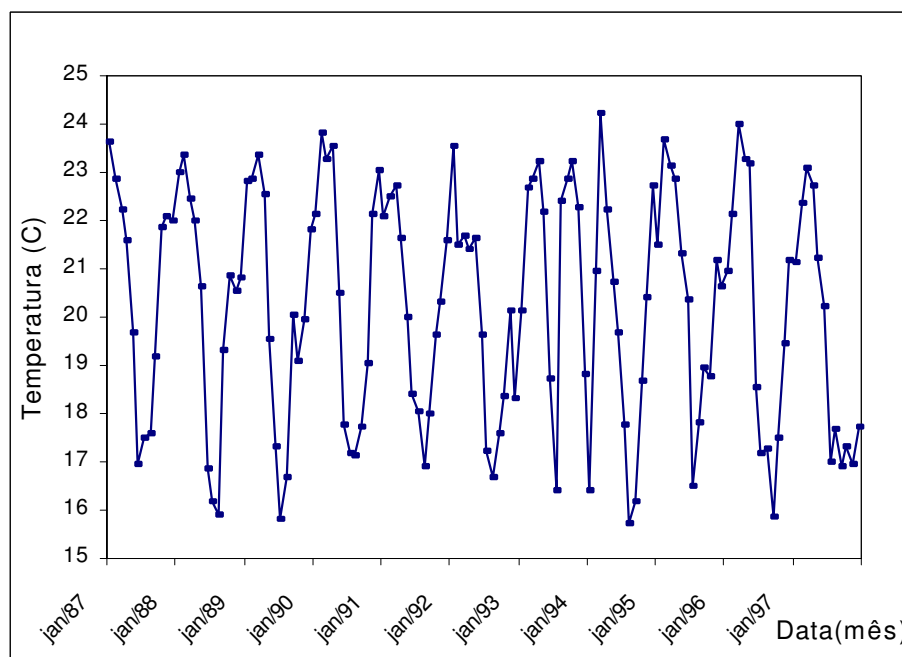


Figura 4.1.1- Variação sazonal da Temperatura média mensal (°C) para o período de 01 de janeiro de 1987 a 31 de dezembro de 1997.

4.1.2. Precipitação

A Figura 4.1.2. apresenta a variação sazonal da precipitação para o período considerado. Os resultados mostram a regularidade de distribuição da precipitação a qual apresenta tendência de concentração em períodos que compreende os meses de Setembro a Março, o que caracteriza o período chuvoso desta localidade, e escassez no período de inverno.

Observa-se que os seis maiores picos de precipitação, ocorreram no auge do período chuvoso, e correspondem aos anos de 1987/88, 1989/90, 1990/91 e 1993/94, 1996/97 e 1997/98.

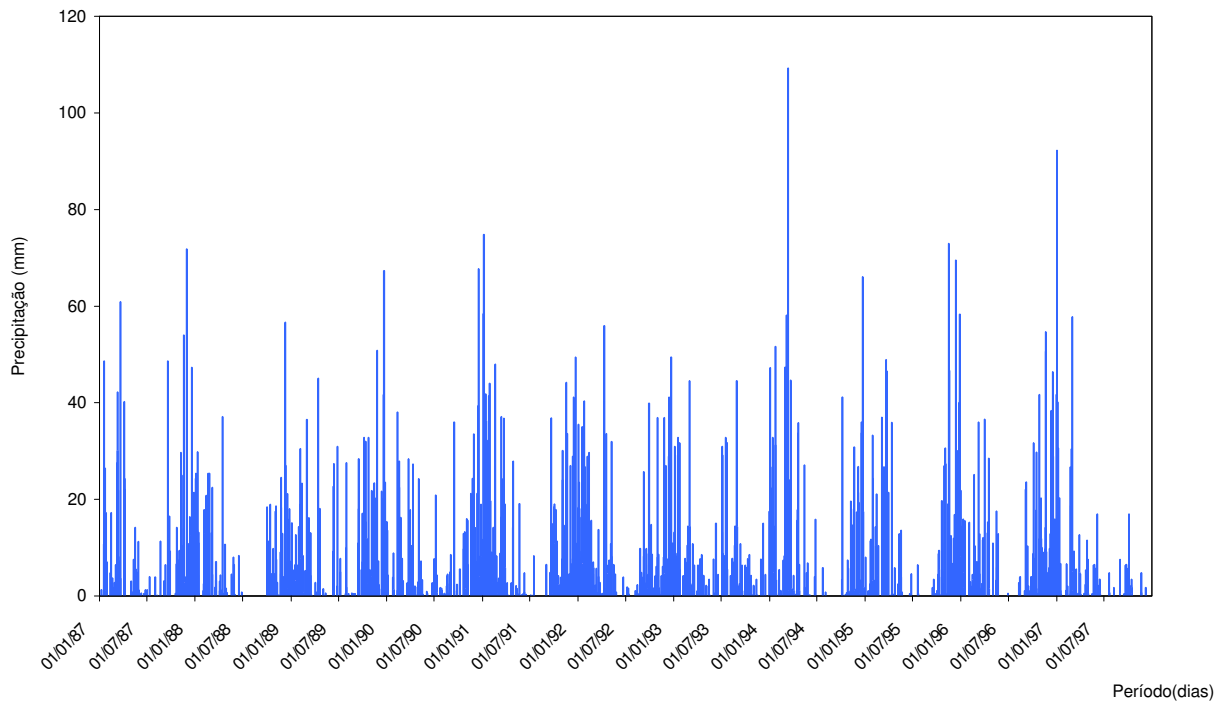


Figura 4.1.2 - Variação sazonal da precipitação pluvial (mm) para o período de 01 de janeiro de 1987 a 31 de dezembro de 1997.

4.1.3. Radiação solar

O presente considera a Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) como sendo 50% da radiação solar global, conforme descrito em materiais e métodos. A Figura 4.1.3. demonstra que os maiores e os menores valores da PAR situam-se respectivamente em torno de 240 W. m^{-2} e 140 W. m^{-2} , sendo que tais picos coincidem com os períodos do ano de maior e menor disponibilidade de radiação, respectivamente.

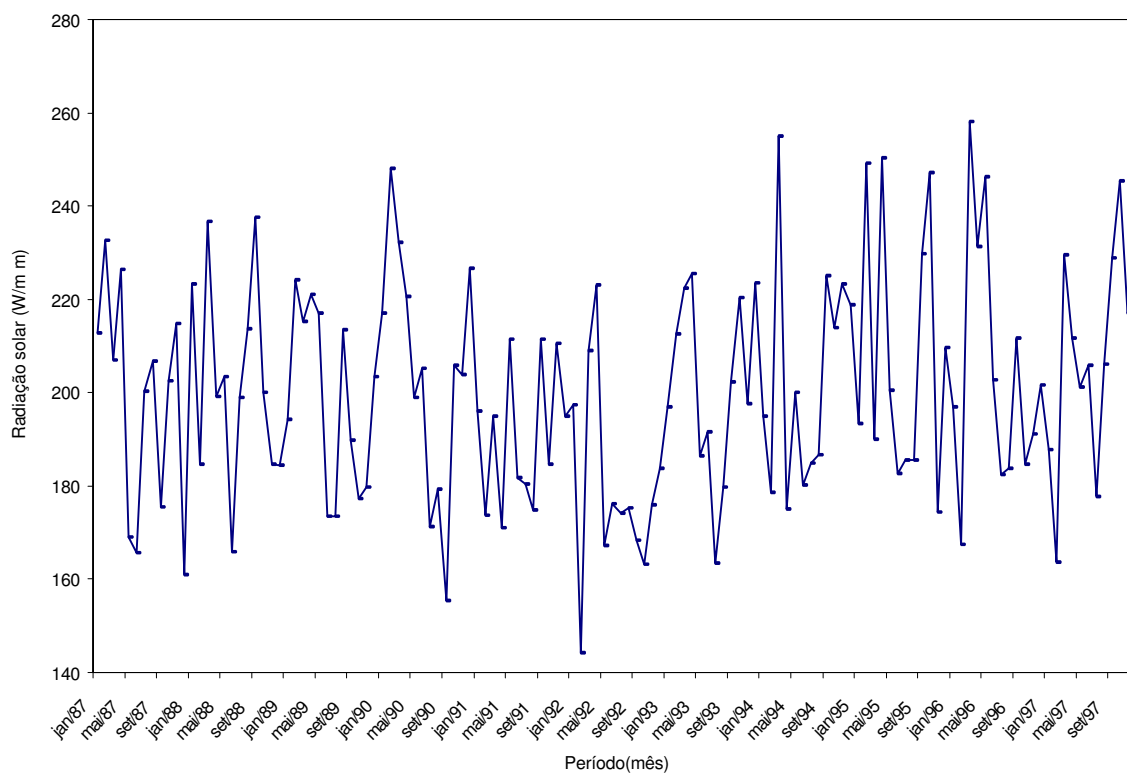


Figura 4.1.3. - Variação sazonal da radiação fotossinteticamente ativa, ($W.m^{-2}$) média mensal para o período de 01 de janeiro de 1987 a 31 de dezembro de 1997.

4.2. Resultados da parametrização

Os valores de P_1 e P_{FRUTO} , obtidos no presente modelo são apresentados na Tabela 4.2.1. Os parâmetros P_1 e P_{FRUTO} apresentam variações de acordo com a fenologia da cultura. Na fase vegetativa o parâmetro P_1 variou de 0,70, na fase inicial do crescimento, a 0,20, no início da primeira florada.

Tabela 4.2.1. Resultados da parametrização para a partição de fotoassimilados destinados as folhas (P_1) e a produtividade de frutos (P_{FRUTO}).

Fase Fenológica	Valor de P_1	Valor de P_{FRUTO}
Desenvolvimento dos botões florais	0,15	-----
Crescimento lento dos frutos	0,30	0,25 e 0,25*
Crescimento rápido dos frutos	0,15	0,35 e 0,40*
Maturação dos frutos	0,20	0,25 e 0,35*

* Valores de P_{FRUTO} a partir do segundo ano de produção.

Os valores de b e Q_{10} obtidos na parametrização foram 0,25 e 1,5, respectivamente. Os valores de $c(20)$ para o período de “descanso” e para os demais períodos foram 0,0017 e 0,0048, respectivamente.

Os resultados da parametrização dos coeficientes do modelo de PICINI (1998) incorporado ao presente modelo foram os seguintes:

$$K_{y0} = -1$$

$$K_{y1} = 1 \quad \text{para} \quad \frac{Y_{aa}}{Y_p} < \frac{Y_f}{Y_p} \quad \text{e}$$

$$K_{y1} = \left(\frac{Y_{aa}}{Y_p} \right)^{0.2} \frac{ER_f}{EP_f} \quad \text{para} \quad \frac{Y_{aa}}{Y_p} > \frac{Y_f}{Y_p}$$

O valor de Y_{aa} (produtividade média observada nos anos anteriores) foi de 19,4 sc ha⁻¹ e o valor de Y_p (produtividade potencial estimada pelo presente modelo) foi 35 sc ha⁻¹.

Y_f , ER_f e EP_f são respectivamente produtividade econômica de frutos, evapotranspiração real e evapotranspiração potencial na fase de frutificação.

Chegou-se a tais resultados analisando-se os valores de produtividade simuladas pelo modelo quando considerou-se apenas o efeito das variáveis climáticas. Como o modelo apresentou a característica de superestimar a produtividade quando não ocorria deficiência hídrica severa, e de aproximar dos resultados reais quando não ocorria deficiência hídrica severa, os valores dos parâmetros acima possibilitaram uma estimativa da produtividade com valores mais próximos da realidade.

4.3. Análise do crescimento do cafeeiro

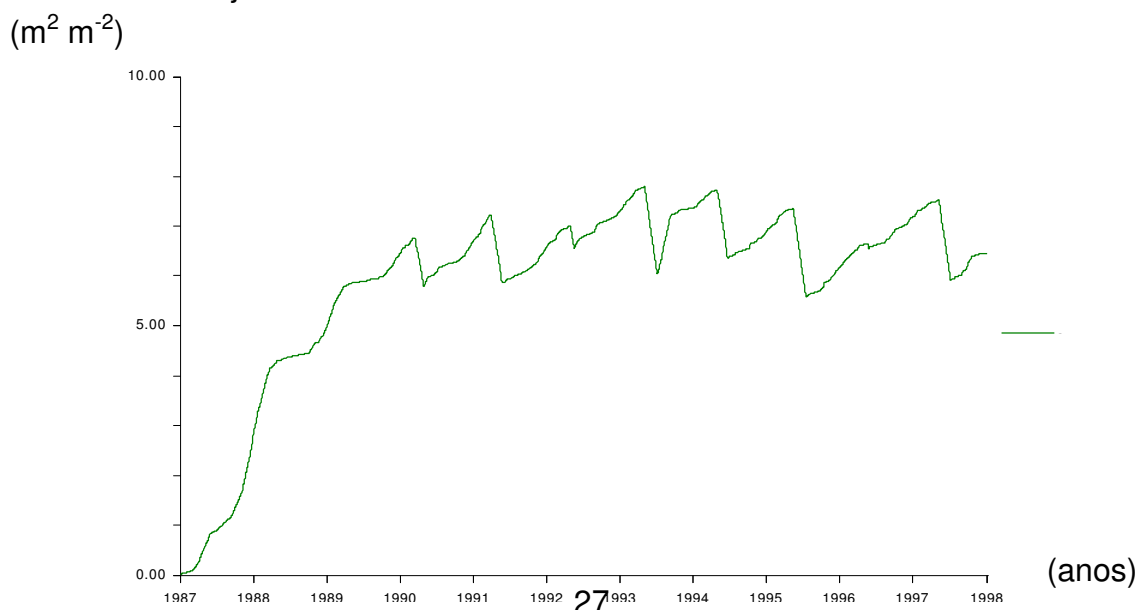
4.3.1. Índice de área foliar - IAF

O índice de área foliar máximo obtido pelo modelo foi de $7,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Tal valor está de acordo com os valores encontrados por GUTIERREZ e MEINZER (1994).

Os resultados apresentados na Figura 4.3.1, demonstram que o IAF apresentou crescimento lento no período correspondente ao primeiro ano, e considerável crescimento nos dois anos subsequentes.

Após o terceiro ano foi observado períodos caracterizados por acentuado crescimento alternados por períodos de perda foliar. Tais perdas são decorrentes da estação de inverno, período em que o cafeeiro chega perder de 20 a 50% de sua área foliar, e caracteriza o mecanismo de defesa da planta, que consiste nas perdas foliares visando minimizar as perdas por evapotranspiração. No período correspondente a elevação da temperatura e início da estação chuvosa observou-se maiores acréscimos da área foliar. A intensidade de acréscimo foliar na estação chuvosa dependeu da disponibilidade de radiação, além da disponibilidade hídrica. Nota-se que no inverno dos anos de 1992 e 1996 as perdas de área foliar foram menores que nos demais anos. Tal fato é decorrente do método utilizado pelo modelo para quantificar as perdas, quando então maiores ganhos de fotossíntese líquida compensaram as perdas de área foliar.

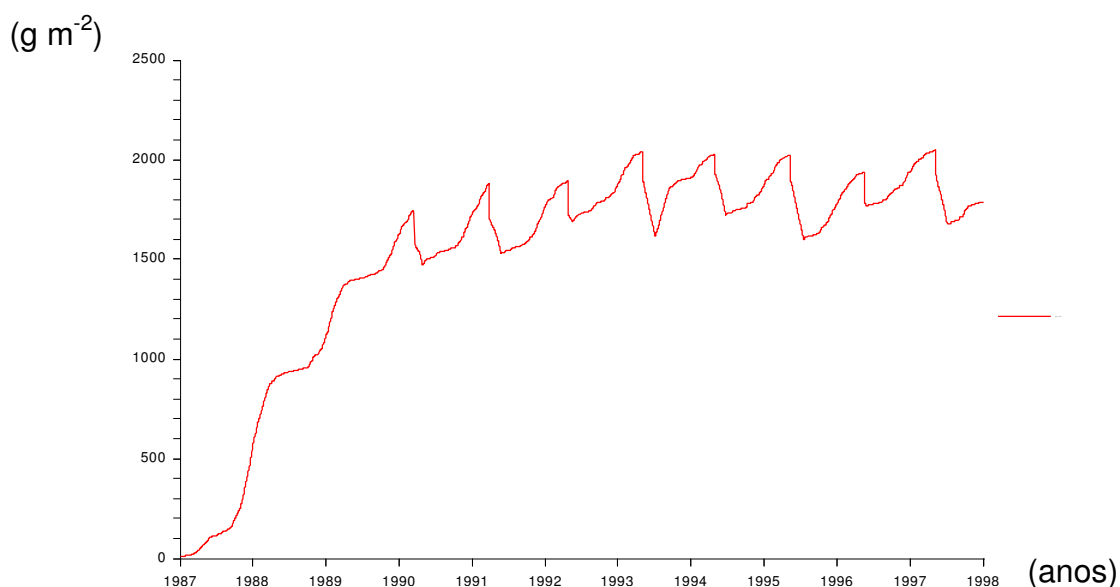
Figura 4.3.1- Evolução do índice de área foliar (IAF) em $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ para o período de 01 de janeiro de 1987 a 31 de dezembro de 1997.



4.3.2. Matéria seca total

Obteve-se considerável acúmulo de matéria seca total considerável nos três primeiros anos, observando-se períodos de crescimento linear acentuado alternados com períodos de lento crescimento, conforme demonstra a Figura 4.3.2. Tais oscilações no ritmo de crescimento são decorrentes da variação sazonal na disponibilidade de radiação. Após o terceiro ano observou-se períodos alternados de crescimento e perda de matéria seca, os quais caracterizam-se respectivamente por períodos de formação de fruto, e colheita dos frutos mais perda foliar. As reduzidas taxas de acúmulos observadas após a colheita podem ser explicadas pela estreita relação entre taxa de acúmulo de matéria seca e taxa fotossintética líquida. Na medida em que a cultura se defronta com severas condições de déficit hídrico, associado a reduzida disponibilidade de radiação, cenário típico de inverno local, a taxa fotossintética líquida assume baixos valores, induzindo quedas na taxa de acúmulo de matéria seca.

Figura 4.3.2. - Produção de matéria seca total (MS_{total}) em g m⁻² para o período de 01 de janeiro de 1987 a 31 de dezembro de 1997.



4.3.3. Taxas fotossintética e respiratória do cafeeiro adulto

Os resultados das taxas de fotossíntese e respiração compreendem apenas os últimos cinco anos, ou seja, o período de dados climáticos utilizados para teste do modelo.

Os maiores valores simulados de taxa de fotossíntese líquida foram em torno de $12 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, sendo que esporadicamente alguns valores se apresentaram em torno de $15 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; entretanto, apresentou com maior frequência valores de 2 a $6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Resultados semelhantes foram encontrados por SILVA (2000) e por OLIVEIRA (1995). A taxa fotossintética bruta oscilou entre 15 e $50 \text{ g (CO}_2\text{) m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Resultados semelhantes foram encontrados por SILVA (2000) e OLIVEIRA (1995).

Os resultados apresentados nas Figuras 4.3.3.1 e 4.3.3.2, 4.3.3.3., 4.3.3.4, 4.3.3.5 mostram diferenças de ano para ano na taxa fotossintética líquida, em que se evidencia periodicamente predominância de elevados valores, alternados com predominância de valores reduzidos. Tais valores correspondem, respectivamente, às épocas do ano de plena disponibilidade de radiação e de reduzida incidência de radiação solar. A taxa fotossintética líquida apresentou também valores reduzidos, muito próximo de zero, em períodos de considerável deficiência hídrica, que ocorreu de maneira acentuada, principalmente em meados dos anos de 1994, 1995, 1996 e 1997. As reduzidas taxas fotossintéticas de tais períodos podem ser explicadas pelo efeito limitante que a deficiência hídrica exerceu sobre a fotossíntese bruta. Índices elevados de déficit hídrico afetam consideravelmente o mecanismo de abertura e fechamento estomatal, de forma que a absorção de CO_2 , bem como a taxa fotossintética bruta, fica condicionado a tal mecanismo. Há de se considerar também que as taxas de fotossíntese bruta apresentaram menores valores no ano de 1997, devido principalmente a deficiência hídrica, que se acentuou nesse período, associada a menores valores de temperatura média observadas principalmente em meados e final do ano. Os maiores valores observados nas taxas de fotossíntese bruta no ano de 1993 são devidas a moderada restrição hídrica no período, e no ano de 1995 são devidas as maiores disponibilidade de radiação. As taxas respiratórias acompanharam a evolução das temperaturas médias, sendo que as menores taxas foram observadas em 1997, devido também aos reduzidos valores de temperatura média mensal.

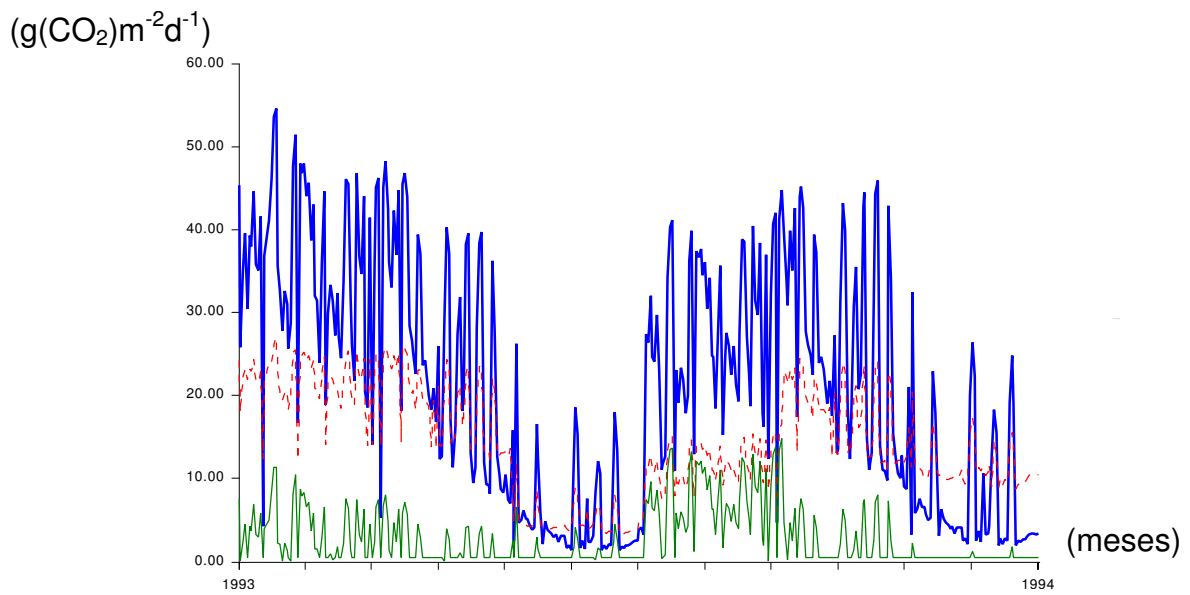


Figura 4.3.3.1- Evolução das taxas de Fotossíntese Bruta (linha espessa), Respiração total (linha pontilhada) e Fotossíntese Líquida (linha delgada) em $\text{g}(\text{CO}_2).\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ correspondente ao ano de 1993.

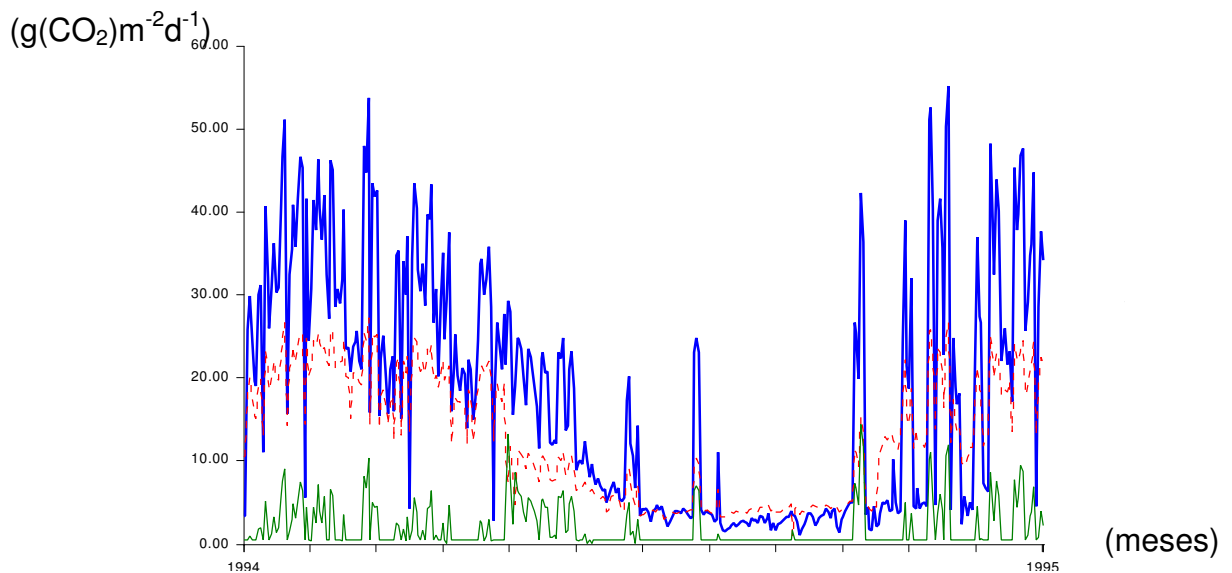


Figura 4.3.3.2 - Evolução das taxas de Fotossíntese Bruta (linha espessa), Respiração total (linha pontilhada) e Fotossíntese Líquida (linha delgada) em $\text{g}(\text{CO}_2).\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ correspondente ao ano de 1994.

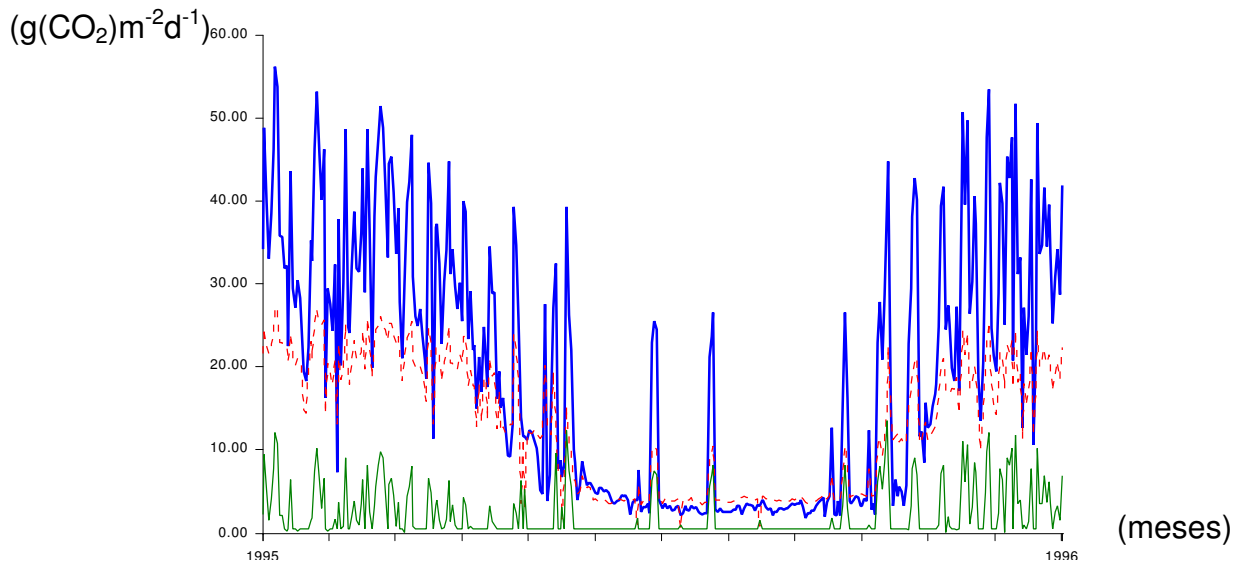


Figura 4.3.3.3 - Evolução das taxas de Fotossíntese Bruta (linha espessa), Respiração total (linha pontilhada) e Fotossíntese Líquida (linha delgada) em $g.(CO_2).m^{-2}.d^{-1}$ correspondente ao ano de 1995.

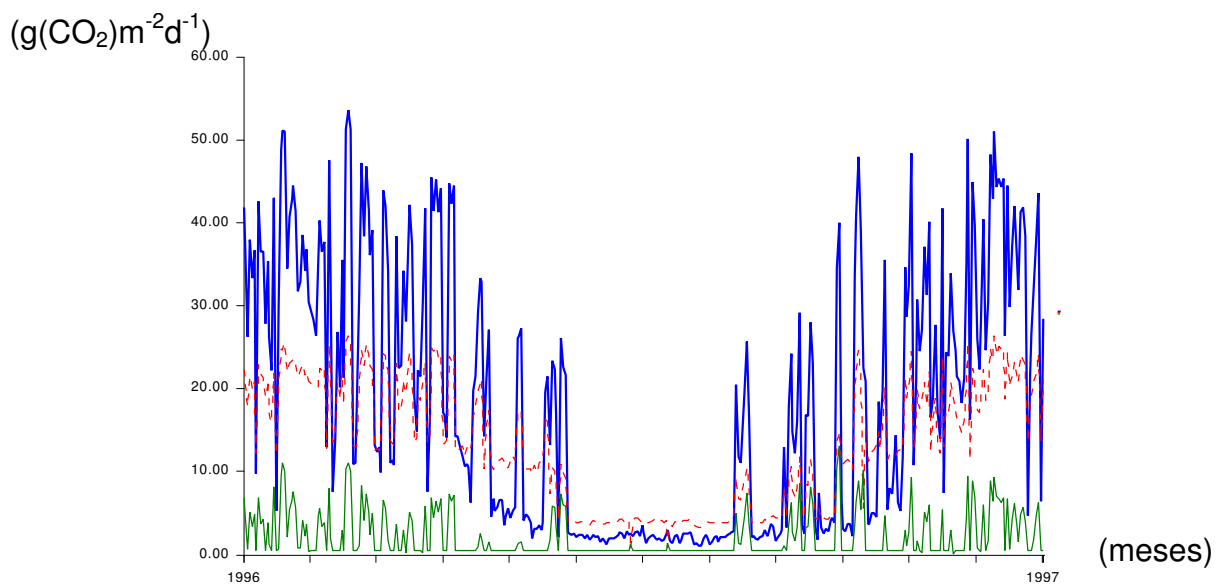


Figura 4.3.3.4 - Evolução das taxas de Fotossíntese Bruta (linha espessa), Respiração total (linha pontilhada) e Fotossíntese Líquida (linha delgada) em $g.(CO_2).m^{-2}.d^{-1}$ correspondente ao ano de 1996.

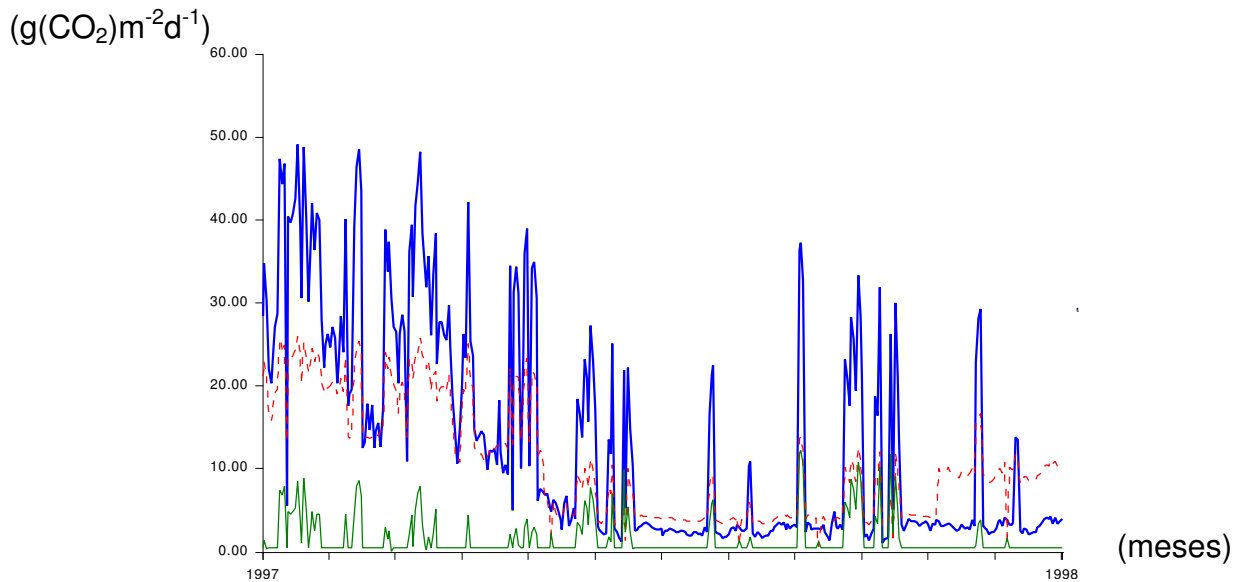


Figura 4.3.3.5 - Evolução das taxas de Fotossíntese Bruta (linha espessa), Respiração total (linha pontilhada) e Fotossíntese Líquida (linha delgada) em $\text{g}(\text{CO}_2).\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ correspondente ao ano de 1997.

4.3.4. Comparação da produtividade estimada com a observada

A Figura 4.3.4.1. e 4.3.4.2. apresentam, respectivamente, as produtividades estimadas (Y_{est}) pelo modelo e produtividades observadas (Y_{ob}), e os erros percentuais entre produtividade estimada e observada para os últimos cinco anos do período considerado. A produtividade estimada apresentou valores acima e abaixo da produtividade observada.

A média dos desvios percentuais entre as produtividades estimadas pelo modelo e as produtividades observadas foi de $-5,85\%$ e o desvio padrão de 1,80. Nota-se que há tendência de subestimativa dos valores estimados nos anos agrícola de 1992/93, 1993/94 e 1994/95, e superestimativa da produtividade estimada nos anos agrícola de 1995/96 e 1996/97. Os desvios negativos da produtividade estimada em relação a observada de 1992/93 a 1994/95 são devidos a ocorrência de déficit hídrico severo no período produtivo. Já os desvio positivo estão associados a ocorrência de déficit hídrico menos severo.

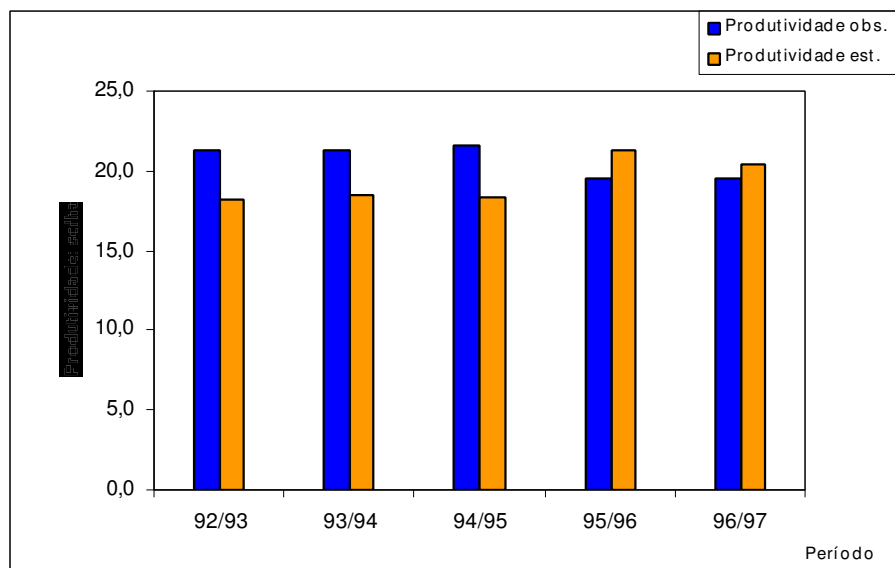


Figura 4.3.4.1 - Valores de produtividade estimada pelo modelo (tom claro) em sc ha⁻¹ e produtividade observada (tom escuro) em sc ha⁻¹, para as safras de 1992/1993 a 1996/1997.

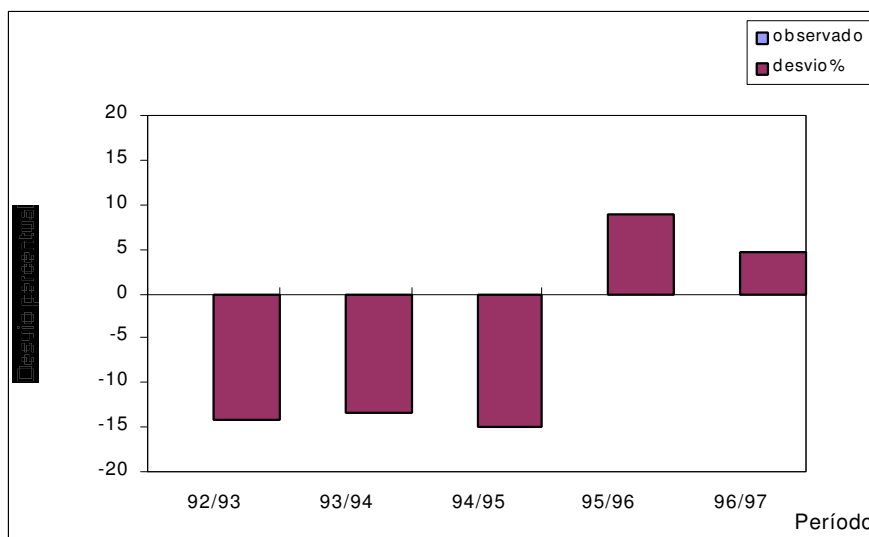


Figura 4.3.4.2 - Valores dos desvios entre produtividade estimada pelo presente modelo e produtividade observada, para as safras de 1992/1993 a 1996/1997.

5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados desta secção demonstram que o modelo foi capaz de simular os diversos processos envolvidos no crescimento e na produção do cafeeiro, gerando como dados de saída resultados coerentes com a realidade.

Os processos de fotossíntese, acúmulo de matéria seca e evolução de área foliar apresentados indicam que o modelo foi capaz de simular as diversas interações entre os elementos considerados, e quantificar os efeitos das inter-relações de tais elementos sobre a produção de matéria seca e produtividade de frutos de forma satisfatória.

Os resultados da análise de erros (desvios) cometidos pelo modelo mostraram, embora tenha sido considerado um número reduzido de anos para simulação, a potencialidade de uso do modelo na simulação e perda da produtividade, podendo o mesmo ser utilizado como ferramenta de auxílio nos trabalhos que envolvem previsão da produtividade da cultura do cafeeiro.

Os resultados indicaram, concordando com diversos autores, IAFFE et al. (2000), PICINI (1998), a importância de se considerar a produtividade dos anos anteriores em processos de simulação e previsão de produtividade da cultura.

A consideração de outras fontes de variação da produtividade tais como doenças, fertilidade de solo e fatores econômicos, na estrutura do modelo, contribuiria para melhor estimativa dos processos fisiológicos, discutidos esta secção, bem como para um melhor ajuste entre a produtividade simulada e observada

6. RESUMO E CONCLUSÕES

Com o objetivo de quantificar os efeitos das variações climáticas sobre o crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do cafeeiro, desenvolveu-se um modelo de simulação mecanístico determinístico dinâmico.

O modelo se caracterizou por apresentar os dados climáticos de entrada mais simples, de fácil obtenção, bem como pela integração de submodelos matemáticos, representativos dos diversos processos simulados, já conhecidos no meio científico.

Procedeu-se a simulação, utilizando uma série de dados climáticos de 1987 a 1997 para localidade de Viçosa-MG.

A eficiência na quantificação dos efeitos das variações dos elementos climáticos sobre as variáveis tais como produtividade, IAF, fotossíntese e respiração, dentre outras, demonstra a grande potencialidade de aplicação do presente modelo na simulação da produtividade das culturas.

O presente modelo, com suas características proporcionou um ajuste satisfatório dos resultados simulados aos dados reais, fornecendo desvios com valor médio de – 5,85 e um desvio padrão de 1,80.

7. RECOMENDAÇÕES

O presente modelo demonstrou eficiência e potencial de estimar e prever os resultados de produtividade cafeeira com antecedência a colheita. No entanto, considerou apenas as restrições hídricas, tendo utilizado um método simples de estimativa do déficit hídrico para o período de crescimento da cultura.

Sugere-se que em estudos posteriores, de mesma natureza, seja incluído no modelo um método que contemple todos os aspectos do mecanismo existente na interação clima-solo-planta, ou seja, que outras fontes de variação da produtividade devam ser levadas em consideração para o aperfeiçoamento do modelo. Para tanto, é necessário que sejam adicionados ao presente modelo outros módulos, tais como modelos de quantificação dos efeitos da ocorrência de doenças sobre a produtividade da planta, modelos de quantificação dos efeitos econômicos na produtividade, bem como modelos que descrevam os mecanismos de absorção de nutrientes e interação do sistema radicular da cultura com o sistema solo.

Para fins de melhor quantificação dos processos físico e fisiológico, tais como fotossíntese e respiração, sugere-se que se realize estudos direcionados a determinação dos parâmetros fisiológicos, utilizados nas equações, restringindo-se a determinadas variedades de cafeeiro.

Dessa forma, será possível explorar o presente modelo no potencial que tem demonstrado, visando contemplar novas áreas de conhecimento, além de tornar seu uso cada vez mais adequado na orientação do planejamento agrícola e no manejo de culturas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE, 2001. Site.

ARRILAGA, J.G. e L.A. GOMEZ. Effect of solar radiation intensity on the vegetative growth and yield of coffee. **J. Agric. of Univ. P. Rico**. Vol. XXVI, n.4c, 74-90.1942.

ARRUDA, F.B. WEILL, M.A.M., IAFFE, A., SAKAI, E. e PIRES, R.C.M. Estudo da influência do clima e do consumo hídrico na produção de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) em Pindorama, SP. **Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**. Poços de Caldas, MG. 2000. 2v. p. 782-785.

BERNARDO S. Manual de Irrigação. Universidade Federal de Viçosa- Imprensa Universitária. Viçosa - MG, 657 p.1995.

BIERHUZEN, J.F., M.A. NUNES e C. PLOEGAN. Studies on productivity of coffee.II – Effect of soil moisture on photosynthesis and transpiration of *Coffea arabica*. **Acta. Bot. Neerl.** 18(2):367-374. 1969.

BLACKMAN, V.H. The compound interest law and plant growth. **Annals of Botany**, London, v. 33, p. 353-360, 1919.

BOOTE,K.J., JONES, J.W., e PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop model. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, p.704-716, 1996.

- CAMARGO, M. B. P., JÚNIOR, M.J.P., ORTOLANI, A. A., ALFONSI, R. R. e PINTO, H. S. Relações entre a precipitação pluviométrica e a produtividade do cafeeiro. **Ecosistema**, v.9, p. 166- 171, 1984.
- CAMARGO, R. e TELLES JR., A.Q. Café no Brasil. Sua aclimação e industrialização. Ministério da Agricultura. Rio de Janeiro, Brasil, 1953.
- CAMPOSTRINI, E. Potencialidade fotossintética de cinco genótipos de *Coffea canephora* Pierre. Viçosa : UFV, 1994. 40p. **(Dissertação - Mestrado em Fisiologia Vegetal)**.
- CARVALHO, L.M. Efeito morfo-fisiológicos de exposições noturnas a baixas temperaturas sobre mudas de *C. canephora* Pierre e *C. arabica* L. Viçosa, MG : UFV, 1997. 53p. : II. **(Dissertação - Mestrado em Fisiologia Vegetal)**.
- CIETTO, S.. Acumulação de matéria seca, recrutamento de macro e micronutrientes pelo cafeeiro (*Coffea arabica* L.cv. *Catuaí*) com dois, três, quatro e cinco anos de idade, nas fases fenológicas de repouso, granação e maturação, vegetando em um latossolo vermelho amarelo, fase cerrado. Piracicaba : ESALQ, 1988. 101p. : II. **(Dissertação -Mestrado em Agronomia)**1988.
- COSTA L.C. **Modelo agrometeorológico de previsão de produtividade da soja para as regiões o Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba**. Dissertação de Mestrado. Viçosa, MG UFV, 1988, 40p.
- COSTA, L.C., e BARROS, A.H.C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.9, n.1, p. 75-82, 2001.
- De WIT, C. T., BROUWER, R. e PENNING DE VRIES, F.W.T. The simulation of photosynthetic systems. In: IBP/PP TECHNICAL MEETING, PREDICTION AND MEASUREMENTS OF PHOTOSYNTHETIC PRODUCTIVITY, 1969, Trebon. **Proceedings...** Trebon: 1970. p. 47-70.
- De WIT. C.T. Simulation of living system. In: PENNING DE VRIES, F.W.T & VAN LAAR, H.H. eds. **Simulations of plant growth and crop production**. Wageningen, Pudoc, 1982. p. 3-8.

- FERREIRA, W.P.M. **Desenvolvimento e teste de um modelo agrometeorológico de simulação para a cultura da soja *Glycine Max (L.) Merrill***. Viçosa: UFV. Impr. Univ.1997. 84p Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa.
- FRANCO, C.M. Influence of temperature on growth of coffee plant. **IBEC Res. Inst.**1958.
- GOUDRIAAN J. A simple and fast numerical method for the computation of daiy totals of crop photosynthesis. Elsevier Science Pub. B.V., Amsterdam. **Agric. And Forst. Met.** V.38 (1986), 249-254.
- GUTIERREZ, M.V. e MEINZER, F.C. Estimating water use irrigation requirements of coffee in Hawaii. **J. Amer. Soc. Hort. Sci** 19(3): 652-657. 1994
- HUERTA, ARMANDO S. Indice de área foliar y su influencia en la capacidad fotosintetica del café. **Cenicafe** (Colombia): 75-85.1962.
- HUNT, R. The Fitted curve in plant Growth studies In: ROSE, D.A.; CHARLES-EDWARDS, D.A. Mathematics and Plant Physiology. London, Academic Press, 1981. 283-98.
- IAFFE, A., ARRUDA, F.B., SAKAI, E., PIRES, R.C.M. e CALHEIROS, R.O. Quantificação do efeito dos elementos agrometeorológicos na produção de um ensaio de café em Ribeirão Preto, SP. **In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil** (1: 2000 : Poços de Caldas, MG). 2000. 2v. (1490p.), p. 794-797.
- IAFFE, A., PINTO, H., ARRUDA, F. B., QUAGLIA, L., SAKAI, E., PIRES, R. C. M.e ASSAD, E. Estimativa de temperatura base e graus-dia com correção pelo fotoperíodo do florescimento à colheita de café em Campinas, SP. **In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa dos Cafés do Brasil** (2. : 2001 : Vitória, ES). Resumos. Brasília, D.F. : Embrapa Café, 2001. 181p., p. 47.
- INSTITUTO DE PLANEJAMENTO ECONÔMICO E AGRÍCOLA. IPEA. Variações climáticas e flutuações da oferta agrícola no Centro-Sul do Brasil. **Relatório de Pesquisa**, vol.1. Brasília-1972.
- KUMAR, D. e L.L. TIESZEN. Photosynthesis in *Coffea arabica*. I. Effetc of light and temperature. **Expl. Agric.** (1980), vol. 16, pp.13-19.

- LIU, W. T. H. e LIU, B. W. Y. Comparação de três modelos de previsão da safra de café no Estado de Minas Gerais. **Ciência e Cultura**, v. 40, n. 8, p. 801 - 807, 1988.
- LUCHESE, A.A. Fatores da produção vegetal. In: **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba, Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1987. p.1-10.
- MAGALHAES, A.C. e L.R. ANGELOCCI. Sudden alterations in water balance with flower bud opening in coffee plants. **J. Hort Sci.**51: 419-423. 1976.
- MATTA, F. M. Desempenho fotossintético do cafeeiro em resposta a tensões abióticas. Viçosa : UFV, 1995. 67p. : il. (**Tese - Doutorado em Fisiologia Vegetal**).
- McCREE, K.J. An equation for the rate of respiration of white clover plants growing under controlled conditions. In: SETLIK, I., ed. **Prediction and measurement of photosynthetic productivity**. Wageningen, Pudoc. 1970. p 221-229.
- MCCREE, K.J. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as function of dry weight, photosynthesis rate and temperature. **Crop Science, Madison**, v.14, p. 509-514. 1974.
- MENDES, L. F. Variação diurna da atividade da redutase do nitrato, da respiração e dos teores de n-nítrico e carboidratos em plantas jovens de café, cacau e soja. Viçosa : UFV, Impr. Univ., 1987. 33p. : Il. (**Dissertação - Mestrado em Fisiologia Vegetal**).
- MODELMAKER, **Version 2.0 SB Technology**. Scientific Publishing Limited: Oxford, Great Britain, 1993, 1994.
- MONSI, M., SAEKI, T. Über der lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. **Jap. J. Bot.**, v.14, p.22-52, 1953.
- MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, B **281**: 277-294, 1977.

- MONTEITH, J.L. Light and crop production. **Field Crop Abstracts**. v.18, n.4, p. 213-9, 1965.
- NUNES, M. A., RAMALHO, J. D. C. e DIAS, M. A. Effect of nitrogen supply on the photosynthetic performance of leaves from coffee plants exposed to bright light. **J. Exp. Bot.**, 44: 893-899. 1993.
- NUNES, M.A., BIERHUIZEN, F.J. e PLOEGMAN, C. Studies on productivity of coffee III - differences in Photosynthesis between four varieties of coffee. **Acta Bot. Neerl.** 18(3), June 1969.
- NUNES, M.A., J.F. BIERHUZEN e C. PLOEGAN: Studies on productivity of Coffee. I - Effects of light, temperature and CO₂ concentration on photosynthesis of *Coffea arabica*. L. **Acta. Bot. Neerl.** 17: 93-102. 1968.
- OLIVEIRA, J.G. **Acompanhamento da cinética de emissão de fluorescência da clorofila a de plantas de café (*Coffea arabica* L.) submetidas a um ciclo de suspensão e restabelecimento da irrigação.** Viçosa: UFV. Impr. Univ. 1995. 64p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa.
- PENNING DE VRIES, F.W.T , JANSEN, D.M., TEN BERGE, H.F.M., e BAKENA A. **Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops.** Wageningen, Pudoc, 1989. 271 p.
- PICINI, A.G. Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo. Piracicaba : ESALQ, 1998. 132p. : II. **(Dissertação - Mestrado em Agrometeorologia).**
- PICINI, A.G., M.B.P. DE CAMARGO, L.C. FAZUOLI, B.P.GALLO e A.D. ORTOLANI. Desempenho de modelo matemático agrometeorológico de estimativa de produtividade para a cultura do café no Estado de São Paulo. **Bragantia**, 58 (1) p. 157-170. 1999.
- RENA, A.B. e MAESTRI, M. **Ecofisiologia da produção agrícola.** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. 249p.

- RENA, A.B. e MAESTRI, M., **Fisiología do cafeeiro. Informe agropecuario.** Informe Agropecuario. v.II, n. 126. p. 26-40. 1985.
- ROBLEDO, A.J. **Balanço de radiação solar em (*Coffea arabica* L.) variedades Catuaí e Bourbon amarelo.** Piracicaba, SP. 1979. 74p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) USP.
- RODRÍGUEZ, E.C., PULGARÍN, J.A., ROBLEDO, A.J., e SANABRIA, J. Interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el área foliar de *Coffea arabica*. **Cenicafe**, Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café, v. 48, n. 3, p. 182-194, 1997.
- SCHUCH, U.K. e LESLIE H. FUCHIGAMI. Flowering, ethylene production and in leakage of coffee in response to water stress and gibberelic acid. **J. Amer. Soc. Hort. Sci.** 117(1):158-163. 1992.
- SILVA, E.A. **Periodicidade do crescimento vegetativo em *Coffea arabica* I.: Relações com a fotossíntese em condições de campo.** Viçosa: UFV. Impr. Univ. 2000. 41p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa.
- STEWART, J. T., HAGAN, R. M., e 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.
- THORNLEY J.H.M. e JOHNSON I.R. Plant and Crop Modelling: A mathematical approach to plant and crop modelling. **Clarendon Press.** Oxford, 1990, p. 242-244.
- THORNTHWAITE, C. W., e MATFHER, J. R. The water balance. **Centerton**, N. J. 1955, 104 p. (Publications in Climatology. v01 8, n. 1).
- TOSELLO, R. N. e ARRUDA, H. V. DE. Correlação entre estimativas oficiais de produção de café e precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.21, p. 449-446. 1962.
- VIANELLO R.L. e ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações.** Imprensa Universitária. Viçosa, UFV. 1991. 499p.

APENCIDE A

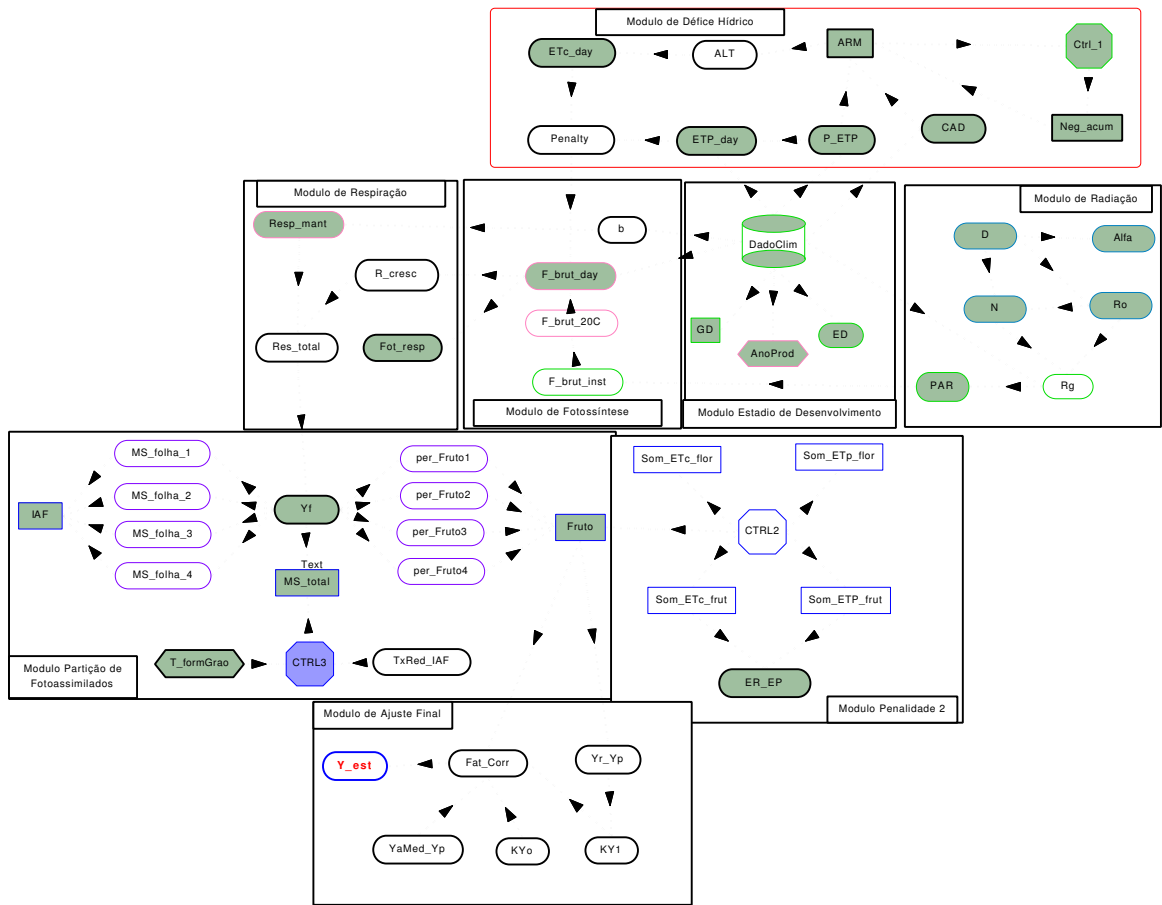


Figura A: Estrutura detalhada do modelo contendo os módulos que foram considerados, e seus principais componentes, bem como a interrealização entre tais componentes