

ANA PAULA DA SILVA DIAS

**MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO E DA PRODUTIVIDADE DO
CACAUEIRO E INFLUÊNCIA DO CLIMA NA OCORRÊNCIA DE
VASSOURA-DE-BRUXA**

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
2004**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

D541m
2004

Dias, Ana Paula da Silva

Modelagem do desenvolvimento e da produtividade do cacauero e influência do clima na ocorrência de vassoura-de-bruxa / Ana Paula da Silva Dias. – Viçosa : UFV, 2004.

xvii, 79f. : il. ; 29cm.

Orientador: Luiz Cláudio Costa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: p. 72-79.

1. Climatologia agrícola. 2. Cacau - Doenças e pragas. 3. *Crinipellis pernicioso*. 4. Vassoura-de-bruxa. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 20.ed. 630.2516

ANA PAULA DA SILVA DIAS

**MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO E DA PRODUTIVIDADE DO
CACAUUEIRO E INFLUÊNCIA DO CLIMA NA OCORRÊNCIA DE
VASSOURA-DE-BRUXA**

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*.

Prof. Eduardo S. Gomide Mizubuti
(Conselheiro)

Prof. Luiz Antonio Maffia
(Conselheiro)

Prof. Aristides Ribeiro

Dr. Luiz Antonio dos Santos Dias

Prof. Luiz Cláudio Costa
(Orientador)

Dedico:

Aos meus pais Jorge e Onilda,

À minha irmã, Alexandra,

Aos meus avós e tios,

Aos meus amigos.

Pessoas maravilhosas que sempre me

Apoiaram e me deram forças e motivação

para continuar a jornada.

Ofereço:

Ao meu esposo Frederico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas graças concebidas em minha vida.

Aos meus queridos pais, avós, tios, amigos e irmã pelo amor, força e carinho.

Ao meu querido Frederico, pelo amor, força e paciência.

À querida Dra. Edna Dora M. N. Luz, por permitir a realização desta tese.

Ao querido conselheiro Luiz Antonio Maffia pela paciência, força, confiança e carinho em todos os momentos.

Ao meu orientador Luiz Cláudio Costa, sempre presente quando eu realmente precisei.

Ao meu conselheiro Eduardo Mizubuti por todas as preciosas dicas.

A todos os professores da Meteorologia Agrícola, sempre prestativos e confiantes no meu trabalho.

Aos queridos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela presteza e o carinho todos os dias.

Ao CNPq.

À Universidade Federal de Viçosa.

BIOGRAFIA

ANA PAULA DA SILVA DIAS, filha de Jorge Gamba Dias e Onilda Pereira da Silva Dias, nasceu em São João de Meriti, no Estado de Rio de Janeiro.

Em Dezembro de 1996, formou-se Técnica em Meteorologia, pelo CEFET-RJ.

Em maio de 2002, graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais.

Em abril de 2002, iniciou o Curso de Mestrado em Meteorologia Agrícola na UFV, submetendo-se à defesa de tese em maio de 2004.

ÍNDICE

LISTA DE EQUAÇÕES.....	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO 1	
MODELO DE DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DO CACAEIRO (<i>Theobroma cacao</i> L.).....	4
1. INTRODUÇÃO.....	4
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1. Dados Utilizados.....	12
3.2. Determinação da Soma Térmica.....	13
3.3. Desenvolvimento do Modelo	13
3.3.1. Módulo Clima	14
3.3.2. Módulo Balanço de Carbono	17
3.3.3. Módulos Desenvolvimento e Partição de Matéria Seca.....	19

3.3.4. Módulo Balanço de Água no Solo	19	
3.4. Teste de Sensibilidade dos Parâmetros.....	21	
3.5. Validação do Modelo	21	
3.6. Análise Estatística	22	
4. RESULTADOS.....	23	
4.1. Clima.....	23	
4.2. Soma Térmica	23	
4.3. Modelo Cacau.....	26	
4.4. Análise de Sensibilidade de Parâmetros.....	29	
5. DISCUSSÃO	31	
6. CONCLUSÕES	35	
CAPÍTULO 2		
CONDIÇÕES FENOLÓGICAS E CLIMÁTICAS FAVORÁVEIS AO		
DESENVOLVIMENTO DA EPIDEMIA DE VASSOURA-DE-BRUXA EM		
RAMOS E FRUTOS DO CACAUEIRO NA BAHIA.....		36
1. INTRODUÇÃO	36	
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	38	
3. MATERIAL E MÉTODOS	49	
3.1. Dados Utilizados.....	49	
3.2. Processamento dos Dados	50	
4. RESULTADOS.....	53	
5. DISCUSSÃO	65	
6. CONCLUSÕES	62	
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72	

LISTA DE EQUAÇÕES

1. Soma Térmica considerando Temperatura Mínima superior à Temperatura Basal (GD).....	13
2. Soma Térmica considerando Temperatura Mínima inferior ou igual à Temperatura Basal (GD).....	13
3. Pressão de Saturação de Vapor (hPa).....	15
4. Pressão de Saturação de Vapor à Temperatura Máxima (hPa)	15
5. Pressão de Saturação de Vapor à Temperatura Mínima (hPa).....	15
6. Pressão Atual de Vapor (hPa)	15
7. Balanço de Ondas Curtas ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)	15
8. Balanço de Ondas Longas ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$).....	15
9. Radiação Solar Líquida ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$).....	16
10. Radiação resultante após interceptação da cobertura ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)	16
11. Radiação Fotossinteticamente ativa ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)	16
12. Radiação de ondas curtas que atingem o dossel ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$).....	16
13. Assimilação Máxima à Temperatura Média ($\mu\text{gCO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).....	17
14. Fotossíntese Bruta ($\text{g MS. m}^{-2} . \text{dia}^{-1}$).....	17
15. Respiração de crescimento do cacaueteiro ($\text{g MS. m}^{-2} . \text{dia}^{-1}$).....	18
16. Respiração de manutenção do cacaueteiro ($\text{g MS. m}^{-2} . \text{dia}^{-1}$)	18
17. Evapotranspiração diária (mm).....	19
18. Déficit de Pressão de Vapor (hPa)	19
19. Rampa da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).....	20
20. Resistência Estomática (s.m^{-1})	20
21. Água disponível no solo (mm)	20

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

1. Representação esquemática do modelo de produtividade do cacauero	14
2. Temperatura Média e Precipitação Pluviométrica mensais registradas durante as safras 91/92, 92/93 e 93/94	24
3. Número de lançamentos foliares, número de almofadas florais e número de flores e precipitação pluviométrica observados em duas safras em função de graus-dia acumulados.....	25
4. Comparação entre a produtividade de amêndoas secas simulada em duas condições de água no solo e a produtividade de amêndoas secas colhidas em frutos sadios e doentes observados no campo	27
5. Análise de correlação entre a produtividade de amêndoas secas observada e estimada pelo Modelo Cacau em simulação utilizando penalização da produtividade pela ocorrência de déficit hídrico.....	27
6. Comparação entre as épocas em graus-dia de lançamentos foliares observadas no experimento e estimadas em simulações com e sem ocorrência de déficit hídrico no solo	28
7. Análise de regressão entre as épocas de lançamentos foliares observadas e estimadas em simulações com e sem ocorrência de déficit hídrico no solo	29
8. Análise de Sensibilidade dos parâmetros utilizados no cálculo da produtividade de amêndoas secas pelo Modelo Cacau.....	30

CAPÍTULO 2

1. Observações Semanais de Total de Chuva (Chuva), Número de Horas de Chuva (NHCS), Número de Horas de Chuva ocorridas entre 22h e 5h (NHC22-05) e Temperatura Média (TM)..... 54
2. Observações Semanais de Número de Horas de Temperaturas inferiores a 20°C (NHT<20); Número de Horas de Temperaturas entre 20 e 24°C (NHT20-24); Número de Horas de Temperaturas entre 24 e 28°C (NHT24-28) e Número de Horas de Temperaturas superiores a 28°C (NHT>28) 55
3. Observações Semanais de Umidade Relativa do Ar Média por Semana (URMS), Número de Horas de Umidade Relativa do ar Superior a 90% por Semana (NHU>90), Número de Horas de Umidade Relativa do ar entre 80 e 90% por Semana (NHU80-90) e Número de Horas de Umidade Relativa do ar Inferior a 70% por Semana (NHU<70) 57
4. Observações Semanais do Número de Lançamentos Foliares por Semana (LANC), Número de Almofadas Florais por Semana (ALM), Número de Vassouras em Ramos Verdes (VBRV) e Número de Frutos Morango (FMO).....58

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

1. Coeficientes de correlação de Pearson entre número de Vassoura-de-bruxa em Ramos Verdes (VBRV) e as variáveis fenológicas e meteorológicas.....59
2. Coeficientes de correlação de Pearson entre Número de Frutos Morango (FMO) e as variáveis fenológicas e meteorológicas60
3. Coeficientes de Trilha calculados para a variável VBRV (Vassouras-de-bruxa em Ramos Verdes por Semana): efeitos diretos e indiretos em função de variáveis fenológicas e meteorológicas.....61
4. Coeficientes de Trilha calculados para a variável VBRV (Vassouras-de-bruxa em Ramos Verdes por Semana): efeitos diretos e indiretos em função de variáveis fenológicas e meteorológicas.....62
5. Coeficientes de Trilha calculados para a variável FMO (Número de Frutos Morango por Semana): efeitos diretos e indiretos em função de variáveis fenológicas e meteorológicas.....63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo:

GD	Soma Térmica
T_{\max}	Temperatura Máxima ($^{\circ}\text{C}$)
T_{\min}	Temperatura Mínima ($^{\circ}\text{C}$)
T_{med}	Temperatura Média Diária ($^{\circ}\text{C}$)
T_{bi}	Temperatura basal para Cacaueiro ($^{\circ}\text{C}$)
es	Pressão de Saturação de Vapor Diária (hPa)
$es(T_{\max})$	Pressão de Saturação de Vapor à Temperatura Máxima (hPa)
$es(T_{\min})$	Pressão de Saturação de Vapor à Temperatura Mínima (hPa)
ea	Pressão Atual de Vapor (hPa)
Ur_{\max}	Umidade Relativa do Ar Máxima Diária (%)
Ur_{\min}	Umidade Relativa do Ar Mínima Diária (%)
BOC	Balanço de Ondas Curtas ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
Rg	Radiação Global ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
rf	Refletância da cultura
BOL	Balanço de Ondas Longas ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
RN	Radiação Solar Líquida ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
Rcb	Radiação após a interceptação da cobertura ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
Ke	Coefficiente de extinção da vegetação de Cobertura

IAFe	Índice de Área Foliar da vegetação de cobertura ($m^2 \cdot m^{-2}$)
RFA	Radiação Fotossinteticamente ativa ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)
Rcc	Radiação de ondas curtas que atingem o dossel ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)
Ki	Coefficiente de Extinção do Cacaueiro
IAFc	Índice de Área Foliar do Cacaueiro ($m^2 \cdot m^{-2}$)
Am	Assimilação Máxima à Temperatura Média ($\mu g CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
T_r	Temperatura de Referência ($^{\circ}C$)
Amr	Assimilação Máxima de referência do cacaueiro ($\mu g CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
Fg	Fotossíntese Bruta ($g \text{ MS} \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$)
MS	Matéria Seca (g)
N	Comprimento do dia (horas)
E	Eficiência de uso da radiação ($\mu g CO_2 \cdot J^{-1}$)
Resp_C	Respiração de crescimento do cacaueiro ($g \text{ MS} \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$)
Resp_M	Respiração de manutenção do cacaueiro ($g \text{ MS} \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$)
W	Peso seco acumulado pela cultura ($g \text{ MS}/m^2$)
Q10	Fator de incremento da Manutenção
ET	Evapotranspiração diária (mm)
ρ	Densidade média do ar à pressão constante ($kg \text{ m}^{-3}$)
cp	Calor específico do ar à pressão constante ($MJ \text{ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}C^{-1}$)
Δ	Rampa da curva de pressão de vapor ($kPa \text{ }^{\circ}C^{-1}$)
γ	Constante Psicrométrica ($kPa \text{ }^{\circ}C^{-1}$)
VPD	Déficit de Pressão de Vapor (hPa)
ra	Resistência aerodinâmica da cultura ($s \cdot m^{-1}$)
rc	Resistência da cultura ($s \cdot m^{-1}$)
re	Resistência Estomática ($s \cdot m^{-1}$)
ARM	Água disponível no solo (mm)
CC	Capacidade de Campo (mm)
NC	Número de Condição
VBRV	Vassouras em Ramos Verdes por Semana
FMO	Número de Frutos Morango por Semana

Chuva	Total de Chuva na semana (mm)
NHCS	Número de Horas de Chuva por semana
NHC22-05	Número de Horas Semanais de Chuva entre 22:00 e 5:00h
TM	Temperatura Média da Semana (°C)
NHT<20	Número de Horas Semanais de Temperatura do ar <20°C
NHT20-24	Número de Horas Semanais de Temperatura do ar entre 20 e 24°C
NHT24-28	Número de Horas Semanais de Temperatura do ar entre 24 e 28°C
NHT>28	Número de Horas Semanais de Temperatura do ar > 28°C
URMS	Umidade Relativa Média do ar (%)
NHU>90	Número de Horas Semanais de Umidade Relativa do ar >90%
NHU80-90	Número de Horas Semanais de Umidade Relativa do ar entre 80 e 90%
NHU<70	Número de Horas Semanais de Umidade Relativa do ar <70%
LANC	Lançamentos Foliares por Semana
ALM	Número de Almofadas Florais Ativas por Semana

RESUMO

DIAS, ANA PAULA DA SILVA, M.S., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2004. **Modelagem do desenvolvimento e da produtividade do cacau e influência do clima na ocorrência de vassoura-de-bruxa** Orientador: Luiz Cláudio Costa. Conselheiros: Luiz Antonio Maffia e Eduardo Seiti Gomide Mizubuti.

Considerando a importância da modelagem para o detalhamento dos mecanismos envolvidos no sistema solo-planta-atmosfera, desenvolveu-se no presente trabalho, um modelo para o desenvolvimento e a produtividade do cacau, considerando as relações entre o clima e os processos fisiológicos e fenológicos da cultura, denominado Modelo Cacau. Além disso, foram estudados os possíveis fatores climáticos e fenológicos atuantes sobre a ocorrência de vassoura-de-bruxa do cacau. Utilizou-se o conceito de modelagem modular, que preconiza a compartimentalização dos processos em módulos independentes e interligados, para o desenvolvimento de um modelo mecanístico para o cacau. O modelo considera os dados meteorológicos diários como variáveis de entrada, os quais atuam nos compartimentos referentes à fisiologia da cultura, incluindo os processos de fotossíntese, respiração, evapotranspiração, partição de assimilados, entre outros, gerando informações sobre as épocas de lançamentos foliares e a produção de amêndoas. Os dados experimentais utilizados neste trabalho foram coletados nas safras agrícolas de 1991 a 1995, em lavoura comercial de cacau com

6 anos de idade, localizada na cidade de Camacã, Bahia (Latitude 15,4°S; Longitude 39,5°W),. Obtiveram-se dados diários de clima e dados semanais de fenologia do cacau e ocorrência de vassoura-de-bruxa. Parte dos dados experimentais serviu para a simulação utilizando o Modelo Cacau, cujas respostas foram comparadas aos dados observados no mesmo período. Para o estudo dos fatores climáticos e fenológicos atuantes sobre a ocorrência de vassoura-de-bruxa do cacau , os dados experimentais foram organizados em diferentes intervalos de tempo até a ocorrência da doença em ramos e a formação de frutos morango. A comparação foi realizada por meio da análise de trilha. Os resultados indicaram que o ciclo anual do cacau completa-se aos 3000 Graus-dia Acumulados (GD), com início de lançamentos foliares em torno de 200, 1100 e 1900GD. A formação de almofadas florais ocorreu apenas no intervalo de 400 a 2800 GD e o ciclo de frutos foi completado em 1400 GD. O modelo modular de desenvolvimento do cacau simulou as épocas de ocorrência de surtos de lançamentos foliares na Bahia. As infecções causadas por *Crinipellis pernicioso* em ramos vegetativos ocorreram preferencialmente nas gemas em desenvolvimento, cerca de 3 a 4 semanas antes dos fluxos de lançamentos foliares, os quais coincidiram com o aparecimento de sintomas. A umidade do ar teve influência sobre a ocorrência da doença em ramos e sobre a formação de frutos morango. O monitoramento das condições de umidade do ar, juntamente com o acompanhamento da fenologia da cultura através das ferramentas de modelagem, pode ser utilizado na indicação das épocas propícias à infecção de *C. pernicioso*, quando medidas eficazes de controle poderão ser acionadas.

ABSTRACT

DIAS, ANA PAULA DA SILVA, M.S., Universidade Federal de Viçosa, May 2004. **Cocoa development and productivity modeling and climate influence on the occurrence of witches' broom disease.** Adviser: Luiz Cláudio Costa. Committee members: Luiz Antonio Maffia and Eduardo Seiti Gomide Mizubuti.

The first part of the present study had for objective the development of a dynamic deterministic mechanistic model for the cocoa crop considering the relationships between the climate and its physiologic and phenologic processes. The modulate modeling concept was used, which concerns the compartmentalization of the processes in independent and interlinked modules, for the development of the cocoa mechanistic model. The model considers the daily meteorological data as entrance variables, which act in the compartments referring to the physiology of the culture, including the photosynthesis processes, breathing, evapotranspiration, partition of assimilates, among others, generating information about the period of foliate releasing and about the pod production. The experimental data used in this study were collected in a commercial crop in Bahia from 1991 to 1995, including hourly climate data and weekly cocoa phenology data and witches' broom occurrence data. Part of the experimental data was used for the development of the model and the remaining was used for a simulation, whose answers were compared to the data observed in the same period. In the final part of this study, the possible

climatic and phenologic factors acting on the occurrence of cocoa witches' broom were studied. The experimental data were organized in different intervals of time to the occurrence of the disease in branches and the development of chirimoia fruits for the comparison through path analysis. The results indicated that the cocoa annual cycle is completed in 3000 degree-days (GD), with foliate release around 200, 1100 and 1900GD; floral cushions formation done between 400 and 2800 GD and fruit cycle completed in 1400 GD. The influence of soil humidity was also verified in the crop phenology. The modulate model of cocoa development successfully simulated the pod productivity in conditions of water deficit and the periods of occurrence of foliate releasing in Bahia. The infections caused by *Crinipellis pernicioso* in vegetative branches mainly occurred in developing buds, about 3 to 4 weeks before the occurrence of the foliate release, which coincided with symptom developing. The air humidity had influence on the occurrence of the disease in branches and in the chirimoia fruit formation. The air humidity condition monitoring and the cocoa phenology accompaniment through modeling tools can be used in the indication of the favorable periods to the infection of *C. pernicioso*, when effective control should be done.

INTRODUÇÃO GERAL

O cacauieiro (*Theobroma cacao* L.) é uma planta originária das florestas úmidas da bacia Amazônica, de onde dispersou para o norte e oeste. Hoje as áreas produtivas estão concentradas na Costa do Marfim, na Indonésia e Malásia, na América Central e no Brasil. As principais áreas produtoras brasileiras estão na região Norte do país, Norte do Mato Grosso, Sul da Bahia e Norte do Espírito Santo (CEPLAC, 2004).

A produção de cacau no Brasil sofreu grande redução no final dos anos 80, com a introdução do fungo *Crinipellis pernicioso* nas plantações do sul da Bahia. Este patógeno é o agente causal da doença conhecida como Vassoura-de-Bruxa do cacauieiro. A vassoura-de-bruxa afeta os tecidos em crescimento, acarretando em problemas de hipertrofia em ramos vegetativos, dando-lhes aspecto de vassoura. Além disso, infecções em flores provocam a formação de frutos deformados, conhecidos como frutos morango (Silva *et al.*, 2002).

O cacauieiro é bastante influenciado pelo clima em diversos aspectos e em especial, nos aspectos fisiológico e fitopatológico. Apesar de a cultura aparentemente exigir condições climáticas definidas, devido a sua origem tropical, as interações no triângulo envolvendo o clima, *Crinipellis pernicioso* e o cacauieiro são bastante complexas. A ocorrência simultânea de clima favorável, tecido hospedeiro suscetível e produção de basidiocarpos determina o desenvolvimento da vassoura-de-bruxa do cacauieiro. Em especial, a

variação do clima ao longo das safras agrícolas influencia as variações no desenvolvimento do cacaueteiro e na ocorrência da vassoura-de-bruxa (Schmidt *et al.*, 1993).

Elementos meteorológicos, tais como radiação, temperatura e umidade, atuam sobre o metabolismo do cacaueteiro em diversos aspectos, tanto de ordem fisiológica quanto de ordem fenológica (Alvim, 1975). Por outro lado, o fungo *C. pernicioso* exige também condições climáticas favoráveis nas diversas etapas do ciclo da doença, com ênfase em umidade e temperatura (Luz *et al.*, 1994).

O desenvolvimento da modelagem utilizando as relações existentes no sistema clima, cultura e doença, pode servir como ferramenta simples e de baixo custo às necessidades de monitoramento e manejo do cacaueteiro. Os trabalhos envolvendo modelagem podem, adicionalmente, elucidar os mecanismos envolvidos naquele sistema, dado o detalhamento de informações necessário a este tipo de estudo.

A modelagem aplicada às culturas desenvolveu-se rapidamente nas últimas décadas, com a utilização de métodos matemáticos e estatísticos associados aos recursos computacionais modernos (De Wit *et al.*, 1969). A tendência em modelagem nos últimos anos é o desenvolvimento de modelos mecanísticos modulares, que se baseiam nos detalhados mecanismos do sistema a ser modelado, buscando uma melhor compreensão dos processos que influenciam as culturas (Porter *et al.*, 1999). Alguns modelos mecanísticos dinâmicos modulares foram desenvolvidos no Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, para simulação do desenvolvimento e da produtividade de culturas anuais e perenes (Ferreira, 1997; Santos, 2002).

Apesar dos estudos recentes realizados a cerca da modelagem do desenvolvimento e da produtividade do cacaueteiro (Zuidema e Leffelaar 2002), ainda devem ser testadas diferentes formas de processos fisiológicos e fenológicos, preferencialmente utilizando-se ferramentas mais práticas, tais como os modelos modulares. Além disso, são necessários esforços adicionais para que sejam desenvolvidos módulos que representem o desenvolvimento da vassoura-de-bruxa do cacaueteiro, de tal forma que as respostas geradas em simulações com dados meteorológicos reais tenham aplicação prática sobre o manejo da cultura. Os estudos a cerca das relações entre o clima e a doença

estão avançados, mas ainda são necessárias elucidações sobre os fatores meteorológicos mais fortemente correlacionados ao desenvolvimento da doença e os intervalos de tempo entre a sua ocorrência e o aparecimento de sintomas.

Desta forma, os objetivos gerais deste trabalho foram: i) desenvolver um modelo do desenvolvimento e da produtividade do cacaueteiro; ii) elucidar os fatores atuantes sobre a ocorrência de vassoura-de-bruxa do cacaueteiro em diferentes intervalos de tempo até o surgimento da doença em ramos e frutos morango.

CAPÍTULO 1

MODELO DE DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DO CACAUEIRO (*Theobroma cacao* L.)

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, o manejo dos cacauais no Brasil foi altamente desestimulado pelos preços vigentes para as amêndoas (CEPLAC, 2004). Em contrapartida, após a introdução da vassoura-de-bruxa nas lavouras do sul da Bahia, o manejo regular das lavouras tornou-se fator determinante para a produção (Luz *et al*, 1997). O desenvolvimento e produção do cacauero são extremamente dependentes das condições climáticas predominantes (Alvim, 1975). Neste contexto, a modelagem do desenvolvimento e da produtividade do cacauero para simulação de eventos fenológicos e da produção em função do clima pode servir como ferramenta auxiliar relativamente simples para o monitoramento das lavouras manejadas.

A modelagem geralmente é utilizada em duas vertentes principais, as quais podem contemplar o desenvolvimento de modelos para cacauero. A primeira vertente inclui o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e previsão, considerando que o comportamento de uma variável pode ser simulado em função de suas relações com outras variáveis (Thornley e Johnson, 1990). Neste sentido, o modelo para simulação do desenvolvimento e

da produtividade do cacaueteiro poderá processar as condições climáticas monitoradas na lavoura em tempo real para gerar as características atuais da cultura. Este tipo de informação deverá servir como ferramenta de manejo do cacaueteiro, podendo ser empregada em conjunto com diferentes métodos de controle fitossanitário, incluindo controle químico e biológico de doenças.

A segunda vertente de utilização da modelagem inclui o desenvolvimento de modelos com finalidade de geração de conhecimento científico. Neste sentido, o detalhamento necessário ao desenvolvimento de modelos evidencia os pontos em que não se dispõem de informação científica específica. Este fato estimula a pesquisa científica para geração de conhecimento em diferentes áreas de estudo. Além disso, em algumas situações, os modelos computacionais podem substituir a experimentação no campo, constituindo-se portanto em uma ferramenta de aplicação prática e de baixo custo para a pesquisa científica (Thornley e Johnson, 1990). Neste sentido, a construção de modelos para o desenvolvimento e a produtividade do cacaueteiro poderá servir como estímulo à pesquisa em áreas do conhecimento onde faltam informações detalhadas sobre a cultura.

Dentre as variáveis meteorológicas freqüentemente introduzidas nos modelos de desenvolvimento, a temperatura destaca-se como determinante da ocorrência e da intensidade dos diferentes processos fisiológicos, notoriamente para a fotossíntese, respiração e a evapotranspiração. No cacaueteiro, as temperaturas determinam a ocorrência de lançamentos foliares e da floração (Alvim, 1975). Neste sentido, a soma térmica aparece como uma forma adequada de associação entre a temperatura e os fenômenos fenológicos, que deverá ser incorporada ao modelo modular da cultura do cacaueteiro (Milde e Sgrillo, 1993). Além desta, outras associações entre clima e fisiologia da cultura são necessárias ao modelo, como forma de representar os mecanismos e processos envolvidos no metabolismo da cultura.

Sendo assim, os objetivos do presente trabalho foram:

- Desenvolver um modelo mecanístico determinístico dinâmico modular para simulação do desenvolvimento e da produtividade do cacaueteiro
- Definir a soma térmica para os diferentes estádios fenológicos da cultura do cacaueteiro

2. REVISÃO DE LITERATURA

O desenvolvimento das culturas e a sua produtividade dependem de diversos fatores, que estão compreendidos nas relações solo-planta-atmosfera. O clima exerce papel essencial, uma vez que os processos fisiológicos das culturas são parcialmente influenciados pelas condições climáticas dominantes. A temperatura influencia amplamente os processos de fotossíntese, respiração e evapotranspiração. A intensidade e a qualidade da radiação interferem na fotossíntese e na evapotranspiração. A disponibilidade de água no solo tem efeito sobre a evapotranspiração, a translocação e a partição de assimilados (Larcher, 1986).

Dada a complexidade de fatores que atuam sobre as culturas, a utilização de técnicas de modelagem destaca-se como ferramenta interessante à análise do seu metabolismo. Os modelos utilizam informações específicas da cultura, por meio de linguagem matemática, para simular respostas prováveis daquela com base em informações ambientais introduzidas no modelo (Thornley e Johnson, 1990). Desta forma, pode-se obter uma simulação da produtividade esperada, baseando-se no impacto das condições meteorológicas sobre os fatores que influenciam a produtividade da cultura.

A modelagem do desenvolvimento e da produtividade de uma cultura é basicamente uma metodologia onde são agrupados organizadamente os processos e as interações que determinam as taxas de crescimento e desenvolvimento da cultura. O modelo é a representação simplificada de um

sistema, que por sua vez, constitui-se na parte limitada da realidade onde vários elementos estão inter-relacionados. A simulação é a atividade de se construir modelos matemáticos e comparar suas características em relação às características do sistema modelado (De Wit, 1982). Os modelos de desenvolvimento e crescimento das culturas podem ser divididos basicamente em dois tipos: Modelos empíricos ou descritivos, e Modelos mecanísticos ou explanatórios (Loomis *et al.*, 1979).

Os modelos empíricos são desenvolvidos utilizando-se uma base de dados, de onde são extraídas as relações estatísticas entre as diferentes variáveis. Nestes modelos são simplesmente realizadas descrições matemáticas dos dados, sem considerar a compreensão científica das relações entre as variáveis envolvidas. Os modelos mais simples de crescimento das culturas constituem-se de relações estatísticas entre o acúmulo de matéria seca e as variáveis que se relacionam ao desenvolvimento das culturas (Rouse, 1988). Para cacaueteiro, alguns modelos empíricos foram desenvolvidos relacionando acúmulo de matéria seca a características morfológicas da cultura e a precipitação pluviométrica (Balasimha e Nair, 1989; Alvim, 1987).

Para o desenvolvimento de modelos mecanísticos consideram-se os princípios teóricos contidos no sistema para explicar o desenvolvimento e o crescimento das culturas. Nestes modelos é incorporado maior detalhamento fisiológico das culturas, o que destaca seu realismo biológico (Loomis *et al.*, 1979). Outra característica destes modelos é a sua organização hierárquica, a qual interliga diferentes níveis de detalhamento do sistema. Além disso, os modelos mecanísticos do desenvolvimento e da produtividade de culturas são multidisciplinares uma vez que reúnem informações adquiridas em diferentes áreas de conhecimento, incluindo fisiologia vegetal, climatologia, genética, fitopatologia, solos, informática, entre outras (Rouse, 1988).

Em outras abordagens, os modelos também podem ser classificados como determinísticos ou probabilísticos, caso seus resultados incluam nenhum ou algum grau de probabilidade respectivamente. Geralmente os modelos mecanísticos são determinísticos, já que não apresentam grau de probabilidade atrelado às suas respostas, dada a complexidade de suas relações. Também devido à sua complexidade, os modelos mecanísticos tendem a apresentar piores ajustes estatísticos em comparação com os

modelos empíricos. Finalmente, os modelos podem também ser classificados como dinâmicos, quando um das suas fontes de variação é o tempo. Nesta classificação, no entanto, a função do tempo pode ser substituída por uma função de acúmulo térmico ou graus-dia (Hunt, 1982).

Os modelos mecanísticos são constituídos de sub-modelos que explicam individualmente os processos de crescimento das culturas em função do estado atual das plantas e da influência de variáveis bióticas e abióticas (Loomis *et al.*, 1979). Este formato se encaixa no conceito de modularidade, conforme realizado por Porter *et al.* (1999).

Os modelos modulares têm como característica sua estrutura eficiente e flexível, uma vez que dividem o sistema em partes independentes capazes de explicar mecanismos biológicos separadamente, as quais são interligadas, a fim de representar o sistema (Reynolds & Acock, 1997). A essência destas estruturas está na capacidade de cada módulo em se relacionar diretamente aos processos reais comuns que ocorrem na cultura, representando separadamente funções disciplinares distintas; utilizar variáveis que representam valores mensuráveis, tanto na entrada como na saída do modelo e validar-se independentemente de outros módulos (Reynolds & Acock, 1997).

A maioria dos parâmetros relacionados à fisiologia do cacauero, necessários à parametrização do modelo mecanístico de desenvolvimento e produtividade, já foi determinada. As taxas máximas de assimilação de carbono do cacauero observadas em estudos conduzidos em cacauais antigos foram em média de $180 \mu\text{gCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Hutcheon, 1977; Raja Harun e Hardwick, 1986). Por outro lado, em estudos mais recentes conduzidos em clones melhorados, foram constatadas taxas máximas de assimilação superiores a $350 \mu\text{gCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Yapp e Hardley, 1994; Miyaji *et al.*, 1997).

Os índices de área foliar (IAF) para cacaueros geralmente têm valores superiores a $7,9 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ e ótimos em torno de $8,5 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ (Monte *et al.*, 1984; Wills, 1981; Zuidema e Leeflaar, 2002). A manutenção de valores altos de IAF na cultura do cacauero é função de alta disponibilidade de água no sistema, que evita queda prematura das folhas. Além disso, valores altos de IAF indicam a capacidade da cultura em sobreviver sob sombreamento (Alvim, 1975).

Além da introdução de parâmetros e de dados climáticos, o modelo deve conter ainda as relações pertinentes entre o clima e o metabolismo da cultura,

verificadas em diversos trabalhos na literatura. O cacaueteiro é influenciado pelo clima durante os meses anteriores à colheita, especialmente durante os períodos de lançamento foliar e floração. Alguns autores desenvolveram modelos simples para a produtividade da cultura que contemplam este tipo de enfoque, como aqueles desenvolvidos por Souza Jr. (1997), Alvim (1987) e Almeida *et al.* (1987).

As variáveis meteorológicas relativas à radiação solar, temperatura e umidade do ar influenciam a fotossíntese do cacaueteiro, que responde a variações sazonais (Balasimha *et al.*, 1991; Balasimha e Rajagopal, 1988; Raja Harun e Hardwick; 1987). As taxas de fotossíntese do cacaueteiro variam com a temperatura, atingindo o máximo no intervalo de 31-33°C, o que é característico em espécies tropicais (Balasimha *et al.*, 1991). Além disso, a cultura do cacaueteiro é considerada uma das mais sensíveis à tensão de água no solo, e longos períodos de seca prejudicam o crescimento, metabolismo e produtividade (Balasimha, 1987; Joly, 1987; Abdul Haris *et al.*, 1999). A partição da matéria seca é afetada pela distribuição das chuvas, e a redução na produtividade de amêndoas de um ano para outro pode ser explicado pela variação na disponibilidade de umidade no solo (Balasimha, 1999).

Os ritmos de lançamentos e floração, apesar de estimulados pelos mesmos fatores climáticos, normalmente não ocorrem de forma sincronizada, obedecendo a uma seqüência própria (Alvim, 1987). Na Bahia, verificou-se que a falta completa de floração durante os meses de Junho e Julho é altamente correlacionada à falta de atividade cambial, além da presença de alta carga de frutos no mesmo período e o registro de baixas temperaturas, geralmente com médias inferiores a 23°C (Alvim, 1987). Almeida *et al.* (1987) observaram que apesar do efeito predominante da energia sobre a floração do cacaueteiro, é o efeito conjugado da energia e da disponibilidade de água no solo que determina a ocorrência de picos elevados de floração. Augusto (1997) observou, em experimentos de irrigação, que a demanda crítica de água no cacaueteiro ocorre durante os picos de formação de almofadas florais e floração. A irrigação concentrada nestes períodos garante a produtividade da cultura.

Apesar de cultivado em regiões onde as variações climáticas ao longo do ano são relativamente pequenas, o cacaueteiro demonstra acentuadas variações periódicas em lançamentos foliares, devido a fatores exógenos e

endógenos à planta (Alvim, 1975; Alvim, 1984). Altas temperaturas, geralmente superiores a 28°C, associadas à transição do período seco para o período úmido estimulam os lançamentos foliares em cacau. Este fato é confirmado por um aumento significativo do número de folhas jovens após o reinício do período chuvoso, como verificado por diversos autores (Almeida, 1986; Alvim, 1994; Augusto, 1997). Como fatores exógenos, destacam-se a temperatura e a precipitação, como as variáveis climáticas que mais afetam os lançamentos foliares do cacau (Alvim, 1975 e Alvim, 1984). Como fator endógeno destaca-se o equilíbrio hormonal da planta (Alvim *et al.*, 1974). Foi demonstrado para cacau que o estresse hídrico aumenta a concentração de ácido abscísico (ABA) nas folhas, o que induz a formação da camada de abscisão. Com a queda das folhas antigas, ocorre uma redução da concentração de ABA e aumenta a atividade de citocinina nas gemas do cacau, levando a novos lançamentos foliares (Alvim *et al.*, 1974).

A influência da temperatura no metabolismo do cacau pode ser incorporada à modelagem da cultura utilizando-se o conceito de graus-dia, ou acúmulo diário de temperatura média acima da temperatura basal da cultura, estabelecida como o limite de temperatura abaixo do qual o metabolismo é reduzido ao mínimo. A soma térmica será então a quantidade de graus-dia acumulados até a ocorrência de determinados fenômenos fisiológicos, tais como lançamento de folhas, floração, lançamento e maturação de frutos.

Algumas metodologias para cálculo de graus-dia foram desenvolvidas e utilizadas com sucesso em diversas culturas de ciclo anual e perene. A metodologia padrão utiliza as temperaturas máxima e mínima diárias para cálculo da temperatura média da qual subtrai-se a temperatura basal (Arnold, 1960). Baskerville e Emin (1969) introduziram na metodologia padrão o conceito de limite superior de temperatura, acima do qual não se acumulam graus-dia, uma vez que temperaturas demasiadamente altas também interferem no metabolismo das culturas. Thydesley (1978) pondera que a resposta dos organismos à temperatura é não-linear e portanto, o cálculo de graus-dia acumulados exige um método que concorde com o sistema biológico o qual pretende representar.

Para o cálculo de graus-dia acumulados na cultura do cacau, Almeida (1986) introduziu a metodologia de Graus-dia Penalizados, a qual

inclui na equação o efeito da deficiência de água no solo sobre o desenvolvimento da cultura. Milde e Sgrillo (1993), em experimento realizado no sul da Bahia com cacauero, utilizaram o método de Villa Nova *et al.* (1972) para o cálculo de graus-dia, que contempla o efeito da ocorrência de temperaturas mínimas inferiores à temperatura basal da cultura.

A determinação correta das temperaturas limitantes é de grande importância na determinação da soma térmica para as culturas. A escolha equivocada de valores mínimos pode determinar o acúmulo sistemático de erros diários (Arnold, 1959). Para a cultura do cacauero, utilizou-se inicialmente uma temperatura basal de 10°C (Almeida, 1986). Entretanto, Milde e Sgrillo (1993), utilizando metodologia que minimiza o erro de estimativa do comprimento do ciclo, determinaram a temperatura basal do cacauero como 14,3°C durante o desenvolvimento do fruto.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Dados Utilizados

Os dados utilizados nesta tese foram obtidos de experimento conduzido pela pesquisadora do Centro de Pesquisas da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), Edna Dora Martins Newman Luz. O experimento foi montado na fazenda Caprichosa, município de Camacã, Bahia (Latitude 15,4°S e Longitude 39,5°W) entre julho de 1991 a outubro de 1994.

A área experimental foi constituída de 100 plantas híbridas de cacaueteiro e bordadura de 10 plantas em todas as direções. No início do experimento as plantas tinham 6 anos de idade e espaçamento de 3 x 3 m. A cobertura permanente foi feita com Eritrina (*Erythrina* spp.), em espaçamento de 9 x 9 m.

Dentre as 100 plantas selecionadas e numeradas, escolheram-se ao acaso 20 plantas e, em cada uma delas, foram marcados 10 galhos localizados em diferentes posições na copa para monitoramento dos lançamentos foliares (LANC). Todos os ramos marcados foram contados, e semanalmente, os novos lançamentos laterais e apicais foram monitorados.

Os números de almofadas florais ativas (ALM), flores, frutos novos e frutos maduros foram monitorados semanalmente em porções de 80cm dos galhos principais e troncos das 20 árvores selecionadas.

Na área experimental foi instalado um abrigo meteorológico contendo termohigrógrafo, termômetros de máxima e mínima, psicrômetro, pluviômetro e

pluviógrafo. Realizaram-se observações horárias de temperatura, chuva e umidade relativa do ar e observações diárias de irradiância solar global.

3.2. Determinação da Soma Térmica

Com os dados meteorológicos de temperatura nos anos agrícolas 1991/1992 e 1992/1993, obtidos em base horária, determinaram-se as temperaturas máxima (T_{max}), mínima (T_{min}) e média (T_{med}) diárias.

Os graus-dia foram acumulados seguindo a metodologia utilizada por Milde e Sgrillo (1993), a qual contempla duas situações: a) temperatura mínima superior à temperatura basal da cultura (T_{bi}) e b) temperatura mínima inferior à temperatura basal da cultura.

$$a) T_{max} > T_{min} > T_{bi}$$

$$GD = [((T_{max} - T_{min}) / 2) + (T_{min} - T_{bi})] \quad (1)$$

$$b) T > T_{bi} \geq T_{min}$$

$$GD = [((T_{max} - T_{bi}) / (T_{max} - T_{min})) \times (T_{min} - T_{bi}) / 2] \quad (2)$$

A temperatura basal utilizada neste experimento foi 14,3°C, determinada por metodologia que minimiza o erro (Milde e Sgrillo, 1993). Os dados fenológicos da cultura nos dois anos foram plotados em função dos graus-dia e as diferentes somas térmicas até a ocorrência dos eventos fenológicos foram contabilizadas e comparadas.

3.3. Desenvolvimento do Modelo

O modelo modular para a cultura do cacaueiro foi desenvolvido utilizando o software Model Maker 3 (Cherwell, 1997), o qual é caracterizado

por permitir uma melhor visualização da seqüência e das relações entre os módulos. Neste trabalho foram desenvolvidos os módulos: Clima, Balanço de Carbono, Acúmulo Térmico, Acúmulo de Matéria Seca em Folhas, Acúmulo de Matéria Seca em Frutos e Balanço Hídrico (Figura 1).

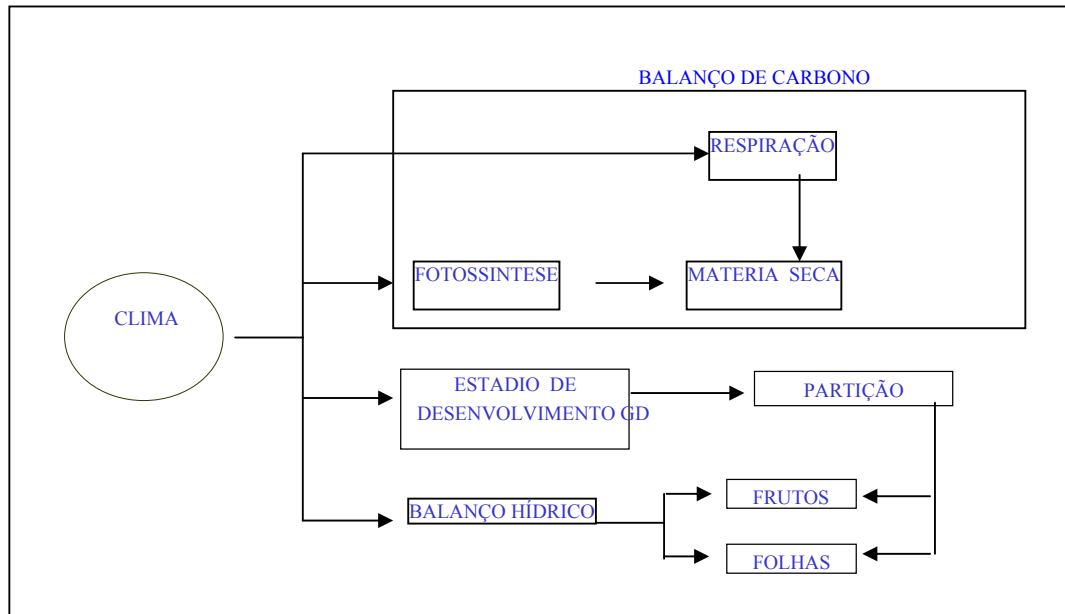


Figura 1 - Representação esquemática do modelo de produtividade do cacauero.

3.3.1. Módulo Clima

Este módulo totalizou os dados meteorológicos introduzidos no modelo em base diária. As variáveis utilizadas foram: temperaturas máxima, mínima e média ($^{\circ}\text{C}$), precipitação (mm), umidade relativa do ar (%) e radiação solar global ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$). Além disso, entraram neste módulo os cálculos de Pressão de Saturação de Vapor (e_s) e Pressão Atual de Vapor (e_a), conforme as equações (Allen *et al.*, 1998):

$$es = [es(T_{max}) + es(T_{min})] / 2 \quad (3)$$

es: Pressão de Saturação de Vapor Diária (hPa)

es(T_{max}): Pressão de Saturação de Vapor à Temperatura Máxima (hPa)

es(T_{min}): Pressão de Saturação de Vapor à Temperatura Mínima (hPa)

$$es(T_{max}) = 6,1078 \times \exp[(17,27 \times T_{max}) / (237,3 + T_{max})] \quad (4)$$

$$es(T_{min}) = 6,1078 \times \exp[(17,27 \times T_{min}) / (237,3 + T_{min})] \quad (5)$$

$$ea = [es(T_{min}) \times (Ur_{max})/100 + es(T_{max}) \times (Ur_{min})/100] / 2 \quad (6)$$

ea : Pressão Atual de Vapor (hPa)

Ur_{max} : Umidade Relativa do Ar Máxima Diária (%)

Ur_{min} : Umidade Relativa do Ar Mínima Diária (%)

A radiação foi calculada diariamente através do Balanço de Ondas Curtas (BOC), como função da Radiação Global (Rg) e do albedo da cultura "e do Balanço de Ondas Longas (BOL) no dossel, como função da temperatura e umidade do ar. O Balanço de Ondas Longas foi calculado por meio da equação geral para a cultura de referência (Allen, 1998). O albedo de 0,20 foi utilizado para a cultura do cacauzeiro, conforme realizado por Butler e Miranda (1984).

$$BOC = Rg \times (1-rf) \quad (7)$$

BOC: Balanço de Ondas Curtas (MJ.m⁻².d⁻¹)

Rg: Radiação Global (MJ.m⁻².d⁻¹)

rf: Albedo da cultura

$$BOL = (4,8989 \times 10^{-9}) \times ((T_{med} + 273,15)^4) \times (0,08 \times (ea)^{(1/2)} - 0,56) \times 0,55 \quad (8)$$

BOL: Balanço de Ondas Longas (MJ.m⁻².d⁻¹)

A Radiação Solar Líquida (RN) foi calculada como a parte do Balanço de Ondas Curtas (BOC) resultante após a interceptação pela vegetação de cobertura, composta por Eritrina (Rcb), descontada do Balanço de Ondas Longas (BOL).

$$RN = Rcb - BOL \quad (9)$$

RN: Radiação Solar Líquida ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$)

Rcb: Radiação após a interceptação da cobertura ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$)

$$Rcb = BOC \times \exp(-K_e \times IAF_e) \quad (10)$$

K_e : Coeficiente de extinção da vegetação de sombreamento

IAF_e : Índice de Área Foliar da vegetação de sombreamento ($m^2.m^{-2}$)

O Coeficiente de extinção (k_e) da vegetação de sombreamento (Eritrina) foi fixado em 0,6 e o Índice de Área Foliar da Eritrina utilizado foi $0,2 m^2.m^{-2}$, conforme observado por Zuidema e Leffelaar (2002).

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) utilizada pela cultura do cacauero foi calculada como função da radiação de ondas curtas que atingiram o dossel (R_{cc}), após a interceptação da vegetação de sombreamento (R_{cb}). Para este cálculo, considerou-se que em média, metade da radiação diária que atinge o dossel está no intervalo de comprimento de ondas aproveitado pelas plantas para a fotossíntese (Penning de Vries *et al.*, 1989).

$$RFA = R_{cc} \times 0,5 \quad (11)$$

RFA: Radiação Fotossinteticamente ativa ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$)

$$R_{cc} = R_{cb} \times (1 - \exp(-K_i \times IAF_c)) \quad (12)$$

R_{cc} : Radiação de ondas curtas que atingem o dossel ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$)

K_i : Coeficiente de Extinção do Cacauero

IAF_c : Índice de Área Foliar do Cacauero ($m^2.m^{-2}$)

O Coeficiente de extinção (ki) foi fixado para a cultura do cacauero neste trabalho em 0,62, conforme observado por Zuidema e Leffelaar (2002).

3.3.2. Módulo Balanço de Carbono

A área foliar para a cultura do cacauero foi considerada constante, com Índice de Área Foliar (IAFc) máximo de 10 m² de Folha/m² de solo, já que o enfoque do modelo é a simulação em plantas adultas (Zuidema e Leffelaar, 2002). A Assimilação Máxima de referência da cultura do cacauero (Amr) foi fixada em 180 µgCO₂.m⁻².s⁻¹, à temperatura de referência (Tr) de 20°C, conforme verificado por Raja Harun e Hardwick (1986) em cacaueros antigos, semelhantes àqueles utilizados neste trabalho. A Assimilação Máxima foi corrigida em função da variação de temperatura, segundo a equação:

$$A_m = A_{mr} \times (T_m - T_{bi}) / (T_r - T_{bi}) \quad (13)$$

Am: Taxa de Assimilação Máxima à Temperatura Média (µgCO₂.m⁻².s⁻¹)

Amr: Assimilação Máxima de referência do cacauero (µgCO₂.m⁻².s⁻¹)

T_m: Temperatura Média (°C)

T_{bi}: Temperatura Basal do Cacauero (°C)

T_r: Temperatura de Referência (°C)

A fotossíntese bruta (Fg) foi estimada através do modelo hiperbólico proposto por Goudriaan (1986).

$$F_g = 0,68 \times (A_m / k_i) \times N \times 3600 \times (10^{-6}) \times \ln((A_m + \delta) / (A_m + (\delta \times \exp(-k_i \times IAFc)))) \quad (14)$$

$$\delta = E \times k_i \times RFA$$

Fg: Fotossíntese Bruta (g MS. m⁻².d⁻¹)

N: Comprimento do dia (horas)

E: Eficiência de uso da radiação (µgCO₂.J⁻¹)

IAFc: Índice de Área Foliar (m².m⁻²)

A respiração total (Resp_T) foi introduzida no modelo em duas partes: Respiração de Crescimento (Resp_C) e Respiração de Manutenção (Resp_M).

A respiração de crescimento do cacauero (Resp_C), que representa o gasto energético da cultura para a produção de novos compostos orgânicos, foi fixada como função da fotossíntese bruta (Fg), conforme realizado por Zuidema e Leffelaar (2002):

$$\text{Resp}_C = 0,129 \times Fg \quad (15)$$

Resp_C: Respiração de crescimento do cacauero (g MS. m⁻². d⁻¹)

Fg: Fotossíntese bruta (g MS. m⁻². d⁻¹)

A respiração de manutenção (Resp_M), que constitui o consumo de energia necessário para a organização estrutural da planta, foi introduzida no modelo como função do peso seco acumulado da cultura (W) e da variação de temperatura (McCree, 1974; Zuidema e Leffelaar, 2002).

$$\text{Resp}_M = 0,0047 \times W \times Q10^{(T_{med}-T_{bi})/10} \quad (16)$$

Resp_M: Respiração de manutenção do cacauero (g MS. m⁻². d⁻¹)

W: Peso seco acumulado pela cultura (g MS/m²)

Q10: Fator de incremento da Manutenção

O balanço diário de carbono foi definido então como a matéria seca resultante da diferença entre a assimilação e a respiração diárias do cacauero. O resultado do balanço diário foi integrado no tempo, de forma a totalizar o acúmulo de matéria seca na planta (W).

3.3.3. Módulos Desenvolvimento e Partição de Matéria Seca

O desenvolvimento da cultura foi acompanhado com base na soma térmica, sendo que os graus-dia foram acumulados segundo a metodologia de Milde e Sgrillo (1993) já descrita.

À medida que se acumularam os totais de graus-dia exigidos pela cultura para a ocorrência de eventos fenológicos, tais como lançamentos foliares e frutificação, o módulo referente à partição de assimilados distribuiu a assimilação diária entre os órgãos da planta. Desta forma, pode-se evidenciar as épocas de ocorrência dos eventos fenológicos do cacaueteiro, bem como as épocas de colheita de frutos. Os coeficientes de partição para folhas e frutos utilizados neste trabalho foram semelhantes ao utilizado por Zuidema e Leffelaar (2002).

3.3.4. Módulo Balanço de Água no Solo

A evapotranspiração da cultura do cacaueteiro (ET) foi estimada utilizando-se o modelo proposto por Penman e Monteith, posteriormente parametrizado pela FAO (Allen *et al.*, 1998).

$$ET = 0,408 \times ((\Delta \times RN) + (\rho \times c_p \times (VPD / r_a))) / (\Delta + \gamma \times (1 + r_c / r_a)) \quad (17)$$

ET: Evapotranspiração diária (mm)

RN: Radiação Solar Líquida ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

ρ : Densidade média do ar à pressão constante ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

c_p : calor específico do ar à pressão constante ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

Δ : rampa da curva de pressão de vapor ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

γ : Constante Psicrométrica ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

VPD: Déficit de Pressão de Vapor (hPa)

r_a : Resistência aerodinâmica da cultura ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)

r_c : Resistência da cultura ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)

$$VPD = e_s - e_a \quad (18)$$

$$\Delta = (4098 \cdot e_s) / (T_{med} + 237,3)^2 \quad (19)$$

A resistência aerodinâmica do cacauzeiro (r_a) foi fixada em $2,2 \text{ s. m}^{-1}$, calculada em função das condições meteorológicas médias da região cacauzeira da Bahia (Miranda *et al.*, 1994). A resistência da cultura (r_c) foi introduzida como função da resistência estomática (r_e) e do Índice de Área Foliar da cultura (IAFc).

$$r_c = (r_e) / 0,5 \times \text{IAFc} \quad (20)$$

r_e : Resistência Estomática (s.m^{-1})
 IAFc: Índice de Área Foliar ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)

A resistência estomática (r_e) foi calculada como função da água disponível no solo (ARM), conforme observado por Augusto (1997):

$$r_e = \exp \{19,225 - \{[2025,839 \times \ln (\text{ARM})] / \text{ARM}\} + 7867,470 / \text{ARM}\} \quad (21)$$

ARM: Água disponível no solo (mm)

O balanço hídrico foi introduzido no modelo como a diferença diária entre a evapotranspiração (ET) e a chuva. A água disponível no sistema (ARM) foi constituída pelo acúmulo das diferenças diárias, sendo o valor máximo alcançado na capacidade de campo (CC), determinado na região cacauzeira da Bahia segundo Machado *et al.* (1979).

$$\text{Penalização} = \text{ARM} / \text{CC} \quad (22)$$

CC: Capacidade de Campo (mm)

À medida que a estimativa da disponibilidade de água no solo foi reduzida em função da redução da precipitação observada para valores

inferiores às perdas por evapotranspiração, foi calculada na simulação uma taxa de disponibilidade de água no solo em relação à capacidade de campo. Esta taxa foi introduzida no módulo de partição de matéria seca de frutos e folhas para redução do acúmulo de matéria seca em frutos e para a antecipação do acúmulo de matéria seca em folhas.

3.4. Teste de Sensibilidade dos Parâmetros

A influência dos parâmetros introduzidos no modelo sobre a simulação final da produtividade de amêndoas secas foi verificada por meio do teste de sensibilidade dos parâmetros. Para tanto, os valores obtidos em literatura e utilizados no Modelo Cacau, dos parâmetros Assimilação Máxima de Referência (AMR), Índice de Área Foliar do Cacaueiro (IAFc) e da vegetação de sombreamento (IAFe) e Resistência Aerodinâmica do cacaueiro (r_a), foram acrescidos e reduzidos em 10 e 20% individualmente, enquanto os demais parâmetros foram mantidos inalterados.

As estimativas de produtividade de amêndoas secas obtidas nas simulações realizadas com cada um dos valores atribuídos aos parâmetros foram comparadas às estimativas geradas na simulação realizada com os parâmetros originais inalterados. Desta forma, avaliou-se proporcionalmente a influência destes parâmetros nas estimativas de produtividade de amêndoas secas geradas pelo modelo Cacau.

3.5. Validação do Modelo

Com o modelo completo, composto de todos os módulos devidamente interligados, executou-se a validação do modelo por meio de uma simulação utilizando os dados climáticos das safras 1991/1992, 1992/1993 e 1993/1994.

Obtiveram-se estimativas referentes à produtividade nas colheitas Temporã e Principal, simuladas em duas situações de disponibilidade de água no solo, presença e ausência de déficit hídrico. Os resultados estimados de produtividade de amêndoas secas nas duas situações foram comparados aos

totais reais de amêndoas secas coletadas em frutos sadios e doentes colhidos no mesmo período da simulação.

As estimativas de épocas de lançamentos foliares foram obtidas pela simulação da safra 1993/1994 utilizando o Modelo Cacau em duas situações de disponibilidade de água no solo, presença e ausência de déficit hídrico. Os resultados da simulação foram comparados às ocorrências de fluxos de lançamentos foliares no mesmo período durante o experimento.

3.6. Análise Estatística

As estimativas de produtividade de amêndoas secas e de épocas de lançamentos foliares, obtidas nas simulações realizadas com o Modelo Cacau, foram comparadas estatisticamente com as observações realizadas durante o experimento por meio de cálculo das Correlações de Pearson. Para tanto, foi utilizado o programa Genes, desenvolvido no Departamento de Biologia da Universidade Federal de Viçosa (Cruz, 2001).

4. RESULTADOS

4.1. Clima

As temperaturas médias mensais mantiveram-se entre 18,7°C e 24° C nas safras 91/92, 92/93 e 93/94 (Figura 2). As chuvas tiveram variação temporal durante os três anos de estudo, com os menores totais pluviométricos mensais localizados em Abril/92, Março/93, Julho a Setembro/93 e Agosto/94 (Figura 2).

4.2. Soma Térmica

Constatou-se pelo experimento que o ciclo anual do cacaueteiro se completa em 3000GD, quando novo ciclo da cultura foi iniciado.

Quanto aos lançamentos foliares, verificaram-se três fluxos de lançamentos foliares por safra, os quais ocorreram em intervalos regulares de graus-dia (Figura 3). O primeiro fluxo de lançamentos foliares iniciou-se em 200 GD acumulados a partir do início do ciclo da cultura nos dois anos (Figura 3). O segundo fluxo de lançamentos foliares iniciou-se em 1100 GD nas duas safras. O terceiro fluxo de lançamentos foliares ocorreu em aproximadamente 1900 GD acumulados, nas duas safras estudadas (Figura 3).

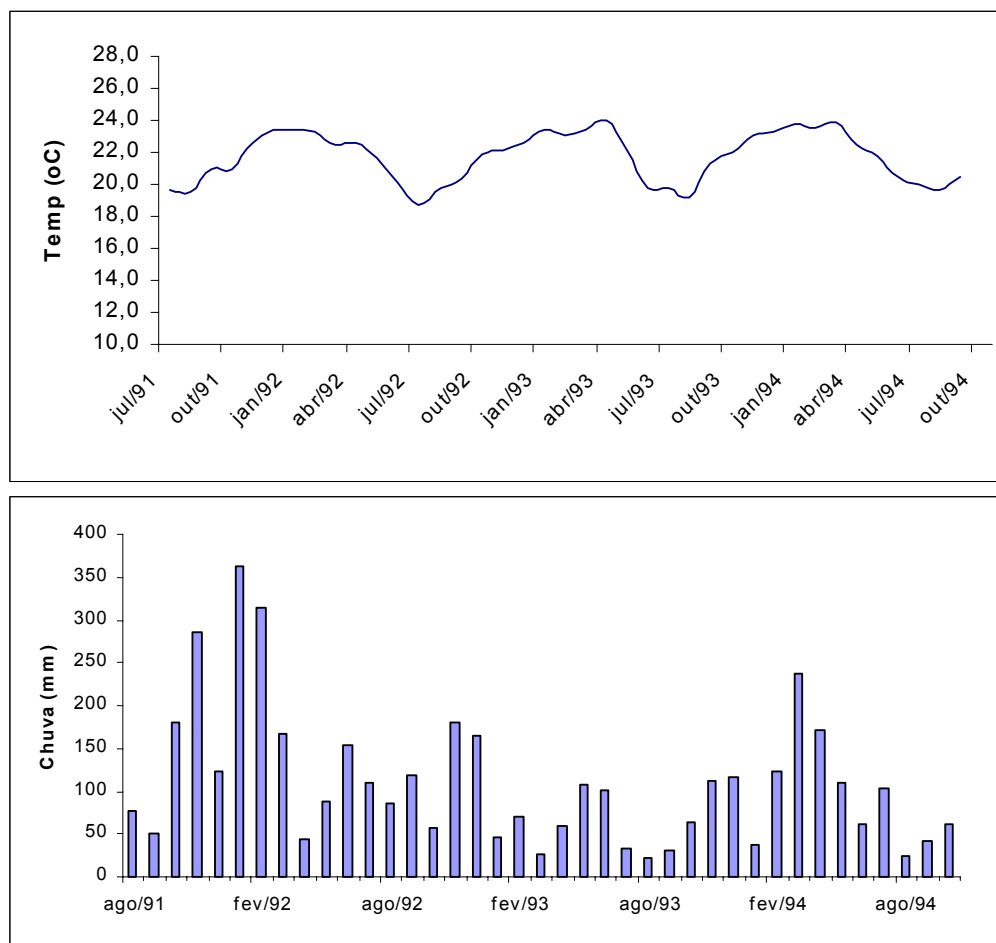


Figura 2 - Temperatura Média (°C) e Precipitação Pluviométrica (mm) mensais registradas durante as safras 91/92, 92/93 e 93/94.

Os dois primeiros fluxos anuais de lançamentos foliares coincidiram com uma redução da precipitação seguida da ocorrência de chuvas intensas nas semanas anteriores (Figura 3). No primeiro ano de experimento, verificou-se um ligeiro atraso no segundo lançamento foliar anual coincidindo com a ocorrência de chuvas intensas nas semanas anteriores. O terceiro fluxo anual de lançamentos foliares ocorreu independentemente da redução de chuvas. A formação de Almofadas Florais coincidiu nos dois anos de experimento, com um incremento expressivo do número de almofadas a partir de 400 GD e redução em 2800 GD (Figura 3). Neste intervalo, verificaram-se

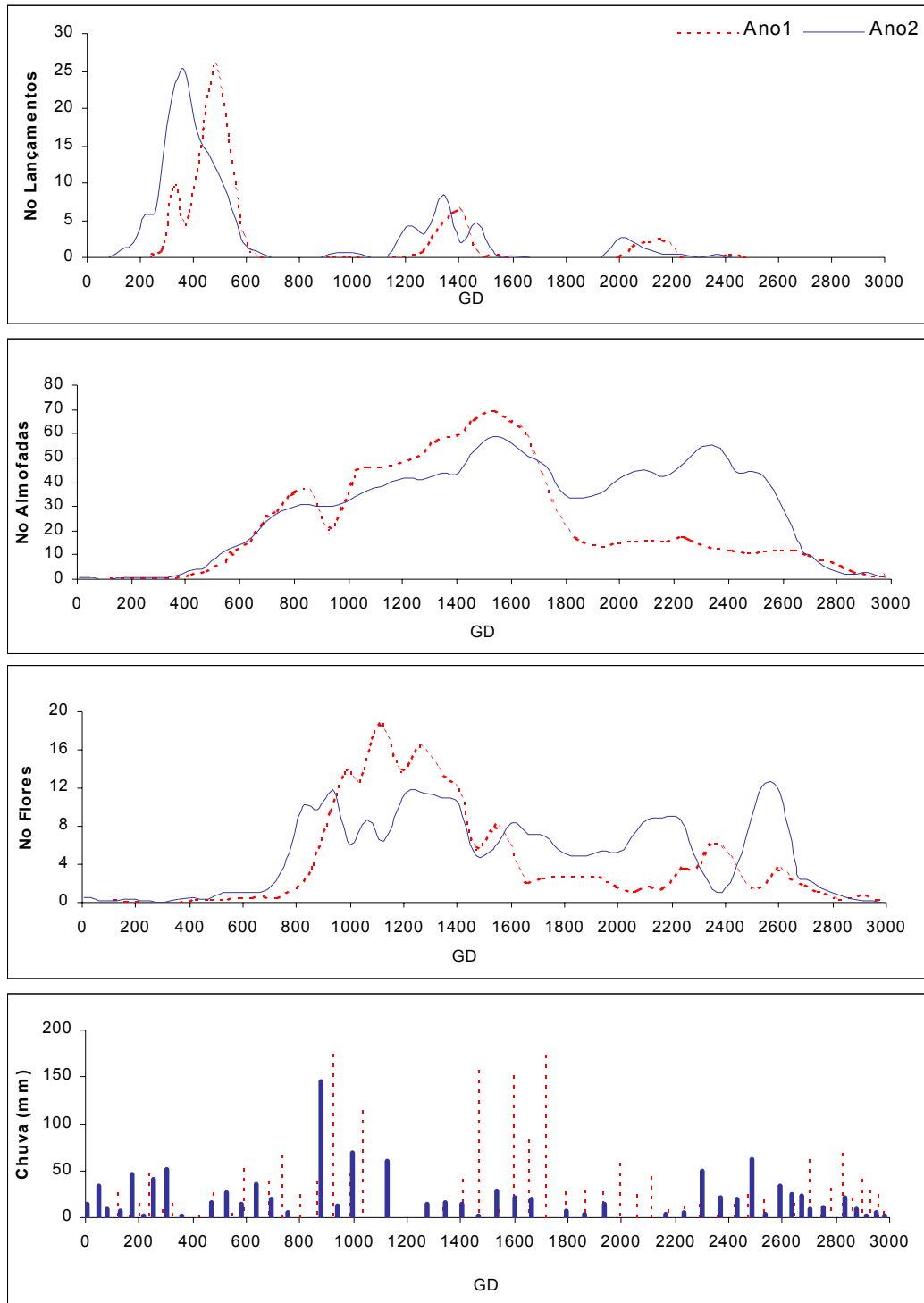


Figura 3 - Número de lançamentos foliares, número de almofadas florais e número de flores e precipitação pluviométrica (mm) observados em duas safras em função de graus-dia acumulados (GD).

dois picos de aparecimento de almofadas, os quais não coincidiram em número de graus-dia acumulados.

A floração do cacauete ocorreu em torno de 100 GD após o aparecimento de almofadas florais nos dois anos de experimento (Figura 3). A frutificação seguiu a mesma tendência observada para almofadas e flores, com dois picos anuais. A ocorrência de dois picos anuais de florescimento e frutificação determinou as duas colheitas anuais: principal e temporã.

O período observado entre a ocorrência de picos de frutos novos e de colheita foi aproximadamente de 1400 GD.

4.3. Modelo Cacau

O modelo de produtividade de amêndoas secas do cacauete foi capaz de simular as safras temporã e principal dos anos agrícolas 1992/1993 e 1993/1994, utilizando os dados climáticos do mesmo período (Figura 4).

A introdução de um módulo referente a penalização da produtividade em função da ocorrência de déficit hídrico reduziu a estimativa final de produtividade de amêndoas secas do cacauete (Figura 4). Em média, verificou-se redução na produtividade de amêndoas secas em 9,5% e 8,5% nas safras principal e temporã, respectivamente, quando se aplicou a penalização por deficiência hídrica do solo. Desta forma, a estimativa de produtividade obtida na simulação aproximou-se da produtividade total observada na área.

A análise de correlação entre a produtividade de amêndoas secas estimada e observada na área foi realizada utilizando-se as quatro safras dos anos agrícolas 1992/1993 e 1993/1994. No entanto, o número reduzido de pontos limitou a capacidade do teste em apontar significância na análise. Sendo assim, optou-se pela análise visual de forma que aparentemente houve bom ajuste do modelo testado (Figura 5).

As épocas em que se iniciaram os lançamentos foliares estimados em função de graus dia pelo modelo coincidiram com a observação dos fluxos de lançamentos foliares no experimento. Foram estimados três fluxos de

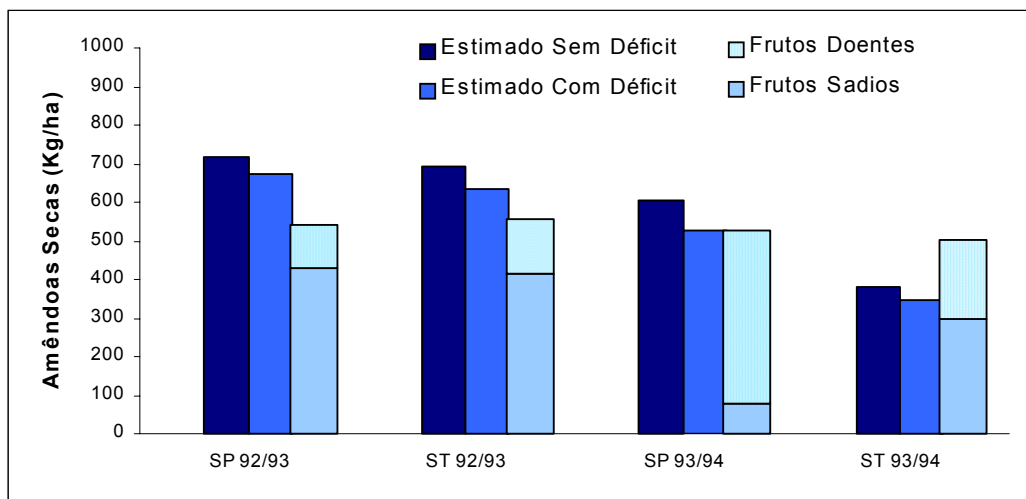


Figura 4 - Comparação entre a produtividade de amêndoas secas simulada em duas condições de água no solo (com e sem déficit hídrico) e a produtividade de amêndoas secas colhidas em frutos saudios e doentes observados no campo, no mesmo período da simulação.

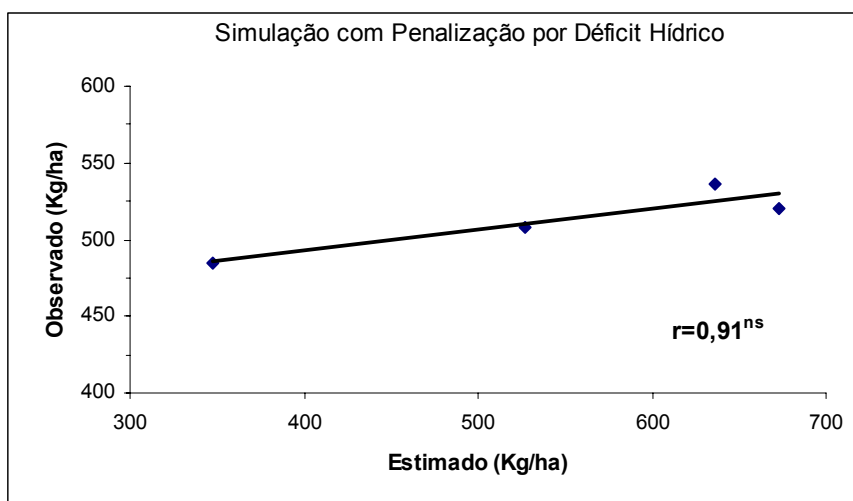


Figura 5 - Análise de correlação entre a produtividade de amêndoas secas observada e estimada pelo Modelo Cacau (Kg/ha) em simulação utilizando penalização da produtividade pela ocorrência de déficit hídrico. ^{ns} Não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

lançamentos foliares durante o ano agrícola 93/94, nas simulações com e sem déficit hídrico (Figura 6).

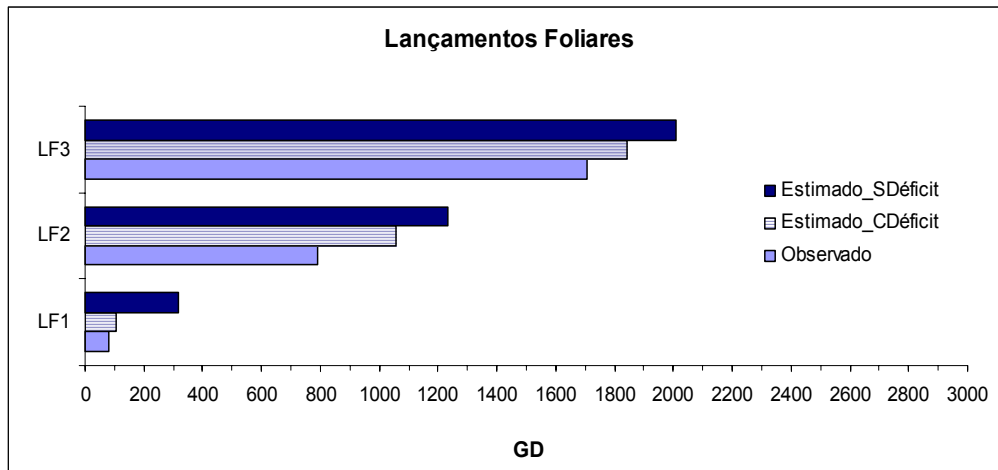


Figura 6 - Comparação entre as épocas em graus-dia de lançamentos foliares observadas no experimento e estimadas em simulações com e sem ocorrência de déficit hídrico no solo.

Pela análise de regressão entre as épocas de lançamentos foliares observadas e estimadas, não se constatou diferença estatística significativa entre as épocas observadas e as simuladas com e sem déficit hídrico do solo (Figura 7). Sendo assim, utilizando-se as duas metodologias de simulação de épocas de lançamentos foliares, com ou sem déficit hídrico do solo, obtém-se estimativas estatisticamente similares às observações de lançamentos foliares no mesmo período.

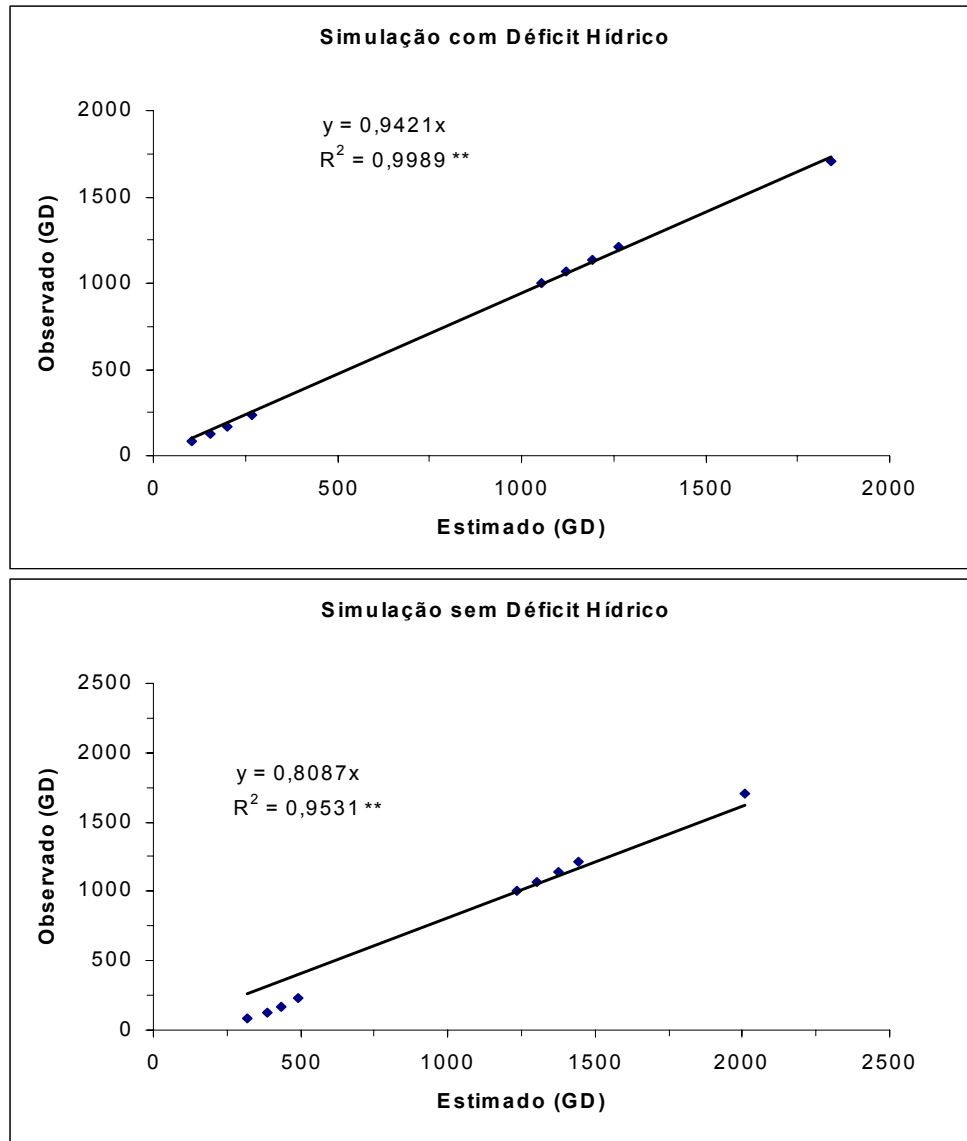


Figura 7 - Análise de regressão entre as épocas de lançamentos foliares observadas e estimadas em simulações com e sem ocorrência de déficit hídrico no solo. ** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

4.4. Análise de Sensibilidade de Parâmetros

Dentre os parâmetros testados na análise de sensibilidade, a Assimilação Máxima de Referência (AMR) foi mais sensível em relação à produtividade de amêndoas secas calculada (Figura 8). A variação positiva de AMR em até 20% gerou incremento de 5 a 10 % na produtividade de

amêndoas estimada. Os demais parâmetros apresentaram sensibilidade pouco expressiva sobre a produtividade de amêndoas secas estimada pelo modelo.

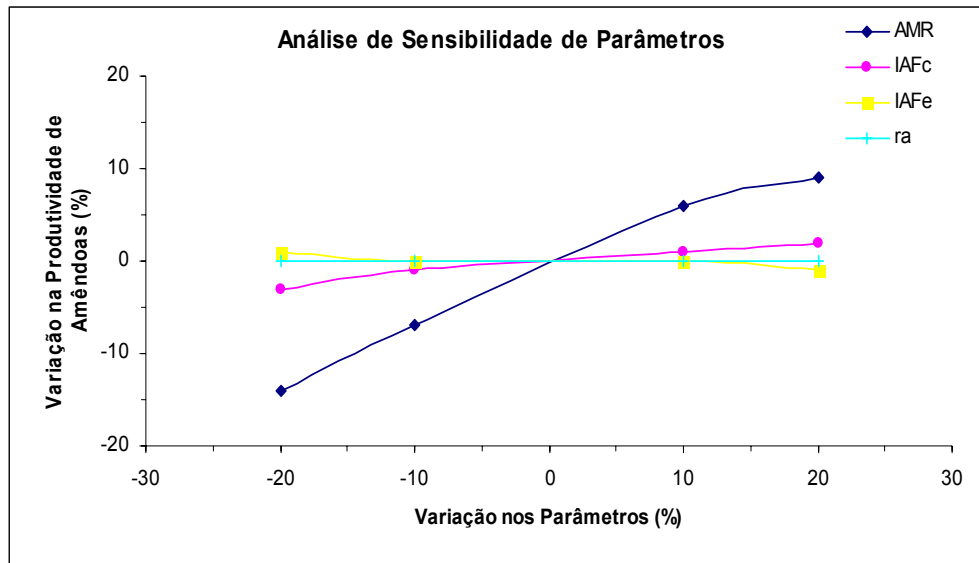


Figura 8 - Análise de Sensibilidade dos parâmetros utilizados no cálculo da produtividade de amêndoas secas pelo Modelo Cacao. AMR: Assimilação Máxima de Referência; IAFc: Índice de Área Foliar do Cacaueiro; IAFe: Índice de Área Foliar da vegetação de sombreamento; ra: Resistência Aerodinâmica do cacaueiro e CC: Capacidade de Campo.

5. DISCUSSÃO

A periodicidade de lançamentos foliares e da floração em cacauero varia de região para região e dentro da mesma região, de ano para ano. Isto sugere que tais fenômenos estão sob o controle de variações sazonais nas condições climáticas, especialmente precipitação e temperatura (Alvim, 1975). Neste trabalho, observou-se a ocorrência periódica de eventos fenológicos do cacauero em intervalos de soma térmica definidos, principalmente para os fluxos de lançamentos foliares e o período total de floração da cultura.

Os lançamentos foliares, apesar de ocorrerem em acúmulos térmicos definidos, sofrem a influência adicional de períodos de baixa pluviosidade. Segundo Alvim *et al.* (1969), existe uma relação entre a disponibilidade de água e os lançamentos foliares. A redução das chuvas, ou o aumento do déficit hídrico, induz a abscisão foliar; e esta provoca quebra de dormência das gemas. Períodos secos induzem a queda prematura das folhas em cacauero, seguida imediatamente por lançamentos foliares intensivos (Alvim, 1975). Os eventuais atrasos observados em lançamentos foliares podem ser atribuídos às variações dos níveis de água no solo, o que também é conhecido pelo termo hidroperiodicidade (Alvim, 1975). Em outros estudos, Alvim (1987) observou que os lançamentos foliares geralmente estão associados à recuperação dos níveis de água no solo após a estiagem em função da ocorrência de chuvas intensas.

A floração do cacaveiro geralmente exhibe grande variação ao longo do ano, mas na maioria das regiões um pequeno número de flores está presente ao longo de praticamente todo o ano (Alvim, 1987). Neste trabalho, almofadas florais foram observadas durante a maior parte do ano, com exceção do período compreendido entre 2800 e 400GD. As drásticas reduções de floração em uma pequena época do ano podem ter sido função da redução de temperaturas associada ao efeito depressivo da carga de frutos, já que naquele período, as plantas estão acumulando matéria seca em frutos (Alvim, 1975). Por outro lado, a ocorrência de picos de almofadas florais não seguiu uma padronização clara em graus-dia acumulados. O aumento e a redução acentuados das chuvas provavelmente exerceu efeito depressivo na floração do cacaveiro (Alvim, 1975; Alvim, 1987; Sale, 1970)

O período de tempo entre a fertilização das flores e a colheita de frutos maduros de cacau é bastante variável entre regiões e entre épocas do ano. Na Bahia, observou-se que os frutos que crescem nos meses mais quentes do ano completam o amadurecimento mais rapidamente (Alvim, 1987). Quando empregada a metodologia de graus-dia para avaliação do comprimento ciclo do fruto do cacaveiro, verifica-se um intervalo aproximado de 1400 GD em todas as colheitas, confirmando a tendência do fruto de cacaveiro em se desenvolver em função da temperatura (Milde e Sgrillo, 1993). Estas observações comprovam a importância do acúmulo diário de temperatura sobre o ciclo dos frutos de cacaveiro, como forma de estimar corretamente as épocas de colheita (End *et al.*, 1987).

A ocorrência de duas colheitas de cacau por ano foi estimada no modelo e corresponde às observações realizadas na região da Bahia, onde regularmente são realizadas duas colheitas por ano (Rocha *et al.*, 1993). Por outro lado, observou-se que nem sempre a safra principal é superior à safra temporã em produção de amêndoas, sendo que esta variação depende das condições climáticas observadas durante todo o ciclo da cultura (Hamakawa, 2002). Com a simulação, observou-se que o modelo foi sensível em destacar os efeitos do clima durante todo o ciclo da cultura na produção de amêndoas.

A produtividade máxima de amêndoas estimada pelo modelo sem a penalização por deficiência hídrica, na safra principal 92/93, foi de 715Kg/ha, o que corresponde ao observado na Bahia nos anos 80, antes da introdução da

vassoura-de-bruxa. Atualmente, a produtividade de alguns clones atinge cerca de 1500 kg/ha. Em plantas não clonadas e suscetíveis à vassoura-de-bruxa, mesmo com manejo adequado, a produtividade é de 400 a 500 kg/ha (Teixeira, 2002). A estrutura modular do Modelo Cacau, assim como a organização de suas equações e parâmetros, facilita a introdução de dados atualizados, obtidos em pesquisas recentes sobre a fisiologia de plantas melhoradas. Desta forma, obter-se-ão estimativas precisas da produtividade de cacauais jovens melhorados geneticamente.

As estimativas de produtividade de amêndoas secas obtidas pela simulação com o Modelo Cacau, incluindo a penalização por ocorrência de deficiência hídrica do solo, aproximaram-se da produtividade da cultura observada no mesmo período, incluindo a colheita de frutos sadios e doentes. No entanto, as análises estatísticas convencionais não apontaram correlações significativas entre os dados estimados e observados, dado o número limitado de pontos testados. Campbel e Madden (1990) discutem que em casos semelhantes, quando não é possível a comparação estatística para a validação do modelo, pode-se optar pela comparação visual em gráficos de dispersão entre os dados estimados e observados.

Ainda utilizando a comparação visual neste estudo, percebe-se a importância da quantificação de frutos doentes, especialmente nas safras principais, para a aproximação entre a estimativa gerada pelo Modelo Cacau e a observação de produtividade de amêndoas secas. A safra principal do cacauero na Bahia geralmente ocorre a partir do mês de outubro, sendo que nos meses anteriores à colheita são registrados altos índices pluviométricos (Rocha *et al*, 1993). Sendo assim, os frutos da safra principal ficam expostos a condições propícias para o desenvolvimento de doenças por um período prolongado de tempo, o que pode gerar maiores perdas em produtividade neste período.

O Modelo Cacau foi eficaz em simular as épocas de ocorrência de fluxos de lançamentos foliares durante o ano. Considerando a importância de se realizar o monitoramento da fenologia da cultura para fins de manejo, a estimativa correta das épocas em que ocorrem os lançamentos foliares constitui-se em uma ferramenta de trabalho potencialmente útil. Além da importância evidente sobre o monitoramento fisiológico da cultura, a

identificação de períodos de disponibilidade de tecido jovem é também necessária ao monitoramento fitossanitário, já que em muitos casos os tecidos jovens são mais susceptíveis a doenças (Wheeler e Suárez, 1993). Por outro lado, a modelagem do desenvolvimento foliar do cacauero pode auxiliar no estudo da ecologia de microorganismos presentes na superfície foliar, os quais podem servir como agentes de controle biológico de doenças (Gianfagna *et al.*, 2003).

Apesar da utilidade do Modelo Cacau em estimar a produtividade de amêndoas secas e as épocas de lançamentos foliares do cacauero, muitos estudos ainda deverão ser feitos no sentido de melhorar a qualidade das informações geradas. A incorporação de um módulo referente à ocorrência de doenças facilitará a obtenção de estimativas mais precisas sobre a colheita de frutos sadios e doentes, o que pode servir como ferramenta de manejo da cultura. Para tanto, a utilização prática do modelo deverá ser testada no campo de forma a se determinar a aplicabilidade de suas estimativas.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se:

1. O ciclo anual do cacauero completa-se em 3000 Graus-dia Acumulados.
2. Verificam-se três lançamentos foliares em cacauero no sul da Bahia, os quais ocorrem em intervalos fixos de graus-dia, com início aproximado aos 200, 1100 e 1900GD, e com influência adicional da ocorrência de períodos secos.
3. A formação de almofadas florais ocorre entre 400 e 2800 GD, com reduções no número de almofadas decorrentes de condições extremas de chuva durante este período.
4. A floração do cacauero tem defasagem positiva de 100 GD em relação à formação de almofadas florais e o aparecimento de frutos novos em cacauero tem defasagem positiva de 200 GD em relação à floração.
5. O modelo modular de desenvolvimento e produtividade do cacauero é capaz de simular a produtividade de amêndoas da cultura em duas safras anuais, baseando-se em informações meteorológicas
6. Com o modelo modular de desenvolvimento e produtividade do cacauero pode-se prever as épocas de ocorrência de fluxos de lançamentos foliares na Bahia.

CAPÍTULO 2

CONDIÇÕES FENOLÓGICAS E CLIMÁTICAS FAVORÁVEIS AO DESENVOLVIMENTO DA EPIDEMIA DE VASSOURA-DE-BRUXA EM RAMOS E FRUTOS DO CACAUEIRO NA BAHIA

1. INTRODUÇÃO

A vassoura-de-bruxa do cacauero é problemática aos produtores na Bahia desde a sua introdução no final dos anos 80 (Rocha *et al.*, 1993). Inicialmente a doença trouxe redução de produção que, associada a um longo período de desvalorização das amêndoas, desestimulou a efetivação de medidas eficazes de controle nos anos subseqüentes (Luz *et al.*, 1997; CEPLAC, 2004).

Ainda hoje são realizados estudos no sentido de se compreender melhor a epidemiologia da vassoura-de-bruxa, com ênfase nas relações representadas no triângulo ambiente-patógeno-hospedeiro (Alves, 2002). Desta forma, pretende-se desenvolver métodos cada vez mais racionais de manejo da cultura e da doença, tendo em vista o baixo estímulo econômico da atividade.

A modelagem das relações entre as variáveis ambientais, o cacauero e *Crinipellis perniciosa* pode ser utilizada como uma estratégia simples e de baixo custo para gerar estimativas sobre o desenvolvimento da cultura e da epidemia, constituindo-se em uma ferramenta potencialmente útil ao manejo

fitossanitário (Luz *et al.*, 1997). Considerando a influência do clima sobre todos os vértices do triângulo da doença, o monitoramento contínuo das variáveis meteorológicas utilizadas no modelo de simulação pode gerar informações sobre o estado atual do patossistema, a serem aplicadas no manejo da fitossanitário da cultura.

Apesar de este patossistema ter sido estudado exhaustivamente, alguns detalhes do mecanismo envolvido no desenvolvimento da epidemia devem ser esclarecidos, a fim de se produzirem simulações cada vez mais condizentes com a realidade observada (Schmidt *et al.*, 1993). As variáveis meteorológicas geralmente relacionadas à ocorrência de vassoura-de-bruxa são a temperatura e a umidade, com influência adicional da presença de tecido hospedeiro suscetível (Schmidt *et al.*, 1993; Andebrhan, 1984; Purdy e Schmidt, 1996). Por outro lado, boas correlações entre as variáveis meteorológicas e fenológicas e o desenvolvimento da doença raramente foram estabelecidas, tendo em vista a complexidade deste sistema (Costa, 1993). Além disso, não foram constatados os intervalos de tempo entre a ocorrência de condições favoráveis à infecção e o aparecimento de sintomas de vassoura-de-bruxa nas diferentes regiões cacaeiras atacadas pela doença. Este tipo de informação é fundamental para o desenvolvimento de modelos de simulação para a epidemia de vassoura-de-bruxa.

Sendo assim, os objetivos do presente trabalho foram: i) determinar o peso das variáveis fenológicas e climáticas sobre as correlações totais com a ocorrência de vassoura-de-bruxa do cacaeiro no sul da Bahia e ii) determinar o intervalo de tempo entre a ocorrência de condições favoráveis e o aparecimento de sintomas de vassoura-de-bruxa em ramos e frutos jovens de cacaeiro.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A vassoura-de-bruxa é a principal doença da cultura do cacaueteiro no Brasil (Alves, 2002). A doença é endêmica da região amazônica, mesma região de origem da cultura do cacaueteiro, onde provoca perdas de produção variando de 30 a 90% (Wheeler e Suárez, 1993). Os primeiros casos de vassoura-de-bruxa do cacaueteiro na Bahia foram identificados em maio de 1989 e a introdução da doença na região é creditada ao transporte de material infectado (Rocha *et al.*, 1993). A disseminação da doença pelas áreas produtoras da Bahia foi responsável pela forte queda de produção no início dos anos 90 (Rocha *et al.*, 1993).

A vassoura-de-bruxa do cacaueteiro é causada por um basidiomiceto que fora denominado inicialmente como *Marasmius perniciosus* e reclassificado como *Crinipellis perniciosa* por Singer em 1942, nome utilizado até hoje (Silva *et al.*, 2002). O patógeno ataca principalmente os tecidos em crescimento, causando diversos sintomas em plântulas e plantas adultas. São observadas alterações em gemas terminais e axilares e em almofadas florais. Os sintomas em frutos decorrem de infecções indiretas através do ataque em flores, produzindo frutos morango ou cenoura, ou de infecções diretas através da epiderme de frutos, produzindo lesões na superfície dos frutos e nas amêndoas (Silva *et al.*, 2002). O nome vassoura-de-bruxa vem do superdesenvolvimento de tecidos meristemáticos vegetativos, provocando hipertrofia e superbrotação de gemas laterais nas plantas atacadas, gerando o aspecto de vassoura. As vassouras têm inicialmente coloração verde (vassouras vegetativas) e tendem

a secar em oito semanas, assumindo a coloração marrom-escura (vassouras necróticas) (Silva *et al.*, 2002).

Crinipellis perniciosa é considerado fungo hemibiotrófico, com duas fases: parasita (biotrófico) e saprofítica (necrotrófica) (CEPEC, 1979). Na fase parasítica, o fungo apresenta micélio monocariótico inchado, encontrado apenas em tecidos vivos. Nesta forma, o fungo causa hipertrofia e hiperplasia, resultando em formação das vassouras em ramos e lesões em almofadas florais e frutos deformados. Na fase saprofítica, observada em tecido morto e meio de cultura, o micélio é dicariótico e fino. Nesta fase, o fungo produz basidiocarpos, que podem produzir basidiósporos durante vários meses. A patogenicidade de *C. perniciosa* é estimulada por substâncias presentes nos tecidos vivos de cacaueteiro, e a ausência deste estimulante em material geneticamente resistente induz o fungo a não desenvolver a fase parasítica, entrando direto na fase saprofítica (CEPEC, 1979; Evans, 1981).

O desenvolvimento de *C. perniciosa* no tecido infectado é muito variável. Em estudos realizados na Amazônia Brasileira, o período observado entre a produção de basidiocarpos e a infecção em ramos e almofadas foi de 2 a 3 meses e em frutos de 3 a 4 meses (Andebrhan, 1984). O período de incubação médio observado em Altamira e Ouro Preto foi de 6 a 10 semanas (Andebrhan *et al.*, 1993). Em Camacã, na Bahia, estimou-se um período de incubação para vassoura-de-bruxa do cacaueteiro de 3 a 4 semanas. As variações observadas no período de incubação do patógeno entre regiões e na mesma região devem-se ao tipo e a idade do tecido infectado, à dose de inóculo e às características do ambiente (Schmidt *et al.*, 1993). O período médio até o secamento de frutos infectados foi de 3 semanas e dos ramos variou entre 3 e 15 semanas. O período médio para a produção de basidiocarpos foi de 6 a 27 semanas para ramos e 11 semanas para frutos. Ocorre esporulação nos tecidos secos no campo por 18 a 21 meses (Luz *et al.*, 1994).

De forma geral, os sintomas de vassoura-de-bruxa do cacaueteiro aparecem em tempo bastante variável, entre 3 e 14 semanas após a infecção, com média de 5 a 6 semanas. Depois que o tecido infectado seca, ocorre um período de 3 a 8 meses até o aparecimento de sinais do fungo (Wheeler e Suárez, 1993).

Fluxos jovens de lançamentos foliares são mais suscetíveis (Wheeler e Suárez, 1993). As folhas de cacauero recém lançadas, com 0,3 a 5 cm de comprimento, são suscetíveis à infecção. E folhas totalmente expandidas também pode haver penetração, mas nelas não se desenvolvem sintomas. Além disso, a suscetibilidade dos frutos à doença varia em diferentes idades. Frutos inoculados com até 12 semanas produzem sintomas de infecção. Frutos entre 13 e 15 semanas não apresentam sinais externos de infecção, mas apresentam amêndoas manchadas. Frutos acima de 15 semanas, ou maiores que 6 cm, não são infectados (Andebrhan, 1984; Wheeler e Suárez, 1993).

O aparecimento de sintomas em flores durante praticamente todo o ano em diversas regiões deve-se ao constante florescimento estendido por longos períodos (Schmidt *et al.*, 1993). Na Amazônia, Andebrhan *et al.* (1993) destacaram a presença de tecido hospedeiro no período de esporulação do patógeno como fator determinante para a ocorrência da doença. Na Bahia, observou-se coincidência entre a alta atividade fenológica do cacauero no início de 1989 e o primeiro aparecimento de vassoura-de-bruxa na região (Rocha *et al.*, 1993).

Como discutido no capítulo anterior, o clima exerce forte influência sobre o desenvolvimento da cultura do cacauero (Purdy e Schmidt, 1996). Mudanças ambientais devem afetar a intensidade de crescimento do hospedeiro e a frutificação do patógeno. Entretanto, haverá claramente períodos no ano em que o hospedeiro estará suscetível ao patógeno, nos fluxos fenológicos. (Rudgard, 1987b).

Em Rondônia, a cultura do cacauero produz uma safra principal no período chuvoso e outra safra menor no período seco. Os lançamentos ocorrem em 3 ou 4 fluxos no período chuvoso (Rudgard, 1987a). Em outros estudos na mesma região, o autor verificou um padrão de infecção em almofadas 1 a 2 semanas após a identificação dos picos de florescimento, ocorridos a cada 6 semanas (Rudgard, 1987b).

Em Altamira, observou-se aumento de lançamentos seguido de aumento de doença. Neste caso, só se observaram picos de doença frente aos picos de lançamentos, os quais coincidiram com a produção de inóculo. Os picos tiveram defasagens médias de 4 a 8 semanas (Andebrhan *et al.*, 1993). Em Ouro Preto, os autores verificaram que a variação climática não foi suficiente

para explicar a incidência da doença em frutos. No entanto, o desenvolvimento inicial dos frutos em períodos secos, quando há baixa disponibilidade de inóculo é a explicação mais provável do escape à doença (Andebhran *et al.*, 1993).

Na região cacauzeira da Bahia, os períodos secos e úmidos são pouco definidos e a temperatura média anual mantém-se em 23°C, inferior à da região Amazônica. Observa-se também um período de temperaturas amenas, inferiores a 22°C em épocas definidas entre julho e setembro (Rocha *et al.*, 1993). Nesta região, ocorre uma redução dos lançamentos foliares e do florescimento nos meses mais frios e apesar da disponibilidade de flores e frutos ao longo de grande parte do ano, são colhidas duas safras por ano, as safras principal e temporã (Rocha *et al.*, 1993).

Em Manizales, Colômbia, onde o clima é bastante semelhante ao da região sul da Bahia, observa-se sincronia nos lançamentos foliares e a floração, a qual se estende por praticamente todo o ano, com a ocorrência de dois fluxos mais intensos. O clima nestas regiões favorece a produção de inóculo de *C. pernicioso* praticamente o ano todo, com pequena redução de atividade em semanas sem chuva. Desta forma, a presença de tecido hospedeiro suscetível parece determinar a ocorrência da doença tanto em Manizales quanto na Bahia (Rocha *et al.*, 1993; Aranzazu e Buriticá, 1993).

A combinação entre tecido hospedeiro suscetível, clima favorável e produção de basidiocarpos determina a ocorrência e a intensidade da vassoura-de-bruxa do cacauzeiro (Schmidt *et al.*, 1993). A ocorrência da vassoura-de-bruxa do cacauzeiro é principalmente estimulada pela presença de umidade, nas formas de chuva, orvalho ou molhamento foliar, e este fator afeta a epidemia atuando na fenologia do hospedeiro, na produção de basidiocarpos, dispersão e germinação de esporos, na infecção e na sincronização de tais eventos (Andebhran, 1984). A temperatura exerce um papel secundário na doença e raramente é limitante ao desenvolvimento da epidemia, tendo em vista que as áreas geralmente cultivadas com cacauzeiro apresentam o intervalo de temperatura favorável também ao patógeno (Purdy e Schmidt, 1996). Com base em estudos comparativos em diferentes regiões produtoras de cacau, os dados de temperatura em tais regiões não são suficientemente discrepantes para se estabelecer o efeito de temperatura sobre a doença e sobre as

diferentes etapas do processo, já que a temperatura esteve sempre próxima ao ótimo para a doença (Schmidt *et al.*, 1993) .

No entanto, nas regiões mais úmidas, com chuvas ao longo do ano todo, a fonte de inóculo é produtiva durante todo o período, diferentemente do ocorrido em regiões com período seco definido. Sendo assim, a chuva, além da fenologia, é um fator de variação, e portanto, constitui-se um mecanismo chave para o desenvolvimento da epidemia (Schmidt *et al.*, 1993; Wheeler e Suárez, 1993).

Apesar da evidente influência da umidade em diferentes formas sobre a doença, seu efeito ainda é bastante controverso. Aparentemente os ramos secos necessitam de condições determinadas de ambiente durante o período chuvoso para o início da frutificação do fungo (Rudgard, 1987a). Em estudos realizados na região amazônica, não se observou correlação entre o número de basidiocarpos produzidos e a pluviometria semanal. No entanto, houve relação entre o número médio de dias de chuva sucessivos no mês e a produção de basidiocarpos (Andebrhan, 1987). O mesmo autor observou que chuvas noturnas ou ao fim do dia favorecem a formação de basidiocarpos.

As correlações entre produção de basidiocarpos e o volume e duração das chuvas são difíceis de serem estabelecidas devido às características microclimáticas no interior do dossel (Purdy e Schmidt, 1996). Em locais com boa distribuição de chuvas ao longo do ano, podem ser observados basidiocarpos o ano todo (Aranzazu e Buriticá, 1993).

Costa (1993) destacou a correlação entre a produção de basidiocarpos e a duração da chuva entre 7 e 13 semanas de antecedência. O total de chuva não foi importante. Em outros estudos conduzidos na Amazônia, comprovou-se que a chuva é o fator mais importante para produção de basidiocarpos. A frequência, o horário e a duração têm maior peso em detrimento do volume da precipitação. No entanto, observou-se alta produção de inóculo após chuvas moderadas e nenhuma produção após chuvas intensas (Andebrhan *et al.*, 1993). Chuva persistente também reduz a produção de basidiocarpos (Wheeler e Suárez, 1993). Em Manizales, observou-se relação entre a ocorrência de chuvas leves e a produção de basidiocarpos. Além disso, observou-se também um efeito positivo de porcentagem de chuvas ocorridas entre 0:00 e

12:00 horas. Em períodos secos, com chuvas mensais inferiores a 50 mm não houve produção de basidiocarpos (Schmidt *et al.*, 1993).

Além disso, considerando as características climáticas em Manizales, não foram estabelecidas relações quantitativas significativas entre produção de basidiocarpos e chuva, já que as correlações entre a produção de basidiocarpos e o total de chuva por semana foram fracas (Schmidt *et al.*, 1993).

Em cupuaçuzeiro na Amazônia, observou-se que o aparecimento dos sintomas de vassoura-de-bruxa esteve associado ao período seco do ano, enquanto a produção de basidiocarpos coincidiu com o período chuvoso (Nunes *et al.*, 2002). No entanto, a precipitação pluvial não apresentou correlação significativa com a produção de basidiocarpos (Benchimol *et al.*, 2001).

A disponibilidade de água superficial e a alta umidade do ar exercem papel determinante também em diversas fases do ciclo do patógeno. A dispersão de inóculo de vassoura-de-bruxa por água de chuva foi confirmada, inclusive com a possibilidade de dispersão de esporos pré-germinados (Andebrhan, 1987).

Os basidiósporos de *C. pernicioso* dependem de molhamento superficial para manter sua capacidade de germinar e penetrar. Os esporos deixados em superfícies secas perdem rapidamente sua viabilidade (Frias *et al.*, 1991). Por isso, os esporos do patógeno são comumente dispersos no período noturno, já que a germinação e a penetração levam pelo menos 3 horas, e requerem a presença de molhamento foliar ou umidade relativa do ar superior a 95% (Wheeler e Suárez, 1993). A produção de basidiocarpos foi nula ou insignificante quando o molhamento foliar foi inferior a 4 horas ou superior a 20 horas diárias (Rudgard, 1987a; Wheeler e Suárez, 1993).

Apesar de comprovada a necessidade de alta umidade para a esporulação de *C. pernicioso*, alguns autores identificaram o efeito de períodos secos na produção de inóculo do fungo. A alternância de períodos secos e úmidos promoveu a frutificação do fungo (Rocha e Wheeler, 1985; Rudgard, 1987a).

Alguns estudos comprovam que o número de horas com umidade relativa do ar inferior a 70% tem relação positiva com a doença, com

defasagens de 6 a 9 semanas para a observação de sintomas (Costa, 1993; Schmidt *et al.*, 1993). Em cupuaçuzeiro na Amazônia, a umidade relativa do ar máxima apresentou correlação negativa significativa com a doença. (Benchimol *et al.*, 2001). Sendo assim, boas condições diárias de secamento durante no período chuvoso, com a redução da umidade durante o dia, ou chuva noturna e pela manhã, parecem favorecer a quantidade de basidiocarpos formada (Rocha *et al.*, 1993).

O efeito da temperatura sobre o patógeno não é tão marcante, dadas as características climáticas das regiões produtoras, que geralmente estão dentro do intervalo ótimo para o desenvolvimento do patógeno. Os limites para a produção de basidiósporos de *C. perniciosa* variam entre 10 e 30°C, com ótimo entre 20 e 25°C (Wheeler e Suárez, 1993). No geral, o intervalo de temperaturas entre 20 e 30°C é bastante favorável à frutificação do fungo, e a ocorrência prolongada de temperaturas superiores a 30°C e inferiores a 20°C reduz a produção de basidiocarpos (Wheeler e Suárez, 1993; Andebhran *et al.*, 1993). Temperaturas regulares compreendidas no intervalo de 22 a 24°C, associadas a períodos de molhamento foliar, favorecem a germinação de esporos (Wheeler e Suárez, 1993). As baixas temperaturas também influenciam a redução de sintomas em flores, possivelmente pela redução da disponibilidade de inóculo e de tecido suscetível (Schmidt *et al.*, 1993).

De forma geral, predições quantitativas entre o clima e a doença têm sido difíceis de serem feitas, dadas as características particulares deste patossistema (Rocha *et al.*, 1993). Na Bahia, mesmo sendo o clima favorável à produção de basidiocarpos o ano todo, são observados picos de incidência de vassoura-de-bruxa, indicando que o potencial de doença não é máximo ou constante ao longo do ano todo, e que diversos fatores além da disponibilidade do inóculo estão envolvidas no desenvolvimento da epidemia (Rocha *et al.*, 1993).

O controle de Vassoura-de-bruxa do cacaueteiro tem sido realizado em diversas formas, dentre as quais se destacam o controle físico, o controle químico e o melhoramento genético para obtenção de clones resistentes (Wheeler e Suárez, 1993; Purdy e Schmidt, 1996).

Na região amazônica, recomenda-se remover todos os tecidos infectados na plantação, de forma a se evitar infecções diretas (em frutos) e

indiretas (em flores) (CEPLAC, 1983). Após a primeira poda, recomenda-se um repasse para eliminar grande parte das vassouras ativas (Rudgard, 1987a). Se o nível de infecção na área for baixo, as remoções de vassouras podem ser feitas junto às demais práticas agronômicas (CEPLAC, 1983). No geral, a segunda poda anual aumenta a eficácia de remoção de vassouras em 30% (Andebrhan, 1987). Recomenda-se também concentrar as podas em épocas secas do ano, de forma a não expor o tecido cambial quando há inóculo do fungo presente em abundância (Evans, 1981).

Na Bahia, sugere-se a remoção ou poda em junho, após a segunda colheita ou colheita temporã, quando se consegue retirar boa parte das possíveis partes infectadas, evitando o inóculo na estação seguinte. Recomenda-se também não atrasar os tratamentos fitossanitários, para não afetar a safra principal (Rocha *et al.*, 1993). Além disso, a remoção de tecidos estimula a produção de frutos do cacauzeiro (Andebrhan *et al.*, 1993). Por outro lado, se for conduzida na época errada, a poda fitossanitária na cultura do cacauzeiro pode aumentar a intensidade da doença na área, por estimular novos lançamentos e portanto, aumentar a disponibilidade de tecido suscetível (Evans, 1981).

De modo geral, para o manejo de novos plantios, recomenda-se manter a arquitetura da planta com controle de sua estrutura e da altura até 4 m, através de podas, de forma a facilitar a colheita e a remoção de vassouras. Além disso, deve-se eliminar os chupões e não exceder o limite máximo de 1200 plantas/ha. Em tais plantios, deve-se iniciar o controle fitossanitário o mais cedo possível, de forma a manter baixo o nível de inóculo na área (Lass, 1993). Em plantios antigos, recomenda-se a atividade em conjunto de todos os produtores de uma mesma região. Estes devem executar as podas de manutenção, para reduzir o auto-sombreamento, desestimulando a atividade do fungo, além das podas fitossanitárias. Além disso, aconselha-se utilizar a irrigação em épocas secas para estimular a floração e a frutificação fora do período ativo do fungo (Lass, 1993). Com a manutenção do controle periódico ao longo dos anos, o custo de controle da doença tende a diminuir (CEPLAC, 1983).

Após a poda, deve-se picar e cobrir todo o material removido para acelerar sua decomposição (Fundação Cargill, 1993). Em Uruçuca na Bahia,

observaram-se menores taxas de doença no tratamento com podas mensais associadas à aplicação de fungicidas. Neste tratamento obteve-se também um número menor de frutos doentes (Alves, 2002).

O controle químico da doença pode ser realizado de forma a reduzir o inóculo, utilizando fungicidas sistêmicos aplicados ao solo e proteger a produção, com a aplicação de fungicidas protetores, com destaque para os compostos cúpricos, especialmente se forem desenvolvidas formas mais eficientes de se garantir o efeito residual do fungicida, principalmente em áreas com alto nível pluviométrico. A utilização de compostos sistêmicos é limitada pela possibilidade de acúmulo de resíduos nas amêndoas, comprometendo seu sabor e qualidade (Laker e Rudgard, 1989).

Os fungicidas cúpricos devem ser aplicados principalmente em almofadas florais e frutos durante o período de máxima frutificação na planta e durante o enchimento dos frutos, em três aplicações. (Evans, 1981; Fundação Cargill, 1993)

Alguns trabalhos destacam também a necessidade de se investir em melhoramento para obtenção de variedades resistentes como forma mais adequada para controle da vassoura-de-bruxa do cacauero (Dias, 2001). Ferramentas moleculares modernas devem ser utilizadas no intuito de levantar informações mais detalhadas sobre as diferentes raças do patógeno, sobre a sua dispersão entre as áreas de cultivo e ainda, sobre a evolução da população do patógeno no campo. Esta última informação deverá ser importante no desenvolvimento de estratégias duradouras de controle da doença (Griffith, 2000).

Considerando a complexidade dos fatores que influenciam o desenvolvimento do cacauero e da vassoura-de-bruxa, além das dificuldades encontradas no manejo da doença, a utilização de técnicas de modelagem das relações entre o clima, a cultura e a doença, aparece como uma ferramenta importante. Para modelagem, são utilizadas informações científicas detalhadas sobre a cultura e a doença. Os modelos desenvolvidos objetivam fornecer estimativas mais prováveis com base em informações climáticas e ambientais. Com a modelagem, pode-se obter uma estimativa mais precisa das épocas em que haverá tecido suscetível disponível na cultura, além dos períodos mais favoráveis à reprodução do fungo, dadas as condições meteorológicas

favoráveis. A soma destes dois fatores, associada à manutenção das condições meteorológicas favoráveis, apontará os fluxos de doença nos diferentes tecidos, com a defasagem apropriada para o desenvolvimento do patógeno.

Alguns modelos de diferentes graus de complexidade para simulação da epidemia e de perdas decorrentes do desenvolvimento de vassoura-de-bruxa foram desenvolvidos para diferentes regiões (Santos Filho *et al.*, 1998; Sgrillo e Araújo, 1994). A maioria dos modelos apresenta boa aplicabilidade no manejo das culturas, mas foram desenvolvidos em base empírica, partindo da obtenção da modelagem de resultados observados. É o caso da estimativa de perdas de produção em cacaueteiro devido à ocorrência de vassoura-de-bruxa realizada na Bahia baseando-se em ataque de frutos jovens (Santos Filho *et al.*, 1998) e do modelo de simulação da doença que estimou perdas de produção entre insignificantes e 80%, em função do controle aplicado (Sgrillo e Araújo, 1994).

As informações geradas nestes modelos são bastante úteis na finalidade de gerar informações estatísticas que servem para o alerta às autoridades e responsáveis do impacto da doença. No entanto, faltam informações mais precisas, em maior grau de detalhamento, do comportamento da doença, frente às variações pertinentes no sistema patógeno-planta-atmosfera. A determinação das relações significativas entre as variáveis meteorológicas e fenológicas e a doença, bem como das épocas favoráveis à infecção deverá ser útil na implementação de um modelo dinâmico da vassoura-de-bruxa do cacaueteiro.

Um modelo para a estimativa no nível de infecção em áreas de cultivo de cacaueteiro na Bahia a partir da percentagem de plantas doentes verificada por amostragem seqüencial em lançamentos, almofadas florais e frutos, constitui-se uma ferramenta bastante prática a ser utilizada por extensionistas que atuam no controle da doença (Sgrillo *et al.*, 1995). Este modelo, apesar de considerar alguma observação da cultura, ainda não pode ser utilizado como ferramenta preditiva, já que parte da observação dos sintomas da doença já existentes, e portanto, não considera o monitoramento da fenologia e do clima na estimativa real da infecção na área de cultivo.

O modelo monomolecular foi ajustado para o progresso da vassoura-de-bruxa em cacauero na Bahia, com o pico da doença coincidindo com a época de maior fluxo de lançamentos foliares. Em cupuaçuzeiro, foram ajustadas curvas sigmóides para descrição do progresso da doença, com indicação do início da epidemia em lançamentos e flores no período seco do ano (Nunes *et al.*, 2002).

Diversos fatores ambientais atuam tanto sobre a hospedeira como sobre o patógeno, com destaque para o efeito da umidade em diferentes formas. Para cacaueros cultivados na região amazônica, Costa (1993) realizou análise de regressão múltipla entre 16 variáveis climáticas e a intensidade da doença em diferentes defasagens de semanas, com destaque para umidade relativa do ar e precipitação.

Na Bahia, apesar de serem conhecidas algumas das variáveis meteorológicas que afetam a fenologia do cacauero e a esporulação do patógeno, ainda não se determinaram relações pertinentes entre eles em diferentes intervalos de tempo, a fim de serem utilizadas em um modelo do desenvolvimento da doença que considere o clima e a fenologia da cultura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Dados Utilizados

Os dados utilizados nesta tese foram obtidos de experimento conduzido pela pesquisadora do Centro de Pesquisas da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), Edna Dora Martins Newman Luz. O experimento foi montado na fazenda Caprichosa, município de Camacã, Bahia (Latitude 15,4°S e Longitude 39,5°W) entre julho de 1991 a outubro de 1994.

A área experimental foi constituída de 100 plantas híbridas de cacaueteiro e bordadura de 10 plantas em todas as direções. No início do experimento as plantas tinham 6 anos de idade e espaçamento de 3 x 3 m. A cobertura permanente foi feita com Eritrina (*Erythrina spp.*), em espaçamento de 9 x 9 m.

As 100 plantas selecionadas foram numeradas e monitoradas semanalmente quanto ao aparecimento de sintomas em ramos e frutos jovens. Desta forma, foi levantado o número de Vassouras em Ramos Verdes por Semana (VBRV) e de Número de Frutos Morango por Semana (FMO).

Na área experimental foi instalado um abrigo meteorológico contendo termohigrógrafo, termômetros de máxima e mínima e psicrômetro. Foram instalados também um pluviômetro e um pluviógrafo. Realizaram-se observações horárias na estação meteorológica durante o período do experimento.

Com os dados meteorológicos, foram determinadas as seguintes variáveis:

- Chuva - Total de Chuva na semana (mm)
- NHCS - Número de Horas semanais de Chuva
- NHC22-05 - Número de Horas semanais de Chuva entre as 22:00 e as 5:00
- TM - Temperatura Média da Semana (°C)
- NHT<20 - Número de Horas semanais de Temperatura do ar menor que 20°C
- NHT20-24 - Número de Horas semanais de Temperatura do ar entre 20 e 24°C
- NHT24-28 - Número de Horas semanais de Temperatura do ar entre 24 e 28°C
- NHT>28 - Número de Horas semanais de Temperatura do ar maior que 28°C
- URMS - Umidade Relativa Média do ar (%)
- NHU>90 - Número de Horas semanais de Umidade Relativa do ar maior que 90%
- NHU80-90 - Número de Horas semanais de Umidade Relativa do ar entre 80 e 90%
- NHU<70 - Número de Horas semanais de Umidade Relativa do ar menor que 70%

Além disso, foram utilizados na análise, os dados fenológicos de Número de Lançamentos Foliares por Semana (LANC) e Número de Almofadas Florais Ativas por Semana (ALM), obtidos conforme descrição no capítulo 1.

3.2. Processamento dos Dados

Com os dados observados, realizou-se a análise de correlação de Pearson das variáveis meteorológicas e fenológicas, utilizando-se o programa Genes, desenvolvido no Departamento de Biologia da Universidade Federal de Viçosa (Cruz, 2001). Com os coeficientes de correlação, procedeu-se o Diagnóstico de Multicolinearidade, também no programa Genes, de forma a

determinar a existência de redundância entre as variáveis utilizadas a partir da análise da matriz de correlação.

Quando duas variáveis são altamente correlacionadas, ambas convergem para a mesma informação. Nas situações em que as variáveis não apresentam contribuição individual significativa em um modelo testado, mas em conjunto contribuem bastante, gera-se um bom ajuste do modelo, mas que não reflete a realidade modelada. Neste caso, as variáveis são colineares e os resultados mostram multicolinearidade, cujas estimativas são pouco confiáveis.

Deve-se então, adotar algum critério para descarte de variáveis redundantes, de forma a melhorar a qualidade da análise. Cruz (2001) sugere três critérios para o diagnóstico de multicolinearidade, incluindo análise de Fatores de Inflação da Variância (VIF), de Valores Singulares e da magnitude de Autovalores.

No presente trabalho, adotou-se o critério de análise de magnitude de autovalores. Os autovalores são as raízes características da matriz de correlação entre as variáveis. Se os autovalores, são aproximadamente da mesma magnitude, não se observa multicolinearidade entre as variáveis. Se alguns dos autovalores são maiores que outros, esta é uma indicativa de que variáveis relacionadas estão agindo em conjunto sobre o resultado. Desta forma, calcula-se a razão entre o maior e o menor autovalor da matriz de correlação, de forma a gerar o número de condição (NC). O diagnóstico final é feito, então, em função da classificação proposta por Montgomery e Peck (1981): a) $NC < 100$ – colinearidade fraca; b) $NC > 100$ e $NC < 1000$ – colinearidade moderada a forte; c) $NC > 1000$ – colinearidade severa.

A ocorrência de um diagnóstico de colinearidade severa na análise conjunta de todas as variáveis meteorológicas e fenológicas, determinou a divisão de tais variáveis em dois grupos distintos, formados por:

- 1) TM, Chuva, NHCS, NHT20-24, NHT24-28, URMS, NHU>90, LANC e ALM
- 2) NHT<20, NHT>28, NHU<70, URAS, NHC22-05, LANC e ALM

As variáveis semanais relativas à doença foram organizadas junto às variáveis meteorológicas e fenológicas, na semana de ocorrência e nas oito semanas anteriores, totalizando nove semanas de defasagens de variáveis

meteorológicas e fenológicas. Procedeu-se então, a análise de correlação de Pearson entre os intervalos semanais de variáveis meteorológicas e fenológicas e as variáveis relacionadas à doença (VBRV e FMO).

Finalmente, procedeu-se análise de trilha no programa GENES, entre as diferentes defasagens e os dados relativos à doença. Este procedimento teve a finalidade de desdobrar as estimativas dos coeficientes de correlação em efeitos diretos e indiretos. A correlação simples permite avaliar a magnitude e a direção das relações entre duas variáveis, mas não disponibiliza informações a cerca dos efeitos diretos e indiretos que um grupo de variáveis exerce sobre uma variável principal (doença). A análise de trilha gera a decomposição dos efeitos das variáveis selecionadas sobre a variável principal, com estimativas obtidas através de regressão. Apesar de a correlação entre duas variáveis ser uma informação própria em uma dada situação experimental, a sua decomposição depende do grupo de variáveis estudadas, geralmente selecionadas em função de conhecimentos prévios do pesquisador sobre as possíveis inter-relações existentes.

Sendo assim, observaram-se na análise de trilha as correlações totais significativas ($r \geq 0,50$) e a partir delas, determinaram-se as variáveis meteorológicas e fenológicas, e em que intervalos de tempo, verificaram-se efeitos diretos ou indiretos sobre a ocorrência de vassoura-de-bruxa em ramos vegetativos e sobre a formação de frutos morango.

A análise de correlação parcial foi empregada sobre as variáveis relacionadas à umidade do ar, de forma a esclarecer as relações individualizadas destas sobre a doença em ramos verdes (VBRV) e sobre a formação de frutos morango.

4. RESULTADOS

As variáveis meteorológicas, fenológicas e de doença foram arranjadas graficamente para análise exploratória. As temperaturas médias semanais permaneceram entre 18 e 24°C, com média anual de 22°C (Figura 1). Na maior parte do período, os valores de temperatura estiveram no intervalo entre 20 e 24°C, conforme descrito por meio da variável NHT20-24 (Número de Horas de Temperaturas entre 20 e 24°C por semana). Na maior parte do ano, observaram-se pelo menos 10 horas de temperaturas acima 28°C na semana, com exceção dos meses mais frios do ano, conforme verificado através de NHT>28 (Número de Horas de temperaturas Superiores a 28°C por semana) (Figura 2). Neste período também foram registradas pelo menos 20 horas semanais de temperaturas inferiores a 20°C (Figura 2).

Observando-se as variáveis relacionadas à precipitação, denominadas Chuva e NHCS, percebe-se que houve boa distribuição temporal de chuva ao longo de todo o período na região de Camacã. Sendo assim, não foram identificados períodos úmidos e secos definidos durante os anos. A precipitação observada ocorreu também no período noturno, conforme observado através da variável NHC22-05 (Figura 1).

As médias semanais de umidade relativa do ar (URMS) variaram entre 80 e 95% ao longo do ano. Na maior parte do período, a umidade relativa do ar esteve acima de 90%, conforme descrito por meio da variável NHU>90. Foram

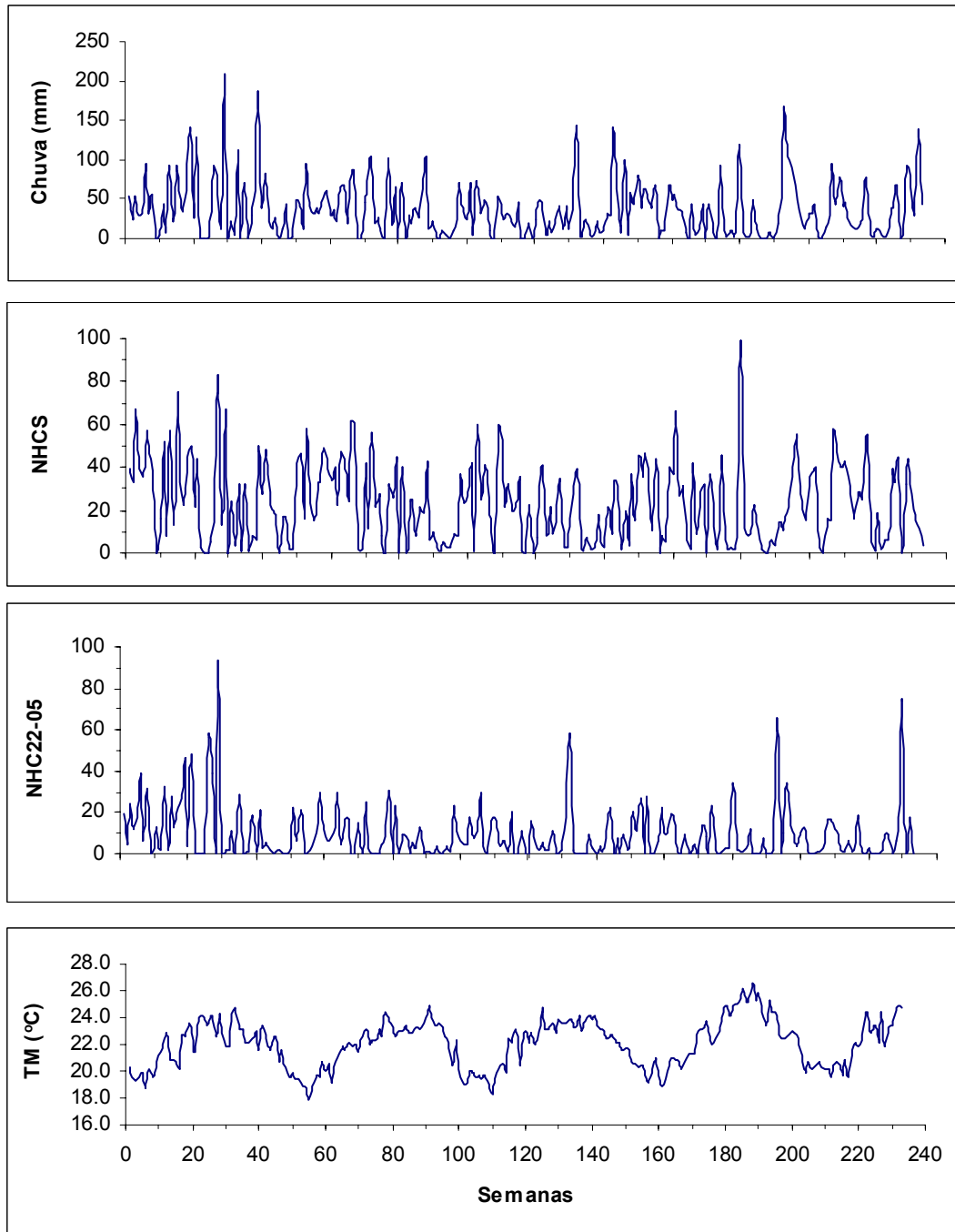


Figura 1 - Observações Semanais de Total de Chuva (Chuva); Número de Horas de Chuva (NHCS); Número de Horas de Chuva ocorridas entre 22h e 5h (NHC22-05) e Temperatura Média (TM).

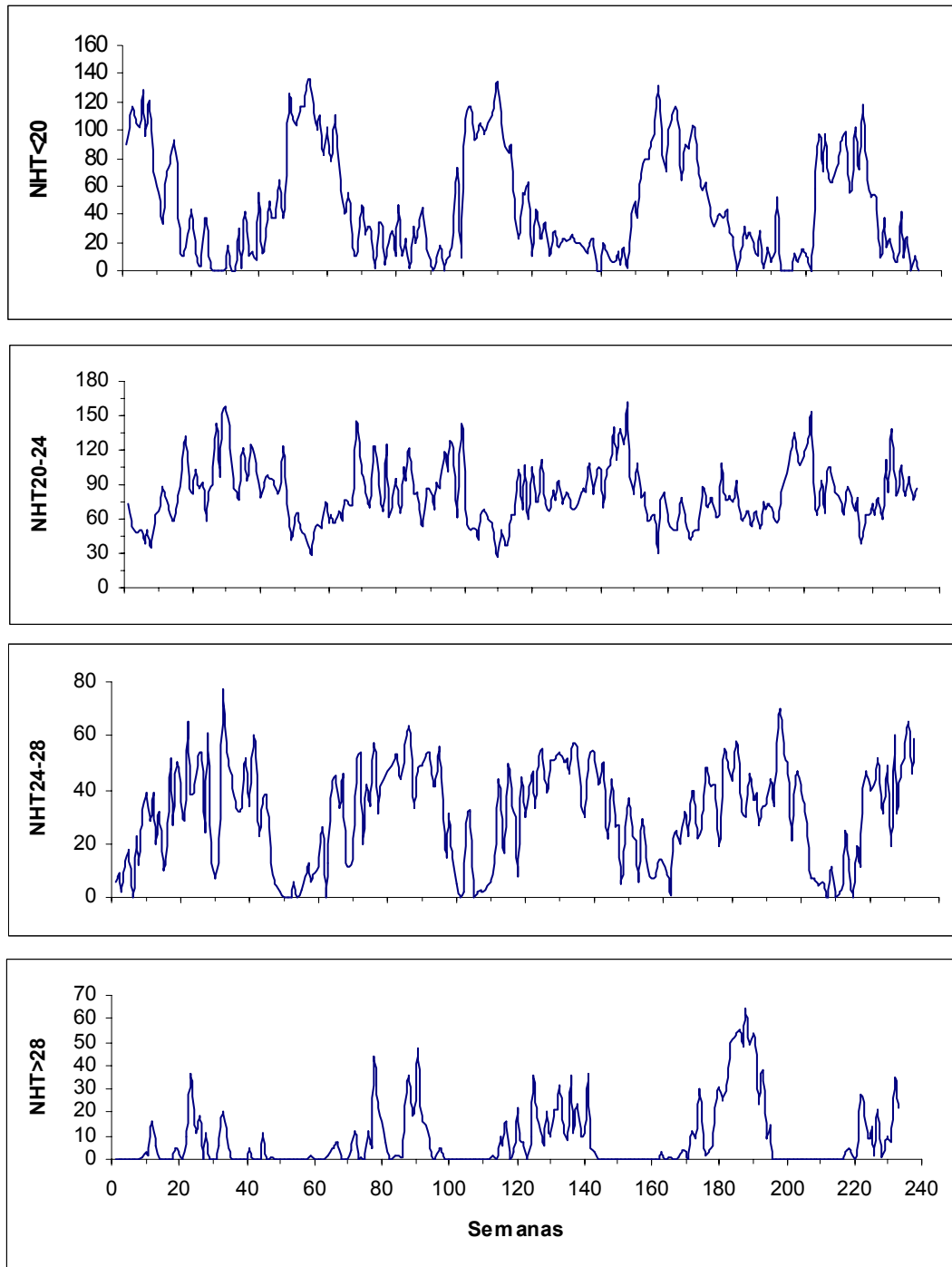


Figura 2 - Observações Semanais de Número de Horas de Temperaturas inferiores a 20°C (NHT<20); Número de Horas de Temperaturas entre 20 e 24°C (NHT20-24); Número de Horas de Temperaturas entre 24 e 28°C (NHT24-28) e Número de Horas de Temperaturas superiores a 28°C (NHT>28).

observados períodos de umidade do ar variando entre 80 e 90% ao longo do ano todo. Nas épocas mais quentes do ano observaram-se também períodos de umidade do ar inferior a 70% (Figura 3).

Observaram-se ocorrências sazonais de lançamentos foliares (LANC) ao longo dos anos, com total de 3 fluxos de lançamentos foliares por ano. A floração ocorreu durante praticamente todo o ano, com redução apenas nos meses mais frios (Figura 4).

Vassouras-de-bruxa em ramos verdes (VBRV) foram observadas a partir do terceiro ano de experimento, com picos de ocorrência em diferentes épocas do ano. Por outro lado, foram constatados frutos morango (FMO) em todos os anos de experimento, com picos anuais de ocorrência ao longo do ano (Figura 4).

Os coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis meteorológicas e fenológicas e a doença foram significativos a 1% e a 5% de probabilidade, na maior parte dos intervalos estudados (Tabelas 1 e 2). A variável relativa ao número de lançamentos foliares (LANC) correlacionou-se positivamente à ocorrência da doença em ramos verdes (VBRV) na mesma semana de ocorrência, e as variáveis relativas à temperatura correlacionaram-se a VBRV no intervalo de sete semanas até o aparecimento da doença em ramos.

Observou-se colinearidade baixa nos dois grupos de variáveis testados, com Número de Condição (NC) de 89,5 e 15,5, respectivamente para o primeiro e o segundo grupo de variáveis. Com isso, as variáveis meteorológicas e fenológicas puderam ser correlacionadas às variáveis relativas à doença (VBRV e FMO), utilizando a análise de trilha.

Por meio da análise de trilha, observou-se o efeito direto dos lançamentos foliares (LANC) sobre a correlação deste com o número de vassouras-de-bruxa em ramos verdes (VBRV), na mesma semana de ocorrência (Tabela 3).

Nas variáveis relacionadas à umidade relativa do ar com destaque para Umidade Relativa Média da Semana (URMS) e Número de Horas de Umidade Relativa do Ar Superior a 90% (NHU>90), observaram-se coeficientes de trilha altos, na 1^a e 3^a semanas anteriores à ocorrência da doença em ramos

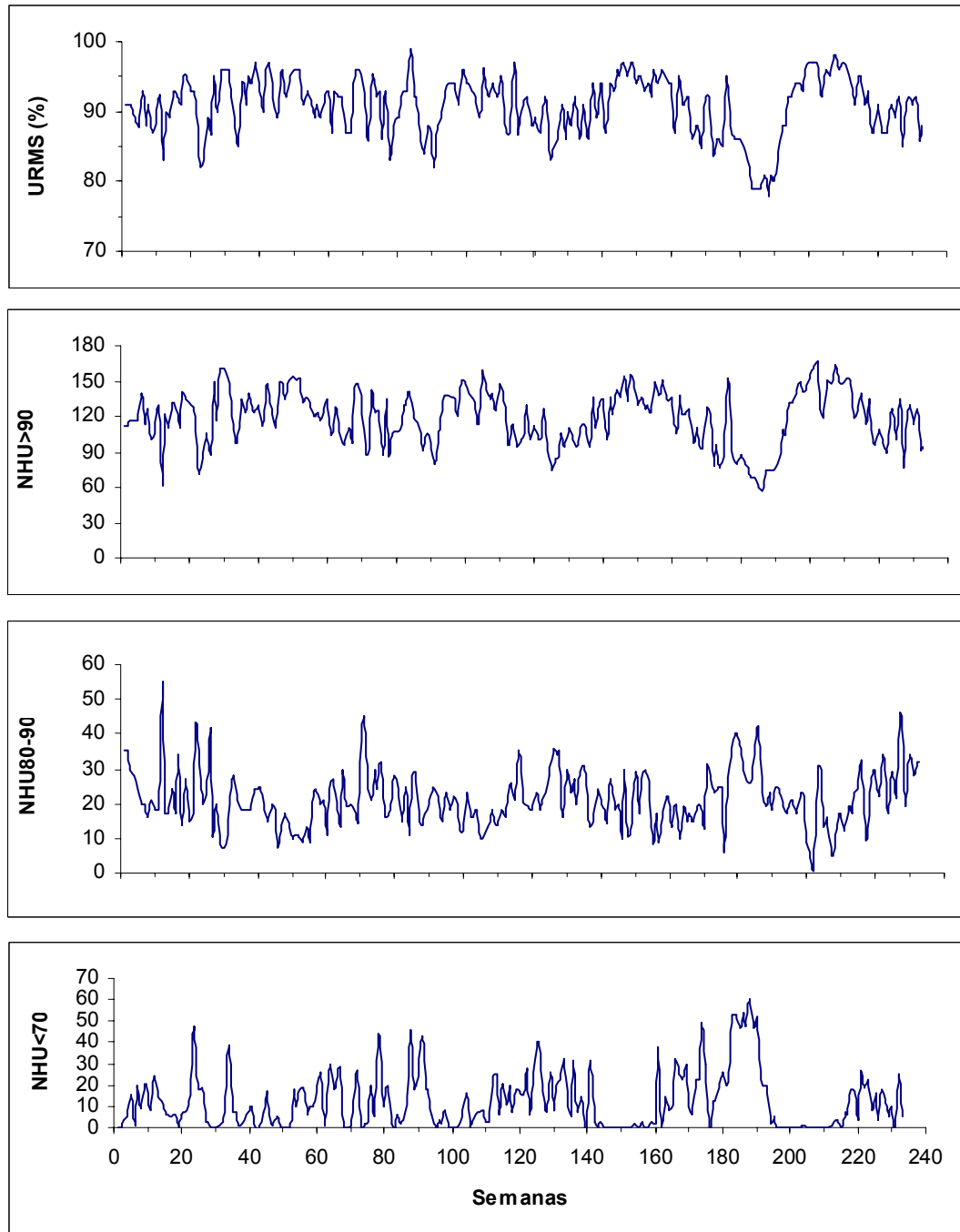


Figura 3 - Observações Semanais de Umidade Relativa do Ar Média por Semana (URMS), Número de Horas de Umidade Relativa do ar Superior a 90% por Semana (NHU>90); Número de Horas de Umidade Relativa do ar entre 80 e 90% por Semana (NHU80-90) e Número de Horas de Umidade Relativa do ar Inferior a 70% por Semana (NHU<70).

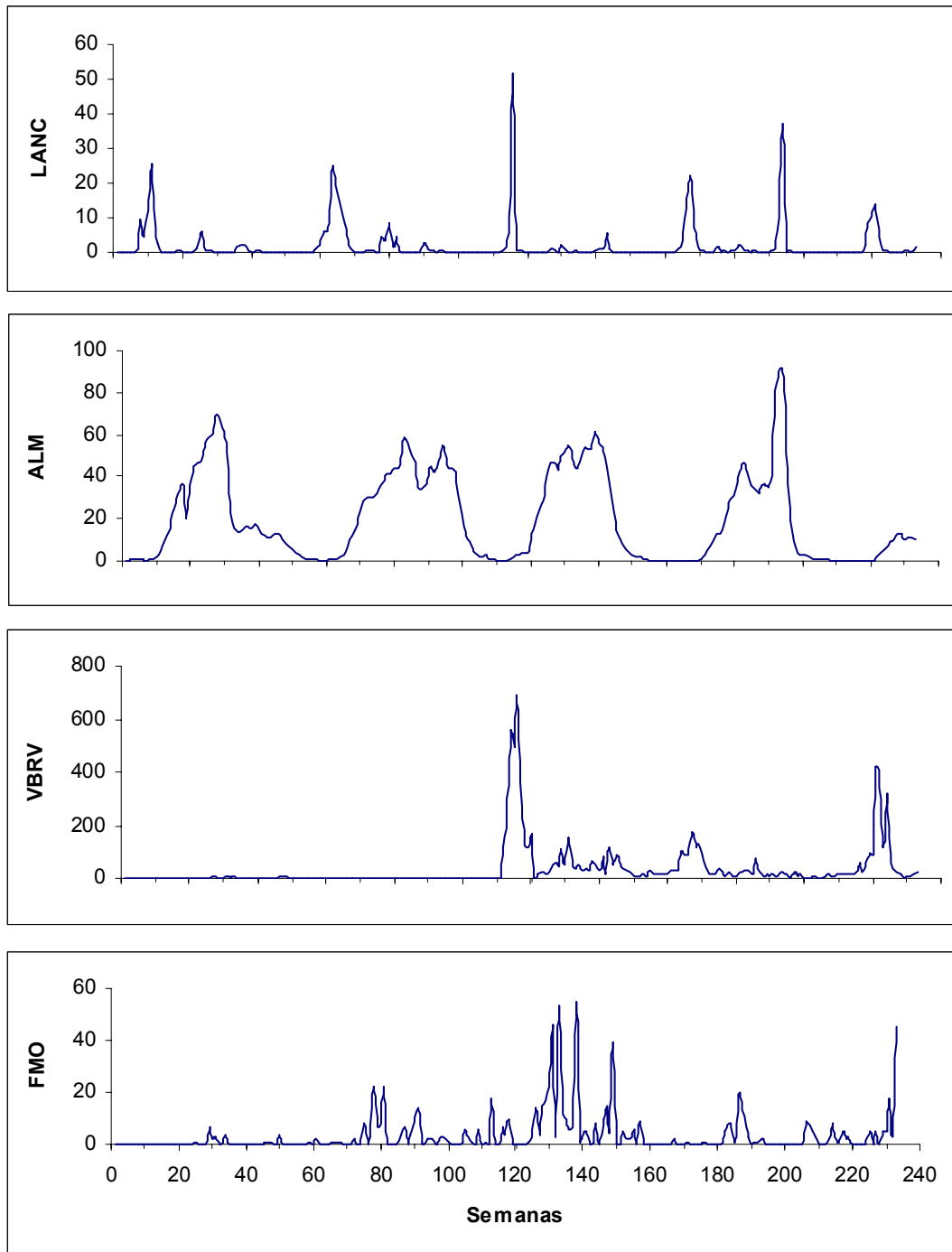


Figura 4 - Observações Semanais do Número de Lançamentos Foliares por Semana (LANC); Número de Almofadas Florais por Semana (ALM), Número de Vassouras em Ramos Verdes (VBRV) e Número de Frutos Morango(FMO).

Tabela 1 - Coeficientes de correlação de Pearson entre número de Vassoura-de-bruxa em Ramos Verdes (VBRV) e as variáveis fenológicas e meteorológicas

Variáveis ^{1/}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Chuva	-0.170*	-0.165*	-0.162*	-0.172*	-0.116	-0.065	-0.091	-0.080	-0.117
NHCS	-0.139*	-0.106	-0.101	-0.100	0.048	0.124	0.125	0.145*	0.074
NHC22-05	-0.104	-0.090	-0.108	-0.118	-0.082	-0.050	-0.034	-0.036	-0.028
TM	-0.042	-0.110	-0.179*	-0.253**	-0.352**	-0.398**	-0.435**	-0.449**	-0.424**
NHT<20	0.018	0.126	0.220**	0.305**	0.425**	0.453**	0.497**	0.497**	0.423**
NHT20-24	-0.136	-0.241**	-0.314**	-0.348**	-0.417**	-0.392**	-0.352**	-0.333**	-0.225**
NHT24-28	0.057	0.101	0.053	-0.002	-0.101	-0.229**	-0.321**	-0.387**	-0.391**
NHT>28	-0.160*	-0.228**	-0.162*	-0.230**	-0.232**	-0.188**	-0.154*	-0.123	-0.123
URMS	-0.097	-0.103	-0.080	-0.047	0.013	0.066	0.142*	0.143*	0.160*
NHU>90	-0.197**	-0.191**	-0.185**	-0.115	-0.014	0.048	0.128	0.148*	0.17*
NHU80-90	0.110	0.063	0.068	0.010	-0.084	-0.091	-0.099	-0.165*	-0.166*
NHU>70	0.009	-0.005	-0.033	-0.059	-0.125	-0.206**	-0.217**	-0.241**	-0.296**
LANC	0.513**	0.421**	0.191**	0.083	0.032	-0.032	-0.113	-0.146*	-0.154*
ALM	-0.224**	-0.213**	-0.196**	-0.187**	-0.183**	-0.193**	-0.198**	-0.212**	-0.222**

1/ Total de Chuva na semana (Chuva); Número de Horas de Chuva por semana (NHCS); Número de Horas Semanais de Chuva entre 22 e 5h (NHC22-05) ; Temperatura Média da Semana (TM) ; Número de Horas Semanais de Temperatura do ar menor que 20°C (NHT<20) ; Número de Horas Semanais de Temperatura do ar entre 20 e 24°C (NHT20-24) ; Número de Horas Semanais de Temperatura do ar entre 24 e 28°C (NHT24-28) ; Número de Horas Semanais de Temperatura do ar maior que 28°C (NHT>28) ; Umidade Relativa Média do ar (URMS) ; Número de Horas Semanais de Umidade Relativa do ar maior que 90% (NHU>90) ; Número de Horas Semanais de Umidade Relativa do ar entre 80 e 90% (NHU80-90) ; Número de Horas Semanais de Umidade Relativa do ar menor que 70% (NHU>70) ; Número de Lançamentos Foliares por Semana (LANC) e Número de Almofadas Florais Ativas por Semana (ALM). *Significativo a 5% de Probabilidade. **Significatvo a 1% de Probabilidade.

Tabela 2 - Coeficientes de correlação de Pearson entre Número de Frutos Morango (FMO) e as variáveis fenológicas e meteorológicas

Variáveis ^{1/}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Chuva	-0.101	0.169*	-0.049	0.129	0.017	-0.114	0.224**	-0.015	-0.176*
NHCS	-0.1568	-0.141*	-0.181**	-0.047	-0.056	-0.181**	0.033	0.035	-0.085
NHC22-05	-0.055	0.186**	0.059	0.206**	-0.033	-0.128	0.231**	-0.051	-0.187**
TM	0.233**	0.227**	0.198**	0.188**	0.192**	0.144*	0.263**	0.114	0.172*
NHT<20	-0.184**	-0.314**	-0.227**	-0.195**	-0.257**	-0.214**	-0.253**	-0.195**	-0.147*
NHT20-24	-0.045	0.126	0.038	0.027	0.028	0.100	-0.011	0.142*	0.018
NHT24-28	0.201**	0.150*	0.238**	0.204**	0.299**	0.099	0.316**	0.159*	0.158*
NHT>28	0.172*	0.057	0.062	-0.061	-0.116	-0.041	0.053	-0.254**	0.078
URMS	-0.155*	-0.001	-0.102	-0.052	-0.132	-0.102	-0.159*	-0.052	-0.117
NHU>90	-0.174*	-0.100	-0.134	-0.093	-0.165*	-0.151*	-0.276**	-0.070	-0.118
NHU80-90	0.088	0.129	0.161*	0.236**	0.172*	0.204**	0.295**	0.146*	0.158*
NHU>70	0.111	0.021	0.120	-0.039	0.036	0.031	0.081	-0.120	0.016
LANC	-0.105	-0.118	-0.085	-0.147*	-0.176*	-0.184**	-0.040	-0.127	-0.145*
ALM	0.132	0.165*	0.186**	0.161*	0.143*	0.163*	0.168*	0.137*	0.108

1/ Total de Chuva na semana (Chuva); Número de Horas de Chuva por semana (NHCS); Número de Horas Semanais de Chuva entre 22 e 5h (NHC22-05) ; Temperatura Média da Semana (TM) ; Número de Horas Semanais de Temperatura do ar menor que 20oC (NHT<20) ; Número de Horas Semanais de Temperatura do ar entre 20 e 24oC (NHT20-24) ; Número de Horas Semanais de Temperatura do ar entre 24 e 28oC (NHT24-28) ; Número de Horas Semanais de Temperatura do ar maior que 28oC (NHT>28) ; Umidade Relativa Média do ar (URMS) ; Número de Horas Semanais de Umidade Relativa do ar maior que 90% (NHU>90) ; Número de Horas Semanais de Umidade Relativa do ar entre 80 e 90% (NHU80-90) ; Número de Horas Semanais de Umidade Relativa do ar menor que 70% (NHU>70) ; Número de Lançamentos Foliaves por Semana (LANC) e Número de Almofadas Florais Ativas por Semana (ALM). *Significativo a 5% de Probabilidade ** Significatvo a 1% de Probabilidade.

Tabela 3 - Coeficientes de Trilha calculados para a variável VBRV (Vassouras-de-bruxa em Ramos Verdes por Semana): efeitos diretos e indiretos em função de variáveis meteorológicas e fenológicas.

			Defasagens (Semanas)			
			1	3	4	7
Efeito Direto	de	TM	0.245	-0.326	-0.542	-0.048
Efeito Indireto	Via	CHUVA	-0.010	-0.003	-0.002	0.000
	Via	NHCS	-0.017	0.005	0.024	-0.052
	Via	NHT20-24	-0.031	-0.040	-0.036	-0.137
	Via	NHT24-28	-0.218	0.083	0.191	-0.138
	Via	URMS	-0.617	-0.485	-0.234	-0.324
	Via	NHU>90	0.662	0.599	0.341	0.248
	Via	LANC	-0.056	-0.012	0.004	0.016
TOTAL			-0.042	-0.179*	-0.253**	-0.435**
Efeito Direto	de	URMS	1.146	0.912	0.443	0.618
Efeito Indireto	Via	TM	-0.132	0.174	0.287	0.025
	Via	CHUVA	-0.038	-0.023	-0.013	-0.036
	Via	NHCS	0.012	-0.004	-0.017	0.034
	Via	NHT20-24	-0.041	-0.052	-0.047	-0.167
	Via	NHT24-28	0.127	-0.048	-0.113	0.082
	Via	NHU>90	-1.123	-1.030	-0.589	-0.427
	Via	LANC	-0.048	-0.008	0.003	0.012
TOTAL			-0.097	-0.080	-0.047	0.142*
Efeito Direto	de	NHU>90	-1.185	-1.087	-0.622	-0.450
Efeito Indireto	Via	TM	-0.137	0.180	0.298	0.026
	Via	CHUVA	-0.030	-0.019	-0.010	-0.030
	Via	NHCS	0.013	-0.004	-0.019	0.039
	Via	NHT20-24	-0.040	-0.051	-0.046	-0.159
	Via	NHT24-28	0.157	-0.059	-0.139	0.101
	Via	URMS	1.086	0.864	0.420	0.585
	Via	LANC	-0.062	-0.010	0.004	0.015
TOTAL			-0.197**	-0.185**	-0.115	0.128
Efeito Direto	de	LANC	0.527	0.097	-0.036	-0.151
Efeito Indireto	Via	TM	-0.026	0.039	0.063	0.005
	Via	CHUVA	-0.012	-0.007	-0.004	-0.010
	Via	NHCS	0.001	-0.001	-0.003	0.006
	Via	NHT20-24	0.014	0.017	0.015	0.054
	Via	NHT24-28	-0.024	0.008	0.020	-0.014
	Via	URMS	-0.105	-0.075	-0.036	-0.049
	Via	NHU>90	0.139	0.113	0.064	0.046
TOTAL			0.513**	0.191**	0.083	-0.113
Coef. Determinação			0.414	0.274	0.244	0.308
Efeito da Var. Residual			0.765	0.852	0.869	0.832

TM: Temperatura Média por Semana; Chuva: Precipitação Total por Semana; NHCS: Número de horas semanais de Chuva; NHT20-24: Número de horas semanais com temperaturas entre 20 e 24°C; NHT24-28: Número de horas semanais com temperaturas entre 24 e 28°C; URMS: Umidade Relativa Média por Semana; NHU>90: Número de horas semanais com umidade relativa do ar acima de 90%; LANC: Número de Lançamentos Foliares por Semana; *Significativo a 5% de Probabilidade. **Significativo a 1% de Probabilidade

($r_1=1,146$ e $r_3=0,912$ para URMS e $r_1= -1,185$ e $r_3= -1,087$ para NHU>90) e na 7ª semana anterior ao aparecimento de frutos morango ($r=0,891$). No entanto, a combinação dos efeitos diretos e indiretos destas variáveis, por apresentarem sinais contrários, gerou correlações totais não significativas (Tabelas 3 e 4). Nas demais semanas, não se observaram coeficientes de trilha com magnitudes expressivas sobre as correlações totais.

Tabela 4 - Coeficientes de Trilha calculados para a variável VBRV (Vassouras-de-bruxa em Ramos Verdes por Semana): efeitos diretos e indiretos em função de variáveis meteorológicas e fenológicas.

			Defasagens (Semanas)			
			1	3	4	7
Efeito Direto	de	NHT<20	-0.087	0.209	0.269	0.602
Efeito Indireto	via	NHT>28	0.100	0.089	0.166	-0.127
	via	NHU>70	-0.045	-0.046	-0.081	0.091
	via	NHU80-90	-0.026	-0.051	-0.042	-0.039
	via	NHC22-05	0.000	0.000	0.000	-0.009
	via	LANC	0.076	0.018	-0.008	-0.021
TOTAL			0.018	0.220*	0.305**	0.497**
Coef. Determinação			0.308	0.120	0.170	0.331
Efeito da Var. Residual			0.832	0.938	0.911	0.818

NHT<20: Número de horas semanais com Temperaturas inferiores a 20°C; NHT>28: Número de horas semanais com Temperaturas entre superiores a 28°C; NHU>70: Número de horas semanais com Umidade Relativa do Ar inferiores a 70%; NHU80-90: Número de horas semanais com Umidade Relativa do Ar entre 80 e 90%; NHC22-05: Número de horas semanais de Chuva ocorridas entre 22 e 5h; LANC: Número de Lançamentos Foliares por Semana; *Significativo a 5% de Probabilidade; **Significativo a 1% de Probabilidade.

Pela análise de correlação parcial entre Vassoura-de-bruxa em Ramos Verdes (VBRV), Umidade Relativa Média da Semana (URMS) e Número de Horas de Umidade Relativa do Ar Superior a 90% (NHU>90) na 3ª semana anterior à doença, observa-se aumento das correlações entre a doença e as variáveis URMS e NHU>90, analisadas isoladamente. O mesmo foi constatado

na análise de correlação parcial entre Número de Frutos Morango (FMO), URMS e NHU>90 na 7ª semana anterior ao surgimento da doença, quando as variáveis foram analisadas isoladamente.

Observou-se também, por meio da análise de trilha, o efeito direto positivo do Número de horas de Temperatura do ar menor que 20°C por semana (NHT<20) sobre a correlação total deste com a variável Vassoura-de-bruxa em ramos Verdes (VBRV) na 7ª semana anterior ao aparecimento da doença (Tabela 5).

Tabela 5 - Coeficientes de Trilha calculados para a variável FMO (Número de Frutos Morango por Semana): efeitos diretos e indiretos em função de variáveis meteorológicas e fenológicas.

			Defasagens (Semanas)			
			1	3	4	7
Efeito Direto	de	NHU>90	-0.129	-0.104	-0.171	-1.063
Efeito Indireto	via	TM	-0.284	0.057	-0.097	-0.105
	via	CHUVA	-0.014	0.009	0.032	0.038
	via	NHCS	0.000	-0.038	-0.035	-0.011
	via	NHT20-24	-0.111	0.022	-0.045	-0.028
	via	NHT24-28	0.046	-0.107	-0.031	-0.004
	via	URMS	0.313	0.047	0.256	0.891
	via	ALM	0.006	-0.021	-0.001	0.005
TOTAL			-0.174*	-0.134	-0.093	-0.276**

TM: Temperatura Média por Semana; Chuva: Precipitação Total por Semana; NHCS: Número de horas Semanais de Chuva; NHT20-24: Número de horas semanais com temperaturas entre 20 e 24°C; NHT24-28: Número de horas semanais com temperaturas entre 24 e 28°C; URMS: Umidade Relativa Média do ar; NHU>90: Número de horas semanais com Umidade Relativa do Ar acima de 90%; ALM: Número de Almofadas Florais por Semana; *Significativo a 5% de Probabilidade; **Significativo a 1% de Probabilidade.

O Número de Horas de Umidade Relativa do Ar Inferior a 70% (NHU<70) e o Número de Horas de Umidade Relativa do Ar entre 80 e 90% (URAS) não apresentaram correlações significativas com a doença em folhas e o aparecimento de frutos morango, nos intervalos semanais estudados. O

mesmo foi observado nas variáveis relacionadas à chuva, representadas por: Total de Chuva por Semana (Chuva); Número de Horas de Chuva por Semana (NHCS) e Número de Horas de Chuva ocorridas entre 22 e 5h (NHC22-05) e nas variáveis relacionadas à temperatura, representadas por: Temperatura Média da Semana (TM), Número de Horas de Temperatura do ar entre 20 e 24°C por semana (NHT20-24), Número de Horas de Temperatura do ar entre 24 e 28°C por semana (NHT24-28) e Número de Horas de Temperatura do ar maior que 28°C por semana (NHT>28).

5. DISCUSSÃO

As temperaturas médias semanais mantiveram-se amenas durante todo o experimento, com média anual de 22°C. Na região cacaeira da Bahia geralmente ocorrem temperaturas mais baixas em relação às regiões produtoras da Amazônia e com um período distinto de temperaturas inferiores a 22°C entre julho e setembro (Rocha *et al.*, 1993). Durante o estudo, não se observaram períodos úmidos e secos, sendo que a precipitação ocorreu principalmente no período noturno, durante grande parte do ano. Esta característica é comum às áreas produtoras de cacau na Bahia, sendo que a distribuição mensal de chuva varia bastante entre os anos (Rocha *et al.*, 1993). Além disso, em grande parte do período do experimento, foram observados períodos de umidade relativa do ar próxima à saturação. Na região de Camacã, a umidade do ar geralmente se mantém acima de 84% por pelo menos 8 horas por dia (CEPLAC, 1983).

Apesar de significativos, a maioria dos coeficientes de correlação estabelecidos entre as variáveis meteorológicas e fenológicas e a doença foi considerada baixa, do ponto de vista biológico. Neste estudo, não se observaram padrões claros de ocorrência de doença, o clima esteve bastante uniforme ao longo do ano para temperaturas, umidade do ar e chuvas, apesar dos eventos fenológicos terem obedecido a padrões regulares de ocorrência. Desta forma, as relações entre o clima, a fenologia da cultura e a doença não se repetiram nos três anos estudados. Além disso, como grande parte das

relações existentes entre as variáveis meteorológicas e os processos biológicos é regida por padrões não lineares, provavelmente as correlações simples, as quais pressupõem relações lineares entre as variáveis analisadas, não foram adequadas para expressar inteiramente tais relações (Tyldesley, 1978).

Constatou-se neste estudo correlação significativa entre redução de temperaturas e a ocorrência da doença em folhas. Considerando que a umidade relativa do ar é função indireta da temperatura do ar, via atuação na pressão de saturação de vapor (Allen *et al.*, 1998), a redução das temperaturas com uma quantidade de água no ar constante, induz a manutenção da saturação do ar por um período mais prolongado. Neste estudo, a ocorrência de horas de temperaturas inferiores a 20°C, possivelmente contribuiu para a manutenção de umidade do ar próxima à saturação, o que favoreceu tanto a produção de inóculo quanto a infecção do patógeno (Wheeler e Suárez, 1993).

A umidade pode ser relacionada à vassoura-de-bruxa do cacaueteiro em diversas etapas do ciclo da doença. Neste estudo, a umidade média do ar relacionou-se positivamente com a doença em ramos e frutos morango, com 3 e 7 semanas de antecedência respectivamente, mas o número de horas de umidade próxima à saturação foi inversamente relacionada no mesmo período, levando a correlação total a valores não significativos. Geralmente, a ocorrência de alta umidade do ar favorece a formação de orvalho sobre a cultura, gerando condições propícias à infecção (Rudgard e Butler, 1987). Por outro lado, o excesso de horas de saturação do ar é fator negativo ao desenvolvimento da doença, uma vez que o patógeno exige alternância de períodos secos e úmidos para o sucesso da infecção (Rocha e Wheeler, 1985; Rudgard, 1987a). O intervalo de tempo entre a ocorrência de condições propícias de umidade e o aparecimento da doença em ramos coincidiu com o período de incubação da doença estimado para Camacã (Luz *et al.*, 1994).

Neste trabalho, a característica sazonal da fenologia do cacaueteiro aparentemente exerceu influência sobre a ocorrência da doença. Os sintomas em ramos ocorreram concomitantemente aos fluxos de lançamentos foliares, com defasagem de apenas uma semana. Esta relação sugere que, considerando um período de incubação da doença de 3 a 4 semanas na região de Camacã, a infecção em ramos ocorreu preferencialmente em gemas em

início de desenvolvimento (Luz *et al.*, 1994). Em outros estudos, evidenciou-se que as gemas em desenvolvimento são tecidos particularmente suscetíveis à infecção do patógeno (Wheeler e Suárez, 1993; Andebrhan *et al.*, 1993).

Apesar de frutos morango serem geralmente formadas 6 semanas após as infecções em flores, no presente trabalho não se estabeleceram boas correlações entre o aparecimento de frutos morango e a disponibilidade de almofadas florais em nenhuma das semanas anteriores ao surgimento da doença (Silva *et al.*, 2002). Esta observação pode ser explicada pela contínua floração do cacau, com um pequeno número de flores disponível ao longo de praticamente o ano todo (Rocha *et al.*, 1993). Desta forma, com a disponibilidade de tecido ao longo do ano, a infecção em flores foi função exclusivamente da atuação do clima sobre o desenvolvimento do patógeno (Schmidt *et al.*, 1993).

A chuva, apesar de ser considerada a principal fonte de variação do clima nas regiões produtoras de cacau (Schmidt *et al.*, 1993; Wheeler e Suárez, 1993), não é marcadamente sazonal na Bahia (Rocha *et al.*, 1993). Provavelmente por isso, a relação entre chuva e doença não foi significativa neste estudo, tanto para produção de vassouras em ramos verdes como a de frutos morango. Em locais com boa distribuição de chuvas ao longo do ano, observa-se produção de inóculo o ano todo (Aranzazu e Buriticá, 1993).

Verificou-se no presente trabalho que o monitoramento dos períodos de redução de temperaturas, com prolongamento do período de saturação do ar, principalmente em épocas quando as gemas vegetativas e reprodutivas são suscetíveis, deverá ser uma estratégia interessante para o manejo da doença, concordando com Huber e Gillespie (1992). A umidade do ar deverá ser monitorada para constatação da formação de orvalho, dado que estas condições são favoráveis a fungos hemibiotróficos, como *C. pernicioso*, os quais exigem períodos mais prolongados de molhamento foliar para a infecção (Sutton, 1988). Estas informações poderão favorecer uma estratégia de controle integrado da doença, melhorando a eficiência das medidas de controle já utilizadas, incluindo as podas fitossanitárias periódicas e o controle químico (Luz *et al.*, 1994; Andebrhan *et al.*, 1993; Alves, 2002). As podas fitossanitárias deverão ser programadas a fim de que se reduza o inóculo nas épocas de

maior suscetibilidade, bem como a pulverização de flores deverá ser realizada sempre que forem detectados períodos favoráveis à infecção.

O presente trabalho determinou o provável intervalo entre a infecção de *C. pernicioso* em cacaueteiro na região de Camacã e o aparecimento de sintomas, bem como as variáveis meteorológicas que exercem maior influência sobre os picos de ocorrência da doença, com destaque para aquelas relacionadas à umidade do ar. No entanto, estudos mais específicos serão necessários a fim de se esclarecer quantitativamente a influência da umidade do ar, da temperatura e da fenologia sobre a ocorrência de vassoura-de-bruxa do cacaueteiro.

6. CONCLUSÕES

1. A ocorrência dos fluxos de lançamentos foliares coincide com o aparecimento de sintomas de vassoura-de-bruxa em ramos do cacauero.
2. A chuva influenciou pouco a ocorrência de picos de doença em ramos verdes e o aparecimento de frutos morango, provavelmente devido à sua boa distribuição na região de Camacã.
3. O incremento da umidade do ar relacionou-se positivamente à infecção em gemas vegetativas e em almofadas florais, respectivamente no intervalo de 3 a 4 semanas e de cerca de 7 a 8 semanas entre a infecção e o aparecimento de ramos doentes e frutos morango.
4. O excesso de umidade, no intervalo de tempo de 3 a 4 semanas para ramos e 7 a 8 semanas para flores, reduziu a incidência da doença.
5. O monitoramento das condições de umidade do ar, juntamente com o acompanhamento da fenologia da cultura, pode ser utilizado na indicação das épocas propícias à infecção de *C. perniciosa*, quando medidas eficazes de controle poderão ser implementadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma das funções da modelagem é organizar e unir os conhecimentos adquiridos a cerca dos mecanismos envolvidos no desenvolvimento das culturas, evidenciando os pontos onde ainda são necessários estudos adicionais para o melhor entendimento do sistema. Neste sentido, o desenvolvimento e o aprimoramento de modelos para o desenvolvimento do cacauero vem servindo tanto para reunir o conhecimento acumulado nas últimas décadas quanto para destacar o que ainda falta ser melhor esclarecido sobre a cultura. Desta forma, a compreensão da seqüência de processos fisiológicos e fenológicos observados no desenvolvimento do cacauero auxilia o planejamento do manejo da cultura e as informações geradas pela simulação é aplicável na condução da lavoura, elevando a possibilidade de sucesso do empreendimento.

Os conhecimentos gerados a partir da modelagem podem também ser aplicados diretamente em estudos sobre cacauero, especialmente no que se refere ao controle de vassoura-de-bruxa. Os testes com cultivares melhorados geneticamente para obtenção de resistência à doença podem ser simulados utilizando-se os modelos desenvolvidos para o cacauero, com a vantagem de que as circunstâncias de condução dos testes podem ser alteradas com relativa facilidade, gerando grande volume de informações em curto período de tempo e com custos inferiores aos testes tradicionais de campo. Além disso,

nos estudos sobre o controle biológico da vassoura-de-bruxa do cacauero, pode-se simular o comportamento dos agentes de biocontrole frente aos fitopatógenos em vários cenários no ambiente da cultura, de forma que diferentes interações entre os microorganismos e o ambiente podem ser testadas e avaliadas.

Finalmente, a modelagem do desenvolvimento e da produtividade do cacauero deve auxiliar outros estudos de modelagem para culturas perenes, servindo com estímulo aos demais pesquisadores em uma área da modelagem onde são pequenos os avanços nos últimos anos em comparação à modelagem de culturas anuais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL HARIS, A., BALASIMHA, D. ; SUJATA, S.; BHAT, R.; ABDUL KHADER, K. B. The influence of drip irrigation and fertilizer levels on yield and photosynthetic characteristics of cocoa in mixed cropping system with arecanut. **Journal of Plantation Crops**, v.27, n.2, p. 131-135, 1999.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requeriments**. (FAO Irrigation and Drainage, 56).Rome: FAO, 308p, 1998.
- ALMEIDA, H. A. **Influência dos elementos meteorológicos no lançamento foliar, na floração e frutificação do cacauero (*Theobroma cacao* L.)**. Piracicaba - SP: ESALQ, 1986. 111 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) - ESALQ, 1986.
- ALMEIDA, H. A.; MACHADO, R. C. R.; SILVA, W. S.; NOVA, N. A. Influência dos fatores meteorológicos na floração do cacauero. In: 10th International Cocoa Research Conference, Santo Domingo, Lagos: Cocoa Producers' Alliance, p.93-98, 1987.
- ALVES, S. A. M. Epidemiologia de vassoura-de-bruxa (*Crinipellis pernicioso* (Stahel) Singer) em cacaueros enxertados em Uruçuca, Bahia. **Dissertação de Mestrado**. Piracicaba - SP: ESALQ, 2002. 53 p.
- ALVIM, P. T. Ecophysiology of cacao. In: (Eds.) **Ecophysiology of Tropical Crops**. 1975. p. 01 - 53.
- ALVIM, P. T. Flowering of cocoa. **Cocoa Growers Bulletin**, v.35, p. 23-31, 1984.
- ALVIM, P. T. Hydroperiodicity of flowering and flushing of cacao. In: XI International Cocoa Research Conference, 1993, Côte D'ivoire. **Proceedings**. 11st International Cocoa Research Conference: 1994. p. 625 - 34.

- ALVIM, P. T. Relações entre fatores climáticos e produção do cacau. In: 10th International Cocoa Research Conference, 1987, Santo Domingo. **Proceedings**. 10th International Cocoa Research Conference: 1987. p.159 - 67.
- ALVIM, P. T.; MACHADO, A. D.; GRANGIER Jr., A. Alguns estudos sobre as relações de água, solo e crescimento do cacau. 2a Conferência Internacional de Pesquisas em Cacau, Bahia, Brasil, p.316-326, 1969.
- ALVIM, R.; ALVIM, P. T.; LORENZINI, R.; SAUNDERS, P. F. The possible role of abscisic acid and cytokinins in growth rhythms of *Theobroma cacao* L. **Revista Theobroma**, v.2, n.1, p.3-12, 1974.
- ANDEBRHAN, T. Rain-water as a factor in the dissimination of basidiospores of *Crinipellis pernicioso* (Stahel) singer within cacao trees. In: 10th International Cocoa Research Conference, 1987, Santo Domingo. **Proceedings**. 10th International Cocoa Research Conference: 1987. p. 367-69.
- ANDEBRHAN, T. Studies on the epidemiology and control of witches' broom disease of cacao in the brazilian Amazon. 9th International Cocoa Research Conference, Lomé, Lagos : Cocoa Producers' Alliance, p.395-402, 1984.
- ANDEBRHAN, T.; COSTA, J. C. B.; CARVALHO, A. L. P.; ALBUQUERQUE, P. Comparative epidemiology experiment: Brazil. In: **Disease management in cocoa**. S. A. Rudgard, A. C. Maddison and T. Andebrhan. London, Chapman & Hall: 33 - 56.1993
- ARANZAZU, F. H.; Buriticá, P. C. Comparative epidemiology study: Colombia, Caldas and Llanos Orientales. In: Rudgard, S. A.; Maddison, A. C.; Andebrhan, T. (Eds.) **Disease management in cocoa**. London: Chapman & Hall, p. 57-71, 1993.
- ARNOLD, C. Y. Maximum-minimum temperatures as a basic for computing heat units. **Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.**, v.76, p. 682-692, 1960.
- AUGUSTO, S. G. **Irrigação suplementar nos diferentes estádios fenológicos do cacau (Theobroma cacao L.)**. Viçosa - MG: UFV, 1997. 120 p. Dissertação (Dissertação de Doutorado) - UFV, 1997.
- BALASIMHA, D. Stress physiology of cocoa. **Journal of Plantation Crops**, v. 27, n. 1, p. 1 - 8, 1999.
- BALASIMHA, D. Water relations, growth and other indicators of plant water stress in cocoa under drought. 10th International Cocoa Research Conference, Santo Domingo, Lagos: Cocoa Producers' Alliance, p. 215-217, 1987.
- BALASIMHA, D.; DANIEL, E. V.; BHAT, P. G. Influence of environmental factors on photosynthesis in cocoa trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 55, p. 15-21, 1991.
- BALASIMHA, D.; NAIR, B. P. Biomass estimation of cocoa plant by regression analysis. **Journal of Plantation Crops**, v.17, n.1, p. 57-58, 1989.

- BALASIMHA, D.; RAJAGOPAL, V. Stomatal responses of cocoa (*Theobroma cacao*) to climate factors. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.58, n.3, p.213 –216, 1988.
- BASKERVILLE, G. L.; EMIN, P. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. **Ecology**, v.50, p.514-517, 1969.
- BENCHIMOL, R. L., F. C. Albuquerque, et al. Aspectos epidemiológicos da vassoura-de-bruxa do cupuaçuzeiro na microrregião de Belém, PA. **Pesquisa Agropecuária brasileira** 36(2): 279-283.2001
- BEZERRA, J. L. Novos hospedeiros de *Crinipellis pernicioso* na região cacauzeira da Bahia. 27th Congresso Brasileiro de Fitopatologia, Fitopatologia Brasileira, 1994.
- BUTLER, D. R.; MIRANDA, R. A. C. Comparação entre os métodos de Penman e Thornthwaite para calcular a evapotranspiração potencial no sudeste da Bahia. **Revista Theobroma**, v.14, n.2, p.127-133, 1984.
- CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V. **Introduction to plant disease epidemiology**. New York: John Wiley, 1990. 532 p.
- CEPEC. Uma reavaliação do ciclo de vida da vassoura-de-bruxa (*Crinipellis pernicioso* (Stahel) Singer) do cacau (*Theobroma cacao* L.). In: **Informe Técnico**. Ilhéus, Bahia, p.404-405, 1979.
- CEPLAC. Sinopse do Cacau. www.ceplac.gov.br Último acesso: 15/07/2004.
- CEPLAC. Vassoura-de-bruxa do cacauzeiro. In: **Informe de Pesquisas**. Ilhéus, Bahia, p.437, 1983.
- CHERWELL. Model Maker 3 for Windows – version 3.0.2. Cherwell Scientific Publishing, Palo Alto, EUA, 1997.
- COSTA, J. C. B. Progresso de vassoura-de-bruxa em órgãos vegetativos do cacauzeiro em Altamira e Tomé-Açu, PA. Viçosa, 1993. 52p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa.
- CRUZ, C. D. Programa GENES – versão Windows. Ed. UFV, Viçosa, MG. 2001. 642 p.
- DE WIT, C. T.; BROUWER, R.; PENNING DE VRIES, F. W. T. The simulation of photosynthetic systems. In: BP/PP Technical Meeting: prediction and measurements of photosynthetic productivity, 1969, Trebon. **Proceedings**. IBP/PP Technical Meeting: prediction and measurements of photosynthetic productivity, 1969. 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.

- DIAS, L. A. S. (ed). Melhoramento Genético do Cacaueiro. Goiânia, GO: FUNAPE, 2001. 578p.
- END, M. J.; HADLEY, P.; PETTIPHER, G. L. Long and short-term studies of the growth of cocoa (*Theobroma cacao* L.) pods in relation to photo-thermal environment. 10th International Cocoa Research Conference, Santo Domingo, Lagos: Cocoa Producers' Alliance, p.219-223, 1987.
- EVANS, H. C. Witches' broom disease: a case study. **Cocoa Growers' Bulletin**, v.32, p.36-51, 1981.
- FERREIRA, W. P. M. Desenvolvimento e teste de um modelo agrometeorológico de simulação para a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). Viçosa - MG: UFV, 1997. 84 p. **Dissertação (Dissertação de Mestrado)** - UFV, 1997.
- FRIAS, G. A.; PURDY, L. H.; SCHMIDT, R. A. Infection biology of *Crinipellis pernicioso* on vegetative flushes of cacao. *Plant Disease*, v.75, n.6, 9.552-556, 1991.
- FUNDAÇÃO CARGILL. Vassoura-de-bruxa do cacaueiro. Campinas, SP. 7 p., 1993.
- GIANFAGNA, T.; HEBBAR, P.; LUMSDEN, R. D. Why *Trichoderma stromaticum* is a Hot Topic? **GRO-Cocoa**, N.3; p.6, 2003.
- GOTSCH, N. Cocoa crop protection: an expert forecast on future progress, research priorities and policy with the help of the Delphi survey. **Crop Protection**, v.16, n.3, p.227-233, 1997.
- GOUDRIAAN, J. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. **Agric. and Forest Meteorology**, v. 38, p.249-54, 1986.
- GRIFFITH, G. Application of the techniques of molecular biology to cocoa pathology. **Cocoa Growers' Bulletin**, n.52, p.46-58, 2000.
- HAMAKAWA, P. J. Análises multivariadas e de séries temporais de elementos meteorológicos e de parâmetros fenológicos do cacaueiro (*Theobroma cacao* L.) sob diferentes regimes de irrigação. Viçosa, 2002. 165p. Dissertação de Doutorado – Universidade Federal de Viçosa.
- HUBER, L.; GILLESPIE, T. J. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. **An. Rev. Phytopathology**, v.30, p.553-577, 1992.
- HUNT, R. Plant growth curves: the functional approach to plant growth analysis. Baltimore, University Park Press, 1982, 248 p.
- HUTCHEON, W. V. Growth and photosynthesis of cocoa relation to environmental and internal factors. In: 5th International Cocoa Research Conference, 1987, Ibadan. **Proceedings**. 5th International Cocoa Research Conference, 1975. p.222-223.

- JOLY, R. J. Physiological adaptation for maintaining photosynthesis under water stress in cacao. 10th International Cocoa Research Conference, Santo Domingo, Lagos : Cocoa Producers' Alliance, p. 199-203, 1987.
- LAKER, H.; RUDGARD, S. A. A review of the research on chemical control of witches' broom disease of cocoa. **Cocoa Growers' Bulletin**, v.42, p.12-24, 1989.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Paulo: EPU, 1986. 319 p.
- LASS, R. A. Summary report of the International Witches' Broom Project (IWBP). **Cocoa Grower's Bulletin**, v.46, 32 p., 1993.
- LEK, S.; GUÉGAN, J. F. Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction. **Ecological Modelling**, v. 120., p. 65 – 73, 1999.
- LOOMIS, R. S.; RABBINGE, R.; NG, E. Explanatory models in crop physiology. **An. Rev. Plant Physiology**, v.30, p. 339-367, 1979.
- LUZ, E. D. M. N.; BEZERRA, J. L.; RESENDE, M. L. V.; OLIVEIRA, M. L. Cacau (*Theobroma cacao* L.) Controle de Doenças. In: VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, L. (eds.). Controle de Doenças de Plantas. Ed. UFV, Viçosa, Brasil, 1997, p.611-655.
- LUZ, E. D. M. N.; MACHADO, R. C. R.; ALMEIDA, H. A. Períodos de incubação, secamento de vassouras, produção de basidiomas e atividade de *Crinipellis pernicioso* em ramos e frutos de cacauzeiro. 27th Congresso Brasileiro de Fitopatologia, Fitopatologia Brasileira.1994
- MACHADO, R. C. R.; ALVIM, P.T.; MILDE, L. C. E. Reações fisiológicas do cacauzeiro à deficiência de água no solo. In: 7th International Cocoa Research Conference, 1979, Douala. **Proceedings**. 7th International Cocoa Research Conference: 1979. p. 121-127.
- 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.
- MILDE, L. C. E.; SGRILLO, R. B. Parâmetros para modelagem do crescimento do fruto do cacauzeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.28, n.7, p.759-765, 1993.
- MIRANDA, R. A. C.; MILDE, L. C. E.; BICHARA, A. L.; CORNELL, S. Daily characterisation of air temperature and relative humidity profiles in a cocoa plantation. **Pesq. Agrop. Brasileira**, v.29, n.3, p. 345-353, 1994.
- MIYAJI, K. I.; SILVA, W. S.; ALVIM, P. T. Productivity of leaves of a tropical tree *Theobroma cacao*, grown under shading, in relation to leaf age and light conditions within the canopy. **New Phytologist**, 137: 463-472. 1997.

- MONTE, M. J. S.; ALVIM, P. T.; MACHADO, R. C. R.; MÜLLER, M. W. Avaliação de potencial de produção do cacauero com base em análise de crescimento de plantas jovens. 9th International Cocoa Research Conference, Lomé, Lagos: Cocoa Producers' Alliance, 131-136, 1984.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E.A. Introduction to linear regression analysis. Nova York: John Wiley & Sons, 1981. 504 p.
- NUNES, A. M. L.; BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L.; NUNES, M. A. L.; DIAS, C. T. S. Análise da curva de progresso temporal da vassoura-de-bruxa do cupuaçuzeiro. **Fitopatologia Brasileira**, v. 27, n. 4, p. 344-48, 2002.
- 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.
- PORTER, C. H.; BRAGA, R.; JONES, J. W. An approach for modular crop model development. Research Report No 99 – 0701. Gainesville, Florida, 1999.
- PURDY, L. H.; SCHMIDT, R. A. Status of cacao witches' broom: biology, epidemiology, and management. **An. Rev. Phytopathology**, v.34, p.573-594, 1996.
- RAJA HARUN, R. M.; HARDWICK, K. Photosynthesis and transpiration of cocoa leaves. In: Pushparajah, E.; Chew, P. S. (eds.). Cocoa and coconuts: Progress and outlook. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, p. 499-504.
- RAJA HARUN, R. M.; HARDWICK, K. The effect of different temperatures and vapour pressure deficits on photosynthesis and transpiration of cocoa leaves. In: 10th International Cocoa Research Conference, 1987, Santo Domingo. **Proceedings**. 10th International Cocoa Research Conference: 1987. p.211-14.
- REYNOLDS, J. F.; ACOCK, B. Modularity and genericness in plant and ecosystem models. **Ecological Modeling**, v. 94, p. 7 - 16, 1997.
- ROCHA, H. M.; MIRANDA, R. A. C.; SGRILLO, R. B.; SETUBAL, R. A. Witches' broom in Bahia, Brazil. In: S. A. Rudgard; A. C. Maddison; T. Andebrhan (Eds.) **Disease management in cocoa**. London: Chapman & Hall, p.189-200, 1993.
- ROCHA, H. M.; WHEELER, E. J. Factors influencing the production of basidiocarps and the deposition and germination of basidiospores of *Crinipellis pernicioso*, the causal fungus of witches' broom on cocoa *Theobroma cacao*. **Plant Pathology**, v. 34, n. 3, p. 319 - 28, 1985.
- ROUSE, D. I. Use of crop growth-models to predict the effects of disease. **An. Rev. Phytopathology**, v.26, p. 183-201, 1988.
- RUDGARD, S. A. Interpreting the epidemiology of cocoa witches' broom for better disease management in Rondonia, Brazil. **Cocoa Growers' Bulletin**, n.38, p.28-38, 1987a.

- RUDGARD, S. A. Witches' broom disease of cocoa in Rondônia, Brazil: infection of vegetative flushes and flower cushions in relation to host phenology. **Plant Pathology**. V.36, p.523-530, 1987b.
- RUDGARD, S. A.; BUTLER, D. R. Witches' broom disease on cocoa in Rondonia, Brazil: pod infection in relation to pod susceptibility, wetness, inoculum, and phytosanitation. **Plant Pathology**, v.36, n.515-522, 1987.
- SALE, P. J. M. Growth and flowering of cacao under controlled atmospheric relative humidities. **Journal of Horticultural Science**, v.45, p. 119-132, 1970.
- SANTOS FILHO, L. P.; FREIRE, E. S.; CARZOLA, I. M. Estimativas de perdas de produção de cacau causadas por vassoura-de-bruxa (*Crinipellis pernicioso* (Stahel) Singer) na Bahia. **Agrotrópica**. V.10, n.3, p.127-130, 1998.
- SANTOS, A. A. Desenvolvimento e avaliação de um modelo mecanístico para a estimativa da produtividade da cultura do cafeeiro. Viçosa: UFV, 2002. 43 p. **Dissertação (Dissertação de Mestrado)** - UFV, 2002.
- SCHMIDT, R. A., RUDGARD, S.A.; MADDISON, A.C.; ANDEBRHAN, T. Comparative epidemiology of the witches' broom pathosystem. **Disease management in cocoa**. S. A. Rudgard, A. C. Maddison and T. Andebrhan. London, Chapman e Hall: p.131 – 155, 1993.
- SGRILLO, R. B.; ARAUJO, K. R. P. Modelo de simulação da evolução da vassoura-de-bruxa do cacau na Bahia. **Agrotrópica**, v. 6, n. 3, p. 73-84, 1994.
- SGRILLO, R. B.; LUZ, E. D. M. N.; ARAUJO, K. R. P. Método de amostragem seqüencial para avaliação do nível de infecção em áreas de cacau afetadas pela vassoura-de-bruxa na Bahia **Agrotrópica**, v. 7, n. 2, p. 31-42, 1995.
- SILVA, S. D. V. M.; LUZ, E. D. M. N.; ALMEIDA, O. C.; GRAMACHO, K. P.; BEZERRA, J. L. Redescrição da sintomatologia causada por *Crinipellis pernicioso* em cacau. **Agrotrópica**, v.14, n.1, ed. Especial, 2002.
- SOUZA JR., J. O. S. Fatores Edafoclimáticos que influenciam a produtividade do cacau cultivado no sul da Bahia, Brasil. Viçosa - MG: UFV, 1997. 146 p. **Dissertação (Dissertação de Mestrado)** - UFV, 1997.
- SUTTON, J. C. Predictive value of weather variables in the epidemiology and management of foliar diseases. **Fitopatologia Brasileira**, v.13, p.305-312, 1988.
- TEIXEIRA, C. O cacau renasce na Bahia. **Revista Rural**, v.7, 2002.
- THORNLEY, J. H. M.; JOHNSON, I. R. Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology. Oxford Science Publications, NY, EUA. 669 p., 1990.

- TYLDESLEY, J. B. A method of evaluating the effect of temperature on an organism when the response is non-linear. **Agricultural Meteorology**, v. 19, p.137 - 53, 1978.
- VALLE, R. R.; SILVA, W. S.; MIRANDA, R. A. C. Stomatal resistance and transpiration rates of shaded and unshaded cacao trees. **Revista Theobroma**, v.17, n.3, p.175-187, 1987.
- VILA NOVA, N. A.; PEDRO JR.; M. J., PEREIRA, A. R.; OMETTO, J. C. Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura-base, em função das temperaturas máximas e mínimas. **Caderno de Ciência da Terra**, n.30, 1972.
- WHEELER, B. E. J.; SUÁREZ, C. The pathosystem. In: Rudgard, S. A.; Maddison, A. C.; Andebrhan, T. (Eds.) **Disease management in cocoa**. London: Chapman & Hall, p. 9-31, 1993.
- WILLS, G. A. Growth of *Theobroma cacao* L. under conditions of accelerated shade removal. **Planter**, v.57, p.526-575, 1981.
- YAPP, J. H. H.; HADLEY, P. Inter-relationships between canopy architecture, light interception, vigour and yield in cocoa: implications for improving production efficiency. In: Tay, E. B.; Le, M. T.; Yap, T. N.; Zulkairnin, B. I.; Thong, F. T.; Bong, S. L.; Tee, S. K. (eds.). *Proceedings of the International Cocoa Research Conference: challenges in the 90s*, Kuala Lumpur, Malasia, 1991, p. 332-350.
- ZUIDEMA, P. A.; LEFFELAAR, P. A. A physiological production model for cacao. Wageningen, Netherlands, Wageningen University. 61p., 2002.