

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO CERES-MAIZE EM CONDIÇÕES TROPICAIS DO BRASIL

MILCÍADES GADELHA DE LIMA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Antonio Luiz Fancelli

**Tese apresentada à Escola Superior
de Agricultura "Luiz de Queiroz",
da Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em
Agronomia, Área de Concentração:
Fitotecnia.**

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Outubro - 1995

Dados internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Divisão de Biblioteca e Documentação - CAMPUS "LUIZ DE QUEIROZ"/USP

Lima, Milcfades Gadelha de
Calibração e validação do modelo cereis-maize em condições tropicais
do Brasil. Piracicaba, 1995.
119p.

Tese - ESALQ
Bibliografia.

1. Milho - Rendimento - Estimativa 2. Milho - Desenvolvimento - Simu
lação automatizada 3. Simulação automatizada - Modelo - Avaliação
I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 633.151

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO CERES-MAIZE EM CONDIÇÕES TROPICAIS DO BRASIL

MILCÍADES GADELHA DE LIMA

Aprovada em: 14/12/1995

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Antonio Luiz Fancelli

ESALQ/USP

Prof. Dr. Durval Dourado Neto

ESALQ/USP

Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova

ESALQ/USP

Prof. Dr. William Tse Horng Liu

IAG/USP

Dr. Ariovaldo Luchiari Júnior

CNPMA/EMBRAPA



Prof. Dr. ANTONIO LUIZ FANCELLI
Orientador

À minha esposa Regina Lima,
pelo apoio e compreensão, e
aos meus filhos André, Iara e Sara

OFEREÇO

Aos meus pais e aos
meus irmãos

DEDICO

AGRADECIMENTOS

- A Deus, pelas vicissitudes boas que me aconteceram durante a realização do Curso de pós-graduação em Agronomia, área de concentração: Fitotecnia, as quais só me fizeram crescer profissional e espiritualmente;
- À Universidade Federal do Piauí, através do Centro de Ciências Agrárias/Departamento de Engenharia Agrícola e Solos, pela possibilidade de realização do Curso;
- À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, através do Departamento de Agricultura, bem como aos demais funcionários, pela acolhida amiga durante o Curso;
- À CAPES/PICD pela cessão do apoio financeiro;
- Ao Departamento de Física e Meteorologia e respectivos funcionários pelo apoio na realização da parte experimental;
- Ao professor orientador Dr. Antonio Luiz Fancelli, pela amizade, apoio e oportunidade de participação de suas idéias e conhecimentos através de sua valiosa orientação;
- Ao professor José Carlos Ometo, pelo incentivo, apoio e empenho pessoal dedicados antes e durante a realização do Curso;
- Aos professores Durval Dourado Neto, Nilson Augusto Villa Nova e Paulo Leonel Libardi, pelas sugestões e apoio cedidos na realização dos experimentos e tratamentos de dados e também pelo afeto demonstrado nas ocasiões em que foram solicitados;
- Aos professores Antonio Roberto Pereira, Gil Miguel de Sousa Câmara, Luiz Roberto Angelocci e Sérgio Oliveira Moraes pela colaboração prestada durante o Curso;

- Ao professor Dr. Quirijn de Jong Van Lier, do Departamento de Solos/FA/UFRGS pelas valiosas contribuições apresentadas;
- À professora Maria Cristina Stolf Nogueira do Departamento de Matemática e Estatística pelas orientações durante o planejamento dos experimentos e análise dos dados;
- Ao professor Luiz Gonzaga Carneiro pela amizade, e, principalmente, pelas valiosas contribuições na correção ortográfica;
- Aos colegas Antonio Domeval Alexandre, Eduardo McLouf, José Elenildo Queiroz, Marco Antonio de Sousa, Marcos Cabral de Vasconcellos Barretto, Raimundo Nonato de Assis Júnior, Raymundo Velazco Nuño, pelo apoio e amizade prestados;
- Às bibliotecárias Eliana M. Garcia Sabino e Kátia M. de Andrade Ferraz pela revisão das referências bibliográficas;
- Aos amigos Adeodato Ari Cavalcante Salviano, Antonio José de Almeida Filho, José Orlando Piauilino, Luiz Evaldo de Moura Pádua, Maria Cezira, Nelson Donizete e Renato Fernando Amabile pelo apoio sincero;
- Aos demais professores, colegas e pessoas que contribuíram para que este estudo se concretizasse.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xviii
SUMMARY	xx
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Modelos de simulação	4
2.1.1. Introdução	4
2.1.2. Vantagens do uso	5
2.1.3. Classificação	6
2.1.4. O modelo CERES-Maize	10
2.1.5. Calibração, validação e análise de sensibilidade	17
2.2. Fisiologia da cultura do milho	20
2.3. Movimento de água no solo	22
2.4. Evapotranspiração	23
3. MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1. Técnicas culturais	27
3.2. Delineamento experimental, amostragens e determinações	28
3.3. Caracterização do solo, manejo de água e balanço hídrico	30

3.4. Produção por área	35
3.4.1. Obtenção de parâmetros fisiológicos	35
3.5. Obtenção de graus-dia	36
3.6. Descrição do modelo CERES-Maize	36
3.6.1. Informações necessárias para o funcionamento do modelo	38
3.6.2. Parâmetros de saída do modelo	38
3.7. Procedimentos para determinação dos parâmetros do solo	38
a) Albedo	38
b) Coeficiente de evaporação do solo na camada superficial	40
c) Coeficiente de drenagem	40
d) Número da curva de escoamento superficial	41
e) Fator de peso para a distribuição das raízes	41
f) Conteúdo inicial de água no solo	42
3.8. Calibração dos parâmetros do modelo	45
3.9 Validação do modelo	46
3.10. Procedimento para o teste de sensibilidade	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1. Condições do ambiente durante as três épocas de semeadura	49
4.2. Fenologia da cultura do milho	54
4.3. Acúmulo diferencial de matéria seca (g.m^{-2})	59
4.4. Taxa de produção de matéria seca ($\text{g.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}.\text{dia}^{-1}$)	64
4.5. Parâmetros essenciais ao modelo observados durante a primeira época de semeadura	66
4.6. Calibração dos parâmetros do modelo	67
4.7. Validação do modelo	75
4.8. Testes de sensibilidade	76
4.9. Balanço hídrico	80
4.10. Índice de área foliar	83

4.10.1. Índice de área foliar observado	83
4.10.2. Índice de área foliar observado e estimado	84
4.11. Matéria seca total observada e estimada pelo modelo	88
4.12. Considerações finais	90
5. CONCLUSÃO	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
APÊNDICES	109
Apêndice 1	110
Apêndice 2	111
Apêndice 3	115
Apêndice 4	116
Apêndice 5	117
Apêndice 6	118
Apêndice 7	119

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Análise química do solo Terra Roxa Estruturada.....	26
Tabela 2- Relação das variáveis incluídas no arquivo de dados meteorológicos.....	39
Tabela 3 - Relação das variáveis incluídas no arquivo dos parâmetros de solo, genéticos e manejo.....	39
Tabela 4 - Estimativa do albedo do solo (JONES & KINIRY, 1986)...	43
Tabela 5 - Valores estimados do fator de peso para a distribuição das raízes, segundo o método proposto por JONES & KINIRY(1986).....	43
Tabela 6 - Grupos de solos usados para estimar o número da curva de escoamento (JONES & KINIRY, 1986).....	43
Tabela 7 - Número da curva de escoamento (CN2) em função do grupo hidrológico (JONES & KINIRY, 1986).....	44
Tabela 8 - Parâmetros de entrada do modelo, densidade do solo e coeficiente de drenagem.....	44
Tabela 9 - Parâmetros do solo e da cultura utilizados no modelo.....	44
Tabela 10 - Fenologia da cultura do milho híbrido, com exigências calóricas baixa, média e alta; semeado em 14/10/93; 14/01/94 e 27/08/94. Os valores representam dias após a	

semeadura.....	55
Tabela 11 - Parâmetros observados em três épocas de semeadura para os híbridos XL-520; XL-380 e XL-678.....	57
Tabela 12 - Simulação antes de calibrar os parâmetros do modelo.....	68
Tabela 13 - Calibração do parâmetro fisiológico P5 (graus-dia do florescimento até o ponto de maturidade fisiológica, observado em 06/02/94, dia juliano 37), para o híbrido com soma calórica baixa.....	70
Tabela 14 - Calibração do parâmetro fisiológico P5 (graus-dia do florescimento até o ponto de maturidade fisiológica), observado em 10/02/94 (dia juliano 41), para o híbrido com exigência calórica média.....	70
Tabela 15 - Calibração do parâmetro fisiológico P5 (graus-dia do florescimento até o ponto de maturidade fisiológica), observado em 11/02/94 (dia juliano 42) para o híbrido com exigência calórica alta.....	70
Tabela 16 - Calibração do coeficiente genético G2 (número potencial de grãos por planta), para o híbrido com exigência calórica baixa. O rendimento observado foi de 11.157 kg.ha ⁻¹	72
Tabela 17 - Calibração do coeficiente genético G2 (número potencial de grãos por planta), para o híbrido com exigência calórica média. O rendimento observado foi de 10.765 kg.ha ⁻¹	72

Tabela 18 - Calibração do coeficiente genético G2 (número potencial de grãos por planta). O rendimento observado foi de 10 577 kg.ha ⁻¹	72
Tabela 19 - Calibração do coeficiente genético G3 (taxa de crescimento potencial de grãos em mg.grãos ⁻¹ .dia ⁻¹), para o híbrido com exigência calórica baixa. O rendimento observado foi de 11 157 kg.ha ⁻¹	73
Tabela 20 - Calibração do coeficiente genético G3 (taxa de crescimento potencial de grãos, em mg.grãos.dia ⁻¹), para o híbrido com exigência calórica média. O rendimento observado foi de 10 765 kg.ha ⁻¹	73
Tabela 21 - Calibração do coeficiente genético G3 (taxa de crescimento potencial de grãos, em mg.grãos.dia ⁻¹), para o híbrido com exigência calórica alta. O rendimento observado foi de 10 577 kg.ha ⁻¹	73
Tabela 22 - Simulação após a calibração dos parâmetros do modelo..	74
Tabela 23 - Validação do modelo (calibrado em 1993 - 1 ^a época de semeadura). Valores obtidos em 1994 (3 ^a época de semeadura). Híbridos XL-520, XL- 380 e XL-678.....	77
Tabela 24 - Resultados dos testes de sensibilidade (valores dos parâmetros preferidos são indicados por *)......	79
Tabela 25 - Balanço hídrico mensal da cultura do milho híbrido, com exigência calórica média. ETr observada e estimada pelo modelo CERES-Maize. Piracicaba, SP. 1994.....	81

Tabela 26 - Balanço hídrico mensal da cultura do milho híbrido, com exigência calórica média. ETr observada e estimada pelo modelo CERES-Maize. Piracicaba, SP. 1994.....	81
---	----

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Curvas características do solo para as profundidades de 0,10, 0,35, 0,55 e 0,85m. (...) - Valores de Ψ_m obtidos e (—) - valores de Ψ_m ajustados pelo modelo de Van Genuchten, em Terra Roxa Estruturada de Piracicaba, SP. 1994.....	32
Figura. 2 - Representação esquemática do funcionamento do modelo CERES-Maize (Versão padrão).....	37
Figura 3 - Condições do ambiente durante a primeira época de semeadura (14 de outubro de 1993): (A) precipitação e irrigação (mm.dia^{-1}); (B) radiação solar global ($\text{cal.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); (C) temperaturas máximas e mínimas ($^{\circ}\text{C}$).....	50
Figura 4 - Condições do ambiente durante a segunda época de semeadura (14 de janeiro de 1994): (A) precipitação (mm.dia^{-1}); (B) radiação solar global ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); (C) temperaturas máximas e mínimas($^{\circ}\text{C}$).....	52
Figura 5 - Condições do ambiente durante a terceira época de semeadura (27 de agosto de 1994): (A) precipitação e irrigação (mm.dia^{-1}); (B) radiação solar global ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); (C) temperaturas máximas e mínimas ($^{\circ}\text{C}$).....	53
Figura 6 - Acúmulo diferencial de matéria seca em híbridos de milho com diferentes exigências calóricas (ECB=baixa), em duas épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.....	60
Figura 7 - Acúmulo diferencial de matéria seca em híbridos de milho com diferentes exigências calóricas (ECM=média), em duas	61

épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.....	
Figura 8 - Acúmulo diferencial de matéria seca em híbridos de milho com diferentes exigências calóricas (ECA=alta), em duas épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.....	62
Figura 9 - Taxa de produção de matéria seca total em híbridos de milho com diferentes exigências calóricas (ECB=baixa; ECM=média; ECA=alta), em duas épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.....	65
Figura 10 - Índice de área foliar do milho híbrido, com exigências calóricas baixa (A), média (B) e alta (C) em função dos graus dia acumulados, em duas épocas de semeadura.....	85
Figura 11 - Índices de área foliar do milho híbrido, com exigências calóricas baixa (A e B) média (C e D) e alta (E e F), observados e estimados pelo modelo CERES-Maize, em duas épocas de semeadura. A inclinação das linhas não difere significativamente de zero (*) a $P = 0,05$	87
Figura 12 - Matéria seca total do milho híbrido, com exigências calóricas baixa (A e B), média (C e D) e alta (E e F), observada e estimada pelo modelo CERES-Maize, em duas épocas de semeadura. A inclinação das linhas é significativamente diferente de zero (*) a $P = 0,05$, exceto para o caso (B)	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Θ	= Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
α	= Parâmetro empírico (kPa^{-1}) do modelo de Van Genuchten (1980)
ΔARM	= Variação do armazenamento de água no solo ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$)
ΔAz	= Variação de armazenamento ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$)
Θ_{cc}	= Umidade do solo a um potencial mátrico de -0,60m de coluna de água correspondente à capacidade de campo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
Θ_{i}	= Umidade do solo no momento da irrigação ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
ψ_{m}	= Potencial mátrico (kPa^{-1})
Θ_{r}	= Umidade residual ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
Θ_{s}	= Umidade de saturação ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
ψ_{t}	= Potencial total da água do solo (m)
Δz	= Camada de solo (m)
A	= Estimativa assintótica de crescimento máximo
AF	= Área Foliar (cm^2)
B	= Coeficiente de ajuste da função logística
BD(L)	= Densidade global da camada L ($\text{kg} \cdot \text{m}^3$)
C	= Coeficiente de ajuste da função logística
CAD	= Capacidade de Água Disponível (mm)
CERES	= Crop Environment Resource Synthesis
CN2	= Número da curva de escoamento superficial
CNPMS	= Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo

CPAC	= Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados
Ct	= Taxa de produção de matéria seca ($\text{g.m}^{-2}.\text{GD}^{-1}$)
DAE	= Dias após a emergência
E.U.A.	= Estados Unidos da América
Ef	= Eficiência de irrigação (0,75)
EMBRAPA	= Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ES	= Escoamento superficial (mm)
ESALQ	= Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
ETr	= Evapotranspiração real (mm.dia^{-1})
G2	= Número potencial de grãos por planta
G3	= Taxa potencial de crescimento de grãos ($\text{mg.grãos}^{-1}.\text{dia}^{-1}$)
GD	= Graus-dia
h	= Potencial mátrico (m)
I	= Irrigação (mm.dia^{-1})
IAF	= Índice de Área Foliar
IBGE	= Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K(Θ)	= Condutividade hidráulica do solo (mm.dia^{-1})
L	= Cada camada do solo
LB	= Lâmina Bruta (mm)
LL	= Lâmina Líquida (mm)
m	= Parâmetro empírico da equação de Van Genuchten
M.O.	= Matéria Orgânica (%)
MSF	= Matéria Seca das Folhas (g.m^{-2})
MST	= Matéria Seca Total (g.m^{-2})
n	= Parâmetro empírico da equação de van Genuchten
P	= Precipitação (mm.dia^{-1})
P1	= Graus-dia acumulados entre a emergência das plântulas e o final do estágio juvenil

P2	= Coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo
P5	= Graus-dia acumulados entre o florescimento e o ponto de maturidade fisiológica
PO(L)	= Porosidade do solo na camada L (%)
PRNT	= Poder Relativo de Neutralidade Total
Prof.	= Profundidade (m)
q	= Densidade de fluxo de água (mm.dia^{-1})
qz	= Densidade de fluxo de água na direção da profundidade z (mm.dia^{-1})
RMSE	= Raiz do erro médio quadrado
S	= Área de terreno (m^2)
β	= Coeficiente de drenagem
t	= Tempo (DAE)
Tbase	= Temperatura base ($^{\circ}\text{C}$)
Tmax	= Temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$)
Tmin	= Temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$)
USP	= Universidade de São Paulo
U	= Coeficiente de evaporação do solo na camada superficial
WR(L)	= Fator de peso para a distribuição das raízes
Wt	= Matéria seca total (g.m^{-2})
z	= Potencial gravitacional (m)
Z(L)	= Profundidade relativa ao centro da camada L (m)
$\psi_{t1,10}$	= Potencial total a 1,10m (m)
$\psi_{t0,90}$	= Potencial total a 0,90m (m)

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO CERES-MAIZE EM CONDIÇÕES TROPICAIS DO BRASIL

Autor: MILCÍADES GADELHA DE LIMA

Orientador: PROF. DR. ANTONIO LUIZ FANCELLI

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o modelo CERES-Maize em condições tropicais do Brasil, através da calibração, validação e teste de sensibilidade dos principais parâmetros envolvidos.

CERES-Maize é um modelo de simulação de crescimento e desenvolvimento do milho, elaborado e usado com sucesso nos Estados Unidos. Neste estudo, o CERES-Maize foi avaliado para verificação das possibilidades de sua utilização nas condições tropicais do Brasil, onde as expectativas da cultura do milho são favoráveis.

Os dados para testar o modelo foram coletados em experimentos de campo conduzidos no Departamento de Agricultura da ESALQ/USP, em Piracicaba, SP, utilizando-se três híbridos de milho, XL-520, XL-380 e XL-678, cultivados em solo classificado como Terra Roxa Estruturada eutrófico A moderado textura argilosa/muito argilosa. O delineamento foi inteiramente casualizado, com quatro repetições. As sementeiras foram realizadas em 14 de outubro de 1993, 14 de janeiro de 1994 e 27 de agosto de 1994, com espaçamento entre linhas de 0,85m, perfazendo uma população de 58 800 plantas.ha⁻¹. O manejo da água no solo foi realizado através de tensiômetros. A fenologia do milho foi observada diariamente e a análise de crescimento foi realizada a intervalos de 14 dias, tomando-se cinco plantas ao acaso.

Os parâmetros do modelo foram calibrados com dados de um ano e validados com dados do ano seguinte, seguida da análise de sensibilidade. As constantes genéticas, graus dia da emergência ao final do período juvenil (**P1**), graus-dia do florescimento ao ponto de maturidade fisiológica (**P5**), número de grãos por planta (**G2**) e a taxa potencial de crescimento do grão (**G3**) foram determinadas experimentalmente. Os valores observados do índice de área foliar e da matéria seca da parte aérea das plantas foram comparados com os estimados pelo CERES-Maize, através de uma análise de regressão linear. Comparou-se, também, a evapotranspiração real observada e estimada pelo modelo.

As simulações realizadas no presente estudo evidenciaram que na região tropical, o crescimento, o desenvolvimento da planta e o rendimento de grãos da cultura do milho são estimados satisfatoriamente pelo modelo CERES-Maize.

CALIBRATION AND VALIDATION OF THE CERES-MAIZE MODEL IN TROPICAL CONDITIONS OF BRAZIL

Author: **MILCÍADES GADELHA DE LIMA**

Adviser: **PROF. DR. ANTONIO LUIZ FANCELLI**

SUMMARY

CERES-Maize is a simulation model of maize growth and development, conceived and successfully used in the United States. In this study, CERES-Maize was tested under Brazilian tropical conditions, where the expectation of the maize crop is favorable.

Field experiments were carried out for 2 years at USP/ESALQ/ Agriculture Department in Piracicaba, SP using three corn hybrids (XL-520, XL-380 and XL-678) on a Terra Roxa Estruturada soil. Corn lines were planted in small plots (20 by 5.1m) with row spacings of 0.85m, and thinned to 58 800 plants.ha⁻¹, randomly distributed and replicated four times. The three sowing-dates were 14 October 1993, 14 January 1994, and 27 August 1994. Tensiometers were installed to schedule irrigation. Phenology was determined at least once a week and the growth analysis was made at 2 wk intervals, starting at 2 wk after plant emergence, taking five randomly selected plants from each plot.

Calibration and validation of the model were conducted for each hybrid, followed by sensitivity analysis of the newly calibrated model for the hybrids. Genetic constants, ie growing degree-days (base 10°C) from seedling emergence to the end of the juvenile phase (**P1**), growing degree-days (base 10°C) from silking to physiological maturity (**P5**), potential kernel number (**G2**) and potential kernel growth rate (**G3**) were therefore determined from local

experiments. Index foliar area and dry matter observed values were compared with those estimated by the CERES-Maize model through regression linear analysis. It was also compared the observed and estimated values of real evapotranspiration.

The simulations carried out in the present work showed that in the Tropical region, the maize growth, development and grain yield were predicted acceptable CERES-Maize model.

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) em função de sua composição química e valor nutritivo é um dos cereais mais cultivados no Brasil e no mundo, devido a sua multiplicidade de usos na alimentação humana e animal.

Apesar da falta atual de incentivos e da descapitalização do produtor por parte do governo brasileiro, as expectativas da cultura de milho no Brasil ainda são favoráveis; segundo o IBGE, o rendimento médio vem crescendo nos últimos anos, principalmente na região Centro-Sul, responsável por 93 % do cereal produzido e por 79 % da área total, sendo o Paraná o principal Estado produtor. Nessa região, as condições edafoclimáticas são mais propícias ao desenvolvimento do milho, e além disso a tecnificação (utilização de insumos e práticas modernas) tem aumentado consideravelmente, já que nela situam-se os principais centros de pesquisa agrícola do Brasil.

Entre as principais culturas de cereais dos trópicos subúmidos e semi-áridos, o milho tem a mais alta produção em condições ótimas de água e fertilidade do solo, porém, é uma das culturas menos tolerantes ao estresse hídrico.

Em regiões áridas, os irrigantes querem e necessitam utilizar eficientemente a água de irrigação aplicada. Em regiões úmidas, onde a probabilidade de ocorrer chuva durante a estação chuvosa é alta,

torna-se necessário planejar eficientemente o uso da água e decidir quando e quanto irrigar a fim de aproveitar a precipitação natural no período mais extenso possível. Analisando o balanço hídrico total nessas regiões, podem ser desenvolvidas estratégias que minimizarão as perdas por evaporação e drenagem e maximizarão a eficiência do uso de água.

O surgimento de cultivares de milho com exigências calóricas baixas, médias e altas, adaptadas às diversas condições de solo e clima, tem resultado em um novo interesse na expansão da produção do milho nos trópicos.

Qualquer promessa de uma nova tecnologia de cultivo necessita de uma avaliação, antes de se tornar uma prática de uso generalizado. Uma alternativa parcial para tal avaliação é usar um modelo de simulação de crescimento e desenvolvimento da cultura, para estimar o rendimento de grãos através do uso de dados meteorológicos existentes.

Vários modelos que utilizam recursos de computação foram desenvolvidos para simular o processo de crescimento das culturas, em base diária. Tais modelos são baseados, em grande parte, em mecanismos que descrevem as interações entre os processos fisiológicos da planta e o ambiente. Esses modelos simulam o crescimento e desenvolvimento das culturas em ambientes diversos com pouco ou nenhum ajuste para locais individuais e também têm potencial para estimar a época da colheita e prever a safra em uma região. Tais estimativas são de valor para os agricultores que necessitam vender ou armazenar seus produtos; para o transporte até a indústria; para o planejamento de cultivo e para as empresas estimarem os efeitos da produção sobre os preços futuros.

O modelo Crop-Environment Resource Synthesis (CERES)-Maize foi desenvolvido por uma equipe interdisciplinar do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos e o seu objetivo é quantificar os efeitos

independentes e interativos do genótipo, tempo meteorológico e atributos do solo no crescimento e produção da planta. O modelo simula os principais processos fisiológicos do milho, incluindo: fotossíntese; respiração; acumulação e partição de fitomassa; fenologia; extensão do crescimento de folhas, caules e raízes; extração de água do solo e, evapotranspiração.

As razões para a aceitação deste modelo são: ele pode ser usado com muitos híbridos em diferentes tipos de solo; apresenta sensibilidade às interações entre os processos de crescimento da planta e o ambiente, não necessita de grandes recursos de computação, pois é fácil implementá-lo num computador pessoal, além de fornecer predições exatas do rendimento do milho. O CERES-Maize também tem sido usado na busca de “cenários” de rendimento diferentes das condições normais, como por exemplo, excesso de água e mudanças climáticas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o modelo CERES-Maize em condições tropicais do Brasil, através da calibração, validação e teste de sensibilidade dos principais parâmetros envolvidos, com dados observados em experimentos de campo, com a cultura do milho, realizados em três épocas de semeadura em área do Departamento de Agricultura da ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Modelos de simulação

2.1.1. Introdução

A 2ª edição do Novo Dicionário da Língua Portuguesa (1986) dá treze conotações para a palavra “modelo”, entre elas, 1. “objeto destinado a ser reproduzido por imitação”, 2. “representação em pequena escala de algo que se pretende executar em grande”, 3. “pessoa ou coisa cuja imagem serve para ser reproduzida em escultura, pintura, fotografia, etc”. e 4. “aquilo que serve de exemplo ou norma; molde”. O décimo-terceiro e último significado dado nesse dicionário é o que se refere esta revisão: “conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico pelo qual se procuram explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades do sistema”. Diversos pesquisadores da área de modelagem têm-se preocupado em definir o que é um modelo. WIT (1982) considerou que modelo é a representação simplificada de um sistema. Ele definiu simulação como a arte de construir modelos matemáticos.

THORNLEY (1976) e REYNOLDS (1979) definiram modelo matemático ou simplesmente modelo como uma equação ou conjunto de equações, que devem representar um sistema real. THORNLEY (1976) acrescenta que o modelo deve entretanto assemelhar-se ao sistema e, se o sistema for dinâmico, deve ser capaz de simular seus movimentos.

2.1.2. Vantagens do uso

Um bom modelo preditivo simula exatamente o comportamento de uma parte do mundo real em situações onde seu comportamento tem ou não sido ainda observado. Ele é, entretanto, um bom instrumento para aplicar o conhecimento científico na prática e deve predizer razoavelmente bem, em condições limites diversas, para suprir seu usuário com soluções alternativas de um problema. Bons modelos científicos são também detalhados ou muito teóricos para aqueles que querem aplicá-los, enquanto os modelos usados para fins preditivos ou de manejo são frequentemente triviais ou mesmo grosseiros para desafiar interesses científicos (VRIES, 1987).

O uso de modelos bem elaborados traz inúmeras vantagens pois, os mesmos devem resumir convenientemente uma série de informações, que permitam progressos no conhecimento da planta e suas respostas ao ambiente, bem como, devem também esclarecer pontos em que o conhecimento seja limitado (THORNLEY, 1976). O autor acrescenta que os modelos podem estimular o trabalho em equipe, além de facilitar o planejamento e indicar prioridades na pesquisa.

A formulação de um modelo deve preceder qualquer trabalho experimental, a qualquer nível. O procedimento irá clarear as questões formuladas, determinar o tipo de experimentos a ser conduzido e, indicará aquelas áreas onde os dados são escassos (LANDSBERG, 1981).

WHISLER et al. (1986) catalogaram em três categorias básicas as razões para a construção de modelos: (i) como auxílio na interpretação de resultados experimentais; (ii) como ferramenta para pesquisa agrônômica; (iii) como ferramenta de desenvolvimento agrônômico. Segundo os mesmos autores, muitos modelos de cultivo ou parte deles foram construídos para ajudar o pesquisador a entender a operação de alguma parte de um sistema de cultivo

agronômico, como o fluxo de água no solo, controle estomatal, ou movimento de nutrientes fertilizantes.

De um modo geral, pode-se dizer que: (i) a tentativa de construir um modelo ajuda a detectar áreas onde o conhecimento e dados são escassos; (ii) a modelagem estimula novas idéias; (iii) comparados com métodos tradicionais, os modelos fazem, geralmente, melhor uso de dados que estão se tornando mais caros; (iv) modelos permitem interpolação e previsão; (v) um modelo resume convenientemente grande quantidade de informações; (vi) um bom modelo pode ser usado para sugerir prioridades de recursos na pesquisa; (vii) a base matemática para as hipóteses permite progresso no sentido de conhecer melhor o comportamento do sistema e discernir entre hipóteses alternativas (PEREIRA, 1987).

2.1.3. Classificação

Devido à grande variedade de modelos desenvolvidos nas últimas décadas, vários autores sentiram a necessidade de classificá-los a fim de tornar a sua descrição mais simples. Diferentes critérios têm sido utilizados por eles para efetuar essa classificação, mas sempre a diferença entre os tipos de modelo é determinada pela sua filosofia e arquitetura, tornando-os aplicáveis a problemas em agricultura de maneiras diferentes.

Vários modelos dinâmicos foram desenvolvidos em muitos países para determinar os rendimentos da maioria das culturas de importância agrícola e especificamente para a cultura do milho (CURRY & CHEN, 1971; SPLINTER, 1974; WIT et al., 1978; ROBERTSON (1983), entre outros.

Modelos dinâmicos podem armazenar informações devido à sua estrutura. Porém, para serem usados, deve-se conhecer o estado presente do

sistema, que depende das condições iniciais de todos os dados atuais de entrada. Os modelos dinâmicos de rendimento de culturas apresentam a mesma variação que os modelos estáticos, ou seja: determinístico ou estocástico, estatístico ou mecanístico, discreto ou contínuo, e assim, incluem todas as combinações (WISIOL & KESKETH, 1987). Neste sentido, WHISLER et al. (1986) comentaram que os modelos prevêem mudanças no estado da cultura com o tempo, como uma função dos parâmetros exógenos. Como exemplo, citam aqueles que prevêem a mudança no conteúdo de água no solo e a variação da temperatura do solo com a profundidade.

Os modelos agrometeorológicos se enquadram em um dos dois tipos, a saber: (i) estatístico (onde são tentadas correlações entre as variáveis de interesse, isto é, dados de rendimento ou de maturidade, e as variáveis meteorológicas consideradas importantes); (ii) simulação (onde os processos de interesse particular são relacionados por um modelo matemático para os fatores do tempo e da planta que os dirigem). Os modelos de simulação são também conhecidos como “determinísticos” (HUME & CALLANDER (1990).

Modelos de simulação estocásticos são aqueles baseados na probabilidade de ocorrência de alguns eventos e de variáveis exógenas.

As variáveis do tempo, por exemplo, são tratadas freqüentemente de uma maneira estocástica ou com probabilidade de ocorrência, e como tal, podem ser combinadas com um modelo mecanístico.

Modelos do tipo conceitual, físico e matemático foram relatados por ACOCK & ACOCK (1991) e esses autores salientaram que para cada hipótese testada existe um modelo conceitual associado. Argumentaram também que os modelos matemáticos são classificados e subdivididos em muitos tipos, porém, os mais conhecidos são os empíricos e os mecanísticos. Para KAC (1969),

modelo matemático é aquela classe de modelos que podem ser descritos simbolicamente e discutidos dedutivamente.

Os modelos empíricos descrevem relações entre variáveis sem se referir a qualquer estrutura biológica ou física que possa existir entre as variáveis (REYNOLDS & ACOCK,1985). No modelo mecanístico, as funções matemáticas representam o conhecimento e/ou as hipóteses que relatam o comportamento observado dos fenômenos. Embora a distinção entre modelos empíricos e mecanísticos seja útil, muitos modelos de cultivo de fato contêm uma combinação de ambos.

WHISLER et al. (1986) apresentaram uma ordem para classificar qualitativamente os modelos. Para dados sumarizados e talvez mesmo para previsão interpolativa, os modelos empíricos são suficientes, contudo, a força preditiva é restrita ao intervalo de condições experimentais dos dados e além disso, somente descreve os dados e não podem suprir-nos de conhecimento sobre os mecanismos de causa (THORNLEY,1976). Para previsão extrapolativa, os modelos devem ser mecanísticos.

Modelos fenológicos são uma extensa classe de modelos que predizem o desenvolvimento de uma cultura, de um estágio de crescimento a outro. As predições são geralmente baseadas em unidades térmicas acumuladas, durante o crescimento e o desenvolvimento da cultura (CARBERRY et al.,1989).

Os modelos mecanísticos de simulação baseados em Física e aplicados no sistema solo-planta-atmosfera descrevem os processos fisiológicos da planta e os do solo, fisicamente, ou quimicamente. Por outro lado, os modelos matemáticos-fisiológicos baseiam-se no conhecimento de interações entre os processos fisiológicos e o ambiente, visando simular o crescimento e o desenvolvimento de uma cultura (MACHADO, 1981).

Existe pouca uniformidade entre os modeladores quanto à classificação dos modelos, com predominância dos tipos estatístico e determinístico.

Cada modelador deve considerar o nível de detalhes no qual um dado modelo deve ou pode ser desenvolvido, pois o mesmo pode variar desde os mais simples que usam somente dados médios de temperatura do ar para prever o rendimento de uma cultura em um sistema irrigado, até os mais complexos que exigem um nível de detalhamento que chega ao fluxo de CO₂, a detalhes bioquímicos de células guardas que controlam a abertura e o fechamento dos estômatos, entre outros. Neste sentido, ACOCK & ACOCK (1991) apresentaram uma análise dos vários níveis de organização em um sistema de produção que vão desde o bioma até a molécula. Nessa análise, os autores mostraram que dependendo do nível de complexidade do modelo, variam as exigências quanto às instalações para condução do mesmo, bem como o intervalo de tempo necessário para sua condução. Os modelos hierarquicamente mais baixos exigem menos tempo de execução e requerem dados detalhadados de experimentos conduzidos sob condições bem definidas (ou em ambientes controlados)

Na década de 80 começaram a ser explorados os modelos fisiológicos de previsão de safra. Tais modelos procuram simular o crescimento e o desenvolvimento das plantas usando relações baseadas na teoria fisiológica, tais como fotossíntese, produção de fitomassa, florescimento, enchimento de grãos e uso de água pela cultura (COSTA, 1992).

WHISLER et al. (1986) relataram que existem vinte a vinte e cinco equipes nos E.U.A e em outras partes do mundo construindo modelos de simulação de cultivo e entre as culturas que têm sido modeladas estão citros, amendoim, beterraba, milho, sorgo, trigo, arroz, cevada, batatinha, algodão, soja e alfafa.

Esses modelos dinâmicos de crescimento simulam a variação total do rendimento das culturas. Uns simulam as interações entre densidade populacional e rendimento em monocultivo, destacando-se o trabalho desenvolvido por MUTSAERS (1989), em que foram apresentados dados de rendimento final de biomassa do milho, cultivado em quinze densidades de plantio, variando de 0,80 a 15,38 plantas.m⁻², para demonstrar a força preditiva do modelo. Outros avaliam a habilidade dos modelos em estimativas do crescimento e rendimento de várias espécies de culturas em rotações, envolvendo níveis de manejo, fertilizantes, irrigações e preparo do solo CABELGUENNE et al. (1990).

Dependendo da especialidade de cada pesquisador, os modelos enfatizam determinados aspectos e apresentam diferentes aproximações para quantificar as ações do clima no rendimento das culturas. Como exemplo citam-se os modelos de THOMPSON (1969), BAIER (1973), BRUNINI et al. (1982), CAMARGO (1984), MONDRAGON (1990) e HERRERA (1991).

2.1.4. O modelo “CERES-Maize”

Uma série de modelos de simulação dos processos fisiológicos de culturas chamada CERES (Crop Environment Resource Synthesis), foi desenvolvida pelo Grassland, Soil and Water Research Laboratory (JONES & KINIRY, 1986). O modelo para o milho, CERES-Maize, requer como dados de entrada aqueles relacionados às condições atmosféricas, ao solo, às constantes genéticas e às práticas de manejo. A temperatura do ar é a principal variável que influencia o desenvolvimento da cultura. O modelo tem sido testado em diversos países com resultados razoáveis de estimativa e previsão de rendimento. Como desvantagem pode-se considerar a necessidade de dados precisos de solos,

características da planta e meteorológicos, freqüentemente difíceis de se obter (HODGES et al., 1987).

RITCHIE (1985), ressaltou que o CERES-Maize pode ser utilizado para: (i) decisões de manejo da cultura em um determinado ano; (ii) análise de risco multianual para planejamento estratégico; (iii) previsão de rendimento para grandes áreas; (iv) definição de necessidades de pesquisa.

DUCHON (1986) utilizou o CERES-Maize para desenvolver um esquema operacional de previsão de safra do milho nos 14 estados que compõem o “cinturão do milho” - E.U.A. A técnica consiste em usar dados climatológicos diários do ano em questão (temperatura do ar e precipitação) para representarem o tempo meteorológico futuro. Esses dados vão sendo substituídos por dados meteorológicos reais, de acordo com o desenvolvimento da cultura. Os resultados de Duchon mostraram que a variância associada com a previsão é relativamente constante até o florescimento, diminuindo até próximo de zero com o avanço do ciclo. No ponto de maturidade fisiológica da cultura do milho, o governo têm uma estimativa satisfatória da safra, antes mesmo de iniciar a colheita, podendo a partir disso tomar decisões quanto ao transporte, armazenamento, política de preços e exportação.

Ainda no “cinturão do milho” - E.U.A. , HODGES et al. (1987) testaram a versatilidade do CERES-Maize quanto à estimativa das flutuações anuais da produção de milho naquela região, com dados de experimentos realizados no período de 1982 a 1985. Foram utilizados dados de 51 estações meteorológicas dos 14 estados que compõem o “cinturão do milho”, os quais contemplam 85% da produção de milho nos E.U.A. e a calibração do modelo para a região foi realizada a partir dos parâmetros fisiológicos de cada estação, com base nos dados de crescimento e de rendimento das culturas durante o ano de 1982. Os autores usaram oito conjuntos de coeficientes varietais obtidos para cada

uma das 51 estações, representando todos os híbridos cultivados naquela região, ao invés de um híbrido específico e para os anos de 1982 (ano da calibração), 1983, 1984 e 1985, obtiveram a estimativa de produção de 92, 97, 98 e 101%, respectivamente, da estimativa oficial do governo. Concluíram que o modelo pode ser usado para estimativa de produção e de rendimento em grandes áreas dos E.U.A., com uma mínima calibração regional e que o mesmo tem potencial para estimativa de rendimento em grandes áreas em outras partes do mundo onde existam dados disponíveis de temperaturas máximas e mínimas do ar, precipitação e radiação solar.

Quando aplicado no Norte da China, para simular os rendimentos da cultura do milho, utilizando dados de experimentos realizados no período de 1979 a 1984, nas províncias de Anhui, Jiangsu, Shansu, Shandong, Henan e Hebei, WU et al. (1989) calibraram o modelo CERES-Maize para estas cinco localidades, desenvolvendo cinco conjuntos de parâmetros genéticos, usando dados de 1979 e 1980. Observaram que a tendência do modelo foi superestimar o rendimento em anos úmidos e subestimar em anos secos e que a simulação incluindo irrigação melhorou as estimativas para os anos secos. Constataram, também, no caso dos anos úmidos, que o modelo teve que ser modificado através da inclusão do índice da cultura de Palmer, PALMER (1968), que explicou os efeitos do excesso hídrico na produção final de grãos.

O submodelo do balanço hídrico, integrante do modelo CERES-Maize, foi validado por COMERMA et al. (1985), na zona de Maracay, Estado de Aragua, Venezuela. Os autores compararam, durante o ciclo do milho, os valores do conteúdo de água no solo simulados pelo submodelo com os valores determinados por camadas, em diferentes datas, ficando demonstrado que o movimento de água no solo durante o crescimento da cultura se reproduz de

forma bastante precisa e que há possibilidades do mesmo prever um possível estresse hídrico durante alguma fase da cultura.

O CERES-Maize foi testado e adaptado por PLANTUREUX et al. (1991) no Nordeste da França (Alsace), onde foram utilizados dois cultivares de milho (LG11 e DEA), cultivados em solo argiloso durante dois anos. O modelo foi calibrado e validado para cada cultivar, seguido pela análise de sensibilidade. Como as constantes genéticas para os híbridos cultivados na Europa eram desconhecidas, os valores foram estimados a partir de dados procedentes dos híbridos cultivados no Canadá e na França. Observaram que os valores estimados pelo modelo não calibrado, usando constantes estimadas foram muito diferentes dos valores medidos. Por isso modificaram as constantes genéticas e algumas equações, validando o modelo com outros conjuntos de dados com o que mostraram uma boa concordância entre os valores previstos e observados para o desenvolvimento das plantas e o rendimento dos grãos. Concluíram que o modelo CERES-Maize pode ser usado para simular o crescimento e o desenvolvimento do milho e para a previsão de safra nas condições da Europa. Contudo, recomendam uma calibração rigorosa deste modelo e também experimentações para determinar precisamente os parâmetros desconhecidos na Europa. Por último, sugeriram a inclusão de algumas subrotinas que considerem as condições específicas tais como o frio na primavera e os solos hidromórficos.

VOS & MALLETT (1987) informaram que o modelo CERES-Maize produziu estimativas realísticas de matéria seca total da planta de milho acima do solo em quatro localidades na África do Sul. Usando tal modelo para estimar o ciclo da cultura e a data aproximada do ponto de maturidade fisiológica antes de completar o ciclo, obtiveram resultados satisfatórios. A técnica consiste em utilizar os dados médios simples das variáveis meteorológicas, geradas para o período correspondente à última parte do ciclo da cultura, como parâmetros de

entrada no modelo. CLEMENCE & MALLETT (1988) também utilizaram esse método, usando uma longa série de dados de estações meteorológicas da África do Sul. Comparando os rendimentos e as datas do ponto de maturidade fisiológica estimadas com base nos dados meteorológicos gerados para o período final do ciclo com os rendimentos e as datas do ponto de maturidade fisiológica estimadas utilizando dados meteorológicos atuais para todo o ciclo da cultura, obtiveram um desvio médio do rendimento estimado de 31,5 %, enquanto as estimativas feitas 30 dias mais tarde reduziram o erro médio da estimativa para 1,8 %. As diferenças entre datas do ponto de maturidade fisiológica observadas e estimadas foram da ordem de 4 dias.

JAGTAP et al. (1993) testaram o modelo CERES-Maize durante as estações de crescimento dos anos de 1990 e 1991 em Ibadan, no sudoeste da Nigéria. Mesmo sem fazer nenhuma modificação, o modelo simulou o rendimento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), peso de grãos (g), número de grãos por m^2 , índice de área foliar e fitomassa acima do solo, com uma diferença menor que 10 % dos dados observados no campo.

No Brasil, o modelo foi testado por LIU et al. (1989), utilizando dados meteorológicos, de solo e da cultura do milho híbrido DINA 10, coletados no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), localizado em Sete Lagoas-MG. Com base nesses dados, foi feita uma comparação entre o rendimento medido e o simulado para um período de cinco anos (1983-1987). Os parâmetros genéticos da cultura obtidos em 1983 (ano de calibração) foram usados para simular os dados dos próximos quatro anos (1984, 1985, 1986 e 1987). Os resultados mostraram que as datas previstas e medidas, da emergência até o final do estágio juvenil, apresentaram uma diferença média de três dias enquanto as datas do florescimento até a ponto de maturidade fisiológica tiveram uma diferença média de 0,5 dias. Os rendimentos de grãos estimados pelo modelo

para os anos de 1983, 1984, 1985, 1986 e 1987 foram 98,3; 107,1; 103,6; 90,2 e 91,3 % dos rendimentos medidos, respectivamente. O estudo mostrou que o modelo produziu estimativas úteis de rendimento do milho para um local específico tendo os autores sugerido a aplicação deste modelo para a estimativa de rendimento em outros locais do Brasil.

Posteriormente, COSTA (1992) aplicou o CERES-Maize na microrregião de Ribeirão Preto-SP, Brasil, calibrando os parâmetros para três áreas, usando dados meteorológicos e calendário do cultivo do ano de 1988. Os coeficientes calibrados foram então usados para rodar o modelo no período de 1984 a 1989. A autora verificou que o modelo simulou bem a produtividade em anos normais, mas tendeu a superestimar a safra nos anos em que foram observados períodos persistentemente chuvosos.

BOWEN et al. (1993) testaram o modelo CERES-Maize (RITCHIE et al., 1989) utilizando dados de experimentos conduzidos no CPAC-EMBRAPA-DF, Brasil. A versão nitrogênio deste modelo foi avaliada com respeito à simulação da disponibilidade de N após a incorporação de adubos verdes. O submodelo simulou realisticamente bem a liberação de N, porém ficou evidenciado a necessidade de realizar outros trabalhos visando determinar a importância da retenção de nitrato no subsolo e como a retenção pode ser descrita no modelo.

Com propósitos semelhantes, RETTA et al. (1991) utilizaram vários modelos de crescimento do milho, como o CERES-Maize versão original, CERES-Maize modificado para os trópicos semi-áridos e CERES-Maize modificado para o cálculo do crescimento da folha e da fenologia (CARBERRY et al., 1989), com o objetivo de avaliar a conveniência destes modelos na estimativa dos parâmetros de crescimento e rendimento do milho. Foram incorporados também aos modelos, estresses causados por insetos e plantas

daninhas a fim de testar a sensibilidade do modelo selecionado às variações de luz e água. Isto foi possível através de combinações simuladas de níveis de luz e água variando entre 50 e 100 % do total. O modelo combinado mostrou sensibilidade à água e à luz e assim pode ser modificado para simular a competição por plantas daninhas.

No Estado de Washington-E.U.A., HODGES & EVANS (1992) utilizaram as equações de unidades térmicas do modelo CERES-Maize para comparar o requerimento de graus-dia em dez híbridos de milho cultivados em cinco experimentos, durante quatro anos. Os valores de graus-dia (unidades térmicas) por folha foram estáveis entre os experimentos, porém, variaram substancialmente entre anos e híbridos. O modelo previu relativamente bem o aparecimento da folha bandeira, e a taxa de desenvolvimento da mesma não diferiu entre os híbridos, entretanto, mostrou-se sensível ao comprimento do dia e a temperaturas extremas, que não são consideradas no mesmo. Por isto, os autores sugeriram modificações no algoritmo que calcula as unidades térmicas, principalmente, temperaturas extremas e, possivelmente o comprimento do dia e os fatores herdados.

Todos os testes e estudos indicaram que o CERES-Maize é um modelo capaz de estimar a produtividade de milho em grandes áreas. No entanto, JONES & KINIRY (1986) argumentaram que solos não cuidadosamente caracterizados e estimativas imprecisas do conteúdo de água armazenada podem levar a erros nas simulações. Além disso, todos os testes assumem que não há limitações na produção de grãos por falta ou excesso de nutrientes. Assim, o modelo poderá superestimar a safra caso ocorra deficiência de nutrientes durante o ciclo da cultura.

De acordo com CURRY et al. (1990) o modelo CERES-Maize pode ser usado como um instrumento para analisar a resposta das culturas às

mudanças dos elementos climáticos como temperatura do ar, precipitação e radiação solar e poderá também incluir os efeitos das características do solo sobre a disponibilidade de água para o crescimento das culturas.

Algumas discussões têm surgido com relação a possíveis erros detectados na definição dos parâmetros contidos no Guia do Usuário do modelo CERES-Maize (JONES & KINIRY, 1986), resultando em uma interpretação errônea do método pelo qual o modelo simula o desenvolvimento de área foliar. Nesse sentido, CARBERRY et al. (1991) propuseram uma descrição correta das funções para desenvolvimento da área foliar e testaram a performance dessas funções, concluindo que as mesmas necessitam de calibração para prever o desenvolvimento de área foliar dos híbridos adaptados às condições tropicais. Por outro lado, PIPER & WEISS (1990) observaram a resposta de uma versão modificada do modelo CERES-Maize à redução na população de plantas e da área foliar em vários estádios de crescimento. Os resultados da simulação mostraram que o modelo não foi capaz de prever o rendimento de grãos com altas populações de planta, mas, superestimou o rendimento de grãos em cerca de 16 % quando a população de plantas foi de 6,5 plantas m^{-2} e para populações menores que 5,6 plantas m^{-2} , o modelo subestimou o rendimento, porém, estimou precisamente as tendências observadas nos dados de campo. Em resposta à redução na área foliar, o modelo superestimou o número de grãos e subestimou o peso de grãos, exceto quando a área foliar foi reduzida em 100 % durante o crescimento vegetativo.

2.1.5. Calibração, validação e análise de sensibilidade

A calibração de um modelo consiste no ajuste de alguns parâmetros de tal maneira que o comportamento do mesmo se iguale ao do

conjunto de dados do mundo real (VRIES, 1987). A performance dos modelos, em geral, é aperfeiçoada pela calibração feita com os dados de campo, no ajuste dos parâmetros frágeis ou desconhecidos que são adaptados para atingir uma concordância total entre os resultados simulados e observados (WIT et al., 1978). Esses autores chamam a atenção para o fato de que essa técnica é perigosa, tendo em vista que o número de parâmetros do modelo é grande quando comparado à quantidade de dados experimentais obtidos no campo e a aplicação indiscriminada da mesma pode conduzir a um ajuste perfeito, porém, sem utilidade prática, devido a adaptação de muitos parâmetros.

Algumas vezes é necessário recalibrar um modelo quando diferentes tipos de solo, culturas, etc., estão sendo simulados. Neste caso, ele ainda pode ser útil desde que a técnica de recalibração seja simples, e se o modelo continuar sendo sensível a um determinado parâmetro, é quase certo que o mecanismo naquela parte do modelo está errado (WHISLER et al., 1986).

Os testes dos modelos consistem na validação (comparação das predições do modelo com as observações de campo) e na análise de sensibilidade (teste da reação do modelo à mudança de parâmetros). Neste sentido, COMERMA (1985) definiu validação como uma comparação das saídas de um modelo simulado com os resultados obtidos no campo. Outra observação pertinente a esta definição foi descrita por THORNLEY (1976), que distinguiu a validação de um modelo em dois níveis distintos: a nível de predição e a nível de hipótese (suposição), enquanto que REYNOLDS (1979) visualizou um modelo validado (como um dispositivo preditivo) a partir do momento em que foram avaliadas a variação nos dados de saída do modelo e a magnitude dos erros de predição. A confiança no modelo é maior quando a validação é feita a nível de suposições, que usa dados de ambiente controlado, do que em modelo com com validação a nível de predições.

Vários modelos de cultivo têm sido bem validados, dentre os quais o CERES-Maize, validado por HODGES et al. (1987); VOS & MALLETT (1987; 1991), e o AUSIM-Maize, validado por JONES & CARBERRY (1994) são bons exemplos.

Uma parte essencial de qualquer conjunto de dados para validação de um modelo de cultivo é o registro completo do solo e do ambiente aéreo em que as plantas crescem, sem os quais não existe conjunto de dados para validação. De acordo com CARBERRY et al., 1989; LIU et al., 1989 e CARBERRY (1991), os modelos requerem ainda informações sobre o manejo da cultura, incluindo data de emergência, espaçamento entre fileiras, população de plantas após a emergência, latitude do local, potencial de água na folha, taxa de evapotranspiração, bem como quaisquer outros dados sobre performance da planta que sejam úteis para validação, como por exemplo, para experimentos com estresse hídrico e nutrientes, é interessante registrar a distribuição de raízes e água no perfil do solo, durante o ciclo da cultura.

Segundo WHISLEY et al. (1986), a validação de um modelo de cultivo nunca é totalmente comprovada. Os autores, a exemplo de outros pesquisadores, observaram que os modelos de cultivo são hipóteses ajustadas de trabalho, e que na ciência nunca é possível provar que uma hipótese é absolutamente correta. Concluíram ainda que, o uso de dados relativos ao crescimento e desenvolvimento de uma cultura, capacita os modeladores a determinar em que estágio e em que aspectos o modelo prediz incorretamente o comportamento da cultura.

Para REYNOLDS (1979), a análise de sensibilidade consiste na variação de valores de uma variável de entrada do modelo e na manutenção das demais variáveis. Por outro lado, WHISLER et al. (1986), em estudos sobre o mesmo assunto, acrescentaram que é possível agrupar ajustes locais na variação

de valores de uma variável de entrada de um modelo, como: aumento ou diminuição de valores de latitude; aumento ou diminuição da compactação ou da textura do solo; mudanças das técnicas de manejo da cultura (época de irrigação e cultivares).

Pelo exposto, a análise de sensibilidade é um teste de fundamental importância para o modelador, visto que o mesmo revela se alterações em determinados parâmetros produzem ou não mudanças significativas no rendimento simulado pelo modelo. Não é, pois, um simples exercício acadêmico, uma vez que pode servir como indicativo de efeitos do ambiente e/ou do manejo sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura.

2.2. Fisiologia da cultura do milho

A predição dos efeitos do clima sobre os fenômenos biológicos periódicos é uma ciência antiga (WANG, 1972). Hoje, os melhoristas de plantas consideram a fenologia quando fazem cruzamento em um programa de melhoramento e quando liberam cultivares adaptados a um clima particular. Fenologia, ou o tempo de desenvolvimento da cultura relativa às condições meteorológicas, é também, de fato, fundamental para prever a produção da cultura. A combinação de dados fenológicos com dados climatológicos para delinear zonas de unidades térmicas para o milho está sendo usada para ajustar critérios de risco agrícola, considerando a escolha do híbrido e data de plantio (WISIOL & KESKETH, 1987).

O modelador necessita de tabelas contendo dados fenológicos integrados de ambientes controlados e naturais, para cada cultura, e nesse sentido, a literatura sobre fenologia de plantas nativas e plantas cultivadas é extensa, destacando-se os trabalhos de COELHO & DALE (1980), KINIRY & RITCHIE

(1981), KINIRY et al. (1983), WARRINGTON & KANEMASU (1983) e McGARRAHAN & DALE (1984) sobre a fenologia do milho.

Tendo em vista o sucesso do uso de unidades térmicas na predição de datas de ocorrência dos estádios de crescimento da cultura do milho, os modeladores têm assumido que o conceito *unidade térmica* é universalmente aplicável. Como salientaram VILLA NOVA et al. (1972) e MOTA (1975) a quantidade de energia exigida por uma cultura tem sido expressa em graus-dia, ou unidades térmicas de desenvolvimento, unidades de calor, soma de temperatura, exigência térmica, constante térmica, exigência calórica. A base teórica para essa técnica é que, dos processos envolvidos no desenvolvimento da cultura, todos são sensíveis à temperatura do ar pois, a mesma é o principal controlador da evolução dos estádios de crescimento da planta e para muitas espécies esses estádios podem estar vinculados a um certo número de unidades térmicas acumuladas, cabendo enfatizar que a resposta das plantas à temperatura do ar obedece a limites (inferior e superior) e é extensiva ao desenvolvimento total da cultura.

Nesse sentido, CARDOSO & MUNDSTOCK (1979) através da comparação de treze métodos para o cálculo de unidades térmicas de desenvolvimento, concluíram que o método direto é o mais simples e se baseia no somatório de temperaturas obtidas através da média entre a máxima e mínima diárias, com exceção dos valores abaixo de 0°C que não foram computados. A crítica a esse método baseia-se no fato de que a constante térmica sofre variações segundo as localidades consideradas, pois tanto o crescimento como o desenvolvimento da maioria das plantas cultivadas começam com temperatura superior à temperatura de fusão do gelo. Para minimizar esse aspecto e encontrar a real eficiência da temperatura, subtrai-se da média diária a temperatura mínima da espécie (CROSS & ZUBER, 1972). Apesar dessa correção apresentar melhores resultados que o uso do método direto, ainda ocorrem variações na constante

térmica para regiões distintas (DeGAETANO & KNAPP, 1993). MEDERESKI et al. (1973), dentre outros, utilizaram uma temperatura-base superior e uma temperatura-base inferior, objetivando eliminar o efeito prejudicial das temperaturas extremas.

É bastante significativo o número de trabalhos desenvolvidos em ambientes controlados com respeito às interações entre a temperatura do ar, a genética (número de folhas) e o fotoperíodo, dentre os quais (KINIRY et al., 1983; TOLENAR et al. (1979); WARRINGTON & KANEMASU, 1983). Porém, a nível de campo, os dados sobre essas interações são escassos.

2.3. Movimento de água no solo

O modelo CERES-Maize simula o balanço hídrico e, para tanto, o movimento de água no solo, exigindo dados diários e totais de precipitação. A água preenche o perfil, camada por camada, até que seja atingido o conteúdo de água correspondente à “capacidade de campo” naquelas camadas e o excesso é contabilizado como drenagem profunda ou runoff. A quantidade de água na última camada do solo é função do conteúdo de água e do tempo e sua drenagem depende do gradiente hidráulico. Referidos modelos operam normalmente em perfis de 1 ou 2 metros de profundidade onde o conteúdo de água não mudará rapidamente, especialmente sob condições irrigadas.

Os trabalhos de HILLEL et al. (1972) e LIBARDI et al. (1980), apresentaram uma abordagem sobre a relação conteúdo de água - potencial mátrico e a relação conteúdo de água - difusividade), enquanto que van GENUCHTEN (1980), a partir de observações de curvas de retenção de água obtidas experimentalmente, em laboratório ou em condições de campo, propôs o seguinte modelo empírico:

$$\Theta = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{\left[1 + (\alpha \cdot |\Psi_m|)^n\right]^m}$$

onde Ψ_m é o potencial mátrico (**kPa**), Θ é a umidade volumétrica (**m³.m⁻³**) e Θ_r (umidade residual, **m³.m⁻³**), Θ_s (umidade de saturação, **m³.m⁻³**), α (**kPa⁻¹**), m e n são parâmetros empíricos da equação.

A condutividade hidráulica e o potencial de água em várias camadas do solo são facilmente calculadas. Contudo, existe um gradiente muito íngreme no potencial de água próximo à superfície de um solo seco e a única maneira correta para simular isto, usando os métodos numéricos atuais, é tratar o topo do solo como se ele fosse composto de um número amplo de camadas finas de solo com diferentes conteúdos de água. Isto é possível, porém dispendioso em termos de computação, e nenhuma solução analítica desejável está ainda disponível (WHISLER et al., 1986).

2.4. Evapotranspiração

O principal dilema para alguém que modela evapotranspiração é que a maioria dos modelos mecanísticos requer informação que não está prontamente disponível, enquanto os modelos empíricos não têm boa habilidade preditiva. HELLMAN & KANEMASU (1976) afirmaram que a maioria dos modelos mecanísticos lida com fluxos de energia na cultura e com a transferência turbulenta de CO₂ e vapor d'água entre o solo, a planta e a atmosfera e acrescentaram que a solução normal é usar relações empíricas entre, por exemplo, radiação solar e resistência estomática e tratá-las como relações fixas. Os autores salientaram ainda que não há relação mecanística entre as variáveis, portanto, uma relação empírica é confiável.

Uma alternativa mais simples e usada por muitos modeladores é a venerável equação de Penman (PENMAN, 1956). Esta equação é mecânica para a extensão que ela modela a evaporação de uma superfície livre de água. Contudo, ela lida empiricamente com a rugosidade da cultura e o efeito resultante sobre a turbulência do vento. Ela também é aplicada somente a uma cultura que está evaporando livremente, isto é, não experimentando estresse hídrico. Assim, a equação é mais útil para o cálculo da evapotranspiração potencial e modelos adicionais são necessários para prever como isto será limitado a fim de calcular a evapotranspiração real.

A equação de Penman requer um conhecimento de radiação solar, velocidade do vento, temperatura do ar, umidade do ar e o albedo do solo e da cultura. Tendo em vista que essas informações não estão sempre prontamente disponíveis, alguns modeladores usam equações empíricas simples derivadas da equação de Penman por aproximação “Procrustian”(TANNER & JURY, 1976).

A maioria dos valores de albedo das culturas varia de 0,2 a 0,25 (FRITSCHEN 1967; LINACRE, 1968; RITCHIE, 1971), sendo que normalmente os modelos utilizam o valor igual a 0,23. O albedo do solo nu varia enormemente com a cor do solo e com o conteúdo de água em sua superfície, numa relação inversamente proporcional (IDSO et al., 1975).

A evaporação e a transpiração da água são limitadas por diferentes mecanismos e caem abaixo da taxa potencial em diferentes períodos após uma chuva de alta intensidade, sendo conveniente modelá-las separadamente. A água é evaporada da superfície do solo a uma taxa potencial sempre que a mesma esteja saturada. Essa condição persiste por 3 a 4 dias e em seguida cai continuamente à medida que a superfície do solo começa a secar.

Nesse sentido, GRANT (1990) realizou um estudo sobre simulação dinâmica visando reproduzir o comportamento diurno de uma cultura

de milho submetida a diferentes níveis de déficit hídrico. Os resultados mostraram que as relações simuladas entre evapotranspiração e rendimento foram consistentes com aquelas observadas, apesar de a evapotranspiração sazonal simulada, a altas taxas de irrigação, ter sido 5 a 10 % mais alta que a observada. Essa técnica de simulação pode ser usada para representar o comportamento de culturas sob condições hidrológicas variadas.

A transpiração da cultura ocorre à taxa potencial (ditada pelas variáveis climáticas) até que as raízes aumentem a absorção de água àquela taxa e os estômatos comecem a fechar. Esta condição é mais provável ocorrer ao meio dia do que em qualquer outra hora e normalmente persiste somente por poucas horas. Ademais, a taxa de absorção de água depende do comprimento e da idade das raízes das plantas, do potencial de água no solo na vizinhança daquelas raízes e o histórico do estresse anterior da planta. As relações são muito complexas e quase impossíveis para modelar empiricamente, embora isto seja o que muitos modeladores tentam fazer.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos com a cultura do milho foram conduzidos na área experimental do Departamento de Agricultura da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (22° 43’ latitude Sul, 47° 25’ longitude Oeste, 580 m de altitude), junto ao posto meteorológico dessa unidade. O solo da área em questão é classificado como Terra Roxa Estruturada eutrófico A moderado textura argilosa/muito argilosa, correspondente ao “Kandiudalfic Eutrudox” da classificação americana (VIDAL-TORRADO & SPAROVEK, 1993).

A análise química da terra, para fins de verificação da necessidade de calagem e adubação (Tabela 1) mostrou a necessidade de aplicação de calcário para tornar as condições de acidez e de saturação de bases adequadas para a cultura do milho.

Tabela 1 -Resultado da análise química da Terra Roxa Estruturada

Prof (m)	pH CaCl ₂	M.O. (%)	P μg.dm ⁻³	Ca	Mg	K	AH+H meq.10 ⁻² cm ⁻³	SB	T	V (%)
0-0,20	4,7	2,2	35	2,9	1,2	0,33	4,7	4,4	9,1	48

O clima, segundo a classificação de Köeppen, é do tipo Cwa, com as seguintes médias anuais: (i) precipitação: 1253 mm; (ii) temperatura do ar: 21,1° C; (iii) umidade relativa do ar: 74 %; (iv) velocidade do vento: 2,2 m.s⁻¹,

com direção E/SE predominante (média de sessenta e um anos: 1917 a 1987) (VILLA NOVA, 1989).

3.1. Técnicas culturais

O preparo do solo constituiu-se de uma subsolagem realizada dez dias antes da semeadura do primeiro experimento, seguida de aração, incorporação de calcário calcinado e gradeação. O calcário dolomítico metamórfico do grupo Acungui - São Roque apresenta as seguintes características: CaO - 45%; MgO - 15%; Soma de Óxidos - 60% e PRNT = 120%.

A adubação mineral, para todas as parcelas, foi idêntica nas três épocas de semeadura, em conformidade com a análise química do solo.

Foram aplicados fertilizantes às taxas de 15, 60 e 45 kg.ha⁻¹ como N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente na forma de sulfato de amônio, superfosfato simples e cloreto de potássio e, parceladamente, 100 kg.ha⁻¹ de uréia, cuja primeira aplicação foi 50 kg.ha⁻¹, por ocasião do aparecimento da 5^a folha e a segunda aplicação foi realizada quando a planta apresentava doze folhas.

As aplicações de adubos no plantio foram feitas manualmente nos sulcos de semeadura, abertos com sulcador tracionado por trator. Foram realizadas manualmente três semeaduras (14 de outubro de 1993, 14 de janeiro de 1994 e 27 de agosto de 1994), valendo-se de uma população de 58 000 plantas por hectare e espaçamento entre fileiras de 0,85 m.

Foram utilizados três híbridos comerciais de milho, sendo representativos de diferentes ciclos, quais sejam: híbrido triplo superprecoce XL-520; híbrido triplo normal XL-380 e híbrido duplo normal XL-678, com exigências calóricas baixa, média e alta, respectivamente.

Aos 21 dias após a semeadura foi realizado o desbaste de plântulas, conforme a população programada.

3.2. Delineamento experimental, amostragens e determinações

Para cada época de semeadura foi instalado um experimento cujo delineamento foi inteiramente casualizado, com quatro repetições, envolvendo três híbridos de milho. As dimensões das parcelas foram de 20 metros de comprimento por 5,1 m de largura, contendo seis fileiras. As parcelas foram divididas em segmentos de 12,38 m, para as medidas de campo, durante a fase de crescimento e 7,62 m para as medidas por ocasião da colheita.

Para as amostragens durante a fase de crescimento, as fileiras externas 1 e 6 e as internas 3 e 4 foram consideradas bordaduras. As fileiras 2 e 5 tinham uma bordadura de 0,38 m no final e os 24 m remanescentes de ambas as fileiras foram divididas em doze segmentos de 2 m, das quais as medidas foram tomadas. Houve bordadura adequada para todos os tratamentos.

A colheita foi efetuada nas fileiras 3 e 4 uma vez que as fileiras 1, 2, 5 e 6 e 0,81 m de cada extremidade das fileiras 3 e 4 foram consideradas bordaduras.

Durante o ciclo das plantas foram efetuadas avaliações para caracterização das etapas vegetativa, reprodutiva e de formação de grãos. O ciclo da cultura do milho foi dividido em 11 estádios distintos de desenvolvimento (FANCELLI, 1986). A identificação dos estádios de desenvolvimento da cultura foi feita pelo menos uma vez por semana durante o crescimento vegetativo. No início da fase de crescimento, dois dos doze segmentos foram escolhidos ao acaso para a identificação dos estádios. Todas as plantas, em cada segmento escolhido, foram observadas, do começo ao fim do crescimento vegetativo. As folhas foram

marcadas para se ter um controle permanente do número das folhas mais baixas, por ocasião da senescência.

A identificação dos estádios durante o crescimento vegetativo teve como base o colar visível da folha principal (mais alta). Durante o estágio reprodutivo, examinou-se, pelo menos uma vez semanalmente, duas ou mais espigas de cada parcela, selecionadas ao acaso.

Foram realizadas medidas de área foliar de duas plantas selecionadas ao acaso de cada parcela, utilizando-se um microcomputador tipo IBM-compatível ligado a um “scanner” manual, marca DFI, modelo HS-3000, e um programa computacional, denominado PCXAREA, desenvolvido por van LIER (1993).

As coletas de plantas para a determinação da matéria seca foram realizadas em intervalos regulares de 14 dias, a partir do 21º dia da semeadura (inclusive), durante todo o ciclo da cultura, com as plantas {(colmo + bainha (c+b); limbo foliar, (f); pendão, (pe); brácteas, (br); sabugo, (sa) e grãos, (gr)} cortadas ao nível do solo, em cada parcela, acondicionadas em sacos de papel e levadas a uma estufa de circulação forçada, a uma temperatura de 70º C, onde permaneceram até atingirem peso constante. Por dificuldades operacionais não foram utilizadas raízes.

A matéria seca total foi obtida através do somatório do peso de matéria seca de todas as partes aéreas da planta.

Os valores de matéria seca total (por ocasião do ponto de maturidade fisiológica) e área foliar mais os componentes de produção foram submetidos à análise da variância.

As curvas de acúmulo de matéria seca total (Wt) foram ajustadas através de regressão não linear, utilizando-se a equação (1):

$$W_t = \frac{A}{(1 + Be^{-Ct})} \quad (1)$$

em que W_t , representa a matéria seca acumulada; A representa a estimativa assintótica de crescimento máximo; B e C coeficientes de ajustamento e t , o tempo, em dias, após a emergência das plantas (RICHARDS, 1969; HUNT, 1982).

Foram efetuadas as análises de regressão não linear das médias da área foliar e da matéria seca total acumulada nos diversos órgãos da planta em relação às coletas, com o emprego dos polinômios ortogonais, utilizando aqueles que melhor se ajustaram aos dados obtidos (RICHARDS, 1969).

A taxa de produção de matéria seca (Ct) foi obtida através da derivada da equação ajustada ao peso da matéria seca total (W_t), em relação ao tempo, sendo os valores de Ct instatâneos RADFORD, 1967; RICHARDS, 1969).

O valor de índice de área foliar (IAF), que é adimensional, foi determinado dividindo a área foliar total da planta (Af), considerando-se apenas uma face do limbo foliar, pela unidade de área de terreno disponível para a planta (S), ou seja:

$$IAF = \frac{Af}{S} \quad (2)$$

3.3. Caracterização do solo, manejo de água e balanço hídrico

A caracterização do perfil do solo foi feita a partir: a) da determinação da granulometria pelo método da pipeta; b) da determinação da densidade do solo, utilizando-se cilindros volumétricos com 4 cm de diâmetro e 3

cm de altura; c) de curvas características (ou de retenção de água no solo), Figura 1, feitas por desorção com amostras indeformadas obtidas com anéis idênticos aos descritos acima e com auxílio de funis de placa porosa e câmara de pressão com placa porosa; d) da porosidade total, calculada a partir de valores de densidade do solo e das partículas, determinada com auxílio de picnômetros e e) da condutividade hidráulica do solo (cm.dia^{-1}) determinada pelo método do perfil instantâneo a campo (HILLEL et al., 1972 e LIBARDI et al., 1980). Para a determinação da relação $K(\Theta)$ foram instalados no campo, tensiômetros com manômetro de mercúrio, nas profundidades de 0,10; 0,30; 0,50; 0,70; 0,90 e 1,10 m, com os quais, além do potencial total estimou-se, também a umidade do solo (Θ) utilizando as curvas de retenção.

Foram instaladas três baterias de tensiômetros, com profundidades idênticas às descritas acima, distribuídas nas parcelas correspondentes a cada híbrido. Esses tensiômetros indicaram, durante o ciclo das culturas as variações de umidade do solo (através das curvas de retenção) e de potencial total da água do solo Ψ_t (m), considerado como a soma dos potenciais mátrico h (m) e gravitacional z (m). De posse desses dados foi possível determinar variações de armazenamento ΔA_z para diversos períodos e profundidades. A densidade de fluxo no solo na direção da profundidade z pôde ser estimada pela equação de Darcy-Buckingham (1856, 1907):

$$q_z = K(\Theta) \frac{\Delta \Psi_t}{\Delta L} \quad (3)$$

utilizando-se valores de $K(\Theta)$ previamente determinados.

$\Delta \Psi_t$ foi estimado pela equação (4):

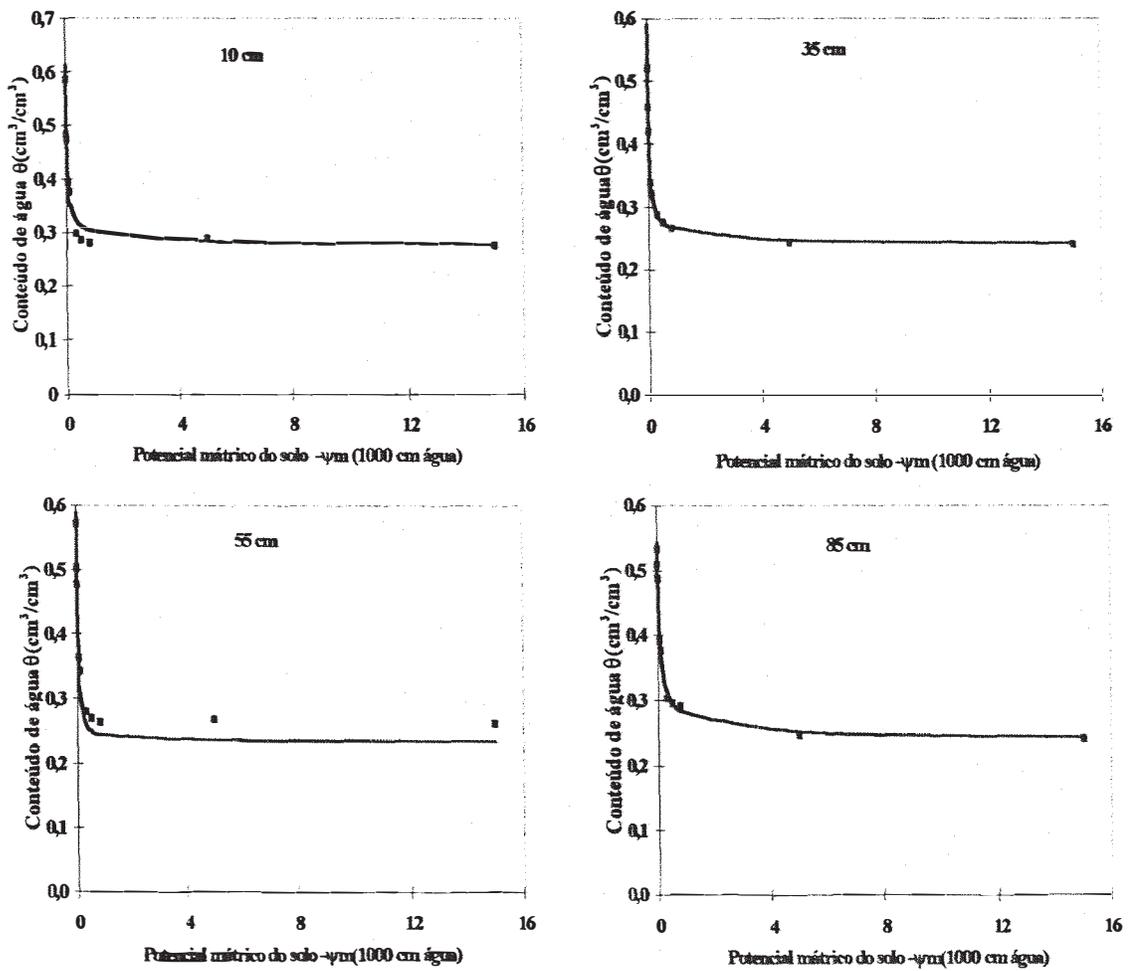


Figura 1- Curvas características do solo para as profundidades de 10, 35, 55 e 85cm. (...) - Valores de Ψ_m obtidos e (—) - valores de Ψ_m ajustados pelo modelo de van Genuchten, em Terra Roxa Estruturada. Piracicaba, SP. 1994.

$$\frac{\Delta\Psi_{t_{1,0}}}{\Delta L} = \frac{(\Psi_{t_{0,90}} - \Psi_{t_{1,10}})}{0,20} \quad (4)$$

O manejo de água no solo foi realizado através de tensiômetros, sendo que se efetuou irrigação para elevar a umidade do solo na camada superficial à capacidade de campo, quando o potencial mátrico da água no solo atingisse um valor ao redor de -8 m de água a 0,20 m, no início do desenvolvimento da cultura (irrigações realizadas a 12, 20 e 23 dias após a emergência (dae), e a 0,35 m de profundidade (irrigações realizadas a 27 e 41 dias após a emergência), conforme o desenvolvimento do sistema radicular.

As lâminas líquida e bruta de irrigação foram estimadas através das equações (5) e (6):

$$LL_i = (\Theta_{cc} - \Theta_i) \cdot \Delta z \quad (5)$$

$$LB_i = \frac{LL_i}{E_f} \quad (6)$$

onde:

LL_i = lâmina líquida da i-ésima irrigação (m);

Θ_{cc} = umidade do solo correspondente a um potencial mátrico de -0,60 m de coluna de água (capacidade de campo) ($m^3 \cdot m^{-3}$);

Θ_i = umidade do solo na i-ésima irrigação ($m^3 \cdot m^{-3}$);

Δz = camada de solo (m);

E_f = eficiência de irrigação = 0,75.

A lâmina bruta total em cada irrigação correspondeu ao somatório das lâminas brutas de cada camada de solo.

Pela equação do balanço hídrico, a evapotranspiração real da cultura do milho (mm.dia^{-1}) foi obtida da seguinte forma:

$$ETr_i = P_i + I_i - \Delta ARM_i - q_i - ES_i \quad (7)$$

onde:

ETr_i = evapotranspiração real (mm.dia^{-1});

P_i = precipitação (mm.dia^{-1});

I_i = irrigação (mm.dia^{-1});

ETr_i = evapotranspiração real (mm.dia^{-1});

ΔARM_i = variação do armazenamento da água no solo (mm.dia^{-1});

q_i = drenagem profunda = densidade de fluxo de água integrada (mm. dia^{-1});

Es_i = escoamento superficial (mm.dia^{-1}).

O componente **P** da equação 3 foi calculado com base nos dados obtidos no posto meteorológico junto à área experimental, através de um pluviômetro.

Quanto à quantidade de água aplicada via irrigação, a taxa de aplicação de água foi determinada no teste de aspersores realizado no local.

A variação do armazenamento de água no solo foi obtida através da determinação de água do solo (Θ , $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$), utilizando-se dados medidos até a profundidade de 1,0 m.

O escoamento superficial foi desprezível em função da área em questão apresentar declive inferior a 3%.

Para a estimativa do balanço hídrico, correspondente à primeira época de semeadura, foram utilizados períodos de trinta dias, entre 21/10/93 e 11/02/94. Na segunda época de semeadura, o balanço hídrico foi estimado para os períodos compreendidos entre 21/01/94 a 18/05/94.

3.4. Produção por área

A colheita foi efetuada manualmente, em duas linhas (fileiras 3 e 4) de 6 m, por repetição, determinando-se em dez plantas os seguintes parâmetros quantitativos: comprimento e diâmetro da espiga, número de fileiras de grãos e por espiga, diâmetro do sabugo, peso de 1000 grãos e peso de grãos a 13% de umidade.

Para determinar a produção por área da palhada, utilizou-se os dados da última coleta (após o ponto de maturidade fisiológica).

Os diferentes parâmetros foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Diferenças de médias entre épocas, diferenças de médias entre tratamentos e diferenças de médias da interação épocas x tratamentos, foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

3.4.1. Obtenção de parâmetros fisiológicos

A taxa de crescimento do grão, para cada híbrido, foi obtida através da regressão linear entre o peso da matéria seca dos grãos e os dias após a emergência. A taxa de crescimento do grão ($\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é dada pela inclinação da reta que ajusta os valores observados.

3.5. Obtenção de graus-dia (GD)

As temperaturas para a computação de **GD** foram obtidas dos dados coletados no posto meteorológico do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ, USP, durante a realização dos experimentos.

O método direto GILMORE & ROGERS (1958) e PLETT (1992) foi empregado para o cálculo de **GD**, utilizando-se a equação (8):

$$GD_n = \sum_{i=1}^n (Tmin_i + Tmax_i)/2 - Tb) (Tmáx_i < Tm \text{ e } Tmín_i > Tb) \quad (8)$$

onde:

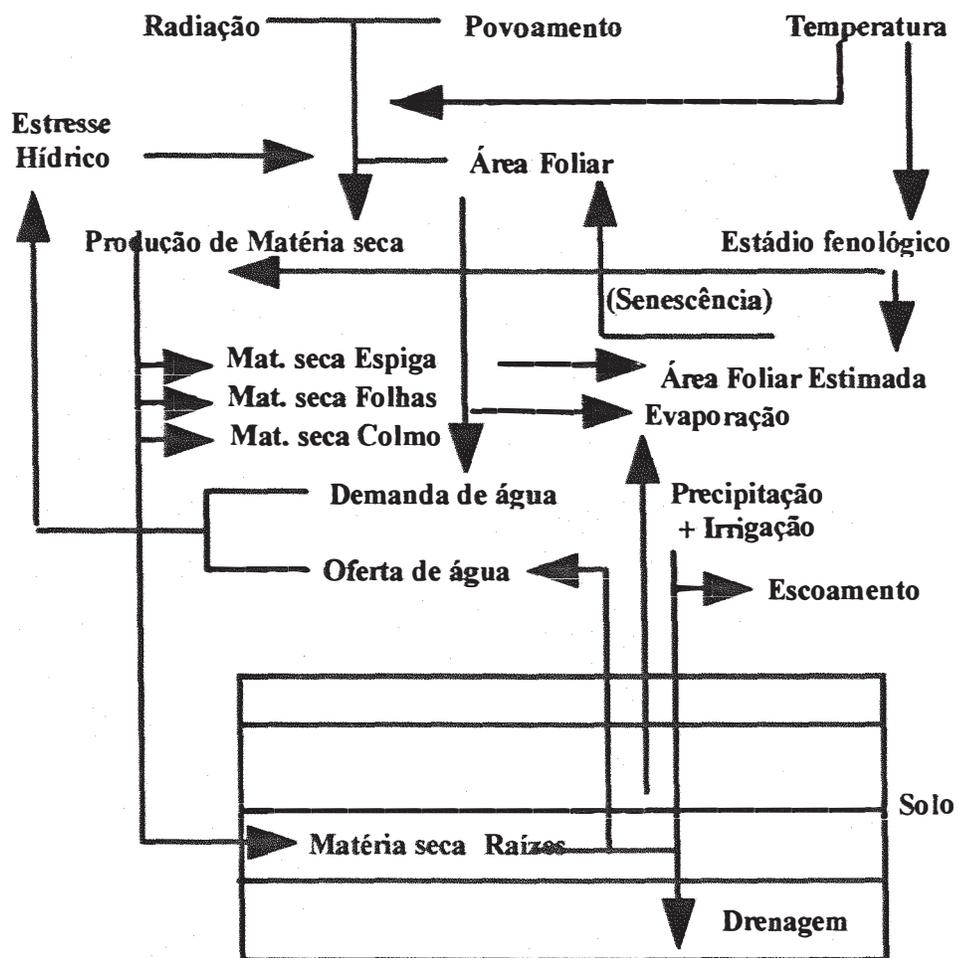
$Tmax_i$ refere-se à temperatura máxima do ar, $Tmin_i$ à temperatura mínima do ar no i -ésimo dia, Tb à temperatura basal mínima ($10^{\circ}C$), e Tm à temperatura basal máxima ($30^{\circ}C$). Se $Tmax_i \geq Tm$, para efeito de cálculo, fez-se $Tmax_i = 30^{\circ}C$. Se $Tmin_i \leq Tb$, nenhum valor de graus-dia foi computado.

3.6. Descrição do modelo CERES-Maize

O CERES-Maize simula o crescimento e o desenvolvimento da cultura do milho. O detalhamento de seu funcionamento foi descrito por JONES & KINIRY (1986), e os principais atributos do modelo se encontram na Figura 2.

Segundo MARTIN et al. (1985), o CERES-Maize também simula a dinâmica do nitrogênio. Para fins deste estudo, a concentração do nitrogênio foi assumida como não limitante.

Os efeitos causados por ervas daninhas, insetos, doenças, deficiências nutricionais, toxidez, bem como, eventos catastróficos não foram considerados.



Fonte: PLANTUREUX et al. (1991)

Figura 2 - Representação esquemática do funcionamento do modelo CERES-Maize (Versão padrão)

3.6.1. Informações necessárias para o funcionamento do modelo

O modelo possui dois grupos de arquivos de entrada (Tabelas 2 e 3). O primeiro grupo contém o arquivo meteorológico. O segundo grupo inclui informações que gerenciam os arquivos de dados de solos e experimentais com informações sobre os dados genéticos dos híbridos de milho, além de informações sobre o manejo da cultura.

3.6.2. Parâmetros de saída do modelo

Outro grupo de arquivos gerados pelo modelo, são os de saída, os quais contêm os resultados simulados. O primeiro arquivo fornece informações sobre as datas de todos os estádios fenológicos, os componentes do balanço hídrico, bem como os parâmetros da cultura observados e simulados. O segundo arquivo, contém informações onde pode ser selecionado o intervalo de saída em dias, sobre o número de folhas, o índice de área foliar, peso da matéria seca das raízes e dos diversos órgãos da planta (g.planta^{-1}), a profundidade das raízes (cm) e o comprimento de raízes (cm.cm^{-3}). No terceiro arquivo, onde também pode ser selecionado o intervalo de saída em dias, contém informações meteorológicas e o conteúdo de água no solo por camada ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

3.7. Procedimentos para a determinação dos parâmetros do solo

a) Albedo

O albedo varia de 0 a 0,1 para solos secos e escuros com alta concentração de material orgânico para cerca de 0,3 em regiões desérticas com areia clara, e diminui levemente quando a superfície do solo é umedecida. A Tabela 4, extraída de JONES & KINIRY (1986) apresenta o albedo em função do

Tabela 2 - Relação das variáveis incluídas no arquivo de dados meteorológicos.

<u>Parâmetros meteorológicos</u>	
Temperatura máxima diária (°C)	Temperatura mínima diária (°C)
Precipitação diária (mm.dia ⁻¹)	Radiação solar diária (cal.cm ⁻² .dia ⁻¹)

Tabela 3 - Relação das variáveis incluídas no arquivo dos parâmetros de solo, genéticos e manejo.

<u>Parâmetros de solo</u>
Albedo do solo (%)
Coefficiente para o limite superior de evaporação do solo no estágio 1 (mm)
Coefficiente de taxa de drenagem no perfil total
Número da curva do escoamento superficial
Espessura da camada de solo (m)
Limite inferior da água extraível pela planta (m ³ .m ⁻³)
Limite superior de drenagem (m ³ .m ⁻³)
Umidade à saturação (m ³ .m ⁻³)
Umidade inicial (m ³ .m ⁻³)
Fator de ponderação da distribuição radicular
Densidade do solo (kg.m ⁻³)
<u>Parâmetros genéticos</u>
Graus-dia para o crescimento desde a emergência das plântulas até o final do estágio juvenil (P1)
Coefficiente de sensibilidade ao fotoperíodo (P2)
Graus-dia para o crescimento do florescimento até o ponto de maturidade fisiológica (P5)
Número potencial de grãos por planta (G2)
Taxa potencial de crescimento de grãos (mg.grãos ⁻¹ .dia ⁻¹) - (G3)
<u>Manejo</u>
Quantidade de água aplicada através de irrigação (mm) e dia do ano
Data de semeadura (dia do ano)
População de plantas (plantas.m ⁻²)
Profundidade de semeadura (m)
Índice de área foliar máximo
Peso de grãos secos no ponto de maturidade fisiológica (kgf)
Número de grãos por m ²
Fitomassa máxima acima do solo no ponto de maturidade fisiológica (kg.ha ⁻¹)
Rendimento de grãos a 15,5% de umidade
Latitude do local (graus)

conteúdo de matéria orgânica (**MO**). Para todos os solos com **MO** menor que 2%, o albedo apresentado na Tabela 4 deve ser multiplicado por 0,9 se a região for temperada e multiplicado por 1,1 se a região for tropical.

Considerando um conteúdo de matéria orgânica de 2,2 % para Terra Roxa Estruturada, o albedo utilizado neste trabalho foi de 0,13, segundo a Tabela 4.

b) Coeficiente de evaporação do solo na camada superficial (U)

O coeficiente de evaporação do solo na camada superficial (**U**) varia de 6 mm em areia e solos com pouca argila, a cerca de 9 mm em solo argiloso e 12 mm em solo barrento-argiloso. Pode-se estimar **U** baseando-se na classe textural da camada do topo do solo. No presente trabalho, utilizou-se $U = 9$ mm.

c) Coeficiente de drenagem (β)

O coeficiente de drenagem (ou de condutividade da água no solo) foi usado para estimar a drenagem do perfil. Primeiramente o β foi calculado para cada camada **L** do solo, em função da porosidade (**PO**) e da umidade à capacidade de campo (Θ_{cc}), eq. (9) e eq.(10).

$$PO(L) = 1 - \frac{BD(L)}{2,65} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{[PO(L) - \Theta_{cc}(L)]}{PO(L)} \quad (10)$$

onde **BD (L)** é a densidade do solo e 2,65 é a densidade de partículas, ou densidade real do solo. O valor de β de todo o perfil é o mínimo valor entre todas as camadas.

Os valores estimados da porosidade (**PO**) e do coeficiente de drenagem β para cada camada do solo são apresentados na Tabelas 5 e 8, utilizando a densidade do solo calculada.

O menor valor encontrado entre camadas foi 0,238, valor esse assumido como o β do perfil do solo.

d) Número da curva de escoamento superficial (CN2)

O modelo CERES-Maize usa o método do número da curva para estimar o escoamento. Este método (USDA, Soil Conservation Service, 1972) descreve quatro grupos hidrológicos de solo (Tabela 6). Deve-se escolher o valor mais apropriado desta Tabela para representar o número da curva de escoamento do solo estudado (JONES & KINIRY, 1986).

Neste trabalho considerou-se que a Terra Roxa Estruturada enquadra-se no grupo B da Tabela 6 (solo em boas condições hidrológicas) e levando-se em conta que o mesmo encontrava-se em boas condições hidrológicas e recebeu o tratamento de fileiras simples para o cultivo, o número da curva atribuído a CN2 foi 78, conforme Tabela 7.

e) Fator de peso para a distribuição das raízes (WR)

O fator de peso para a distribuição das raízes é usado para estimar o crescimento relativo da raiz em todas as camadas do solo nas quais as raízes realmente ocorrem .

Em solos bem drenados, sem nenhum impedimento físico ou químico para o crescimento da raiz, a equação (11) é usada para estimar **WR** de qualquer camada do solo:

$$WR(L) = f \cdot \exp[-2Z(L)] \quad (11)$$

onde **Z(L)** é a profundidade relativa ao centro da camada **L**.

O valor estimado de **WR** segundo a equação (6) para casos onde existam restrições físicas ou químicas para o crescimento da raiz (compactação do solo ou toxidez por alumínio) é reduzido à metade. Como a concentração de alumínio em terra roxa estruturada de Piracicaba, SP, é considerada baixa (abaixo de 20%, Tabela 1), **WR** foi calculado sob a hipótese de nenhum obstáculo para o crescimento da raiz, utilizando-se, porém, um fator de correção (**f**) de acordo com a caracterização morfológica do solo onde foram instalados os experimentos. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

f) Conteúdo inicial de água no solo

O conteúdo inicial de água no solo (Θ_i) em cada camada é estipulado pelo usuário. Neste trabalho, Θ_i foi considerado igual a umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}) da camada.

Nas Tabelas 8 e 9 encontra-se um sumário dos valores de todos os parâmetros do solo e da cultura utilizados no modelo.

Tabela 4 - Estimativa do albedo do solo (JONES & KINIRY, 1986)

M.O. (%)	Albedo
M.O. > 10	0,08
10 > M.O. > 5	0,11
5 > M.O. > 2	0,13
M.O. < 2	0,12 a 0,19*

* variam com a textura

Tabela 5 - Valores estimados do fator de peso para a distribuição das raízes, segundo o método proposto por JONES & KINIRY (1986).

Camada (m)	Espessura (m)	Z(L) (m)	f	Porosidade (%)	WR(L)
0 - 0,27	0,27	0,135	1,1	49,35	0,839
0,27 - 0,45	0,18	0,360	0,9	55,09	0,437
0,45 - 0,68	0,23	0,565	0,5	57,09	0,161
0,68 - 0,80	0,12	0,740	0,5	53,54	0,113
0,80 - 1,00	0,20	0,900	0,95	54,37	0,156

Tabela 6 - Grupos de solos usados para estimar o número da curva de escoamento (JONES & KINIRY, 1986).

Grupo de solos	Descrição
A	Escoamento potencial mais baixo. Inclui areias profundas com muito pouco sedimento e argila, e perde rapidamente a permeabilidade com a profundidade.
B	Escoamento potencial moderadamente baixo. Inclui principalmente solos arenosos menos profundos que A e que perdem a permeabilidade menos rápido (ou seja, são menos agregados que A). O grupo como um todo tem infiltração acima da média após ser umedecido.
C	Escoamento potencial moderadamente alto. Compreende solos rasos e contendo considerável quantidade de argila e colóides, embora menos que o grupo D. O grupo tem infiltração abaixo da média após pré-saturação.
D	Escoamento potencial mais alto. Inclui a maior parte dos solos argilosos e profundos, mas também estão incluídos no grupo alguns solos rasos com subhorizontes impermeáveis próximos da superfície.

Tabela 7 - Número da curva de escoamento (CN2) em função do grupo hidrológico (JONES & KINIRY, 1986).

Tratamento (ou prática)	Condição hidrológica	Grupo hidrológico			
		A	B	C	D
fileiras simples	pobre	72	81	88	91
fileiras simples	boa	67	78	85	89
curvas de nível	pobre	70	79	84	88
curvas de nível	boa	65	75	82	86
terraplanagem	pobre	66	74	80	82
terraplanagem	boa	62	71	78	81

Tabela 8 - Parâmetros de entrada de do modelo, densidade do solo e coeficiente de drenagem.

Camada (m)	Θ_{cc} ($m^3 \cdot m^{-3}$) ¹	Θ_{pmp} ₂	Θ_s ³	Dens. do solo $\rho \cdot 10^3$ (kg.m ⁻³)	β ($m^3 \cdot m^{-3}$)
0 - 0,27	0,394	0,277	0,612	1,3420	0,238
0,27 - 0,45	0,339	0,240	0,589	1,1899	0,417
0,45 - 0,68	0,363	0,263	0,617	1,1371	0,399
0,68 - 0,80	0,393	0,243	0,543	1,2310	0,295
0,80 - 1,00	0,417	0,264	0,762	1,2090	0,310

1. Unidade referente à capacidade de campo do solo correspondente ao potencial mátrico de -60 cca.

2. Unidade referente ao ponto de murcha permanente do solo correspondente ao potencial mátrico de -15 atm.

3. Unidade referente à saturação do solo determinado experimentalmente.

Tabela 9- Parâmetros do solo e da cultura utilizados no modelo.

Parâmetros	Valor
Albedo	0,13
Limite superior de evaporação do solo ao estágio 1	9 mm
Coefficiente de drenagem	0,24
Número da curva de escoamento	78
Profundidade de enraizamento	100 cm
Densidade populacional de plantas	5,88 plantas.m ⁻²
Profundidade de semeadura	10 cm

3.8. Calibração dos parâmetros do modelo

A calibração dos parâmetros do modelo CERES-Maize, foi efetuada com dados de campo obtidos em experimento conduzido na área experimental do Departamento de Agricultura da ESALQ/USP, em outubro de 1993.

São cinco os parâmetros fisiológicos requeridos para inicializar o CERES-Maize, quais sejam: graus-dia acumulados entre a emergência das plântulas e o final do estágio juvenil (**P1**); coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo (**P2**); graus-dia acumulados entre o florescimento e a maturidade fisiológica (**P5**); número potencial de grãos por planta (**G2**) e a taxa potencial de crescimento de grãos (**G3**), em $\text{mg.grãos}^{-1}.\text{dia}^1$.

Os parâmetros fisiológicos são fundamentais porque têm forte influência na simulação do crescimento e desenvolvimento da planta. Valores para tais parâmetros são obtidos em laboratório ou em experimentos a nível de campo, através da medição do número de folhas, datas de emergência, florescimento e ponto de maturidade fisiológica, valores diários de graus-dia, número de grãos e peso dos grãos. JONES & KINIRY (1986) apresentaram valores destes parâmetros para vários cultivares dos E.U.A., do Sul do Canadá e também de alguns híbridos tropicais.

O método usado nesta pesquisa, para determinar os parâmetros fisiológicos, consistiu na calibração dos parâmetros do modelo utilizando-se dados do experimento de campo de um ano específico.

Na calibração foram usados dados meteorológicos do ano escolhido, dados de rendimentos observados no experimento e fenologia da cultura. Durante o processo de calibração, foram atribuídos valores aos parâmetros fisiológicos e o modelo é executado várias vezes até que os

coeficientes genéticos alcançaram datas e rendimentos simulados bem próximos dos observados.

O primeiro passo no procedimento da calibração foi assumir **P2** igual 0,5, que é um valor típico para híbridos tropicais (JONES & KINIRY, 1986). Em seguida, foram utilizados para os outros quatro parâmetros fisiológicos, valores observados no experimento de outubro/93, juntamente com os dados meteorológicos do mesmo ano. Depois, a data de florescimento estimada pelo CERES-Maize foi comparada com a data observada, e o valor de **P1** foi sendo ajustado até que a data de florescimento estimada ficou o mais próximo possível da data observada. Com procedimento análogo, o **P5** foi calibrado pela comparação da data simulada com a observada do ponto de maturidade fisiológica.

Os parâmetros do crescimento **G2** e **G3** também foram calibrados por um processo iterativo. Primeiramente **G3** foi mantido constante, com **G2** variando com incrementos de 10 grãos. Depois, **G2** foi mantido constante, com **G3** variando com incrementos de $0,01 \text{ mg.grãos}^{-1}.\text{dia}^{-1}$. Os valores atribuídos a **G2** e **G3** foram os que forneceram um rendimento simulado mais próximo do observado. Finalmente o grupo de parâmetros fisiológicos assim calibrados para o município de Piracicaba, SP, foi assumido como representativo do local e usado para validar o modelo, utilizando dados experimentais da semeadura realizada em agosto de 1994.

3.9. Validação do modelo

A validação do modelo CERES-Maize, proposta neste trabalho, consistiu de uma comparação dos valores estimados com os observados em experimento realizado em 1994 (3ª época de semeadura).

Os cinco parâmetros fisiológicos (Tabela 2) são fundamentais para o modelo CERES-Maize, uma vez que os mesmos influenciam fortemente a simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura. Os valores desses parâmetros foram determinados experimentalmente através de cultivos de três híbridos em duas épocas de semeadura. JONES & KINIRY (1986) apresentaram valores desses parâmetros para vários cultivares dos E.U.A., do Sul do Canadá e também de alguns híbridos tropicais. No entanto, para este estudo foram utilizados os valores dos parâmetros fisiológicos observados em experimento realizado em 1993, os quais foram calibrados e com isso permitiram a validação do modelo para o ano de 1994.

Compararam-se os dados de evapotranspiração real (E_{Tr}) observados em duas épocas de semeadura, com os estimados pelo modelo após a calibração dos parâmetros, utilizando-se os dados experimentais do ano de 1993. Os valores obtidos nos arquivos de saída foram utilizados para fazer comparações com os valores medidos no campo.

A fim de quantificar a exatidão do CERES-Maize na estimativa do índice de área foliar (IAF) e da matéria seca total (MST) ao longo de um ciclo, os valores observados de IAF e de MST foram comparados com os estimados pelo modelo, através de uma análise de regressão linear, envolvendo os três híbridos, em duas épocas de semeadura. Para isso, foi realizado um teste de significância entre os valores de IAF e de MST medidos e estimados, usando o teste t como parâmetro de estimativa da equação para a linha de regressão, com a finalidade de determinar se a inclinação da linha de regressão foi significativamente diferente de zero. Construiu-se uma linha de regressão para os limites de 95 % de confiança para determinar se a linha ideal que passa através da origem, com uma inclinação de 1,0 estava dentro dos limites de confiança.

3.10. Procedimento para o teste de sensibilidade

O teste de sensibilidade teve como objetivo explorar as limitações, bem como as versatilidades do modelo. Este teste proporcionou uma melhor compreensão do CERES-Maize, principalmente, na simulação do rendimento de grãos com variações nos coeficientes genéticos, nas práticas de manejo e no ambiente físico do solo.

Na análise de sensibilidade, variou-se um parâmetro, com os demais mantidos constantes, a fim de se detectar o efeito daquele parâmetro na performance do modelo.

Além dos parâmetros fisiológicos (**P1, P2, P5, G2 e G3**), outros parâmetros também foram submetidos aos testes de sensibilidade, como o número da curva de escoamento (**CN2**), capacidade de armazenamento de água disponível para a planta, densidade de população de plantas, profundidade de semeadura, albedo do solo, limite superior de evaporação do solo na camada superficial, fator de peso para a distribuição das raízes, conteúdo inicial de água armazenada no solo, coeficiente de drenagem e conteúdo de água armazenada na saturação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Condições do ambiente durante as três épocas de semeadura

Os três principais elementos do ambiente aéreo que afetam o rendimento das culturas são a radiação solar, a temperatura do ar e a precipitação. A ocorrência de precipitação nos trópicos é muito variável, conseqüentemente, as culturas estão sujeitas a ambientes que variam de excessivo a deficitário em água.

Os valores da precipitação, irrigação, radiação solar e temperaturas do ar, máximas e mínimas diárias, coletados na área experimental, no período de outubro de 1993 a fevereiro de 1994 estão representados na Figura 3-A, B, C. A distribuição das precipitações durante o referido período experimental, favoreceu a cultura do milho, sendo necessárias somente seis irrigações durante os primeiros quatro estádios de desenvolvimento da cultura. Os valores da radiação solar global incidente tiveram comportamento irregular durante o período experimental, variando desde $630 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, aos 46 dias após a semeadura, até $128 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ a partir do florescimento da cultura. A radiação solar apresentou grandes oscilações diárias e flutuações horárias, em virtude da ocorrência de nebulosidade na região, sendo que a radiação solar global média da emergência das plântulas até o florescimento foi de $463 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, caindo para $405 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, do período do florescimento ao ponto de maturidade fisiológica.

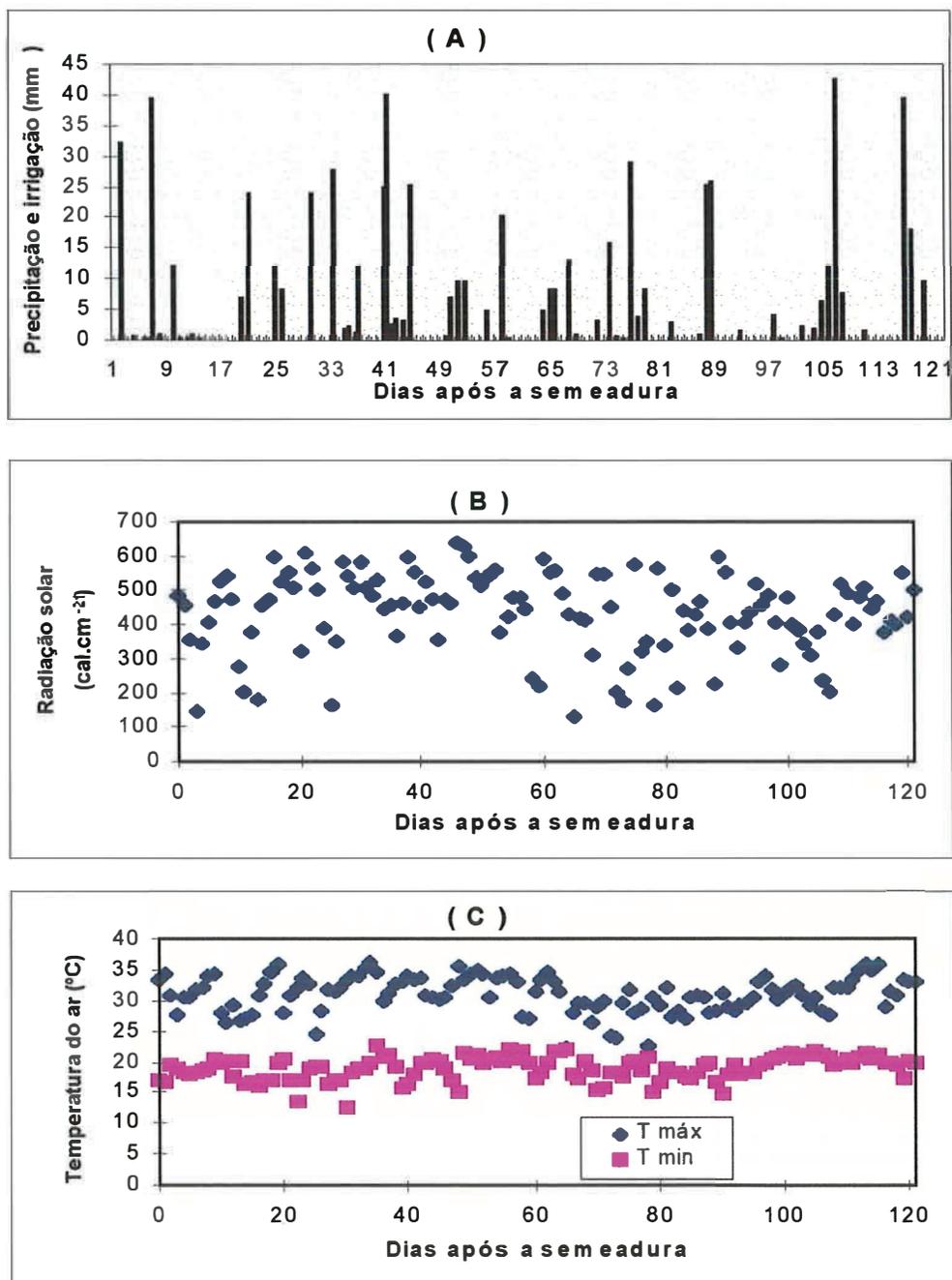


Figura 3 - Condições do ambiente durante a primeira época de semeadura (14 de outubro de 1993): (A) precipitação e irrigação ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$); (B) radiação solar global ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$); (C) temperaturas máximas e mínimas do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Os valores das temperaturas do ar, máxima e mínima diárias foram semelhantes às normais climatológicas da região de Piracicaba, SP, com valores maiores no período compreendido entre a emergência das plântulas e o florescimento, tendo uma queda acentuada tanto das máximas como das mínimas durante o período de enchimento dos grãos.

Na Figura 4-A, B, C, encontram-se os valores de precipitação, radiação solar global e temperaturas do ar, máximas e mínimas, coletados na área experimental, no período de janeiro a maio de 1994. De uma maneira geral, a radiação solar global incidente nessa região foi bem inferior a do período de outubro de 1993 a fevereiro de 1994. No período da emergência das plântulas ao florescimento, a média foi de $430 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, com um ligeiro decréscimo no período subsequente, $339 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Em todo o ciclo da cultura a média foi de apenas $387 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Esta redução pode ser atribuída à ocorrência de alta nebulosidade no período, com uma maior precipitação, principalmente, no período compreendido entre a emergência das plântulas e o estágio de grãos pastosos. Vale salientar que o excesso de chuvas prejudicou o crescimento e desenvolvimento da cultura, com reflexos negativos no rendimento final.

A radiação solar global incidente de agosto a dezembro de 1994 foi bem mais elevada do que no período de janeiro a maio de 1994 (Figura 5-B) e a radiação solar global média incidente em todo o ciclo da cultura foi de $440 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, aproximadamente a mesma do período de outubro de 1993 a fevereiro de 1994. Verificou-se uma maior radiação solar incidente no período compreendido entre a emergência das plântulas e o florescimento, apresentando um valor máximo de $540 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e um valor mínimo de $164 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Devido à escassez de chuvas verificada no período (Figura 5-A), foram necessários aplicar 174 mm de água de irrigação até o estágio de 12 folhas, verificado 48 dias após a semeadura. As temperaturas máximas diárias do ar

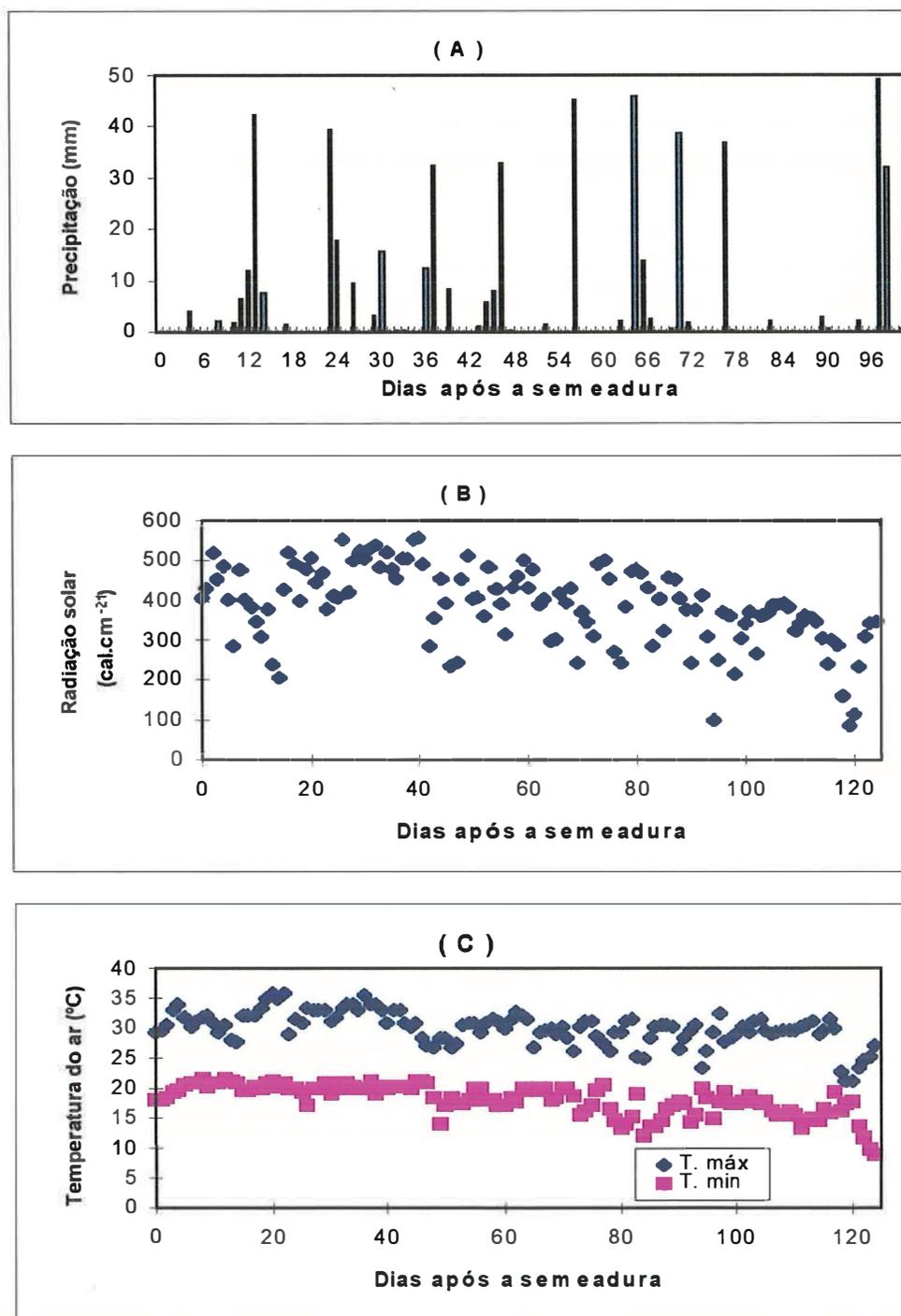


Figura 4 - Condições do ambiente durante a segunda época de semeadura (14 de janeiro de 1994): (A) precipitação (mm.dia⁻¹); (B) radiação solar global (cal.cm⁻².dia⁻¹); (C) temperaturas máximas e mínimas do ar (°C).

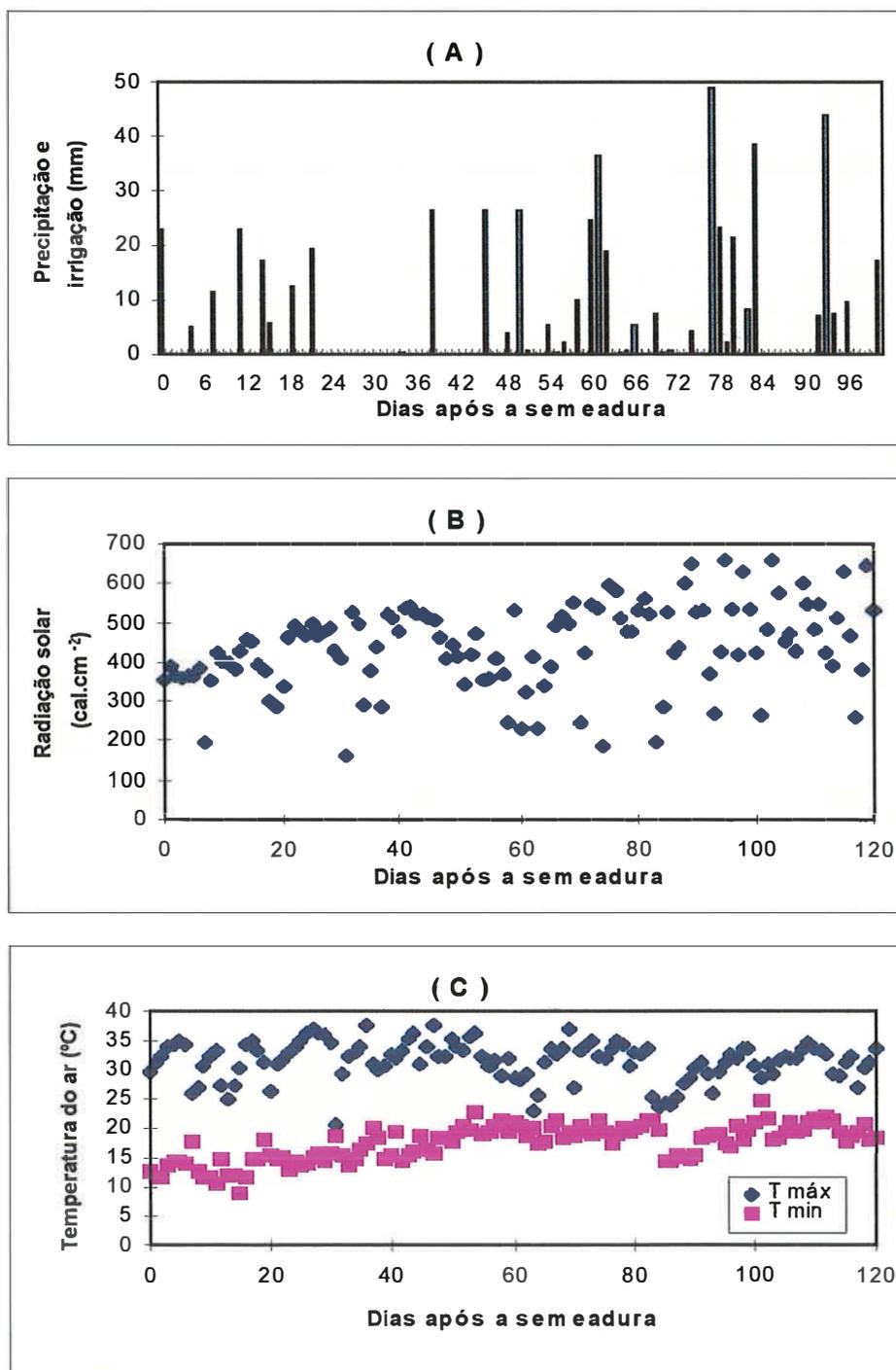


Figura 5 - Condições do ambiente durante a terceira época de semeadura (27 de agosto de 1994): (A) precipitação e irrigação (mm.dia⁻¹); (B) radiação solar global (cal.cm⁻².dia⁻¹); (C) temperaturas máximas e mínimas do ar (°C).

foram semelhantes àquelas registradas nas duas épocas de semeadura anteriores, porém, as mínimas apresentaram valores muito baixos, principalmente, da semeadura até o florescimento da cultura (Figura 5-C).

4.2. Fenologia da cultura do milho

Fenologia ou o período de desenvolvimento da cultura relativo às condições do ambiente, é fundamental para prever a produção da cultura. Neste estudo verificou-se que a duração do ciclo dos três híbridos de exigências calóricas baixa, média e alta, em três épocas de semeadura, variou entre 109 e 124 dias. A variação na duração do ciclo destes híbridos é pequena quando comparada à apresentada por KEULEN & WOLF (1986) para variedades de ciclo curto (80 a 110 dias) e para variedades de ciclo médio (110 a 140 dias), quando as temperaturas diárias do ar são acima de 20°C. Em milho (*Zea mays* L.), a temperatura é a principal causa da variação anual em seus períodos de crescimento e desenvolvimento, e, desta forma, as somas térmicas têm sido usadas para prever o florescimento e a maturação (GILMORE & ROGERS, 1958; MEDERESKI et al. 1973; PLETT, 1992), sendo mais confiáveis que os dias do calendário (CROSS & ZUBER, 1972). A duração do intervalo entre a emergência e o florescimento é afetada tanto pelos fatores genéticos como pelas condições do ambiente. A duração do período pré-florescimento dos três híbridos foi de 5 a 7 dias menor na primeira época (outubro/1993) quando comparada à terceira época de semeadura (agosto/1994).

No período pós-florescimento, a diferença entre a primeira e a terceira épocas de semeadura foi de 3 a 4 dias a menos (Tabela 10). A duração mais curta desse período está associada com as temperaturas mais altas verificadas na primeira época de semeadura (COLIGADO & BROWN, 1975; ALLISON & DAYNARD, 1979).

Tabela 10 - Fenologia da cultura do milho híbrido, com exigências calóricas baixa, média e alta; semeado em 14/10/93; 14/01/94 e 27/08/94. Os valores representam dias após a semeadura.

Híbridos	ESTÁDIOS FENOLÓGICOS (50 %) DAS PLANTAS										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(1ª época de semeadura)											
XL-520	7	19	32	42	51	62	74	86	98	110	116
XL-380	7	19	32	42	53	65	77	89	101	113	120
XL-678	7	19	32	42	53	67	79	91	103	115	121
(2ª época de semeadura)											
XL-520	7	16	29	41	50	59	72	83	95	107	117
XL-380	7	16	29	41	50	62	74	86	98	110	125
XL-678	7	16	29	41	50	64	76	98	100	112	124
(3ª época de semeadura)											
XL-520	8	19	34	49	58	68	80	92	104	116	126
XL-380	8	19	34	49	58	73	85	97	109	121	131
XL-678	8	19	34	49	59	74	86	98	110	122	132
ESTÁDIOS FENOLÓGICOS (50 %) DAS PLANTAS											
ESTÁDIOS	CARACTERÍSTICAS					ESTÁDIOS	CARACTERÍSTICAS				
0	emergência das plântulas					6	grãos leitosos				
1	plantas com 4 folhas					7	grãos pastosos				
2	plantas com 8 folhas					8	grãos pastosos-farináceos				
3	plantas com 12 folhas					9	grãos morfológicamente maduros				
4	plantas com 16 folhas					10	grãos fisiologicamente maduros				
5	florescimento										

HANWAY (1963) ao descrever e ilustrar os diferentes estádios de crescimento da cultura de milho, afirmou que o período que vai do florescimento ao ponto de maturidade fisiológica parece ser relativamente constante para diferentes híbridos e diferentes condições do ambiente. Tendo em vista essa constância e por causa dos diferentes estádios morfológicos de desenvolvimento do grão, este período pode ser razoavelmente separado em 5 subperíodos de 12 dias, indicando que as plantas estão fisiologicamente maduras 60 dias após o florescimento.

Analisando o comportamento dos três híbridos (com exigências calóricas baixa, média e alta), em três épocas de semeadura, constatou-se uma variação de 54 a 60 dias, do florescimento à maturidade fisiológica, aproximando-se razoavelmente bem dos valores descritos por HANWAY (1963), embora KEULEN & WOLF (1986) tenham afirmado que sob condições normais do ambiente este período corresponda uma média de 50 a 55 dias.

Como pode ser observado na Tabela 11, os graus-dia acumulados no período pré-florescimento, dos três híbridos, foram aproximadamente iguais nas três épocas de semeadura. No período pós-florescimento constatou-se um ligeiro acréscimo dos graus-dia acumulados na terceira época de semeadura.

A duração do período pré-florescimento dos três híbridos na segunda época de semeadura foi antecipada em três dias em relação à primeira época de semeadura e de 8 a 10 dias em relação à terceira época de semeadura. Estes resultados estão de acordo com aqueles obtidos por NARWAL et al. (1987). Com relação à duração do período pós-florescimento, constatou-se que houve uma antecipação de 4 a 6 dias deste período na primeira época de semeadura em relação às demais épocas para todos os híbridos (Tabela 10). Estes resultados confirmam as observações feitas por BREUR et al. (1976) e WARRINGTON & KANEMASU (1983), de que temperaturas baixas aumentam

Tabela 11 - Parâmetros observados em três épocas de semeadura para os híbridos XL-520; XL-380 e XL-678.

(1ª época de semeadura)			
PARÂMETROS	HÍBRIDOS		
	XL-520	XL-380	XL-678
Graus-dia da emergência até o final do período juvenil	295	350	355
Graus-dia da emergência ao florescimento	776,5	820,6	846,9
Graus-dia do florescimento ao ponto de maturidade fisiológica	760	790	779
Nº de grãos por planta	585	704	621
Taxa de crescimento do grão (mg.grãos ⁻¹ .dia ⁻¹)	6,61	6,54	7,40
Rendimento de grãos a 15,5 % de umidade (kg.ha ⁻¹)	11 157	10 765	10 577
Peso seco de grãos no ponto de maturidade fisiológica (g)	0,34	0,31	0,33
Nº de grãos por m ²	3 281	3 446	3 185
Nº de grãos por espiga	585	567	540
Índice de área foliar máximo	5,4	5,9	5,4
Fitomassa no ponto de maturidade fisiológica (kg.ha ⁻¹)	21 205	23 142	23 671

(2ª época de semeadura)			
PARÂMETROS	HÍBRIDOS		
	XL-520	XL-380	XL-678
Graus-dia da emergência até o final do período juvenil	290	298	298
Graus-dia da emergência ao florescimento	779	820,7	850,5
Graus-dia do florescimento ao ponto de maturidade fisiológica	756	786	768
Nº de grãos por planta	514	600	536
Taxa de crescimento do grão (mg.grãos ⁻¹ .dia ⁻¹)	4,19	6,55	5,97
Rendimento de grãos a 15,5 % de umidade (kg.ha ⁻¹)	4 482	7 799	6 712
Peso seco de grãos no ponto de maturidade fisiológica (g)	0,17	0,27	0,25
Nº de grãos por m ²	3 028	4 416	3 156
Nº de grãos por espiga	468	509	515
Índice de área foliar máximo	3,9	4,4	5,0
Fitomassa no ponto de maturidade fisiológica (kg.ha ⁻¹)	12 279	20 691	19 323

(3ª época de semeadura)			
PARÂMETROS	HÍBRIDOS		
	XL-520	XL-380	XL-678
Graus-dia da emergência até o final do período juvenil	251	286	286
Graus-dia da emergência ao florescimento	784,2	855,8	870,3
Graus-dia do florescimento ao ponto de maturidade fisiológica	822	825	826
Nº de grãos por planta	573	471	464
Taxa de crescimento do grão (mg.grãos ⁻¹ .dia ⁻¹)	-	-	-
Rendimento de grãos a 15,5 % de umidade (kg.ha ⁻¹)	11 961	10 470	10 508
Peso seco de grãos no ponto de maturidade fisiológica (g)	0,33	0,33	0,35
Nº de grãos por m ²	3 370	2 770	2 794
Nº de grãos por espiga	521	442	431
Índice de área foliar máximo	6,0	6,0	6,2
Fitomassa no ponto de maturidade fisiológica (kg.ha ⁻¹)	25 309	26 100	26 387

o número de dias entre o semeadura e a formação do cabelo e do florescimento ao ponto de maturidade fisiológica.

Entre os três híbridos, de exigências calóricas baixa, média e alta, não se constatou diferenças superiores a 7 dias na duração do ciclo total. Nas três épocas de semeadura, constatou-se diferenças entre dez e onze dias. O requerimento de graus-dia, para o florescimento e para a maturação, em ordem crescente foi a seguinte: 2ª época < 1ª época < 3ª época. Estes resultados confirmam aqueles obtidos por SINGH et al. (1990).

Temperaturas do ar e radiação solar elevadas (Figuras 3-B, C e 5-B, C) em todo o ciclo da cultura proporcionaram altos rendimentos, dos três híbridos na primeira e terceira épocas de semeadura (Tabela 11).

Observou-se melhor desempenho de planta para o híbrido de soma calórica baixa, na primeira e terceira épocas de semeadura. Alto rendimento deste cereal sob condições totalmente irrigadas está associado com alta produção de fitomassa, no ponto de maturidade fisiológica e durante o enchimento de grãos, o que em regra, está associado com a longa duração do crescimento, especialmente o período do enchimento do grão (MUCHOW, 1989). Na segunda época de semeadura, as temperaturas elevadas nos estádios compreendidos entre a emergência e o florescimento (Figura 4-C), diminuíram o período de tempo que a cultura poderia interceptar radiação solar. As temperaturas mais baixas aumentaram a duração do período de enchimento de grãos, porém, isto foi compensado de algum modo pela baixa radiação solar incidente e mais baixo desenvolvimento do dossel, concordando com o relato de MUCHOW (1989). O mais baixo rendimento verificado na segunda época de semeadura resultou do ambiente com temperaturas muito altas, 25,6°C em média, no período pré-florescimento e baixas, 23°C em média, no período pós-florescimento, associado à alta incidência de radiação solar (Figura 4B) e excesso de chuvas (Figura 4-A). Embora a mesma quantidade de fertilizante nitrogenado tenha sido aplicado em todas as épocas de

semeadura, as chuvas persistentes e de alta intensidade em 1994 indicam em perdas de nitrogênio, pela lixiviação, culminando em estresse desse nutriente para as plantas antes do estágio de enchimento do grão. O híbrido com exigência calórica baixa apresentou o pior desempenho nesta época, destacando-se o material com soma calórica média, em função da taxa de acúmulo de matéria seca total e translocação de fotoassimilados (Tabela 11).

4.3. Acúmulo diferencial de matéria seca ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

As Figuras 6, 7 e 8 mostram as variações do acúmulo de matéria seca total, por híbridos de milho com diferentes exigências calóricas, em função dos graus-dia acumulados.

Os coeficientes que melhor se ajustaram aos dados de matéria seca total e de todas as partes da planta encontram-se no Apêndice 1.

O acúmulo da matéria seca total no milho em função dos graus-dia acumulados descreve uma curva sigmóide tal como acontece com as culturas em geral. No período inicial, o crescimento é lento, em seguida passa por uma fase de rápido acúmulo do tamanho e, finalmente, um decréscimo na acumulação de matéria seca total. Tal comportamento é bastante evidente quando se considera apenas o acúmulo de matéria seca das folhas e/ou dos colmos + bainhas. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por MAGALHÃES (1979).

O aumento ocorrido na matéria seca dos grãos coincidiu com o decréscimo verificado na matéria seca dos colmos + bainhas e folhas, fazendo com que a matéria seca total da planta continuasse crescendo. Esse comportamento foi constatado nos três híbridos, nas duas épocas de semeadura.

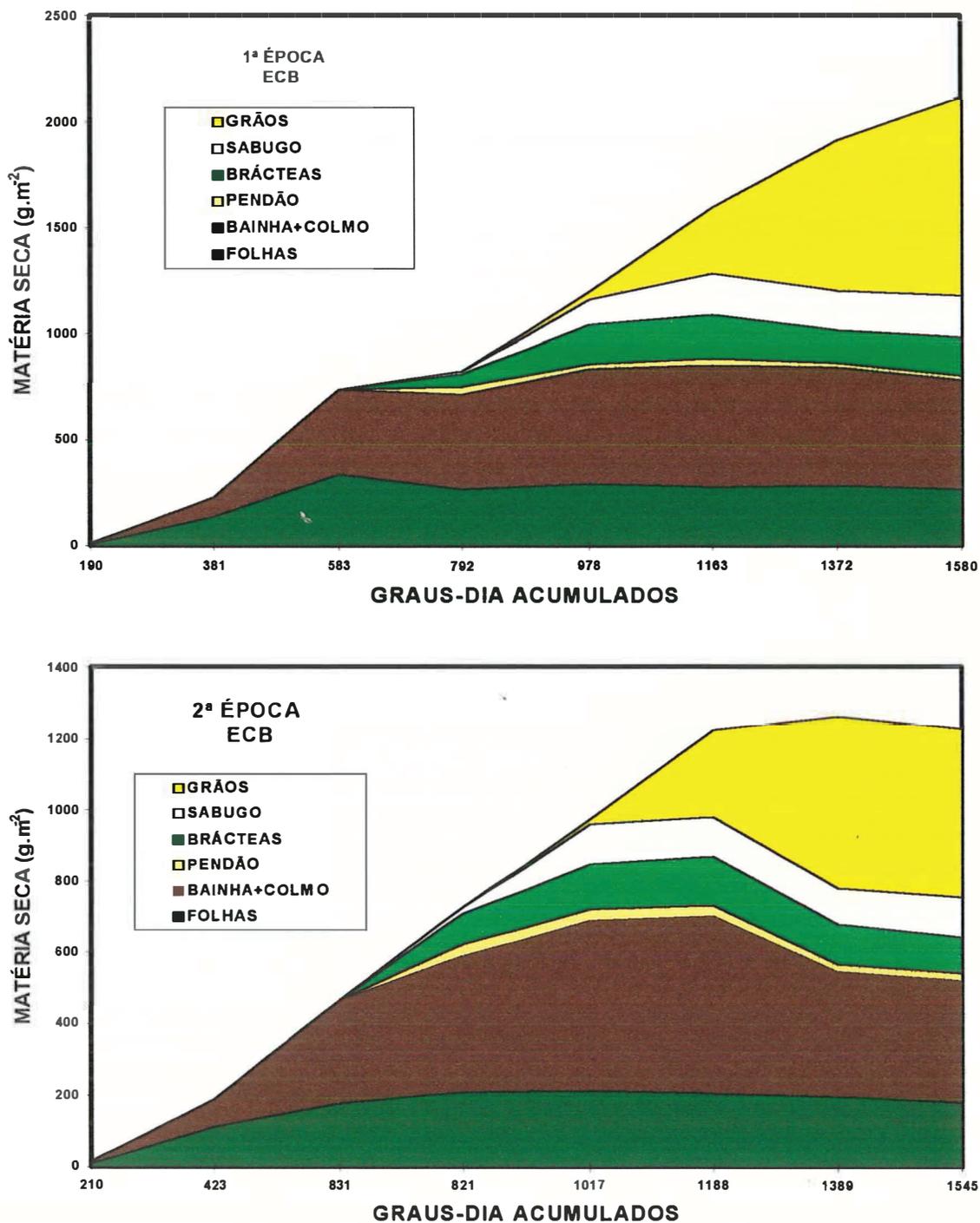


Figura 6 - Acúmulo diferencial de matéria seca em híbridos de milho com diferentes exigências calóricas (ECB=baixa), em duas épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

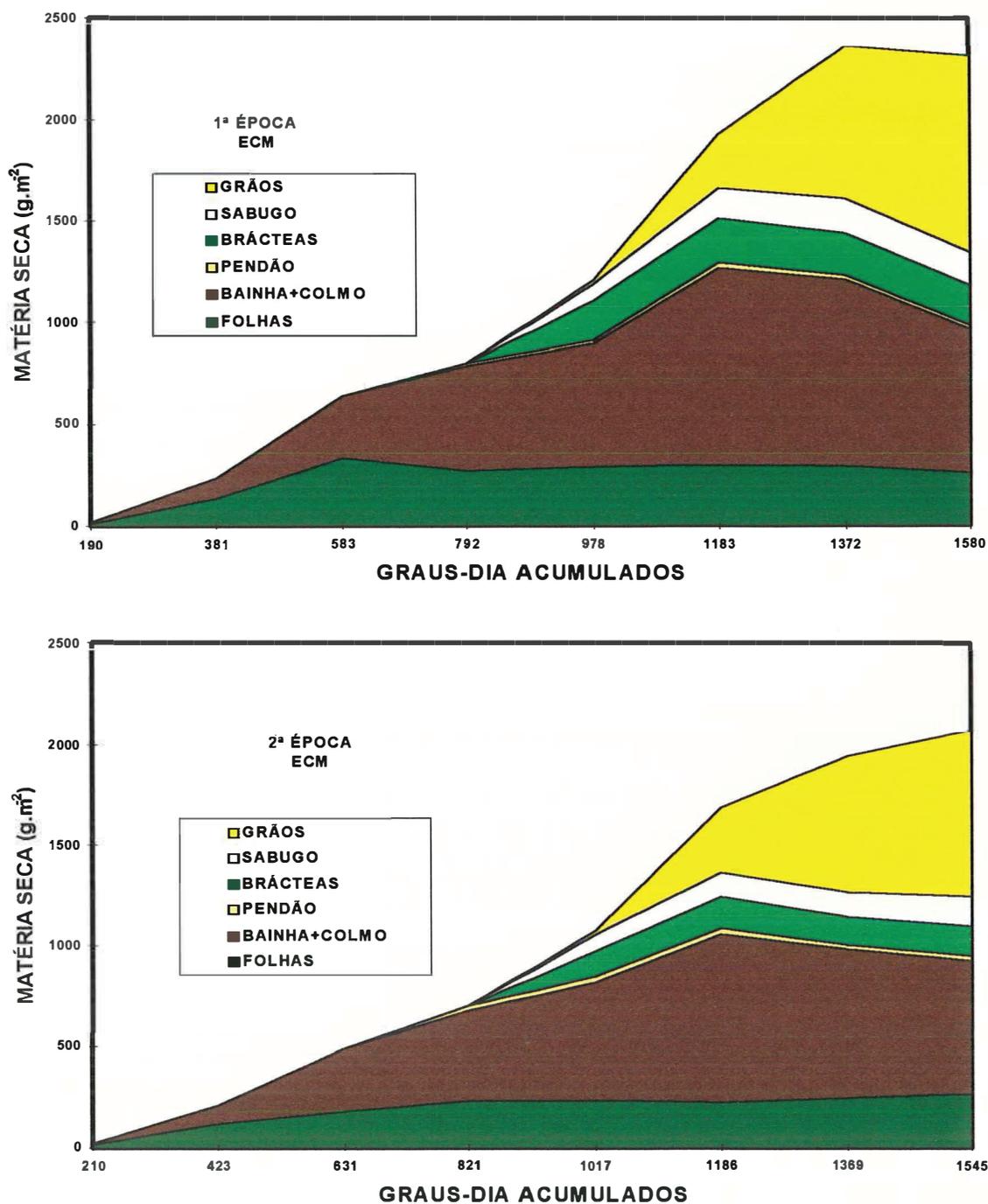


Figura 7 - Acúmulo diferencial de matéria seca em híbridos de milho com diferentes exigências calóricas (ECM=média), em duas épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

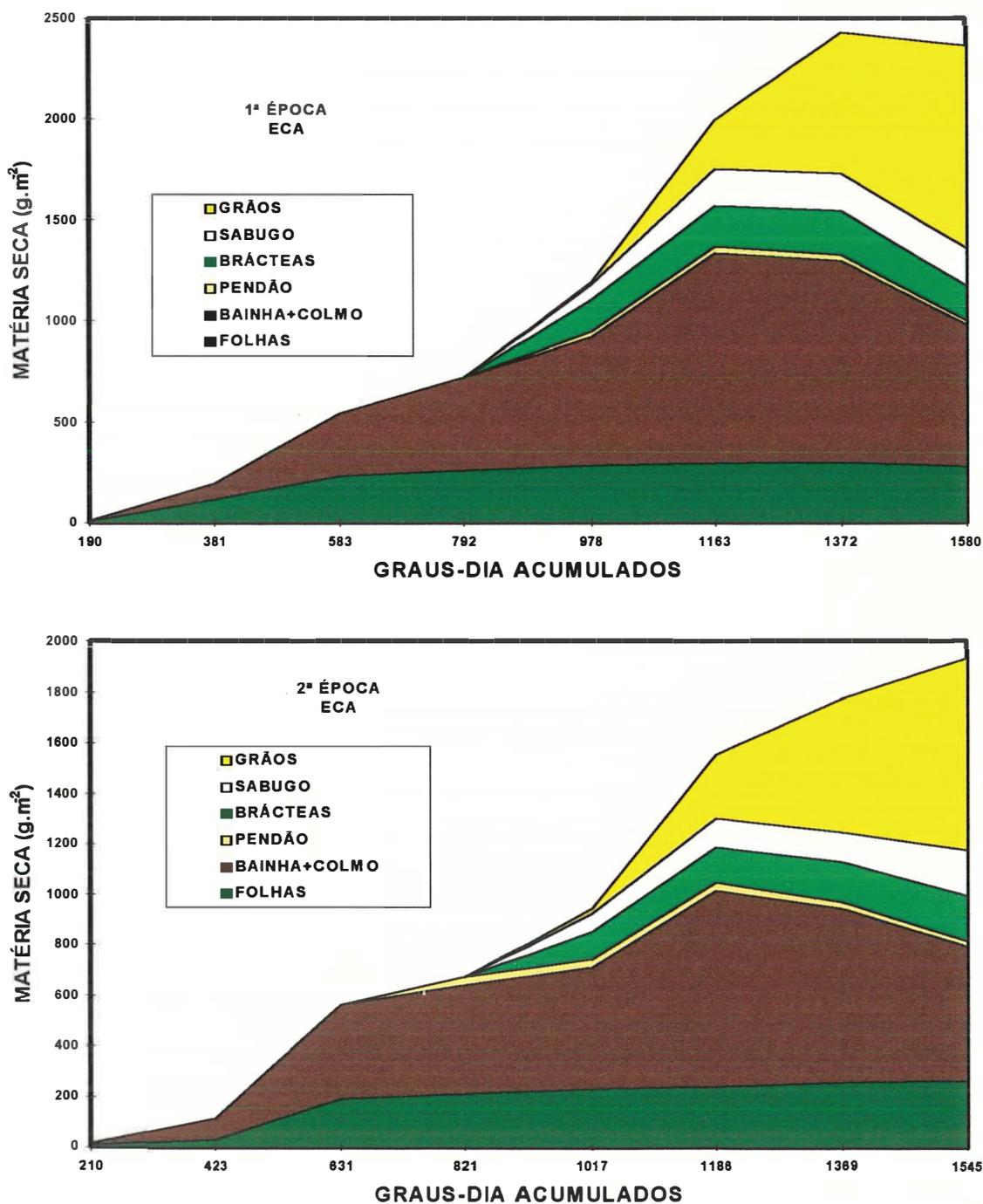


Figura 8 - Acúmulo diferencial de matéria seca em híbridos de milho com diferentes exigências calóricas (ECA = alta), em duas épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

Curvas similares para cultivares de milho de diferentes ciclos, em três densidades de cultivo de safrinha foram obtidas por DURÃES (1963).

Os valores máximos de matéria seca total (2120, 2364 e 2429 g.m⁻²), para híbridos com exigências calóricas baixa, média e alta, respectivamente, na primeira época de semeadura, foram atingidos com 1580, 1372 e 1372 °C.dia.

Os valores máximos de matéria seca total (1264, 2069 e 1932 g.m⁻²) para os mesmos híbridos, na segunda época de semeadura, foram atingidos, com 1369, 1545 e 1545 °C.dia. Houve uma diminuição da matéria seca total próxima à maturação somente do híbrido com exigência calórica baixa. Esse comportamento também foi verificado por NELSON (1956), HANWAY (1962) e HANWAY & RUSSEL (1969).

A análise de variância dos dados de matéria seca total apresentou diferença significativa, ao nível de 5% de probabilidade para o teste de Tukey, para os fatores híbridos e épocas e para a interação épocas x híbridos (Apêndice 2).

A matéria seca das folhas (MSF) não diferiu entre os três híbridos, dentro de uma mesma época de semeadura, verificando-se, porém, valores bem inferiores para os três híbridos na segunda época de semeadura (Figuras 6, 7 e 8). Essa característica (MSF) atingiu seu valor máximo, com 978, 1372 e 1372 °C.dia, para os híbridos com exigências calóricas baixa, média e alta, respectivamente, na primeira época de semeadura. Na segunda época de semeadura, os mesmos híbridos atingiram o valor máximo de MSF com 1017, 1545 e 1545 °C.dia, respectivamente.

O máximo acúmulo de matéria seca dos colmos + bainhas (Figuras 6, 7 e 8), para os diferentes híbridos, na primeira época de semeadura, foi verificado com 1163 °C.dia, sendo que as diferenças entre o acúmulo de matéria seca nos colmos + bainha foram mais evidentes do que as diferenças

ocorridas no acúmulo de matéria seca das folhas. A mesma tendência das curvas de matéria seca foram verificadas na segunda época de semeadura, com o máximo acúmulo de matéria seca dos colmos + bainha ocorrendo com 1186 °C.dia.

4.4. Taxa de produção de matéria seca total (°C⁻¹.dia⁻¹)

Na Figura 9, podem ser observados os valores médios das taxas de produção de matéria seca total (Ct). Com exceção para o híbrido com exigência calórica baixa, na segunda época de semeadura, nos outros dois, a taxa de crescimento da cultura foi mais alta durante o florescimento, com 978 e 1017 °C⁻¹.dia⁻¹ acumulados na primeira e segunda épocas, respectivamente. O tempo gasto para atingir a máxima Ct, variou com as diferentes épocas de semeadura, em função do efeito da temperatura durante a fase vegetativa. Temperaturas mais elevadas durante a fase vegetativa levam a cultura a atingir a máxima Ct com menos graus-dia acumulados. Na primeira época de semeadura, o híbrido com exigência calórica alta apresentou a mais alta Ct, 47,56 g.m⁻².°C⁻¹. dia⁻¹, ou seja: 4,19 g.m⁻².°C⁻¹.dia⁻¹ mais alta do que no híbrido com exigência calórica média e, 9,05 g.m⁻².°C⁻¹.dia⁻¹ mais alta do que no híbrido com exigência calórica baixa. Na segunda época de semeadura, o híbrido com exigência calórica média apresentou a mais alta Ct, 37,73 g.m⁻².°C⁻¹.dia⁻¹, com diferenças de 2,92 e 12,63 g.m⁻². °C⁻¹.dia⁻¹ para os híbridos com exigências calóricas alta e baixa, respectivamente. O híbrido com exigência calórica baixa, na segunda época de semeadura, com 821 °C.dia acumulados, atingiu sua mais alta taxa de crescimento, 25,1 g.m⁻².°C⁻¹.dia⁻¹. WILLIAMS et al. (1965), obtiveram uma taxa máxima de produção de matéria seca total de 52 g.m⁻².dia⁻¹ para uma densidade de plantas de 70 mil plantas.ha⁻¹, enquanto LEMON (1963) obteve um valor bem inferior, 30 g.m⁻².dia⁻¹, utilizando a mesma população de plantas. COSTA (1994) obteve taxas máximas de produção de matéria seca total de 28,3 e 28 g.m⁻².dia⁻¹, para o milho plantado em

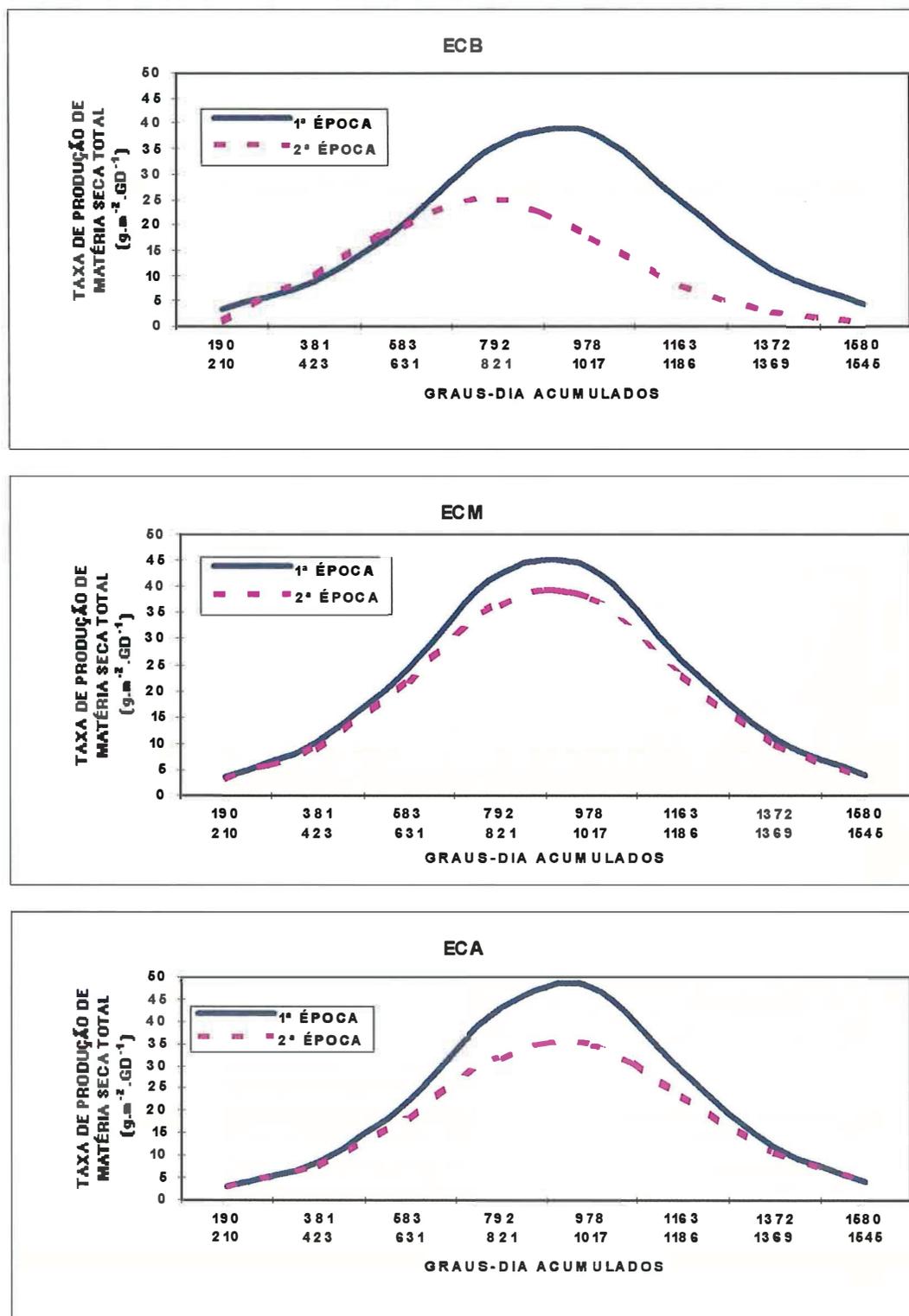


Figura 9 - Taxa de produção de matéria seca total em híbridos de milho com diferentes exigências calóricas (ECB=baixa; ECM=média; ECA=alta). A primeira linha da abscissa corresponde à 1ª época de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

nov/89 e jul/90 e LOPES & MAESTRI (1973) obtiveram um valor máximo de $22,9 \text{ g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para uma população de 40 mil plantas. ha^{-1} . Numa comparação, verifica-se que a taxa registrada para o híbrido com exigência calórica alta, na primeira época de semeadura, aproxima-se do valor obtido por WILLIAMS et al. (1965), e a diferença é em parte, devida à menor densidade de semeadura empregada ($5,88 \text{ plantas.m}^{-2}$). Na segunda época de semeadura, a taxa de produção de matéria seca total (Ct) apresentada pelo híbrido com exigência calórica baixa, situou-se entre os valores obtidos por LOPES & MAESTRI (1973) e COSTA (1994).

A matéria seca das folhas contribuiu com 70% da matéria seca total no início do ciclo, decrescendo quase linearmente, chegando próximo a zero no ponto de maturidade fisiológica. Esse comportamento foi verificado para os três híbridos, na primeira época de semeadura. A mesma tendência dessas curvas foi observada na segunda época de semeadura, sendo que a contribuição da matéria seca das folhas para a matéria seca total, logo após a semeadura, situou-se em torno de 60%, para os três híbridos. A contribuição da matéria seca da bainha + colmos para a matéria seca total da planta é baixa logo após a emergência das plântulas, em torno de 30%, elevando-se para cerca de 50 a 60 % por volta dos $583 \text{ a } 792 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, decrescendo em seguida para cerca de 24 a 30 % no ponto de maturidade fisiológica. Na segunda época de semeadura, constatou-se um comportamento semelhante para os três híbridos, sendo que o percentual de contribuição da bainha + colmos foi mais elevado, no início do ciclo, 36 a 38 %, com os valores máximos ocorrendo com $631 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ acumulados.

4.5. Parâmetros essenciais ao modelo observados durante a primeira época de semeadura

Um sumário dos dados médios fundamentais observados durante a primeira época de semeadura, para os três híbridos de milho, é apresentado na Tabela 12. Os valores dos parâmetros genéticos P1 (graus-dia (base 10°C) da emergência das plântulas ao final do período juvenil) e P5 (graus-dia (base 10°C) do florescimento ao ponto de maturidade fisiológica) foram estimados usando as datas de florescimento e maturidade fisiológica observadas no campo. A temperatura basal (10°C) foi escolhida, com base na caracterização de cultivares usada pela EMBRAPA (1993) e por GOMES & CARNEIRO (1993). Todos os outros parâmetros foram observados durante a colheita referente ao experimento realizado em 1993. P2 (coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo) foi ajustado para 0,5, tendo em vista que os híbridos testados neste estudo não apresentaram sensibilidade ao fotoperíodo, conforme demonstraram os testes de sensibilidade. Constatou-se que a simulação difere sensivelmente da realidade, sob o plano da fenologia e sobretudo do crescimento das diferentes partes da planta. Destacou-se, em particular, uma subestimativa do índice de área foliar máximo, que se traduz em um rendimento de grãos e em fitomassa aérea inferiores às medidas realizadas no campo. Talvez uma grande parte da subestimativa tenha resultado do crescimento subestimado devido às imprecisões em suposições do modelo relacionadas à fenologia e crescimento de cultivares de milho tropical CARBERRY et al. (1989) e CARBERRY (1991).

4.6. Calibração dos parâmetros do modelo

Neste estudo, os dados do experimento realizado em outubro de 1993 foram usados para calibrar os cinco parâmetros genéticos pertinentes aos três híbridos, com exigências calóricas baixa, média e alta, respectivamente.

Tabela 12 - Simulação antes de calibrar os parâmetros do modelo.

(1ª época de semeadura)		
Híbridos / Parâmetros	Estimado	Observado
XL-520 (P1 = 295; P2 = 0,5; P5 = 760; G2 =585; G3=6,6)		
Data de florescimento ^a	348	349
Data do ponto de maturidade fisiológica ^b	34	37
Rendimento de grãos 15,5 % (kg.ha ⁻¹)	7 538	11 157
Peso seco dos grãos (g) no PMF	0,24	0,34
Número de grãos m ⁻²	2 658	3 281
Número de grãos por espiga	452	585
Índice de área foliar máximo	4,82	5,4
Fitomassa (kg.ha ⁻¹) no PMF	18 859	21 205
XL-380 (P1 = 321; P2 = 0,5; P5 = 790; G2 =704; G3=6,5)		
Data de florescimento ^a	350	351
Data do ponto de maturidade fisiológica ^b	38	41
Rendimento de grãos 15,5 % (kg.ha ⁻¹)	9 661	10 765
Peso seco dos grãos (g) no PMF	0,26	0,31
Número de grãos m ⁻²	3 093	3 446
Número de grãos por espiga	526	567
Índice de área foliar máximo	4,96	5,90
Fitomassa (kg.ha ⁻¹) no PMF	20 956	23 142
XL-678 (P1 = 355; P2 = 0,5; P5 = 779; G2 =621; G3=7,4)		
Data de florescimento ^a	355	354
Data do ponto de maturidade fisiológica ^b	41	41
Rendimento de grãos 15,5 % (kg.ha ⁻¹)	8 910	10 577
Peso seco dos grãos (g) no PMF	0,27	0,33
Número de grãos m ⁻²	2 799	3 185
Número de grãos por espiga	476	540
Índice de área foliar máximo	5,16	5,40
Fitomassa (kg ha ⁻¹) no PMF	21 170	23 671

a e b = dia juliano; PMF = ponto de maturidade fisiológica.

Para o coeficiente genético, P2, atribuiu-se valor igual a 0,5 que é um valor típico para híbridos tropicais (JONES & KINIRY, 1986). P1 foi ajustado pelo método iterativo até que a data do florescimento de todos os híbridos fosse a mais próxima possível da data observada no calendário da cultura.

Nas Tabelas 13, 14 e 15 são apresentados os valores do coeficiente genético P5 (graus-dia do florescimento até o ponto de maturidade fisiológica), para os híbridos com exigências calóricas baixa, média e alta, respectivamente.

Um método iterativo foi usado para derivar o parâmetro genético P5. Para isso, o valor inicial $P5 = 760$ foi aumentado de 20 em 20° até atingir a diferença mínima entre a data prevista e a observada do ponto de maturidade fisiológica, o que foi obtido com valor de P5 igual a 900 graus-dia, portanto, esse valor foi escolhido (Tabela 13), para o híbrido com exigência calórica baixa, ou seja: $P5 = 900$. Processo semelhante foi usado para os demais híbridos, sendo que os valores iniciais de P5 (790 e 779 graus-dia) foram aumentados de 10 em 10°. As diferenças mínimas entre as datas prevista e observada foram obtidas com valores de P5 igual a 888 e 859 graus-dia (Tabelas 14 e 15), valores estes escolhidos para os híbridos com exigências calóricas média e alta. COSTA (1992) obteve o valor de $P5 = 850$ graus-dia, como representativo da região, para o Ensaio Nacional de Milho Normal em Ribeirão Preto. Verificou-se que houve a necessidade de aumentar os valores iniciais de P5 para calibrar esse coeficiente, ao contrário do processo utilizado por COSTA (1992), em que os valores de P5 foram reduzidos.

Os parâmetros genéticos G2 e G3 foram determinados pela técnica de calibração iterativa, até que o erro obtido entre o rendimento de grãos simulado e o observado fosse menor que 2%. O modelo foi rodado, com valores de G2 variando de 585 a 825 grãos por planta, com incrementos de 20, para o

Tabela 13 - Calibração do coeficiente genético P5 (graus-dia do florescimento até o ponto de maturidade fisiológica, observado em 06/02/94; dia juliano 37), para o híbrido com exigência calórica baixa.

P5	DATA SIMULADA DE MATURAÇÃO	DIFERENÇA (em dias)
760	30	-7
880	36	-1
900*	37	0
920	38	1

Nota: (*) indica o valor de P5 escolhido na calibração.

Tabela 14- Calibração do coeficiente genético P5 (graus-dia do florescimento até o ponto de maturidade fisiológica, observado em 10/02/94; dia juliano 41), para o híbrido com exigência calórica média.

P5	DATA SIMULADA DE MATURAÇÃO	DIFERENÇA (em dias)
878	40	-1
888*	41	0
898	41	0
908	42	1

Nota: (*) indica o valor de P5 escolhido na calibração.

Tabela 15 - Calibração do coeficiente genético P5 (graus-dia do florescimento até o onto de maturidade fisiológica, observado em 11/02/94, dia juliano 42), para o híbrido com exigência calórica alta.

P5	DATA SIMULADA DE MATURAÇÃO	DIFERENÇA (em dias)
849	41	- 1
859	41	- 1
869*	42	0

Nota: (*) indica o valor de P5 escolhido na calibração.

híbrido de exigência calórica baixa; G2 variando de 704 a 833 grãos por planta, com incrementos de 20, para o híbrido com exigência calórica média e G2 variando de 621 a 734, com incrementos de 20, para o híbrido com exigência calórica alta. Os valores escolhidos para os parâmetros são mostrados nas Tabelas 16, 17 e 18.

Valores de G2 superiores a 700 grãos por planta foram encontrados somente para alguns híbridos cultivados nos Estados Unidos da América (JONES & KINIRY, 1986). O número de grãos por planta dos híbridos estudados situou-se na faixa dos híbridos tropicais apontados por JONES & KINIRY (1986) e LIU (1989).

O mesmo processo foi repetido para G3 (mantendo-se P1, P2, P5 e G2 fixos). G3 variou de 6,59 a 6,62 mg.grãos⁻¹.dia⁻¹, com incrementos de 0,01, para o híbrido com exigência calórica baixa; de 6,48 a 6,53 mg.grãos⁻¹.dia⁻¹, com incrementos de 0,01 para híbridos com exigência calórica média e de 7,31 a 7,43 mg.grãos⁻¹.dia⁻¹, com incrementos de 0,01, para o híbrido com exigência calórica alta. WU (1989) encontrou valores de G3 da ordem de 5,2 a 6,0 mg.grãos⁻¹.dia⁻¹, para híbridos de milho cultivados no Norte da China enquanto JAGTAP et al. (1993) obtiveram valores médios de 8,79 mg.grãos⁻¹.dia⁻¹ para híbridos de milho cultivados na Nigéria. Os valores escolhidos para o parâmetro G3 são mostrados nas Tabelas 19, 20 e 21.

4.6.1. Simulação após a calibração dos parâmetros

Os valores dos parâmetros genéticos calibrados, utilizando os dados do experimento realizado em outubro de 1993, são apresentados na Tabela 22. Os parâmetros assim calibrados para o ano de 1993 (primeira época de semeadura) foram objeto de uma validação para o ano de 1994. Considerando que os dados experimentais da primeira época de semeadura foram usados para

Tabela 16 - Calibração do coeficiente genético G2 (número potencial de grãos por planta), para o híbrido com exigência calórica baixa. O rendimento observado foi de 11 157 kg.ha⁻¹.

G2	RENDIMENTO		
	SIMULADO (kg.ha ⁻¹)	DIFERENÇA (kg.ha ⁻¹)	ERRO (%)
585	8 119	- 3.938	27
785	10 895	- 262	2,34
805*	11 172	15	0,13
825	11 450	293	2,6

Nota: (*) indica o valor de G2 escolhido na calibração.

Tabela 17 - Calibração do coeficiente genético G2 (número potencial de grãos por planta), para o híbrido com exigência calórica média. O rendimento observado foi de 10 765 kg.ha⁻¹.

G2	RENDIMENTO		
	SIMULADO (kg.ha ⁻¹)	DIFERENÇA (kg.ha ⁻¹)	ERRO (%)
813	10.418	- 347	3,2
823*	10 546	- 219	2,0
833	10 674	- 91	0,8

Nota: (*) indica o valor de G2 escolhido na calibração.

Tabela 18 - Calibração do coeficiente genético G2 (número potencial de grãos por planta). O rendimento observado foi de 10 577 kg.ha⁻¹.

G2	RENDIMENTO		
	SIMULADO (kg.ha ⁻¹)	DIFERENÇA (kg.ha ⁻¹)	ERRO (%)
714	10 217	- 360	3,4
724*	10 360	- 217	2,0
734	10.503	- 74	0,6

Nota: (*) indica o valor de G2 escolhido na calibração.

Tabela 19- Calibração do coeficiente genético G3 (taxa de crescimento potencial de grãos, em mg.grãos⁻¹.dia⁻¹), para o híbrido com exigência calórica baixa. O rendimento observado foi de 11 157 kg.ha⁻¹.

G3	RENDIMENTO		
	SIMULADO (kg.ha ⁻¹)	DIFERENÇA (kg.ha ⁻¹)	ERRO (%)
6,59	11 138	-19	0,17
6,60*	11 155	-2	0,01
6,61	11 172	15	0,13
6,62	11 189	32	0,28

Nota: (*) indica o valor de G3 escolhido na calibração.

Tabela 20- Calibração do coeficiente genético G3 (taxa de crescimento potencial de grãos, em mg.grãos⁻¹.dia⁻¹), para o híbrido com exigência calórica média. O rendimento observado foi de 10 765 kg.ha⁻¹.

G3	RENDIMENTO		
	SIMULADO (kg.ha ⁻¹)	DIFERENÇA (kg.ha ⁻¹)	ERRO (%)
6,48	10 408	- 357	3,3
6,49	10 408	- 357	3,3
6,50	10 570	- 195	1,8
6,51	10 570	- 195	1,8
6,52	10 570	- 195	1,8
6,53*	10 833	68	0,6

Nota: (*) indica o valor de G3 escolhido na calibração.

Tabela 21 - Calibração do coeficiente genético G3 (taxa de crescimento potencial de grãos, em mg.grãos⁻¹.dia⁻¹), para o híbrido com exigência calórica alta. O rendimento observado foi de 10 577 kg.ha⁻¹.

G3	RENDIMENTO		
	SIMULADO (kg.ha ⁻¹)	DIFERENÇA (kg.ha ⁻¹)	ERRO (%)
7,31	10 448	- 129	1,20
7,41*	10 591	14	0,13
7,42	10 605	28	0,26
7,43	10 619	42	0,40

Nota: (*) indica o valor de G3 escolhido na calibração.

Tabela 22 - Simulação após a calibração dos parâmetros do modelo.

(1ª época de semeadura)		
Híbridos/Parâmetros	Estimado	Observado
XL-520 (P1 = 295; P2 = 0,5; P5 = 900; G2 =805; G3=6,6)		
Data de florescimento ^a	348	349
Data do ponto de maturidade fisiológica ^b	37	37
Rendimento de grãos 15,5% (kg.ha ⁻¹)	11 155	11 157
Peso seco dos grãos (g) no PMF	0,26	0,34
Número de grãos. m ⁻²	3 657	3 281
Número de grãos por espiga	622	585
Índice de área foliar máximo	4,82	5,4
Fitomassa (kg.ha ⁻¹) no PMF	21 916	21 205
XL-380 (P1 = 322; P2 = 0,5; P5 = 888; G2 =805; G3=6,5)		
Data de florescimento ^a	352	352
Data do ponto de maturidade fisiológica ^b	41	41
Rendimento de grãos 15,5% (kg.ha ⁻¹)	10 546	10 765
Peso seco dos grãos (g) no PMF	0,24	0,31
Número de grãos. m ⁻²	2 411	3 120
Número de grãos por espiga	628	567
Índice de área foliar máximo	5,05	5,90
Fitomassa (kg.ha ⁻¹) no PMF	22 450	23 142
XL-678 (P1 = 355; P2 = 0,5; P5 = 859; G2 =724; G3=7,41)		
Data de florescimento ^a	355	354
Data do ponto de maturidade fisiológica ^b	41	42
Rendimento de grãos 15,5% (kg.ha ⁻¹)	10 360	10 577
Peso seco dos grãos (g) no PMF	0,27	0,33
Número de grãos. m ⁻²	3 264	3 185
Número de grãos por espiga	555	540
Índice de área foliar máximo	5,16	5,40
Fitomassa (kg.ha ⁻¹) no PMF	22 395	23 671

a e b = dia juliano; PMF = ponto de maturidade fisiológica.

calibrar os parâmetros, os resultados do ano de 1993 não são independentes da calibração.

Constatou-se uma concordância razoável entre os resultados simulados e observados, principalmente, nas datas de florescimento, do ponto de maturidade fisiológica e de rendimento de grãos. WIT et al. (1978) advertiram para o perigo que a calibração pode causar, tendo em vista o grande número de parâmetros quando comparado à quantidade de dados experimentais obtidos no campo, e que a aplicação indiscriminada da mesma pode conduzir a um ajuste perfeito, porém, sem utilidade prática, devido à adaptação de muitos parâmetros. Observou-se uma subestimativa do índice de área foliar máximo em todos os híbridos, com o maior erro não superando 14 %. Constatou-se uma superestimativa do número de grãos por m^2 e do número de grãos por espiga, exceto no híbrido de exigência calórica média, em que o número de grãos por m^2 foi subestimado pelo modelo. Os valores de fitomassa estimados pelo modelo foram bem próximos dos observados, com erro inferior a 6,0 %. Existem situações em que é possível obter-se um ajuste perfeito entre os valores simulados e os observados. O trabalho de PLANTUREUX (1991) ilustrou muito bem uma situação de ajuste perfeito.

4.7. Validação do modelo

A validação do modelo CERES-Maize, proposta neste estudo, consistiu de uma comparação dos valores estimados com os observados em experimento realizado em 1994 (terceira época de semeadura). Salienta-se que o CERES-Maize foi construído a partir de dados experimentais obtidos em outros países e em condições totalmente distintas. Quando validado com observações experimentais ~~outras~~ que não aquelas usadas para calibrar os parâmetros do modelo, os resultados ~~indicaram~~ uma boa capacidade preditiva do modelo, para as datas de

florescimento dos híbridos, o mesmo não se verificando com as datas do ponto de maturidade fisiológica (Tabela 23). A comparação dos resultados sugeriu a possibilidade de erros lógicos no programa e não uma calibração inadequada. Resultados semelhantes foram encontrados por HODGES et al. (1987); WU et al. (1989); LIU et al. (1989); PLANTUREUX et al. (1991) e JAGTAP et al. (1993).

O índice de área foliar máximo e a fitomassa dos três híbridos foram subestimados pelo modelo, com erros variando de 14 a 17 %, respectivamente. Observou-se também que a validação, utilizando-se os dados experimentais do ano de 1994, não alterou a tendência destes parâmetros verificados após a calibração (Tabela 22). O peso de grão e o número de grãos estimados pelo modelo situaram-se muito acima dos observados, principalmente para os híbridos com exigências calóricas média e alta. Através da medição desses parâmetros foi possível identificar as áreas frágeis do modelo.

O modelo estimou muito bem o rendimento de grãos dos três híbridos cultivados em 1994, com erros percentuais inferiores a 7 %. Esses resultados foram semelhantes aos obtidos por JAGTAP et al. (1993), indicando que o modelo pode ser usado em uma área mais extensa, onde existem dados diários de temperatura e precipitação, com uma mínima calibração regional.

4.8. Testes de sensibilidade

Os parâmetros necessários ao funcionamento do CERES-Maize são numerosos e por vez delicados para se estimar. Trata-se de parâmetros de entrada (Tabelas 2 e 3) aos quais se juntam aos parâmetros e constantes das equações internas do modelo. A análise de sensibilidade foi realizada simultaneamente com os parâmetros de entrada do modelo ligados ao solo e à cultura. Para assegurar que os dados do solo e da cultura utilizados foram

Tabela 23 - Validação do modelo (calibrado em 1993 - 1ª época de semeadura). Valores obtidos em 1994 (3ª época de semeadura). Híbridos XL-520, XL-380 e XL-678.

Híbridos/Parâmetros	Estimado	Observado	Diferença	Erro (%)
XL-520 (P1 = 295; P2 = 0,5; P5 = 900; G2 =805; G3=6,6)				
Data de florescimento ^a	307	307	0	
Data do ponto de maturidade fisiológica ^b	359	362	3	
Rendimento de grãos 15,5% (kg.ha ⁻¹)	11 292	11 961	- 669	6
Peso seco dos grãos (g) no PMF	0,25	0,33	- 0,08	23
Número de grãos. m ⁻²	3 741	3 370	371	10
Número de grãos por espiga	636	521	115	18
Índice de área foliar máximo	4,70	5,5	- 0,8	14
Fitomassa (kg.ha ⁻¹) no PMF	21 247	25 309	- 4 062	16
XL-380 (P1 = 322; P2 = 0,5; P5 = 888; G2 =823; G3=6,5)				
Data de florescimento ^a	309	312	- 3	
Data do ponto de maturidade fisiológica ^b	361	004	- 9	
Rendimento de grãos 15,5% (kg.ha ⁻¹)	11 161	10 470	691	6,6
Peso seco dos grãos (g) no PMF	0,24	0,33	- 0,09	27
Número de grãos. m ⁻²	3 842	2 770	1 072	38
Número de grãos por espiga	653	442	211	47
Índice de área foliar máximo	5,00	5,9	- 0,9	15
Fitomassa (kg.ha ⁻¹) no PMF	21 681	26 100	- 4 419	17
XL-678 (P1 = 355; P2 = 0,5; P5 = 859; G2 =724; G3=7,41)				
Data de florescimento ^a	311	313	- 2	
Data do ponto de maturidade fisiológica ^b	361	005	10	
Rendimento de grãos 15,5% (kg.ha ⁻¹)	11 034	10 508	526	5
Peso seco dos grãos (g) no PMF	0,27	0,35	- 0,08	23
Número de grãos. m ⁻²	3 415	2 794	621	22
Número de grãos por espiga	581	431	150	35
Índice de área foliar máximo	5,00	5,8	- 0,8	14
Fitomassa (kg.ha ⁻¹) no PMF	22 077	26 387	- 4310	16

a e b = dia juliano; PMF = ponto de maturidade fisiológica.

corretos, o erro produzido pelo modelo ao variar esses dados, deve ser sempre maior que o erro produzido ao usar os valores atribuídos originalmente no modelo. Os parâmetros sensíveis são mostrados na Tabela 24. Os parâmetros P1, P5, G2 e G3 ligados aos híbridos, com exigências calóricas baixa, média e alta foram analisados conjuntamente. De fato a análise de sensibilidade destes parâmetros foi realizada com prudência tendo em vista que eles não são independentes uns dos outros. Usando este procedimento, observou-se que aumentando-se os valores de G2 e G3, que são os valores potenciais ligados aos componentes do rendimento, aumentou proporcionalmente a matéria seca do grão e conseqüentemente o rendimento estimado de todos os híbridos. Um outro fator limitante, a radiação solar se manifesta neste caso. Quaisquer que sejam as condições de estresse, o rendimento está diretamente relacionado com a duração do período de enchimento do grão, e isto explicou a sensibilidade de P5. A variação de P1 antecipa ou retarda o florescimento. Este parâmetro está relacionado ao clima, aos períodos de sensibilidade ao estresse hídrico ou aos períodos de forte radiação solar (PLANTUREUX et al., 1991). Isto explica as variações mais irregulares do rendimento em função de P1. Outros parâmetros sensíveis, como o número da curva de escoamento e a capacidade de armazenamento de água disponível para a planta, produziram erros percentuais significativos no rendimento estimado pelo CERES-Maize. Resultados semelhantes foram obtidos por COSTA (1992), porém, com pequena variação dos erros percentuais. Constatou-se que aumentando-se o valor do número da curva de escoamento ocorre uma pequena diminuição do rendimento previsto.

O principal parâmetro testado para o qual o modelo realmente apresentou sensibilidade foi a capacidade de água disponível para a planta (CAD). O valor usado nas simulações (120 mm) foi acrescido e reduzido e os resultados mostraram que o aumento na capacidade de água disponível para a planta não produziu alterações na simulação do modelo. Isto é decorrente da

Tabela 24 - Resultados dos testes de sensibilidade (valores dos parâmetros preferidos são indicados por *)

Parâmetros	XL-520		XL-380		XL-678	
	Intervalo	Rend. estimado	Intervalo	Rend. estimado	Intervalo	Rend. estimado
Graus-dia da emergência das plântulas ao final do estágio juvenil (P1)	275	10 988	302	11 091	335	10 908
	285	10 987	312	11 161	345	10 908
	295*	11 292	322*	11 161	355*	11 034
	305	11 292	332	11 162	365	11 103
	315	11 370	342	11 162	375	11 726
Graus-dia do florescimento até o ponto de maturidade fisiológica (P5)	880	11 015	868	10 876	839	10 743
	900*	11 292	878	11 161	849	10 743
	920	11 574	888*	11 161	859*	11 034
			898	11 448	869	11 317
Número potencial de grãos por planta (G2) (grãos.planta ⁻¹)	755	10 590	813	11 025	717	10 882
	805*	11 292	823*	11 161	727*	11 034
	855	11 993	883	11 297	734	11 186
Taxa potencial de crescimento de grãos (G3) (mg. grãos ⁻¹ .dia ⁻¹)	6,57	11 240	6,47	11 110	7,38	10 989
	6,60*	11 292	6,50*	11 161	7,41*	11 034
	6,63	11 343	6,53	11 213	7,44	11 079
	72	11 292	72	11 161	72	11 034
Número da curva de escoamento	78*	11 292	78*	11 161	78*	11 034
	84	11 260	84	11 140	84	11 025
	90	11 038	90	10 892	90	10 752
Capacidade de armazenamento de água disponível para a planta (mm)	172	11 292	172	11 161	172	11 034
	146	11 292	146	11 161	146	11 034
	120*	11 292	120*	11 161	120*	11 034
	95	11 062	95	10 992	95	10 781
	69	10 722	69	10 669	69	10 552
	5,26	10 306	5,26	10 194	5,26	10 076
Densidade de população de plantas (plantas.m ⁻²)	5,55	10 773	5,55	10 655	5,55	10 529
	5,88*	11 292	5,88*	11 161	5,88*	11 034
	6,25	11 850	6,25	11 714	6,25	11 586
	7,50	13 622	7,50	13 470	7,50	13 342
Profundidade de semeadura (cm)	9	13 315	9	11 182	9	11 102
	10*	11 292	10*	11 161	10*	11 034
	11	13 622	11	11 091	11	11 110

insensibilidade do modelo ao excesso de água no solo. Por outro lado, decréscimos na capacidade de água disponível ocasionaram reduções significativas no rendimento simulado.

O teste de sensibilidade para a densidade de plantas mostrou que uma pequena variação neste parâmetro pode levar a um erro superior a 8 % na simulação. Verificou-se que quanto maior a densidade de plantas, maior a produção simulada pelo CERES-Maize. Entretanto, sabe-se que na realidade esta relação não é verdadeira, pois existe um ótimo de número de plantas por metro quadrado e densidades muito acima ou muito abaixo desse ótimo levam a produções menores (VIEGAS & PEETEN, 1987). A sensibilidade do modelo à profundidade de semeadura também foi testada, variando este parâmetro de 9 a 11 cm. Os resultados mostraram que valores diferentes de 10 cm (que foi o valor usado) produziram rendimentos simulados maiores, com exceção do híbrido com exigência calórica média.

O teste de sensibilidade mostrou que os valores usados neste estudo foram os que forneceram os menores erros nas estimativas do rendimento, indicando assim, que os valores para cada parâmetro foram assumidos corretamente.

O CERES-Maize foi praticamente insensível às mudanças nas variáveis albedo, coeficiente de evaporação do solo na camada superficial, conteúdo inicial de água armazenada no solo, número da curva de escoamento, coeficiente de drenagem e conteúdo de água armazenada na saturação.

4.9. Balanço hídrico

Os principais componentes do balanço hídrico mensal da cultura do milho, com exigência calórica média, em duras épocas de semeadura, são mostrados nas Tabelas 25 e 26. São mostrados também os valores da

Tabela 25 - Balanço hídrico diário da cultura do milho híbrido, com exigência calórica média, apresentado por períodos de trinta dias.. ETr observada e estimada pelo modelo CERES-Maize. Piracicaba, SP. 1994.

(1ª época de semeadura)

Período	Δ ARM (mm.dia ⁻¹)	q (mm.dia ⁻¹)	P (mm.dia ⁻¹)	I (mm.dia ⁻¹)	ETr observada (mm.dia ⁻¹)	ETr estimada (mm.dia ⁻¹)
21/10 a 19/11	- 1,60	0,10	1,53	2,90	5,93	3,74
20/11 a 19/12	- 0,50	0,00	4,82	1,38	6,70	4,72
20/12 a 18/01	- 0,30	0,00	3,86	0,00	4,16	4,17
19/01 a 10/02	1,10	0,00	4,09	0,00	2,99	4,35
Média					5,06	4,23

Tabela 26- Balanço hídrico diário da cultura do milho híbrido, com exigência calórica média,. apresentado por períodos de trinta dias ETr observada e estimada pelo modelo CERES-Maize. Piracicaba, SP. 1994.

(2ª época de semeadura)

Período	Δ ARM (mm.dia ⁻¹)	q (mm.dia ⁻¹)	P (mm.dia ⁻¹)	I (mm.dia ⁻¹)	ETr observada (mm.dia ⁻¹)	ETr estimada (mm.dia ⁻¹)
21/01 a 19/02	- 1,70	0,30	5,96	0,00	7,36	3,88
20/02 a 21/03	2,50	0,10	6,66	0,00	4,06	4,08
22/03 a 20/04	- 2,50	5,20	2,43	0,00	0,27	3,78
21/04 a 15/05	1,50	-1,20	4,88	0,00	4,58	3,08
Média					3,90	3,73

evapotranspiração real da cultura (**ET_r**) medidos e estimados pelo modelo CERES-Maize.

O experimento instalado com o híbrido de exigência calórica média, demonstrou a capacidade do modelo de reproduzir as flutuações da **ET_r**, ou seja: os valores médios e acumulados da **ET_r** foram reproduzidos, de forma exata, na segunda época de semeadura, com erros percentuais inferiores a 5 %. A evapotranspiração da cultura depende das condições climáticas no período e da disponibilidade hídrica do solo. No início do crescimento, a **ET_r** foi baixa, aumentando rapidamente com o aumento no “stand” de plantas até o ponto máximo de crescimento, quando então, a **ET_r** voltou a diminuir. Este comportamento foi verificado na primeira época de semeadura, para o híbrido com exigência calórica média, tanto nos valores de **ET_r** observados como nos estimados pelo modelo. Na segunda época de semeadura, os valores de **ET_r** estimados apresentaram a mesma tendência enquanto os dados de **ET_r** observados não foram coerentes com a curva normal da **ET_r** de uma cultura de milho. Por outro lado, não se pode esperar uma correspondência total entre as saídas do modelo e os valores observados na realidade, como é o caso da **ET_r** na primeira época de semeadura (Tabela 25), já que existem imprecisões na estimativa de alguns parâmetros e na medição de dados de entrada do modelo. VILLAGRA et al. (1995) advertiram para as dificuldades de se estimar a evapotranspiração através da equação do balanço de água, principalmente, como um resultado da variabilidade dos parâmetros de solo.

Para assegurar que os parâmetros do solo foram usados corretamente, MARTIN et al. (1985) testaram a componente **ET_r** do submodelo do balanço hídrico, estimado pelo CERES-Maize. Foram usados dados de um lisímetro para checar as taxas de **ET_r** e o balanço hídrico total do solo. A

correlação mostrada no trabalho indicou que os parâmetros selecionados foram aproximadamente corretos.

Os valores médios diários de ET_r em todo o ciclo foram de 5,0 e 3,9 mm.dia^{-1} , nas duas épocas de semeadura (Tabelas 25 e 26). BRUNINI (1984) citou que vários autores observaram que o valor médio diário de consumo de água pela cultura do milho foi de 4,5 mm.dia^{-1} . No entanto, acrescentou que este valor médio não representa o que realmente acontece durante todo o ciclo da cultura, podendo ocorrer oscilações em torno deste valor ou mesmo características próprias que reduzem a transpiração quando as condições do ambiente não lhe são favoráveis. Valores semelhantes (4,4 mm. dia^{-1}) foram encontrados por DOURADO NETO & LOPES (1987).

Um balanço hídrico diário que contempla as características das condições meteorológicas, as de retenção e permeabilidade de cada camada, em particular, em quanto o seu sistema radicular e a demanda de água variam durante o seu crescimento e desenvolvimento, pode ser utilizado em um grande número de possíveis aplicações, como o cálculo da interação clima-solo para um conjunto de situações conhecidas que existem em uma região. Agregando-se a isto uma dada cultura, semeada em diferentes épocas e densidades, pode-se verificar seus efeitos sobre os estresses hídricos durante várias fases de desenvolvimento do cultivo e seu resultado final na fitomassa e rendimento dos grãos. Para aqueles modelos que contemplam parâmetros genéticos específicos para cada cultivar, como o CERES-Maize, existe a possibilidade de usá-lo para o processo de seleção de cultivares com maior potencial para uma determinada área.

4.10. Índice de área foliar

4.10.1. Índice de área foliar observado

As tendências do índice de área foliar instantâneo são mostradas na Figura 10. Verificou-se que os três híbridos, na primeira época de semeadura, apresentaram comportamentos semelhantes. O índice de área foliar cresceu até um determinado estágio, atingiu um valor máximo quando a cultura acumulou 792 graus-dia; e a partir daí, em consequência da senescência das folhas inferiores, decresceu até o final do ciclo da planta (maturação). Isto é um fenômeno fisiológico normal em milho, durante o qual os metabólitos são rapidamente transferidos das folhas e caule para o desenvolvimento do grão (ESECHIE, 1992). Resultados semelhantes foram encontrados por WILLIAMS et al. (1965) e SILVA et al. (1974). Estudos conduzidos por LEAL (1993), mostrando a variação do índice de área foliar da cultura do milho em função do número de dias após a emergência das plântulas, em três densidades de semeadura, demonstraram que o maior índice de área foliar ($IAF = 6,7$) foi observado na parcela com 80.000 plantas. ha^{-1} .

Na segunda época de semeadura, observou-se um comportamento semelhante das curvas, com o índice de área foliar máximo sendo atingido com 821 graus-dia acumulados. O híbrido com soma calórica baixa apresentou o menor IAF em todo o ciclo, produziu menos matéria seca que os outros dois híbridos, tendo como consequência o pior desempenho no rendimento de grãos.

4.10.2. Índice de área foliar observado e estimado

O desenvolvimento sazonal do índice de área foliar (IAF) observado e estimado foi similar para os três híbridos, na primeira época de

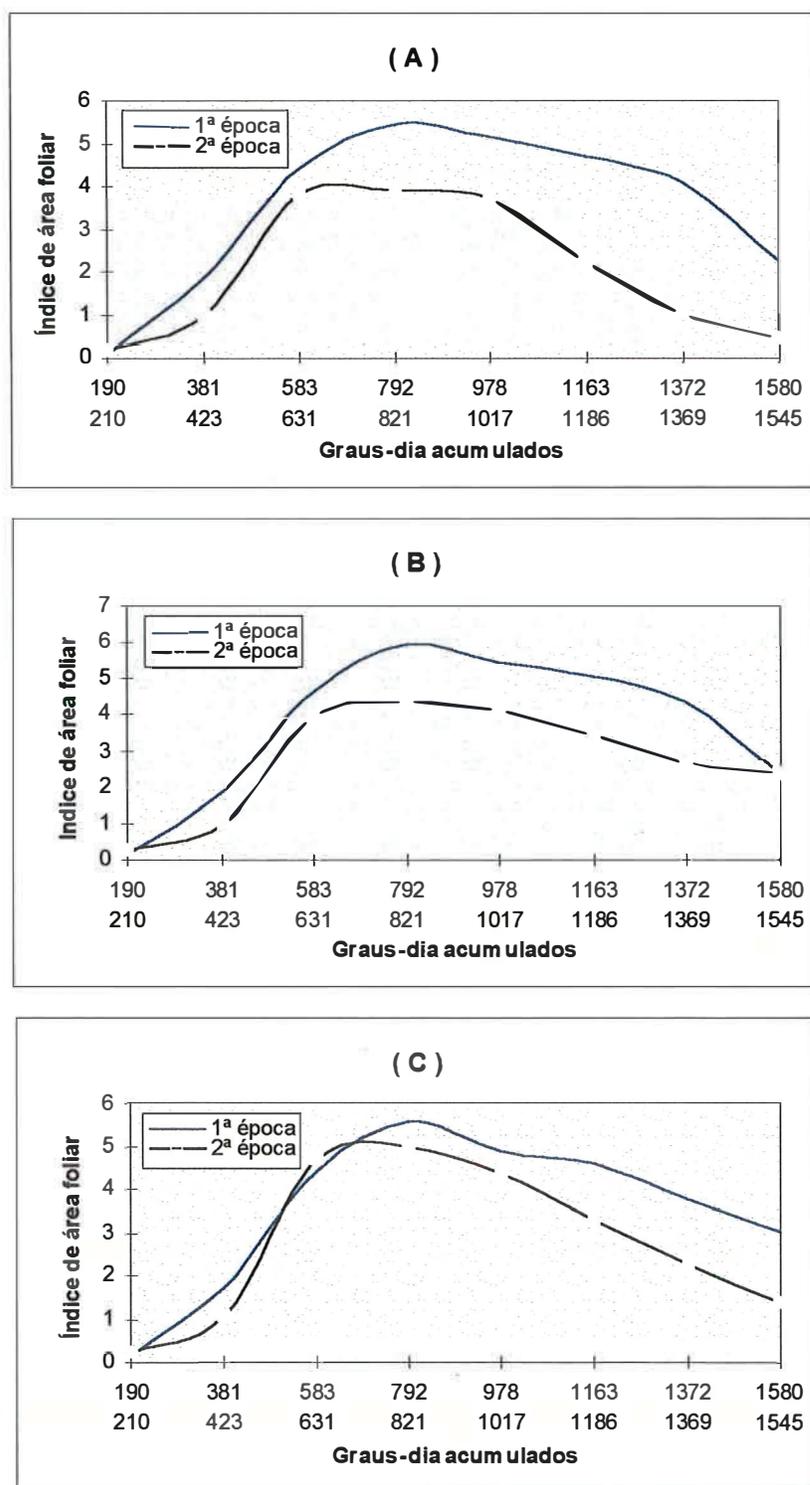


Figura 10 - Índice de área foliar do milho híbrido, com exigências calóricas baixa (A), média (B) e alta (C) em função dos graus-dia acumulados, em duas épocas de semeadura.

semeadura. Na segunda época de semeadura, o híbrido com exigência calórica baixa apresentou baixos valores de **IAF** observados. Não se constatou diferenças entre os valores de **IAF** estimados. O CERES-Maize subestimou os valores de **IAF** dos três híbridos na primeira época de semeadura. Ao contrário, na segunda época de semeadura, os valores de **IAF** foram superestimados pelo modelo. Contudo, os valores do RMSE (raiz do erro médio quadrado) se situaram na faixa de 0,74, 0,69 e 0,63 para os três híbridos estudados, na primeira época de semeadura. Na segunda época os erros foram mais altos: 1,08, 0,74 e 0,73 para os híbridos com somas calóricas baixa, média e alta, respectivamente.

Uma relação significativa ($P = 0,05$) foi encontrada entre os valores observados e estimados em todo o ciclo (Figura 11-A a F). As relações apresentaram inclinações variando de 0,84 a 1,00; interceptos variando de 0,0 a 1,09 e r^2 variando de 0,83 a 0,96.

Para os híbridos com exigências calóricas baixa e média, na primeira época de semeadura, uma parte do segmento da reta 1:1 está fora dos limites de confiança (Figura 11-A e C), indicando que os valores de **IAF** observados tendem a ser maiores que os valores de **IAF** estimados. Isto indica uma melhor estimativa do modelo para a maior parte do período vegetativo, porém, subestimando o **IAF** durante a senescência das folhas. Resultados semelhantes foram encontrados por RETTA et al. (1991). Para o híbrido com exigência calórica alta, observou-se uma concordância perfeita entre os valores observados e estimados. A reta 1:1 caiu dentro dos limites de confiança de 95 % para a equação de regressão (Figura 11-E). O mesmo comportamento foi observado para os híbridos com exigências calóricas média e alta, na segunda época de semeadura (Figura 11-D e F). Para o híbrido com exigência calórica baixa, todo o segmento da reta 1:1 caiu fora dos limites de confiança de 95 % para a equação de regressão. Os efeitos foram constatados no rendimento final de grãos.

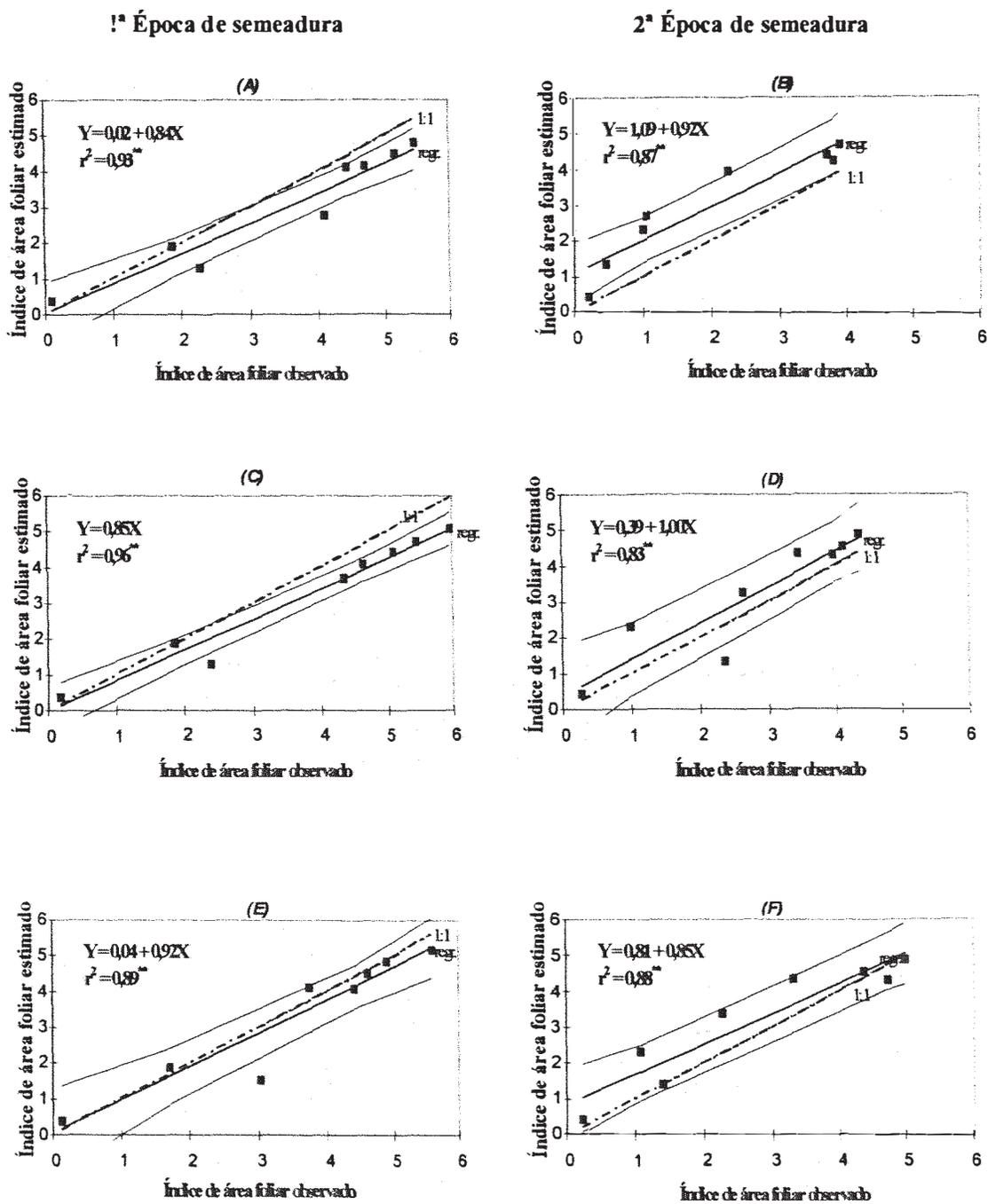


Figura 11 - Índices de área foliar do milho híbrido, com exigências calóricas baixa (A e B) média (C e D) e alta (E e F), observados e estimados pelo modelo CERES-Maize, em duas épocas de semeadura. A inclinação das linhas não difere significativamente de zero (*) a $P = 0,05$.

4.11. Matéria seca total observada e estimada pelo modelo

Os dados observados de matéria seca total (MST) da parte aérea do milho, com exigências calóricas baixa, média e alta, foram comparados com os dados estimados pelo CERES-Maize, em duas épocas de semeadura.

Uma relação significativa ($P = 0,05$) foi encontrada entre os valores de MST observados e estimados, para os três híbridos, em todo o ciclo, (Figuras 12-A a F). As relações apresentaram inclinações variando de 0,56 a 0,94, interceptos variando de 4,4 a 188,5 e coeficientes de determinação variando de 0,87 a 0,97. As inclinações obtidas neste estudo são bem superiores àquelas encontradas por VOS et al. (1987) e por RETTA et al. (1991). Apesar dos valores de r^2 relativamente altos, as inclinações e os interceptos ou ambos significativamente diferentes de 1 e 0, respectivamente, indicaram um ajuste relativamente pobre.

Os valores de MST estimados foram exatos durante o período de crescimento vegetativo, para os três os híbridos, nas duas épocas de semeadura. Isto pode ser comprovado através da parte do segmento da reta 1:1 que está dentro dos limites de confiança. Durante o período de enchimento de grãos, o ajuste não foi bom, pois a maior parte do segmento da reta 1:1 está fora dos limites de confiança. Isto pode ser o resultado das estimativas relativamente pobres das datas de florescimento pelo CERES-Maize. Esta performance não é surpresa, considerando que os dados coletados, principalmente, em condições temperadas foram usados no desenvolvimento e validação iniciais do modelo (JONES & KINIRY, 1986). Resultados semelhantes foram relatados por CARBERRY et al. (1989), todavia, ao introduzirem várias mudanças no modelo original, conseguiram reduzir o RMSE(raiz do erro médio quadrado), que é a

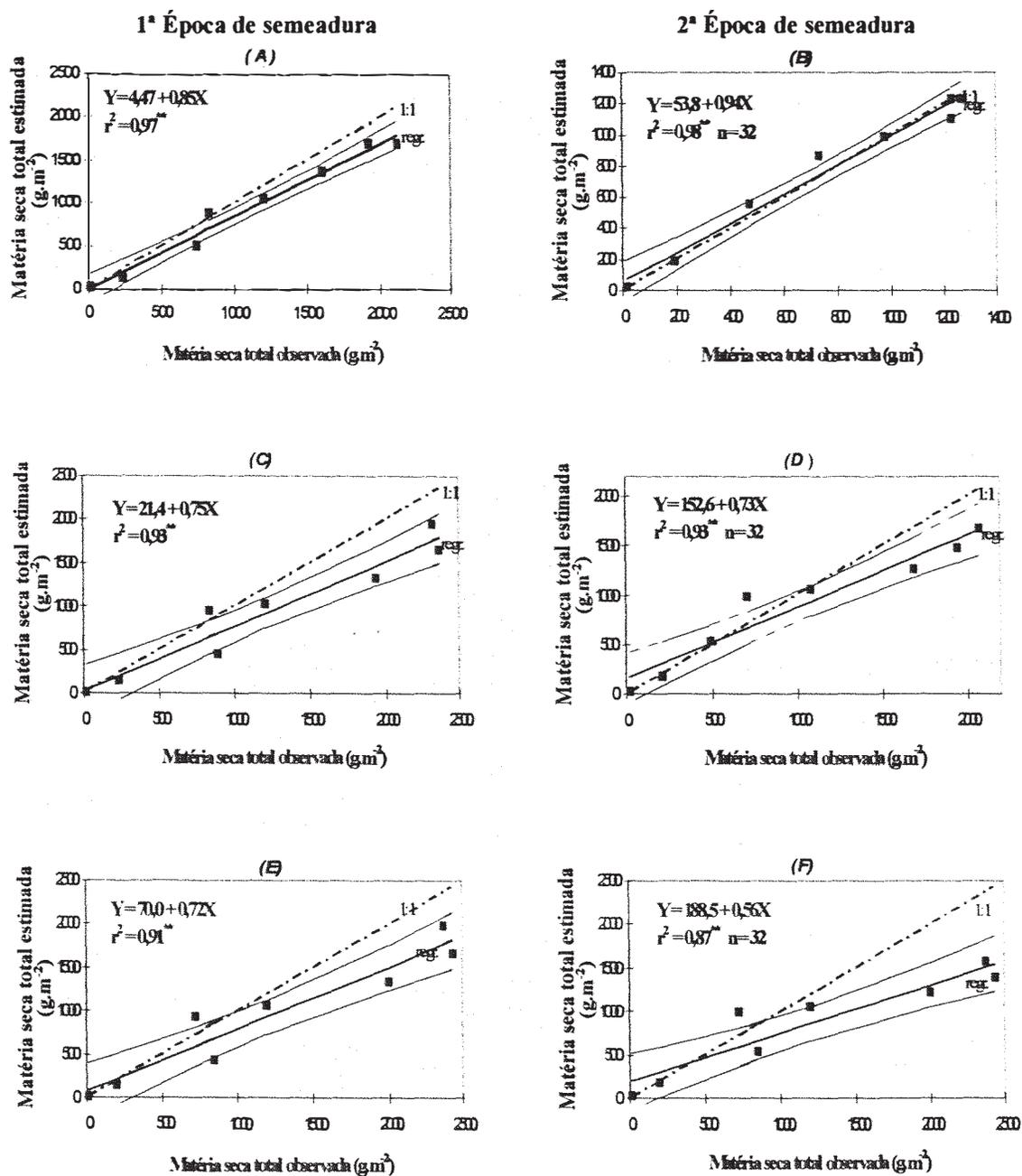


Figura 12 - Matéria seca total do milho híbrido, com exigências calóricas baixa (A e B) média (C e D) e alta (E e F), observada e estimada pelo modelo CERES-Maize, em duas épocas de semeadura. A inclinação das linhas é significativamente diferente de zero (*) a $P = 0,05$, exceto para o caso (B).

diferença média entre os valores observados e estimados, de 5 084 para 2 160 kg.ha⁻¹ no rendimento de grãos de milho. O CERES-Maize forneceu estimativas boas de área foliar e razoáveis de matéria seca total da parte aérea. No entanto revisões do modelo poderão torná-lo mais aplicável aos trópicos, como também poderão identificar os parâmetros que podem requerer calibração para outros cultivares de milho e locais nesta zona climática.

4.12. Considerações finais

Nas condições climáticas de Piracicaba, SP, no período de agosto a fevereiro, a radiação solar global e as temperaturas médias do ar elevadas, proporcionaram melhor rendimento biológico, avaliado pela produção de matéria seca total e pelo rendimento de grãos dos três híbridos de milho, com melhor desempenho de planta para o híbrido com soma calórica baixa;

Entre os três híbridos, com exigências calóricas baixa, média e alta, não se constatou diferenças superiores a sete dias na duração do ciclo, dentro de uma mesma época de semeadura; no entanto, verificou-se diferença de onze dias no ciclo dos híbridos entre as semeaduras de agosto/93 e outubro/94;

O requerimento de graus-dia acumulados no período da emergência ao florescimento, dos três híbridos, foi semelhante nas três épocas de semeadura enquanto no período florescimento-ponto de maturidade fisiológica, constatou-se um ligeiro acréscimo dos graus-dia acumulados na terceira época de semeadura, para os mesmos híbridos;

O mais baixo rendimento verificado na segunda época de semeadura resultou do ambiente com temperaturas baixas no período pós-florescimento, associado à alta incidência de radiação solar e excesso de chuvas;

O comportamento das curvas do índice de área foliar (IAF) e das taxas de produção de matéria seca total (Ct) foi semelhante para os três híbridos

dentro de uma mesma época de semeadura. Na 2ª época de semeadura, os valores de **IAF** e de **Ct** foram menores, apresentando diminuição da fitomassa, com reflexos negativos no rendimento de grãos;

Na estimativa do balanço hídrico, verificou-se que o CERES-Maize superestimou os valores de evapotranspiração real da cultura (**ET_r**) do milho durante a primeira época de semeadura, reproduzindo, porém, de forma bastante precisa as flutuações da **ET_r** na segunda época de semeadura;

O modelo CERES-Maize apresentou sensibilidade aos parâmetros genéticos e hídricos, porém nenhum parâmetro foi tão sensível como a capacidade de água disponível para as plantas, indicando assim, que os valores dos demais parâmetros foram assumidos corretamente;

O referido modelo tem potencial para identificar os sistemas de cultivo e de manejo ou fatores agronômicos específicos, como por exemplo, datas de semeadura, ou tratamento com fertilizantes. Este modelo é uma ferramenta valiosa na tomada de decisões, podendo também ser usado para complementar a pesquisa de campo, através da identificação de áreas onde o conhecimento é escasso. Para tal, o mesmo deve ser melhor avaliado para predizer, a longo prazo, as práticas de manejo e de cultivo com relação a conservação do solo e de água e eficiência da prática de fertilização.

As simulações realizadas em 1993 e em 1994 mostraram que o CERES-Maize estimou corretamente, para a região de Piracicaba, SP, e para os referidos anos, o crescimento e o desenvolvimento de uma cultura de milho. Os dados locais atualmente disponíveis não permitem que se calibre mais exatamente o modelo para estas condições, pois as informações são geralmente incompletas (anotações de fitomassa a intervalos de tempo muito longos), ou mesmo ausentes (dados do final do período juvenil, fitomassa das raízes). Para o funcionamento correto do modelo, nas condições tropicais, necessita-se determinar os parâmetros genéticos **P1**, **P5**, **G2** e **G3**, ou mesmo modificar algumas equações que estimam a

variação temporal do índice de área foliar e da quantidade de matéria seca das diversas partes da planta, na fase de senescência, sem que estes ajustes interfiram na estrutura do modelo.

O modelo ainda não é executável em condições especiais de cultivo do milho, encontradas no Brasil, necessitando de ações de calibração local. O trabalho realizado sobre uma única região não permite conclusões bem fundamentadas das principais hipóteses do CERES-Maize. A generalização dos resultados obtidos para a escala de uma região necessita de uma avaliação do modelo em diversas localidades que integrem situações mais variadas e mais numerosas. O trabalho realizado na região de Piracicaba, SP, mostrou as principais restrições do método: trata-se por um lado da dificuldade de obtenção de número suficiente de dados confiáveis completos e, repetidos no tempo, bem como ausência de critérios para a escolha correta dos parâmetros de calibração e validação do modelo.

5. CONCLUSÃO

As simulações realizadas no presente estudo evidenciam que na região tropical, o crescimento, o desenvolvimento da planta e o rendimento de grãos da cultura do milho são estimados satisfatoriamente pelo modelo CERES-Maize.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOCK, B. & ACOCK, M. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. **Agronomy Journal**, Madison, **83**: 56-61, 1991.

ALISSON, J.C.S. & DAYNARD, T.B. Effect of change in time of flowering, induced by altering photoperiod or temperature on attributes related to yield in maize. **Crop Science**, Madison, **19** (1): 1-4, 1979.

BAIER, W. Crop-weather analysis model: review and model development. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, **12**: 937-47, 1973.

BOWEN, W.T.; JONES, J.W.; CARSKY, R.J.; QUINTANA, J.O. Evaluation of the nitrogen submodel of CERES-Maize following legume green manure incorporation. **Agronomy Journal**, Madison, **85** (1): 153-9, 1993.

BREUR, C. M.; HUNTER, R. B.; KANNENBERG, L. W. Effect of 10 and 20 hour photoperiod treatments at 20 and 30°C on rate of development of single cross maize. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, **56** (4): 795-8, 1976.

BRUNINI, O. Ecologia do milho e da soja. In: SIMPÓSIO SOBRE SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA - REGIÃO CENTRO SUL DO BRASIL.

- Campinas, 1984, **Trabalhos apresentados**. Campinas, Fundação Cargill, 1984. p. 25-7.
- BRUNINI, O.; MIRANDA, N.A.C.; MASCARENHAS, H.A.C.; PEREIRA, J. C.V.N.; SCHIMIDT, N.C. Teste de um modelo agroclimático que relacione o regime pluviométrico com as variações da produtividade agrícola. **Coleção Análise e Pesquisa**, Brasília, **24**: 21-46, 1982.
- BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**. Washington, USDA/Bureaux of Soils, 1907. (USDA. Bulletin, 38).
- CABELGUENNE, M.; JONES, C.A.; MARTY, J.; DYKE, P.T. & WILLIAMS, J.R. Calibration and validation of EPIC for crop rotations in Southern France. **Agricultural Systems**, Essex, **33** (2): 153-71, 1990.
- CAMARGO, M.B.P. Exigências bioclimáticas e estimativa da produtividade para quatro cultivares de soja no Estado de São Paulo. Piracicaba, 1984. 96p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- CARBERRY, P.S. Test of leaf-area development in CERES-Maize: a correction. **Field Crops Research**, Amsterdam, **27** (1/2): 159-67, 1991.
- CARBERRY, P.S.; MUCHOW, R.C.; McCOWN, R.L. Testing the CERES-Maize simulation model in a semi-arid tropical environment. **Field Crops Research**, Amsterdam, **20** (4): 297-315, 1989.
- CARDOSO, M.J. & MUNDSTOCK, C.M. Comparação de treze métodos decálculo de unidades térmicas de desenvolvimento de milho (*Zea mays* L.). **Ciência e Cultura**, São Paulo, **31** (11): 1278-83, 1979.

- CLEMENCE, B.St. E. & MALLETT, J.B. Typifying late-season weather for maize yield prediction. **South African Journal of Plant and Soil**, Pretoria, **5** (1): 46-7, 1988.
- COELHO, D.T. & DALE, R.F. An energy-crop growth variable and temperature function for predicting corn growth and development: planting to silking, **Agronomy Journal**, Madison, **72**: 503-10, 1980.
- COLIGADO, M.C. & BROW, D.M. Response of corn in the pre-tassel initiation period to temperature and photoperiod. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, **14** (3/4): 357-67, 1975.
- COMERMA, J.; GUENNI, L. & MEDINA, G. Validacion del balance hidrico del modelo CERES-Maize en la zona de Maracay, Estado Aragua-Venezuela. **Agronomia Tropical**, Maracay, **35** (4-6): 115-32, 1985.
- COSTA, A.F.S. Influência das condições climáticas no crescimento e desenvolvimento de plantas de milho (*Zea mays* L.), avaliadas em diferentes épocas de plantio. Viçosa, 1994. 109 p. (Doutorado - Universidade Federal de Viçosa/UFV).
- COSTA, M.M.G. Aplicação de dois modelos de previsão de safra agrícola para a cultura de milho na microrregião de Ribeirão Preto, SP. São Paulo, 1992, 198p. (Mestrado - Instituto Astronômico e Geofísico/USP).
- CROSS, H.Z. & ZUBER, M.S. Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. **Agronomy Journal**, Madison, **64** (3): 351-5, 1972.

- CURRY, R.B. & CHEN, H. Dynamic simulations of plant growth. II. Incorporation of actual daily weather data and partitioning of net photosynthate. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, **14**: 1170-5, 1971.
- DARCY, H. Les fontaines publique de la Ville de Dijon. Paris, Victor Dalmont, 1956.
- De GAETANO, A.T. & KNAPP, W.W. Standardization of weekly growing degree day accumulations based on differences in temperature observation time and method. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, **66** (1/2): 1-19, 1993.
- DOURADO NETO, D. & LOPES, J.C.M. Determinação da profundidade efetiva do sistema radicular e da evapotranspiração média na cultura do milho (*Zea mays* L.): um exemplo prático. **ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, **30**: 21-3, set. 1987.
- DUCHON, C.E. Corn yield prediction using climatology. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Boston, **25** (5): 581-5, 1986.
- DURÃES, F.D.M. Fatores ecofisiológicos afetando o comportamento de milho em semeadura tardia (safrinha) no Brasil Central. Piracicaba, 1993. 91p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Recomendações técnicas para o cultivo do milho**. Brasília: EMBRAPA/SPI, 1993. 204p.
- ESECHI, H. A. Effect of planting density on growth and yield of irrigated maize (*Zea mays* L.) in the Batinah Coast region of Oman. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, **119** (2): 165-69, 1992.

- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. National engineering handbook; hydrology, Washington, 1972.
- FANCELLI, A.L. **Plantas alimentícias: guia para aula, estudos e discussão.** 131p. Piracicaba, ESALQ, 1986.
- FRITSCHEN, L.J. Net an solar radiation relations over irrigated field crops. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, 4: 55-62, 1967.
- GILMORE, E. C. & ROGERS, J. S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, Madison, 50: 611-5, 1958.
- GOMES, J. & CARNEIRO, G.E.S. Avaliação estadual de cultivares de milho safra 1991/1992. **Informe de Pesquisa IAPAR**, Londrina, 17 (104): 3-91, 1993.
- GRANT, R.F. Dynamic simulation of water deficit effects upon maize yield. **Agricultural Systems**, Essex, 33 (1): 13-39, 1990.
- HANWAY, J. J. Corn growth and composition in relation to soil fertility. I. growth of different plant parts and relation between leaf weight and grain yield. **Agronomy Journal**, Madison, 54 (1): 145-8, 1962.
- HANWAY, J.J. Growth stages of corn (*Zea mays*, L). **Agronomy Journal**, Madison, 55 (5): 487-92, 1963.
- HANWAY, J.J. & RUSSEL, M. Dry matter accumulation in corn (*Zea mays* L.) plants: comparisons among single-cross hybrids. **Agronomy Journal**, Madison, 61 (1): 947-51, 1969.

- HELLMAN, J.L. & KANEMASU, E.T. An evaluation of a resistance form of energy balance to estimate evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, **68** (2): 607-11, 1976.
- HERRERA, G.G. Modelo agroclimático para a estimativa da produtividade do milho (*Zea mays* L.) na região Lagunera - México, Viçosa, 1991. 55p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa).
- HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOV, Y. Procedure and test of an internal method for measuring soil hydraulic conductivity in situ. **Soil Science**, Baltimore, **114**: 395-400, 1972...
- HODGES, T. & EVANS, D.W. Leaf emergence and leaf duration related to thermal time calculations in CERES-Maize. **Agronomy Journal**, Madison, **84** (4): 724-30, 1992.
- HODGES, T.; BOTNER, D.; SAKAMOTO, C.; HAUG, J.H. Using the CERES-Maize model to estimate production for the U.S. Cornbelt. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, **40** (4): 293-303, 1987.
- HUME, C.J. & CALLANDER, B.A. Agrometeorology and model building. **Outlook on Agriculture**, Washington, **19** (1): 25-31, 1990.
- HUNT, R. Concepts in plant growth analysis. In: _____. **Plant growth curves; the functional approach to plant growth analysis**. London, Edward Arnold, 1982. cap. 2, p. 14-46.
- IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J.; KIMBALL, B.A.; NAKAYAMA, F.S. The dependence of bare soil albedo on soil water

content. **Journal of Applied Meteorology**, Santa Mônica, **14** (1): 109-13, 1975.

JAGTAP, S.S.; MORNU, M.; KANG, B.T. Simulation of growth development and yield of maize in the transition zone of Nigeria. **Agricultural Systems**, Edinburgh, **41** (3): 215-29, 1993.

JONES, C.A. & KINIRY, J.R. **CERES-Maize**: a simulation model of maize growth and development. College Station, Texas A & M. University Press, 1986. 194p.

JONES, P.N. & CARBERRY, P.S. A technique to develop and validate simulation models. **Agricultura Systems**, Essex, **46**: 427-42, 1994.

JONG van LIER, Q. de.; SPAROVEK, G.; VASQUES FILHO, J. Análise de imagens utilizando um "SCANNER" manual: aplicações em Agronomia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, **17**: 479-82, 1993.

KAC, M. Some mathematical models in science. **Science**, Washington, **166**: 695-9, 1969.

KEULER, H van. & WOLF, J. Modelling of agricultural production: weather, soil and crops. Pudoc, Wageningen, 1986. 463p.

KINIRY, J.R. & RITCHIE, J.T. Rates of leaf primordia and tip appearance of different maize genotypes in the field. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY, 73., Atlanta, 1981. **Agronomy Abstracts**, Madison, p. 12, 1981.

- KINIRY, J.R.; RITCHIE, J.T.; MUSSER, R.L. Dynamic nature of the photoperiod response in maize. **Agronomy Journal**, Madison, **75**: 700-3, 1983.
- LANDSBERG, J.J. The use of models interpreting plant response to weather. In: SYMPOSIUM OF THE BRITISH ECOLOGICAL SOCIETY, 21., edinburgh, 1979. **Plants and their atmospheric environment**. Oxford, Blackwell Scientific, 1981. cap. 21, p. 369-89.
- LEAL, B.G. Caracterização da radiação, análise de crescimento e do desenvolvimento de milho (*Zea mays* L.) em três densidades de plantio. Viçosa, 1993. 55p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa).
- LEMON, E.R. Energy and water balance of plant communities. In: EVANS, L. T. ed. **Environmenttal control of plant growth**. New York, Academic Press, 1963. p. 55-7.
- LIBARDI, P.I.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, **44**.(1): 3-7, 1980..
- LINACRE, E.T. Net and solar radiation relations over irrigated field crops. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, **4**: 55-62, 1967.
- LIU, W.T.H. Drought early system for crop production in the State of Minas Gerais: a proposal. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE ESTIMATIVA DA BIOMASSA TERRESTRE E DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA VIA SATÉLITE,. São Paulo, 1990. **Anais**. São Paulo, ESUSP, 1990.

- LIU, W.T.H.; BOTNER, D.M.; SAKAMOTO, C.M. Application of CERES-Maize model to yield prediction of a Brazilian maize hybrid. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, **45** (3/4): 299-312, 1989.
- LOPES, N.F. & MAESTRI, M. Análise de crescimento e conversão da energia solar em populações de milho (*Zea mays* L.) em Viçosa, Minas Gerais. **CERES**, Viçosa, **20**: 189-201, 1973.
- MACHADO, E.C. Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp). Campinas, 1981. 115p. (Mestrado - Universidade de Campinas).
- MAGALHÃES, A.C.N. Análise quantitativa do crescimento. In: FERRI, M.G. **Fisiologia vegetal**. São Paulo, EDUSP, 1979. v. 1, p. 331-50.
- MARTIN, E.C.; RITCHIE, J.T.; LONDON, T.L. Use of the CERES-Maize model to evaluate irrigation strategies for humid regions. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, Chicago, 1985. **Proceedings**. St. Joseph, ASAE, 1985. p. 342-51.
- MEDERESKI, H.J.; MILLER, N.E.; WEAVER, C.R. Accumulated heat units for classifying corn hybrids maturity. **Agronomy Journal**, Madison, **65** (5): 743-7, 1973.
- Mc GARRAHAN, J.P. & DALE, R.F. A trend toward a longer grain-filling period for corn: a case study in Indiana, **Agronomy Journal**, Madison, **76**: 518-22, 1984.
- MONDRAGON, V.E.C. Estimativa da produtividade do milho em Minas Gerais, baseada em variáveis agroclimáticas e em tendência tecnológica. Viçosa, 1990. 68p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa).

- MOTA, F.S. Temperatura do ar e plantas cultivadas. In:_____.
Meteorologia Agrícola. São Paulo, Nobel, 1975. cap. 8, p. 160-3.
- MUCHOW, R.C. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment. I. Yield potential. **Field Crop Research**, Amsterdam, **20** (3): 191-205, 1989.
- MUTSAERS, H.J.W. A dynamic equation for plant interaction and application to yield-density-time relations. **Annals of Botany**, London, **64** (5): 521-31, 1989.
- NARWAL, S.S.; DAHIYA, D.S.; SINGH, G.; MALIK, D.S. Response of maize cultivars to sowing in winter. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, **109**: 303-7, 1987.
- NELSON, L.W. The mineral nutrition of corn as related to its growth and culture. **Advances in Agronomy**, San Diego, **8**: 321-75, 1956.
- PALMER, J.W. Keeping track of crop moisture conditions nationwide: The new crop moisture index. **Weatherwise**, London, **21**: 156-61, 1968.
- PENMAN, H.L. Evaporation: an introduction survey. **Netherlands Journal Agricultural Science**, Wageningen, **4**: 9-29, 1956.
- PEREIRA, A.R. Simulação do crescimento e da produtividade. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, Campinas, 1987. **Anais**. Campinas, Fundação Cargill, 1987. v. 17, p. 201-9.

- PIPER, E.L. & WEISS, A. Evaluation CERES-Maize for reduction in plant population or leaf area during the growing season. **Agricultural Systems**, Essex, **33** (3): 199-213, 1990.
- PLANTUREUX, S.; GIRARDIN, P.; FOUQUET, D.; CHAPOT, J.Y. Evaluation et analyse de sensibilité du modèle CERES-Maize en conditions alsaciens. **Agronomie**, Paris, **11** (11): 1-8, 1991.
- PLETT, S. Comparison of seasonal thermal indices for measurement of corn maturity in a prairie environment. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, **72**: 1157-62, 1992.
- RADFORD, P.J. Growth analyses formulae. Their use and abuse. **Crop Science**, Madison, **7**: 171-5, 1967.
- REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo, Manole,. 1987. 188 p.
- RETTA, A.; VANDERLIP, R.L.; HIGGINS, R.A.; MOSHIER, L.J.; FEYERHERM, A.M. Suitability of corn growth models for incorporation of weed an insect stress. **Agronomy Journal**, Madison, **83** (4):757-65, 1991.
- REYNOLDS, J.F. Some misconceptions of mathematical modeling. **What's New in Plant Physiology**, London, **10** (11): 41-4, 1979.
- REYNOLDS, J.F. & ACOCK, B. Predicting the response of plants to increasing carbon dioxide: a critique of plant growth models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, **29**: 107-29, 1985.

- RICHARDS, F.J. The quantitative analysis of growth. In: STEWARD, F.C. **Plant physiology; a treatise**. London, Academic Press, 1969. p. 1-76.
- RITCHIE, J.T. Dryland evaporative flux in a subhumid climate: I. Micrometeorological influences. **Agronomy Journal**, Madison, **63**: 51-5, 1971.
- RITCHIE, J.T. Evapotranspiration empiricisms for minimizing risk in rainfed agriculture. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCE IN EVAPOTRANSPIRATION, Chicago, 1985. **Proceedings**. St. Joseph, ASAE, 1985. p.139-46.
- RITCHIE, J.T.; SINGH, U.; GODWIN, D.C.; HUNT, L. **A user's guide to CERES-Maize - V2.10**. Muscle Shoals, International Fertilizer Development Center, 1989.
- ROBERTSON, G.W., ed. Guidelines on crop-weather models. Washington, World Meteorological Organization, 1983. 113p. (World Climate Application Programme, WCP-50).
- SILVA, W.J.; MONTOJOS, J.C.; PEREIRA, A.R. Análise de crescimento em dois híbridos simples de milho avaliada em duas densidades de população. **Ciência e Cultura**, São Paulo, **26** (4): 360-5, 1974.
- SINGH, G.; NARWAL, S.S.; RAO, V.U.M.; DAHIYA, D.S. Effect of sowing date on requirement of growing degree days, heliothermal units and photothermal units, and phenology of winter maize (*Zea mays*). **Indian Journal of Agricultural Science**, New Delhi, **60** (11) 723-31, 1990.

- SPLINTER, W.E. Modelling of plant growth for yield prediction. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, **14**: 243-5, 1974.
- TANNER, C.B. & JURY, W.A. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. **Agronomy Journal**, Madison, **68** (1): 239- 43, 1976.
- THOMPSON, L.M. Weather and technology in the production of corn in the corn belt. **Agronomy Journal**, Madison, **61**: 453- 6, 1969.
- THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology**: a quantitative approach to problems in plant crop physiology. London, Academic Press, 1976. 318p.
- TOLLENAR, M.; DAYNARD, T.B.; HUNTER, R.B. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering data in maize. **Crop Science**, Madison, **19** (3): 363-6, 1979.
- VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of insaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, **41**: 892-8, 1980.
- VIDAL-TORRADO, P. & SPAROVEK, G. **Mapa pedológico detalhado do campus Luiz de Queiroz, da Universidade de São Paulo**. Piracicaba, ESALQ, 1993 (Escala 1:10.000). (Não publicado).
- VIEGAS, G.P. & PEETEN, H. Sistemas de produção. In: PATERNIANI, E. & VIEGAS, G.P. ed. **Melhoramento e produção do milho**. Campinas, Fundação Cargill, 1987. p. 453-538.

- VILLA NOVA, N.A. **Dados meteorológicos do município de Piracicaba.** Piracicaba, ESALQ/Departamento de Física e Meteorologia, 1989.
- VILLA NOVA, N.A.; PEDRO Jr, M.; PEREIRA, A.R.; OMETTO, J.C. Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima. **Caderno de Ciências da Terra**, São Paulo, (30): 1972.
- VILLAGRA, M.M.; BACCHI, O.O.S.; TUON, R.L.; REICHARDT, K. Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, 72 (3/4): 317-25, 1995.
- VOS, R.N. & MALLETT, J.B. Preliminary evaluation of two maize (*Zea mays*, L) growth-simulation models. **South African Journal of Plant Soil**. Pretoria, 3: 131-6, 1987.
- VRIES, F.W.T.P. Evaluation of simulation models in agriculture and biology: conclusions of a workshop. **Agricultural Systems**, Essex, 2: 99-107, 1987.
- WANG, J.Y. **Agricultural meteorology**, 3. ed. San Jose, Milieu Information Services, 1972.
- WARRINGTON, E.F. & KANEMASU, E.T. Corn growth response to temperature and photoperiod. III. Leaf numbers. **Agronomy Journal**. Madison, 75: 762-6, 1983.
- WHISLER, F.D.; ACOCK, B.; BAKER, D.N.; FYE, R.E.; HODGES, H.F.; LAMBERT, J.R.; LEMMON, H.E.; MCKINION, J.M.; REDDY, V.R. Crop simulation models in agronomic systems. **Advances in Agronomy**, New York, 40: 141-208, 1986.

- WILLIAMS, W.A.; LOOMIS, R.S.; LEPLEY, C.R. Vegetative growth of corn as affected by population density. II. components of growth, net assimilation rate and leaf area index. **Crop Science**, Madison, **5**: 215-9, 1965.
- WISIOL, K. & HESKETH, J.D., ed. **Plant growth modelling for resource management**. Boca Raton, CRC Press, 1987. 2v. (Current Models and Methods, 1).
- WIT, C.T. Simulation of living systems. In: PENNING DE VRIES, F.W.T. & VAN LAAR, H.H., ed. **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen, Pudoc, 1982. p. 3-8.
- WIT, C.T. & GROUDRIAN, J. **Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops.**, Pudoc, Wageningen, 1978, 141p. (Simulation monographs).
- WU, YIHUA. On the application of the CERES-Maize model to the North China Plain. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, **49** (1): 9-12, 1989.

APÊNDICES

Apêndice 1. Equações ajustadas e coeficientes de determinação (r^2) da matéria seca total (Wt) dos híbridos de milho, com diferentes exigências calóricas, em duas épocas de semeadura. Piracicaba, SP, 1994.

Exig. calórica	Épocas	Símbolo	Equações	r^2	F
Baixa	1ª	Wt	$Y = 2120,1/(1 + 133,36 \exp - 0,07 t)$	0,89	43,19**
Baixa	2ª	Wt	$Y = 1264,41/(1 + 77,07 \exp - 7,96E^{-02} t)$	0,91	54,46**
Média	1ª	Wt	$Y = 2363,73/(1 + 143,29 \exp - 0,07 t)$	0,93	72,21**
Média	2ª	Wt	$Y = 2069,12/(1 + 137,7 \exp - 7,716 E^{-02} t)$	0,96	132,42**
Alta	1ª	Wt	$Y = 2429,9/(1 + 200,54 \exp - 8,12 E^{-02} t)$	0,93	64,24**
Alta	2ª	Wt	$Y = 1932,35/(1 + 128,14 \exp (- 0,07 t)$	0,93	68,29**

Apêndice 2. Resumo das análises estatísticas dos componentes de produção do milho, avaliados em três épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

1. Valores médios de comprimento de espiga (cm), para híbridos de milho, em três épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

HÍBRIDOS	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3	MÉDIA
XL-520	18,4	14,0	17,1	16,5 <i>B</i>
XL-380	19,9	16,5	18,1	18,1 <i>A</i>
XL-678	19,2	15,6	17,4	17,4 <i>AB</i>
MÉDIA	19,2 <i>a</i>	15,4 <i>c</i>	17,5 <i>b</i>	

2. Valores médios de diâmetro de espiga (cm), para híbridos de milho, em três épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

HÍBRIDOS	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3	MÉDIA
XL-520	5,22 <i>Aa</i>	4,15 <i>Ab</i>	4,94 <i>Aa</i>	4,77 <i>A</i>
XL-380	4,57 <i>Ba</i>	4,22 <i>Ab</i>	4,49 <i>Bab</i>	4,42 <i>B</i>
XL-678	4,97 <i>Aa</i>	4,42 <i>Ab</i>	4,98 <i>Aa</i>	4,79 <i>A</i>
MÉDIA	4,93 <i>a</i>	4,27 <i>b</i>	4,80 <i>a</i>	

3. Valores médios do número de fileiras por espiga, para híbridos de milho, em três épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

HÍBRIDOS	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3	MÉDIA
XL-520	16,3	15,2	16,7	16,0 <i>A</i>
XL-380	14,0	13,8	13,6	13,8 <i>B</i>
XL-678	13,8	14,4	14,3	14,1 <i>B</i>
MÉDIA	14,7 <i>a</i>	14,5 <i>a</i>	14,8 <i>a</i>	

4. Valores médios da quantidade total de grãos por espiga, para híbridos de milho, em três épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.-

	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3	MÉDIA
HÍBRIDOS				
XL-520	585,5	468,1	523,3	525,6 <i>A</i>
XL-380	567,8	509,6	444,8	507,4 <i>B</i>
XL-678	540,7	515,7	435,3	497,2 <i>AB</i>
MÉDIA	564,7 <i>a</i>	497,8 <i>b</i>	467,8 <i>ab</i>	

5. Valores médios da quantidade de grãos por fileira por espiga , para híbridos de milho, em três épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3	MÉDIA
HÍBRIDOS				
XL-520	35,7	31,0	31,6	32,7 <i>A</i>
XL-380	41,6	37,9	32,6	37,3 <i>A</i>
XL-678	39,5	36,3	30,2	35,3 <i>A</i>
MÉDIA	38,9 <i>a</i>	35,0 <i>b</i>	31,4 <i>ab</i>	

6. Valores médios do diâmetro do sabugo (cm), para híbridos de milho, em três épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3	MÉDIA
HÍBRIDOS				
XL-520	2,9 <i>Ba</i>	2,6 <i>ABa</i>	2,9 <i>Aa</i>	2,8 <i>A</i>
XL-380	2,5 <i>Ca</i>	2,4 <i>Ba</i>	2,4 <i>Ba</i>	2,4 <i>B</i>
XL-678	3,7 <i>Aa</i>	2,7 <i>Ab</i>	2,7 <i>ABb</i>	3,0 <i>A</i>
MÉDIA	3,0 <i>a</i>	2,6 <i>b</i>	2,6 <i>b</i>	

7. Valores médios do peso de grãos a 13% de umidade (kg ha^{-1}), para híbridos de milho, em três épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

HÍBRIDOS	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3	MÉDIA
XL-520	10 836,13 Aa	4 352,80 Bb	11 617,00 Aa	8 935,31 A
XL-380	10 455,54 Aa	6 589,96 Ab	10 169,00 Aa	9 071,50 A
XL-678	10 272,58 Aa	6 082,64 Ab	10 206,00 ABa	8 853,74 A
MÉDIA	10 521,41 a	5 675,13 b	10 664,00 a	

8. Valores médios do peso de 1000 grãos a 13% de umidade (g) , para híbridos de milho, em três épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

HÍBRIDOS	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3	MÉDIA
XL-520	330,25 Aa	159,67 Bb	325,55 Aa	271,82 A
XL-380	303,36 Aa	215,47 Ab	329,95 Aa	282,92 A
XL-678	322,44 Aa	215,87 Ab	348,64 Aa	295,65 A
MÉDIA	318,68 a	197,00 b	334,71 a	

9. Valores médios do peso da matéria seca total (kg ha^{-1}), para híbridos de milho, em três épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

HÍBRIDOS	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3	MÉDIA
XL-520	21 205,80 Aa	12 279,40 Bb	25 308,70 Aa	19 597, 90 B
XL-380	23 142,10 Ab	20 691,10 Ab	27 485,20 Aa	23 772, 80 A
XL-678	23 671,50 Aab	19 323,50 Ab	26 387,10 Aa	23 127, 30 A
MÉDIA	22 673,10 b	17 431,30 c	26 393,60 a	

10. Valores médios da área foliar máxima (cm²), para híbridos de milho, em três épocas de semeadura. Piracicaba, SP. 1994.

HÍBRIDOS	ÉPOCA 1	ÉPOCA 2	ÉPOCA 3	MÉDIA
XL-520	9 291,20	6 657,20	10 214,80	8 721,00 <i>A</i>
XL-380	10 140,20	7 398,10	10 127,20	9 221,80 <i>A</i>
XL-678	9 517,50	8 477,60	10 666,20	9 553,70 <i>A</i>
MÉDIA	9 649,60 a	7 510,90 a	10 336,00 a	

Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

Letra minúscula em negrito = teste de Tukey para médias de épocas

Letra minúscula = teste de Tukey para médias de épocas dentro de híbridos

Letra maiúscula em itálico = teste de Tukey para médias de híbridos

Letra maiúscula = teste de Tukey para médias de híbridos dentro de épocas

APÊNDICE 3. Resumo das análises de variância para as características agronômicas do milho, avaliadas em diferentes épocas de semeadura. Piracicaba, SP, 1994.

QUADRADOS MÉDIOS											
FONTE DE VARIACAO	G.L.	Comp. de espiga	Diâmetro de espiga	Nº de fileira por espiga	Quant. total de grãos por espiga	Quant. de fileira por espiga	Diâmetro do sabugo	Peso de grãos	Peso de 1000 grãos	M. S. total da parte aérea	Índice de área foliar
ÉPOCA	1	85,5**	2,6**	0,3	26 820**	89**	1,2**	140 918 856**	88 837**	42 280**	27444 277**
HÍBRIDO	2	8,4**	0,2*	8,3**	337	86**	1,2**	1 761 127	1 185	17 755**	2 308 323
ÉPOCA X HÍBRIDO	2	0,5	0,3*	1,4	4 386	1,0	0,4	4 072 566*	3 760*	7 067*	1 816 792
RESÍDUO	18	1,1	0,0	0,3	1 290	5,0	0,2	807 766*	655	1 241	1 363 299
C.V. (%)		6,2	4,4	3,9	6,8	6,0	14,5	11,0	9,9	10,4	13,6

* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste F.

** Significativo ao nível de 1 % de probabilidade pelo teste F.

APÊNDICE 4. Resumo das análises de variância para as características agronômicas do milho, avaliadas em diferentes épocas de semeadura. Piracicaba, SP, 1994.

QUADRADOS MÉDIOS

FONTE DE VARIACAO	G.L.	Comp. de espiga	Diâmetro de espiga	Nº de fileira por espiga	Quant. total de grãos por espiga	Quant. de grãos por fileira por espiga	Diâmetro do sabugo	Peso de grãos	Peso de 1000 grãos	M. S. total da parte aérea	Índice de área foliar
ÉPOCA	2	4 311**	148**	0,6	20 799	84*	40,3**	96 798 139	68 051**	69 936*	26 052 496
HÍBRIDO	2	862*	50**	18**	20 415	3,5	87,2**	145 560	1 706	166 278	2 108 588
ÉPOCA X HÍBRIDO	4	70	15**	1,0	3 771	12,8	17,0**	4 206 839	1 921	4 782	1 175 596
RESÍDUO	27	85	3,0	0,8	3 658	17,2	3,2	712 106	687	1 610	928 358
C.V. (%)		5,3	3,8	6,1	13	13,1	6,6	9,4	9,2	10,7	10,5

* Significativo ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste F.

** Significativo ao nível de 1 % de probabilidade pelo teste F.

APÊNDICE 5. Fatores de conversão das unidades básicas e suplementares, utilizadas neste trabalho, para o Sistema Internacional.

Quantidade	Nome específico	Símbolo	Fator de conversão	Símbolo (SI)
a) Básicas				
	milímetro	mm	$\times 10^{-3}$	m
Comprimento	centímetro	cm	$\times 10^{-2}$	m
	centímetro	c.c.a. ⁽¹⁾	$\times 1/98,07$	Pa ⁽²⁾
massa	grama	g	$\times 10^{-3}$	kg
tempo	dia	d	$\times 1/86400$	s
temperatura				
termodinâmica	Celcius	°C	+ 273	K
b) Suplementares				
	hectare	ha	$\times 10^4$	m ²
área	centímetro			
	quadrado	cm ²	$\times 10^{-4}$	m ²
densidade	-	g.cm ⁻³	$\times 10^{-3}$	kg.m ⁻³
energia	caloria	cal	$\times 1/4,186$	J
pressão	quilopascal	kPa	$\times 10^3$	Pa

¹ apresenta dimensão de comprimento, porém por definição de potencial (diferença de energia específica - energia por unidade de peso - a qual possui dimensão de comprimento).

² energia por unidade de volume.

APÊNDICE 6. Definição dos nomes das variáveis usadas no modelo CERES-Maize.

NCFCE = Número acumulado de folhas completamente expandidas

H = Fotoperíodo (h)

ESTÁDIOS = Estádios fenológicos

7 - Pré-semeadura

8 - Semeadura à germinação

9 - Germinação à emergência

1 - Emergência ao final do período juvenil

2 - Final do período juvenil ao início do cabelo

3 - Início do cabelo ao final do crescimento da folha e do florescimento

4 - Florescimento ao início do período efetivo de crescimento do grão

5 - Período efetivo de enchimento do grão

6 - Final do enchimento efetivo do grão ao ponto de maturidade fisiológica

AFTP = Área foliar total da planta ($\text{cm}^2 \cdot \text{planta}^{-1}$)

PC = Peso do caule ($\text{g} \cdot \text{planta}^{-1}$)

SOMAT = Soma térmica para um dado estágio fenológico ($^{\circ}\text{Cd}$)

PCPEG = Peso do caule no início do período efetivo de enchimento do grão

T_m = Temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$)

NTFP = Número total de folhas produzidas por planta

TTH = Temperatura média do ar (Três leituras diárias) ($^{\circ}\text{C}$)

NFME = Número da folha mais velha expandida

NFTE = Número de folhas totalmente expandidas

APÊNDICE 7. Equações utilizadas no modelo CERES-Maize. (As definições das variáveis encontram-se nas Tabelas 2 e 3 e no Apêndice 6).

Funções	Unidade	Condição	Equações
Fenologia			
1. Duração do estágio 2	°Cd	-	4,0 + P2. (H- 12,5)
2. Duração da emergência ao florescimento	°Cd	-	(NTPF - 2) 38,9 + 96,0
Crescimento e senescência da folha			
3. Taxa de iniciação da folha	°Cd folha ⁻¹	Estádios 1, 2 1, 2, 9	21,0 -
4. Taxa de aparecimento da folha	°Cd folha ⁻¹	NFTE = 1-4 5-NFTE	0,66 + 0,068 NFTE 38,9
5. Área foliar	cm ² . folha ⁻¹	NFME = 1-3 4-11 12- (NTPF-4) (NTPF-3)- NTPF	3,5. NFME 3,5.NFME.NFME 595 595/(NFME+5-NTPF)0,5
6. Área das folhas em senescência (acumulada)	cm ² . planta ⁻¹	Estádios = 1,2 3 4 5	SOMAT.AFTP/10000 AFTP/1000 AFTP (0,05+SOMAT/170,0. 0,05) AFTP(0,1+0,8(SOMAT/P5)3)
7. Área foliar específica	cm ² . g ⁻¹	Planta total Folhas novas	267.1,25/AFTP.0,25 223. 1,25/AFTP.0,25
Produção de assimilados			
8. Eficiência de conversão	gM ⁻¹	Estádio = 1-4 5,6	5,0 5,0
9. Fator de estresse de temperatura	-	-	1- 0,0025.((0,25.Tmin + 0,75.Tmáx) - 26). 2
		8,0 > Tm > 50,0	-
		20,0 < Tm < 40,0	-
		8,0 < Tm < 20,0	-
		40,0 < Tm < 50,0	-
10. Peso seco durante os estádios 5, 6	g. planta ⁻¹	Peso do caule > PCPEG	PCPEG
Crescimento do grão			
11. Fator da taxa relativa do enchimento do grão	-	-	(1- 0,0025. (TTH - 26). 2)/8
12. Fator de estresse para temperaturas elevadas no estágio 4	-	Tmáx > 38	