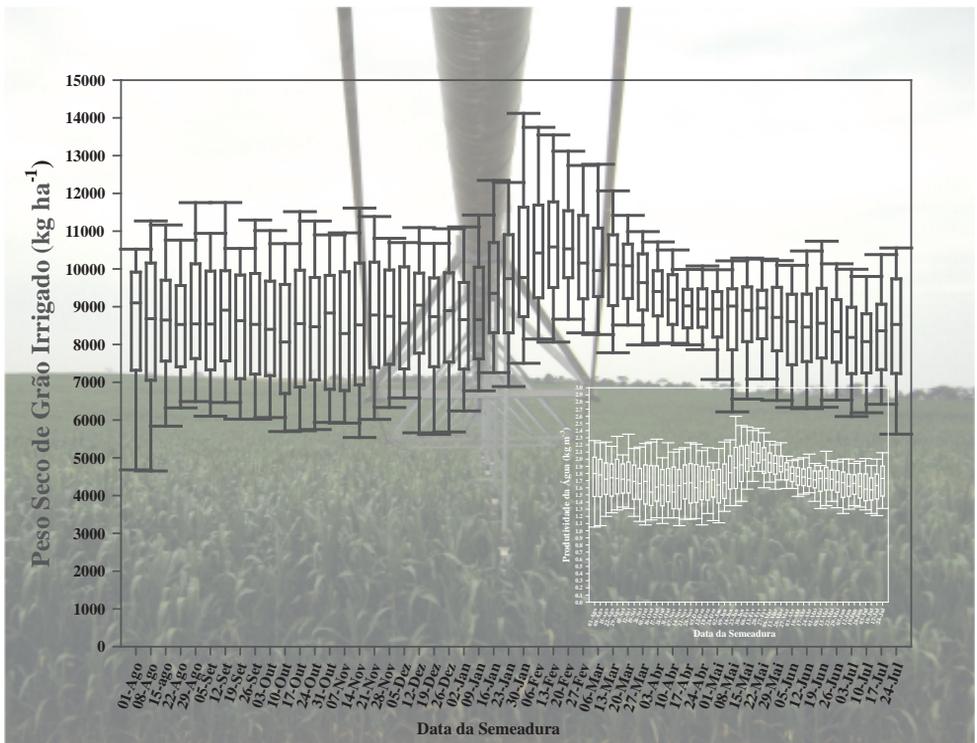


## Modelagem do Crescimento de Culturas: Aplicações à Cultura do Milho



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

## **Documentos 91**

# **Modelagem do Crescimento de Culturas: Aplicações à Cultura do Milho**

Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

Tales Antônio Amaral

João Carlos Ferreira Borges Júnior

Alexandre Bryan Heinemann

Axel Garcia y Garcia

Cecília M. Tojo-Soler

Denise de Freitas Silva

Clério Hickmann

Cirleidy Brandão de Santana

Bruno França Moura

Lília Aparecida de Castro

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

### **Embrapa Milho e Sorgo**

Rod. MG 424 Km 45

Caixa Postal 151

CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG

Fone:(31) 3027 1100

Fax: (31) 3027 1888

Home page: [www.cnpms.embrapa.br](http://www.cnpms.embrapa.br)

E-mail: [sac@cnpms.embrapa.br](mailto:sac@cnpms.embrapa.br)

### **Comitê de Publicações da Unidade**

Presidente: Antônio Álvaro Corsetti Purcino

Secretário-Executivo: Flávia Cristina dos Santos

Membros: Elena Charlotte Landau, Flávio Dessaune Tardin,

Eliane Aparecida Gomes, Paulo Afonso Viana e Clenio Araujo

Revisor de texto: Clenio Araujo

Normalização bibliográfica: Rosângela Lacerda de Castro

Editoração eletrônica: Communique Comunicação

### **1a edição**

1a impressão (2009): 200 exemplares

#### **Todos os direitos reservados.**

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Embrapa Milho e Sorgo

---

Modelagem do crescimento de culturas: aplicações à cultura do milho / Camilo de Lelis Teixeira de Andrade ... [et al.]. -- Sete Lagoas : Embrapa Milho e Sorgo, 2009. 65 p. : il. -- (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-4277; 91).

1. Modelo. 2. Simulação. 3. Milho. I. Andrade, Camilo de Lelis Teixeira de. II. Série.

CDD 003.3 (21. ed.)

# Autores

## **Camilo de Lelis Teixeira de Andrade**

Pesquisador, PhD Eng. de Irrigação/Modelagem, Embrapa Milho e Sorgo, Rod. MG 424, Km - 45, Zona Rural, Caixa Postal 151, 35701-970 - Sete Lagoas, MG. camilo@cnpms.embrapa.br

## **Tales Antônio Amaral**

Biólogo, MSc Fisiologia Vegetal, Bolsista CNPq, Sete Lagoas, MG. tales@cnpms.embrapa.br

## **João Carlos Ferreira Borges Júnior**

Professor Adjunto, DSc Recursos Hídricos e Ambientais, Departamento de Bioengenharia, Universidade Federal de São João Del Rei, Campus de Sete Lagoas, MG. jcborges@ufsj.edu.br

## **Alexandre Bryan Heinemann**

Pesquisador, DSc Irrigação/Modelagem. Embrapa Arroz e Feijão. Santo Antônio de Goiás, GO. alexbh@cnpaf.embrapa.br

## **Axel Garcia y Garcia**

Professor Assistente, DSc, Irrigação/Modelagem, University of Wyoming, EUA. agarci17@uwyo.edu

## **Cecília M. Tojo-Soler**

Assistente de Pesquisa, DSc Irrigação/Modelagem, The University of Georgia, EUA. ctojo@griffin.uga.edu

## **Denise de Freitas Silva**

Eng. Agrícola, DSc Recursos Hídricos e Ambientais, Bolsista PNPd/CNPq, Sete Lagoas, MG. denise@cnpms.embrapa.br

## **Clério Hickmann**

Engenheiro Agrônomo, MSc Solos e Nutrição de Plantas, Bolsista FAPEMIG, Sete Lagoas, MG. clerioh@gmail.com

## **Cirleidy Brandão de Santana**

Graduanda Engenharia Ambiental UNIFEMM, Bolsista PIBIC/FAPEMIG, Sete Lagoas, MG. cirleidy\_santana@yahoo.com.br

## **Bruno França Moura**

Graduando Engenharia Ambiental UNIFEMM, Bolsista PIBIC/CNPq, Sete Lagoas, MG. brunof\_moura@yahoo.com.br

## **Lília Aparecida de Castro**

Graduanda Engenharia Ambiental UNIFEMM, Bolsista Embrapa, Sete Lagoas, MG. lilia\_acastro@yahoo.com.br

# Sumário

Introdução.....	5
Características gerais dos modelos de culturas.....	6
Principais modelos de culturas.....	8
Possibilidades de aplicação dos modelos de culturas.....	10
Aplicação no manejo da cultura.....	12
Aplicação na análise da resposta de culturas à irrigação e no planejamento do uso de recursos hídricos.....	19
Aplicação no manejo de nitrogênio.....	26
Aplicação na avaliação de risco climático e no prognóstico de safras.....	30
Aplicação na análise da sustentabilidade de sistemas de sucessão de culturas.....	34
Aplicação em estudos de variabilidade espacial e em manejo sítio-específico.....	35
Aplicação no planejamento de uso da terra e dos recursos naturais.....	38
Aplicação na genética e melhoramento e na análise da interação genótipo x ambiente.....	40
Aplicação na simulação do efeito de pragas, doenças e plantas daninhas.....	44
Aplicação nos estudos de mudanças climáticas.....	48
Aplicação como ferramenta de educação e transferência de tecnologia.....	50
Limitações dos modelos de crescimento de culturas.....	51
Potencialidades de aplicação de modelos de simulação de culturas no Brasil.....	52
Referências.....	54

# Modelagem do Crescimento de Culturas: Aplicações à Cultura do Milho

---

*Camilo de Lelis Teixeira de Andrade*

*Tales Antônio Amaral*

*João Carlos Ferreira Borges Júnior*

*Alexandre Bryan Heinemann*

*Axel García y García*

*Cecília M. Tojo-Soler*

*Denise de Freitas Silva*

*Clério Hickmann*

*Cirleidy Brandão de Santana*

*Bruno França Moura*

*Lília Aparecida de Castro*

## Introdução

A utilização de modelos de simulação parte do pressuposto que os processos envolvidos em sistemas biológicos podem ser descritos com expressões matemáticas. Sistemas podem ser considerados compartimentos, com entradas e saídas de matéria e energia, compostos por elementos que interagem entre si e se auto-regulam e dotados de limites no espaço e no tempo. Uma população de plantas, delimitada num espaço físico, pode ser considerada um sistema no qual os elementos são as plantas, o solo, a água e a atmosfera. Inúmeros processos ocorrem neste sistema para transformar luz, água e nutrientes em fitomassa. Um modelo poderia então ser concebido para, partindo-se do conhecimento dos elementos e das entradas no sistema, descrever os processos e produzir uma saída que seria a produção de fitomassa e de grãos.

Modelos podem ser simplesmente conceituais, como a estrutura do DNA, por exemplo, ou podem ser matemáticos, constituídos desde uma simples expressão matemática até complexas equações diferenciais, capazes de relacionar causas e efeitos a que os elementos de um sistema estão submetidos. Podem ainda ser classificados como empíricos, nos quais equações são ajustadas a um grupo de dados observados ou mecânicos e determinísticos, nos quais as equações que descrevem os processos são baseadas nos princípios físicos que os regem.

Há duas formas de se considerar os modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas, de agora em diante referidos como “modelos de culturas”. Uma refere-se aos modelos dinâmicos, nos quais um conjunto de equações diferenciais é empregado para descrever a evolução do sistema solo-planta-atmosfera. A integração das equações diferenciais no tempo gera os valores das variáveis ou saídas dos modelos. A outra forma considera os modelos como sendo um conjunto de equações do tipo funções de resposta a variáveis explicatórias. Neste caso, a solução das equações gera as saídas diretamente. Em ambos os casos podem-se incluir elementos randômicos nas equações e, assim, impor aos modelos características estocásticas. As duas formas podem ser complementares nos modelos de culturas. A forma de modelo dinâmico tem a vantagem de permitir que passos intermediários dos processos envolvidos no crescimento da cultura possam ser avaliados e isto é interessante, sobretudo quando estes são empregados em pesquisa. De outro lado, modelos na forma de funções de resposta permitem que o desempenho geral do modelo seja analisado diretamente (WALLACH, 2006).

## **Características gerais dos modelos de culturas**

Modelos de culturas representam o funcionamento dinâmico do sistema solo-planta e sua interação com o clima e com as práticas culturais. Nem

todos os processos do sistema solo-planta são simulados. A inclusão de um ou outro processo depende da aplicação que se dará ao modelo e da escala em que ele será utilizado. Se o principal fator que afeta o desempenho de uma cultura é o estresse hídrico, por exemplo, o modelo não necessariamente precisa simular a dinâmica e absorção de nitrogênio pela planta. A unidade espacial de simulação pode ser uma região, fazenda, campo, lote ou uma quadrícula de uma gleba, no caso de agricultura de precisão. Os modelos assumem que a unidade espacial de simulação é homogênea, o que, na prática, e principalmente dependendo da escala ou do tamanho da unidade de simulação, nem sempre é verdadeiro. Conseqüentemente, os parâmetros do modelo e as variáveis que descrevem o estado do sistema dinâmico representam valores médios daquela unidade espacial. Isto é importante na hora de calibrar e validar os modelos. Nos sistemas dinâmicos, tempo é crucial. O intervalo de tempo para se calcularem os novos valores das variáveis de estado é de, geralmente, um dia na maioria dos modelos. As variáveis de estado de um modelo de cultura são aquelas que descrevem o sistema. Estas podem variar de modelo para modelo. Entretanto, as principais são fitomassa aérea, índice de área foliar (IAF), peso do material que se colhe (grão, no caso do milho), conteúdo de água e de nitrogênio do solo.

Para se operar ou “rodar” um modelo é necessário fornecer informações do solo, clima, sequência de manejo e condições iniciais do sistema. Estas informações são específicas para a unidade espacial considerada e, muitas vezes, apresentam certo grau de imprecisão que se propaga para as variáveis de saída do modelo. As variáveis de saída podem ser informações agrônômicas, como data da colheita, produtividade de grãos, consumo de água e de nitrogênio, e variáveis ambientais, como lixiviação de nitrato, percolação de água etc. Variáveis intermediárias, como fitomassa, IAF, índice de estresses, calculadas em certos estádios fenológicos, podem ser também consideradas importantes variáveis de saída.

Geralmente, os modelos têm módulos ou compartimentos cujas equações

descrevem o desenvolvimento, a dinâmica do IAF, a acumulação de fitomassa, o enchimento de grão e o balanço de água e de nitrogênio. Cada compartimento está ligado a outro através de fluxos de massa, que por sua vez são controlados pela energia disponível, geralmente radiação solar, e dependente também do fluxo de informações sobre o desenvolvimento fenológico e sobre os estresses de água e de nitrogênio. Estes estresses são funções, geralmente empíricas, que reduzem os processos da planta, sendo baseadas no princípio do fator limitante (BRISSON et al., 2006).

## Principais modelos de culturas

A história do desenvolvimento e evolução dos principais modelos de simulação do crescimento de culturas anuais, como trigo, milho, soja, algodão, arroz e sorgo, disponíveis hoje, é descrita por Brisson et al. (2006). Nesta revisão, cinco modelos foram selecionados para ilustrar os conceitos neles empregados e as funcionalidades e limitações dos mesmos.

O modelo mais especializado é o AZODYN, que simula trigo de inverno somente, seguido do CERES-EGC, que simula trigo, milho, colza, cana-de-açúcar e sorgo. O CROPGRO simula leguminosas, como soja, amendoim, feijão e ervilha, e não leguminosas, como tomate, pimentão e forragens, enquanto o CROPSYST simula todas as culturas industriais de maior valor, além de pastagens. O STICS é o modelo mais genérico, capaz de simular todas as culturas anteriores, além de alface, banana, uva, culturas de ciclo muito curto e cultivos intercalares. Em todos os modelos, o subsistema planta é caracterizado pela sua fitomassa aérea e índice de área foliar (IAF). Os órgãos das plantas são divididos em duas classes básicas, os destinados à colheita e os vegetativos. Alguns modelos são mais dirigidos a processos fisiológicos, como os da série DSSAT e ECOTROP. Outros levam em consideração também implicações ambientais, como o APSIM,

STICS, CROPSYST e EPIC. O CROPSYST tem módulos associados que permitem a espacialização de resultados, assim como o DSSAT, e também estudos em bacias hidrográficas. O modelo STICS pode lidar com algumas culturas perenes e consorciadas e pode simular um sistema de drenagem. O CROPSYST é o único que considera ascensão capilar. STICS e CROPSYST têm várias opções de manejo, como preparo e cobertura do solo e proteção da cultura contra frio. Os mecanismos relacionados com estresses bióticos (doenças, pragas e plantas daninhas) ainda não são totalmente entendidos e há necessidade de mais pesquisas para que os modelos possam avançar neste aspecto. Alguns modelos, como o DSSAT, consideram o efeito de pragas e doenças na redução da colheita de forma empírica. O DSSAT ainda não simula algumas condições ambientais e de manejo, como práticas de cultivo como plantio direto, plantio consorciado, excesso de água no solo, salinidade, disponibilidade e estresse de fósforo.

O modelo CERES-Maize (Crop Environment Resource Synthesis) é um modelo determinístico de estimativa, projetado para simular o crescimento de milho, a dinâmica da água, temperatura e nitrogênio no solo, em escala de campo para uma estação de crescimento ou, se combinado com outros modelos do mesmo sistema, ele pode simular uma sucessão de cultivos, incluindo pousio, o efeito da sazonalidade ou da variabilidade interanual do clima nas culturas e permite avaliar também a variabilidade espacial funcionando como uma ferramenta de auxílio ao manejo sítio-específico. O modelo é usado para pesquisas básica e aplicada relacionadas aos efeitos do clima (regime térmico, estresse hídrico e disponibilidade de luminosidade) e do manejo (irrigação, população e espaçamento entre fileiras, épocas de semeadura) no crescimento e rendimento do milho. Também é usado para avaliar práticas de fertilização com nitrogênio, na extração e lixiviação deste nutriente do solo, e em pesquisa de alterações globais para avaliar os potenciais efeitos do aquecimento do clima e de mudanças na precipitação e eficiência de uso de água devido ao aumento de CO<sub>2</sub>.

## Possibilidades de aplicação dos modelos de culturas

Há basicamente três grandes aplicações para os modelos de culturas: 1 – como ferramenta de pesquisa; 2 – como ferramenta para a tomada de decisões e, 3 – como ferramenta em ensino, treinamento e transferência de tecnologia (MATTHEW; STEPHENS, 2002). Dentro de cada um destes três grupos, há uma gama enorme de exemplos de aplicação da modelagem em sistemas de produção.

As primeiras aplicações dos modelos, e ainda as mais intensas, têm sido na área da pesquisa científica, pois permitem a organização e assimilação dos conhecimentos gerados na experimentação, a identificação de lacunas na investigação científica, além de facilitar o trabalho interdisciplinar e favorecer uma visão sistêmica dos processos produtivos. Permitem, assim, que sistemas complexos, como o crescimento de culturas, sejam analisados de forma dinâmica e quantitativa. Neste sentido, os modelos foram desenvolvidos para verificar se os conhecimentos da fisiologia do crescimento de plantas poderiam ser combinados para prever o crescimento de uma cultura e a resposta desta, em termos de produtividade, a vários fatores, como clima, solo e manejo (JONES et al., 2006). Há exemplos de aplicação de modelagem como ferramenta de pesquisa no melhoramento genético, análise da interação genótipo versus ambiente, no manejo cultural, em sistemas de produção, no planejamento agrícola em nível regional ou nacional e na área ambiental. Ensaios virtuais podem ser planejados e executados antes da implementação em campo. Valores de variáveis de difícil medição podem ser estimados com a modelagem.

Outra forma de olhar a aplicação de modelagem em investigação científica é descrita por Brisson et al. (2006), segundo os quais, pesquisas podem ser conduzidas “com”, “para” ou “em” modelos de culturas. No caso de “com”, os modelos funcionam como uma ferramenta de teste ou de análise estatística, que pode ser utilizada para testar hipóteses antes que elas

sejam avaliadas experimentalmente. Pesquisas podem também ser feitas “para” os modelos de culturas, nas quais se procura estudar o funcionamento de compartimentos, como solo, planta ou pragas e doenças, com o objetivo final de melhorar o próprio modelo. Já nas pesquisas “em” modelos, são eles mesmos os objetos da pesquisa, que visa melhorar os seus usos, em termos de parametrização, análise de sensibilidade, comparação com outros modelos.

Modelos são ferramentas extremamente úteis quando os efeitos do manejo das culturas dependem de interações complexas com o solo, com o clima e com outras decisões relacionadas ao próprio manejo. Neste caso, os modelos não são o objetivo final e sim ferramentas para se atingirem outras finalidades mais aplicadas, relacionadas com os sistemas de produção e o seu manejo (JONES et al., 2006), constituindo-se, portanto, em importante auxílio para a tomada de decisões nesta área. Decisões que são comumente consideradas nos principais modelos incluem escolha de variedades, densidade de plantio, datas de semeadura, data de aplicação e doses de fertilizantes nitrogenados, data de aplicação e lâminas de irrigação, além de data da colheita. Uma descrição detalhada de como decisões de manejo podem ser otimizadas empregando-se modelos de simulação de culturas é feita por Bergez et al. (2006). Há outras possibilidades de aplicação na avaliação do efeito da variabilidade climática no desempenho de sistemas de produção, incluindo respostas econômicas. Incertezas relacionadas a preços e custos também podem ser incorporadas e analisadas (JONES et al., 1998). O planejamento do uso da terra e de sistemas de irrigação e a avaliação da introdução de novas tecnologias podem ser realizadas com modelos de culturas. Tomadores de decisão institucionais podem empregar modelos para prever o impacto de decisões regulatórias ou de ajuda do Estado às comunidades e na formulação de políticas públicas. As diversas aplicações dos modelos de crescimento como ferramenta de tomada de decisão foram discutidas por Tsuji et al. (1998) e Wallach et al. (2006).

No caso de modelos empregados como ferramenta de ensino, treinamento

e transferência de tecnologia, a principal aplicação tem sido para o aprendizado dos princípios do manejo do solo e das culturas e para desenvolver a capacidade do estudante de pensar de forma sistêmica, considerando que sua especialidade faz parte de um sistema mais amplo. Testes e demonstrações de estratégias de manejo de solo, de fertilização e de culturas dos mais diversos tipos podem ser realizados com a possibilidade de analisar o efeito, não só em termos de produtividade, mas também em termos de rentabilidade da exploração. O uso de modelos diretamente por agricultores ou consultores também ajuda na visualização do impacto de escolhas de manejo em resultados não visíveis, como lixiviação de nitrogênio.

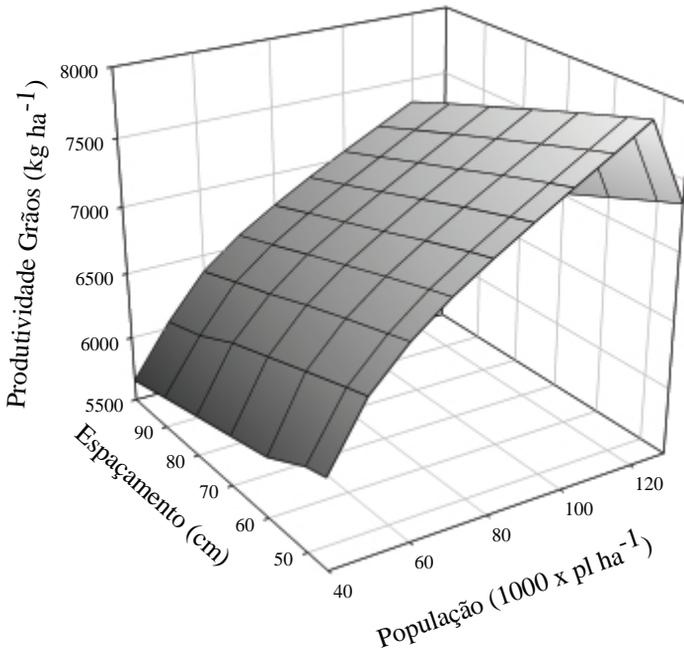
A seguir, serão descritos com mais detalhes e, em alguns casos, mostrados exemplos de aplicação dos modelos de culturas.

## **Aplicação no manejo da cultura**

Uma das aplicações mais simples de simulações com modelos de culturas é em estudos e análises de estratégias de manejo de cultura, entre as quais, espaçamento, densidade ou população de plantas, data de plantio e desempenho de cultivares. Os modelos, previamente calibrados e validados com dados independentes, são empregados com dados históricos de clima de vários anos para simular o desempenho da cultura sob diferentes condições de manejo. Os resultados assim obtidos são uma amostra dos efeitos das condições climáticas reinantes no local, podendo-se, então, atrelar aos mesmos uma probabilidade de ocorrência.

Em um estudo realizado na Nigéria, diferentes densidades de plantio de milho de sequeiro foram simuladas com o modelo CERES-Maize. Concluiu-se que as melhores produtividades de grãos são obtidas com 69 mil plantas por hectare (JAGTAP et al., 1998). Estudo semelhante foi realizado na Índia por Singh e Srinivas (2007). Para Sete Lagoas, MG, empregou-se o modelo CERES-Maize para simular o efeito da combinação

de diferentes espaçamentos entre linhas e populações de plantas da cultivar de milho BRS 3060, semeada em 17 de outubro, em regime de sequeiro (Figura 01). Observa-se que o rendimento de grãos de milho aumenta com a redução do espaçamento entre linhas e aumenta também com o incremento da população até 120 mil plantas por hectare. Após 120 mil plantas por hectare, há um decréscimo na produtividade de grãos. Sabe-se que populações tão elevadas ainda não são empregadas com este genótipo de milho cultivado em condições tropicais. Como o modelo não foi validado para estas estratégias de manejo, os resultados desta simulação indicam que algum trabalho experimental deve ser realizado para avaliar os efeitos de população e espaçamento de plantio no rendimento deste genótipo de milho. Esta é uma aplicação típica de modelagem e simulação, onde ensaios virtuais são realizados para nortear a condução de ensaios de campo.



**Figura 01** – Produtividade média de grãos de milho para diferentes espaçamentos entre linhas e populações de plantas, em um sistema de sequeiro, Sete Lagoas, MG

Dados históricos de clima foram empregados com modelagem em Pergamino, Argentina, para avaliar diferentes datas de plantio de milho (OTEGUI et al., 1996). Na ausência de estresse hídrico e de nutrientes, os híbridos de ciclo longo produziram mais. As semeaduras de setembro produziram mais do que as de agosto (que podem sofrer efeitos de geada) e mais do que as de novembro, que produziram cerca de duas toneladas por hectare a menos. As melhores datas de semeadura de milho de sequeiro e irrigado, em um sistema de sucessão com grão-de-bico na Índia, foram definidas empregando resultados de simulação (SINGH; SRINIVAS, 2007).

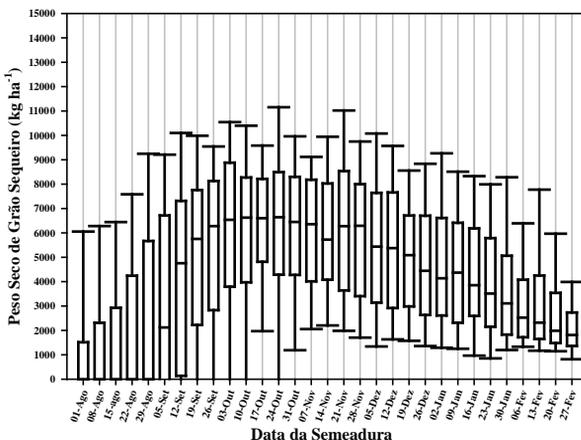
A produção potencial de milho de sequeiro, sem estresses de água e de nitrogênio, foi investigada com o objetivo de avaliar o desempenho da cultura no Planalto Catarinense (CARDOSO; SOCCOL, 2008). Diferentes datas de semeadura de outubro a março, com intervalos de dez dias, foram avaliadas. A maior frequência de falhas no estabelecimento da cultura ocorreu no segundo decêndio de janeiro e de março. O ciclo da cultura, do plantio até a maturidade fisiológica, variou de 140 a 200 dias. A produção potencial decresceu drasticamente para semeaduras após o segundo decêndio de dezembro, praticamente zerando em fevereiro devido à baixa temperatura e radiação solar e ao risco de geada no período de enchimento de grãos. A produção média de grãos no regime de sequeiro não passou de 4000 kg ha<sup>-1</sup> de outubro a dezembro. Verificou-se alto risco de perda de safra para semeaduras a partir do terceiro decêndio de janeiro. O terceiro decêndio de dezembro proporcionou a melhor produtividade naquela região. A produção média potencial de grãos foi de 4944 kg ha<sup>-1</sup> e a produção média de sequeiro de 2490 kg ha<sup>-1</sup>.

O milho tem sido uma das principais alternativas de cultivo na segunda safra (safrinha) em várias regiões do Brasil. Deficiência hídrica, temperatura abaixo da ótima e baixa insolação são um dos problemas mais comuns observados durante esta safra. O impacto da variabilidade climática na produção das culturas pode ser analisado com modelos de simulação de culturas. Utilizou-se o modelo CERES-Maize para avaliar o

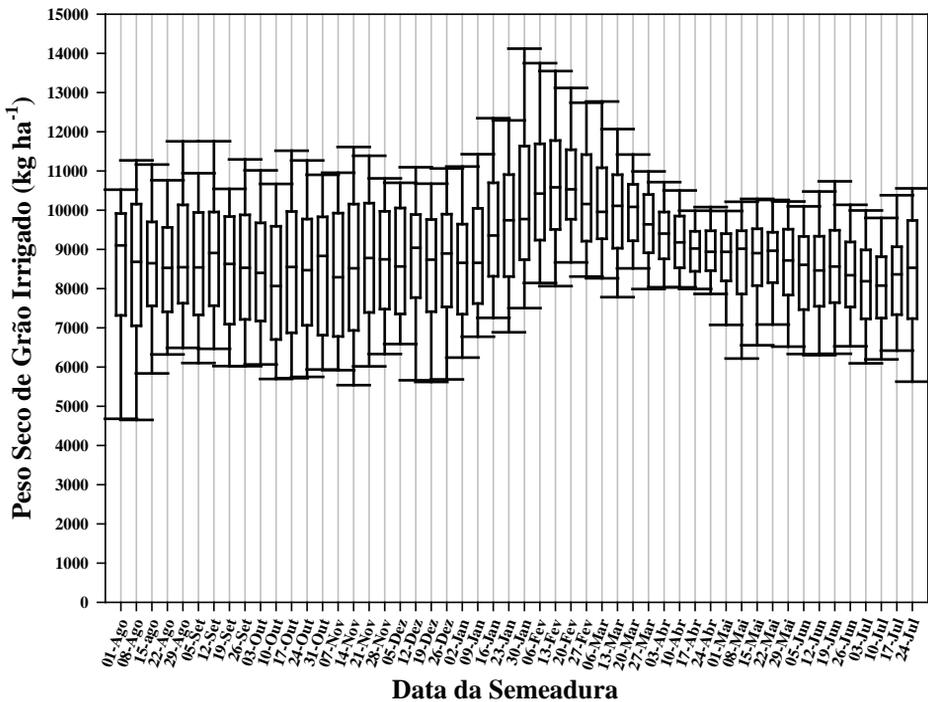
efeito de diferentes datas de semeadura de cultivares com diferentes ciclos na região de Piracicaba e Manduri, São Paulo, sob condições de sequeiro e irrigado. Simularam-se seis datas de plantio de fevereiro a abril. Em Piracicaba, observou-se que um atraso na data de plantio de 1º de fevereiro para 15 de abril causou uma redução média de 55% para o cultivo de sequeiro e de 21% para o irrigado, para todos os híbridos testados (SOLER et al., 2007). Em Manduri, observou-se que o risco de obtenção de baixo rendimento é significativamente aumentado para semeaduras realizadas após 15 de março. Para genótipos de ciclo longo, o limite para semeadura de safrinha naquela região é 15 de fevereiro, podendo-se empregar genótipos de ciclo médio até 1º de março. Mesmo com irrigação, o risco é aumentado para semeaduras após 1º de março, 15 de fevereiro e 1º de fevereiro, para genótipos de ciclo curto, médio e longo, respectivamente. Tanto em regime de sequeiro quanto irrigado, os genótipos de ciclo longo e com maior número de grãos por espiga produziram mais (SOLER et al., 2001). Em Londrina, Paraná, resultados de simulações de épocas de semeadura de janeiro a abril, com intervalos de dez dias, utilizando o mesmo modelo, indicaram um decréscimo de até 38% na produtividade potencial e de 44% na produtividade sob restrição hídrica de milho, à medida que se atrasou o plantio. O ciclo da cultivar precoce XL-520 variou de 120 a 140 dias para semeaduras de janeiro e 160 a 170 dias para plantios de abril. O maior ciclo em semeaduras tardias influenciou na sequência de cultivos do ano seguinte e favoreceu o aumento de falhas no estabelecimento da cultura devido à deficiência hídrica (CARDOSO et al., 2004a).

O modelo CERES-Maize foi empregado para avaliar o desempenho da cultura do milho, cultivar BRS 3060, em regime de sequeiro e sob irrigação em Sete Lagoas, Minas Gerais (ANDRADE et al., 2009a, 2009b). Simulações para semeaduras semanais foram realizadas empregando-se uma série histórica contendo 46 anos de dados diários de clima. Tanto no cultivo de sequeiro quanto no irrigado, observou-se uma grande variabilidade sazonal e interanual na produtividade de grãos, decorrente da

variabilidade dos elementos climáticos que afetam a produção (Figuras 02 e 03). Nota-se que, mesmo sob irrigação, há uma grande amplitude na produtividade para uma mesma data de semeadura em consequência da variabilidade do fluxo de radiação solar e das temperaturas mínimas e máximas, uma vez que a cultura não foi submetida a estresse hídrico. No regime de sequeiro, observaram-se valores medianos da ordem de 6600 kg ha<sup>-1</sup>, para semeaduras realizadas de 10 a 24 de outubro (Figura 02), com o maior valor médio de 6653 kg ha<sup>-1</sup>, obtido na semeadura de 17 de outubro. Entretanto, dada a grande variabilidade interanual, com a possibilidade de ocorrência de veranicos, notou-se produtividade zero mesmo para a semeadura de 24 de outubro, que é uma data adequada para plantio. Algumas datas, como 07 de novembro, apresentaram valor mediano alto e uma amplitude na produtividade menor, indicando menor variabilidade climática. No regime irrigado (Figura 03), produtividades medianas acima de 10000 kg ha<sup>-1</sup> foram observadas para semeaduras realizadas em fevereiro e março. O maior valor médio, de 10649 kg ha<sup>-1</sup>, foi obtido para a semeadura de 20 de fevereiro. Semeaduras de abril apresentaram valores medianos menores, porém com menor variabilidade interanual (Figura 03).



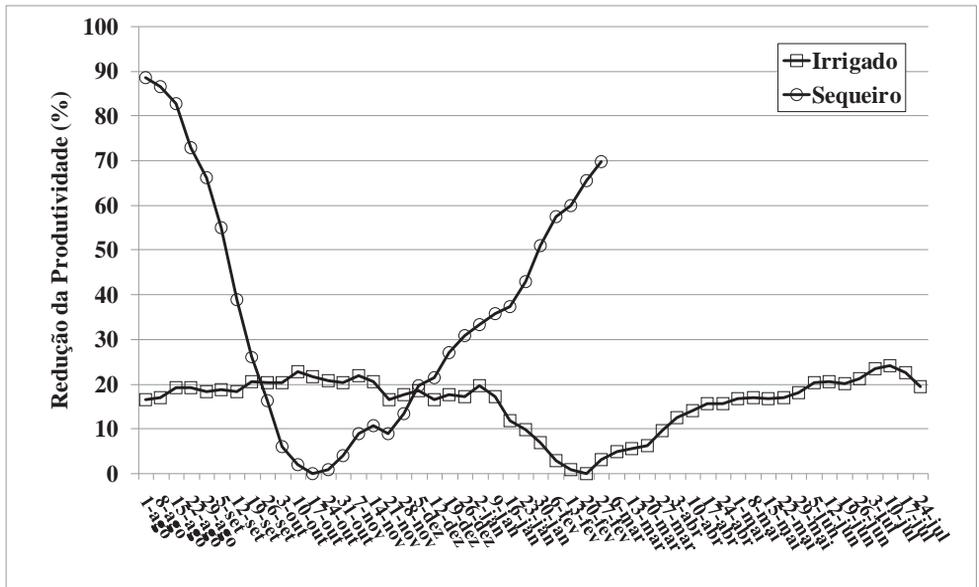
**Figura 02** – Boxplot, indicando percentis (25% menores, 50% centrais, 25% maiores) e valor mediano da produtividade de grãos de milho para diferentes épocas de semeadura em regime de sequeiro, Sete Lagoas, MG



**Figura 03** – Boxplot, indicando percentis (25% menores, 50% centrais, 25% maiores) e valor mediano da produtividade de grãos de milho para diferentes épocas de semeadura em regime de irrigação, Sete Lagoas, MG

Na Figura 04, são apresentadas as curvas de porcentagem de redução da produtividade de grãos de milho em relação aos valores médios máximos, de 6653 e 10649  $\text{kg ha}^{-1}$ , obtidos nos regimes de sequeiro e irrigado, respectivamente, para diferentes datas de semeadura. Nota-se que um atraso no plantio de sequeiro em relação a 17 de outubro, que é a data com maior produtividade média de grãos, causa reduções significativas na produtividade média esperada para a cultura do milho, podendo passar de 50% para semeaduras realizadas após o final de janeiro. No caso do regime irrigado, as quebras esperadas na produtividade, decorrentes da semeadura fora da data ótima de 20 de fevereiro, podem chegar a 24%

(Figura 04). A escolha correta da data de semeadura e o uso da irrigação proporcionam um aumento da produtividade do milho em relação ao regime de sequeiro de quase 4000 kg ha<sup>-1</sup> (Figuras 02 e 03). Se este aumento justifica o uso da irrigação, depende de uma análise econômica, que pode ser realizada utilizando-se uma ferramenta existente dentro do próprio modelo CERES-Maize. As curvas apresentadas na Figura 04 auxiliam o agricultor no planejamento do plantio e oferecem informações que possibilitam que ele faça ajustes no seu sistema de produção para semeaduras realizadas fora do período ótimo. Agricultores avessos a riscos devem estar preparados para plantios em um curto espaço de tempo, mobilizando, portanto, toda sua estrutura em termos de maquinaria e logística para esta finalidade.



Jagtap et al. (1999) utilizaram modelagem para investigar a produtividade de milho em alguns locais da Nigéria. Cultivares de ciclo entre 90 e 110 dias produziram melhor do que as de ciclo entre 120 e 150 dias em vários locais, possivelmente devido à capacidade das cultivares de ciclo mais curto de melhor aproveitar as estações de chuvas também mais curtas.

Sistemas de produção alternativos, envolvendo milho, sorgo e trigo, foram estudados para o sudoeste do Kansas nos Estados Unidos empregando modelos de simulação (WORMAN et al., 1988). Avaliaram-se sistemas de sequeiro e irrigado, empregando modelos previamente validados e alimentados com série histórica de dados de clima. Os melhores retornos econômicos foram obtidos com milho irrigado com 406 mm de água, seguido de sorgo-pousio, sorgo com 305 mm de água, trigo-pousio e trigo irrigado com 203 a 305 mm de água. A escolha da melhor estratégia depende do custo da irrigação e do suprimento limitado de água.

## **Aplicação na análise da resposta de culturas à irrigação e no planejamento do uso de recursos hídricos**

Uma aplicação bastante comum da modelagem é a utilização de simulações para avaliar a resposta das culturas ao uso de irrigação, bem como verificar a rentabilidade da exploração e o impacto ao ambiente, sobretudo no que diz respeito ao uso de água e lixiviação de nitrogênio. Modelos de crescimento de culturas podem ser empregados em condições climáticas adversas, incluindo a possibilidade de estudo de decisões de irrigação em combinação com outras decisões de manejo, como data do plantio, espaçamento entre linhas, e uso de fertilizantes nitrogenados.

O modelo CERES-Maize foi empregado em vários estudos em que se analisou a produtividade, a eficiência de uso da água, estratégias de manejo da irrigação e rentabilidade da exploração da cultura do milho. Estratégias de irrigação e datas de plantio do milho safrinha foram

avaliadas em Londrina, Paraná (CARDOSO et al., 2004b), concluindo-se que a melhor época de plantio em regime de irrigação na região é o mês de abril. O manejo da irrigação que proporcionou maiores rendimentos foi o de irrigar quando 50% da água disponível do solo eram consumidos. O uso da irrigação reduziu os riscos e proporcionou maiores receitas líquidas. As maiores rentabilidades foram obtidas com plantios em fevereiro e com um nível de esgotamento de apenas 10% da água do solo, ou seja, com irrigações frequentes. Em outros trabalhos, o mesmo modelo foi empregado para estudar datas de plantio e doses de nitrogênio na cultura do milho em Janaúba, Minas Gerais (FREITAS et al., 2001), e para avaliar o efeito da uniformidade da irrigação por aspersão na produtividade de milho (FREITAS et al., 2004). Singh e Srividas (2007) empregaram o modelo CERES-Maize para avaliar a resposta do milho à irrigação na Índia, concluindo que, para a região em questão, não havia necessidade desta prática. O aumento necessário da produtividade de milho para pagar os custos da utilização de irrigação em milho foi determinado por Martin et al. (1996), empregando modelos de culturas, dados de preços e custos e série histórica de dados de clima.

Embora não muito comuns, modelos de crescimento de cultura têm sido utilizados como ferramenta de manejo da irrigação (STEELE et al., 1994). Steele et al. (1997) demonstraram como se pode empregar o modelo CERES-Maize para reduzir o consumo de água em milho pipoca sem perda da qualidade do produto. Um modelo de crescimento, combinado com um algoritmo de otimização, foi empregado para melhorar a estratégia de irrigação de milho na França (BERGEZ et al., 2006). A eficiência de uso e o planejamento da alocação de água para diferentes culturas foram investigadas na China por Fang et al. (2009), empregando os modelos RZWQM e DSSAT4.0. Ficou demonstrado que o uso deste tipo de ferramenta permite mitigar a pressão da agricultura ao ambiente, exercida com ações como abaixamento do lençol freático e lixiviação de nitrato.

O balanço hídrico na zona radicular é um dos procedimentos básicos implementados em vários modelos de simulação aplicáveis como

ferramentas de decisão em irrigação e drenagem, como o CROPWAT (desenvolvido pela Land and Water Development Division - FAO), IRRIGA (MANTOVANI et al., 2003), CADSM (PRAJAMWONG et al., 1997), DRAINMOD (SKAGGS, 1999), PRODREN (BORGES JÚNIOR et al., 2001) e MCID (BORGES JÚNIOR et al., 2008). Juntamente com o monitoramento do teor de água do solo e de dados climáticos, o balanço hídrico pode ser empregado no manejo da irrigação e no cálculo de suas componentes, como a evapotranspiração real e a percolação profunda. Vinculado ao balanço hídrico, o balanço de sais (OR; WRAITH, 1997) tem sido utilizado em modelagem (PRAJAMWONG et al., 1997; CAI et al., 2003) para monitorar tendências na variação da salinidade em longos períodos em projetos de irrigação, em larga ou pequena escala. Um modelo computacional em que se verifica a combinação de balanço hídrico e de sais na zona radicular é o MCID (FERREIRA et al., 2006; BORGES JÚNIOR et al., 2008).

Em caso de parcela ou unidade de produção, o modelo computacional MCID pode ser utilizado como ferramenta de apoio ao manejo de irrigação e para simular o efeito de diferentes configurações de sistemas de irrigação e/ou drenagem e manejos de irrigação sobre a produtividade, retorno financeiro e requerimento de irrigação, dentre outras variáveis de saída. As simulações são realizadas em base diária, empregando séries históricas de dados climáticos e informações de solo, cultura, manejo de irrigação, configurações de sistemas de drenagem a serem avaliadas (se a drenagem estiver sendo considerada) e dados financeiros. A produtividade das culturas é calculada considerando-se estresses devido ao déficit hídrico, excesso de água (quando a drenagem estiver sendo considerada) e salinidade, simulados a partir do balanço de água e sais na zona radicular.

Os resultados das simulações com o MCID podem, então, ser empregados com coeficientes técnicos em estudos de otimização de padrão de cultivo em propriedades agrícolas, em relação ao retorno financeiro e ao uso da água, associados à análise de risco. Esse procedimento foi adotado por

Andrade et al. (2008) e Borges Júnior et al. (2007) em estudos de otimização de padrão de cultivo, conduzidos por meio de um modelo de programação linear e análise de risco baseada em análise de sensibilidade e simulações de risco.

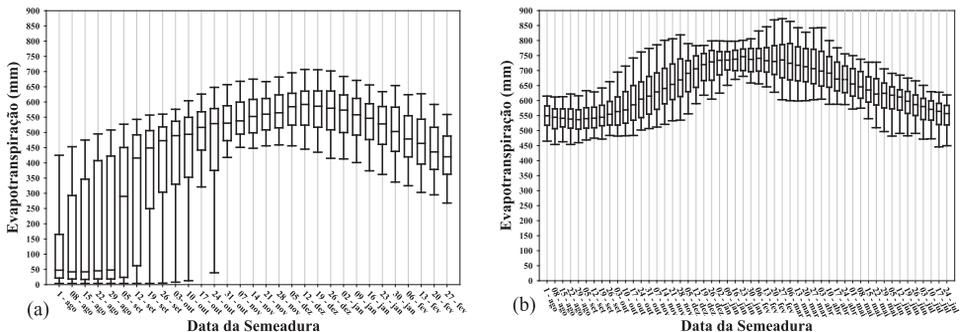
Andrade et al. (2008) aplicaram o MCID para milho e diversas outras culturas em variados cenários de produção para propriedades de pequeno e médio porte no perímetro de irrigação do Gorutuba, Minas Gerais. Simulações foram feitas para diferentes cenários, considerando dados de solo, dados financeiros, produtividade de culturas e requerimento hídrico. Os dois últimos conjuntos de dados foram obtidos com simulações com o MCID. Os dados foram aplicados na otimização do padrão de cultivo em termos financeiros, considerando restrições de terra, água e mão de obra, em duas propriedades, sendo uma de pequeno e outra de médio porte. Séries de produtividade e de requerimento de irrigação, obtidas em simulações com série histórica de dados de evapotranspiração de referência, foram empregadas para inferir valores médios e de desvio padrão dessas variáveis e esses foram utilizados para execução da análise de risco. Borges Júnior et al. (2007) realizaram estudos similares para o perímetro de irrigação do Jaíba, Minas Gerais. Modelos de culturas, como DSSAT e CROPSYST, podem ser aplicados para objetivos similares, gerando dados estocásticos de produtividade e requerimento hídrico para diferentes cultivos, com vistas à aplicação na decisão sobre estratégias de produção.

O planejamento do uso de recursos hídricos nas culturas de milho, soja e amendoim no estado da Geórgia, Estados Unidos, foi realizado com o emprego dos modelos de culturas do sistema DSSAT (HOOK, 1994). Nos 15 anos mais severos em termos de seca, a perda de produtividade foi de 75% para milho, 73% para soja e 64% para amendoim, todos cultivados em regime de sequeiro. A maior parte da necessidade de irrigação de milho, nesses anos de seca, ocorreu antes do período de maior requerimento de água para amendoim e soja. Em outro trabalho realizado em Minnesota, a simulação com dados históricos de clima indicaram que o

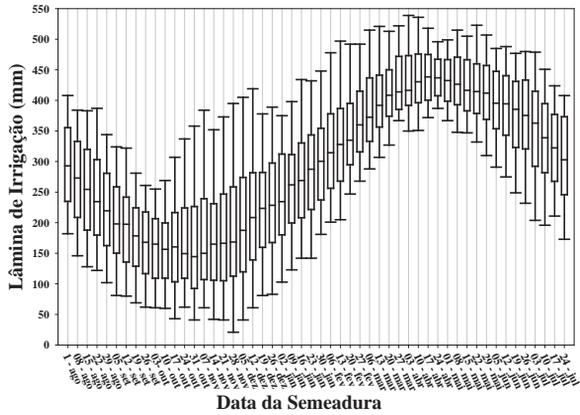
milho consome mais água do que a soja na maioria dos anos e que a lixiviação de contaminantes para a água subterrânea está diretamente relacionada com o momento e intensidade de chuvas e de irrigação nas lavouras (REICOSKY et al., 1995).

O requerimento e a eficiência de uso da água pela cultura do milho em regime de sequeiro e irrigado foram analisados empregando resultados de simulações realizadas com o modelo CERES-Maize, para Sete Lagoas, Minas Gerais (ANDRADE et al., 2009c). Observou-se uma grande amplitude sazonal e interanual nos valores de consumo de água ao longo do ciclo do milho, tanto no regime de sequeiro quanto no irrigado, devido à variabilidade dos elementos do clima e às interações com a cultura. (Figuras 5a e 5b). Para uma mesma data de semeadura, o valor mediano de evapotranspiração da cultura é maior no regime irrigado, que não sofre estresse hídrico, do que no sequeiro, que está sujeito a efeitos de veranicos e secas terminais. O maior consumo de água em termos medianos no regime de sequeiro foi de 592 mm, verificado em dezembro, e de 747 mm no irrigado, observado em janeiro. A lâmina complementar de irrigação aplicada na cultura no sistema irrigado variou consideravelmente, tanto para uma mesma data quanto entre as datas de semeadura simuladas ao longo do ano (Figura 6). Os menores valores medianos de lâmina de irrigação complementar, em torno de 150 mm, foram observados no período de 24 de outubro a 07 de novembro, enquanto os maiores valores, de cerca de 430 mm, foram obtidos de 10 de abril a 01 de maio. Para uma mesma data, a amplitude da lâmina de irrigação complementar é considerável, principalmente no período de chuvas, quando podem ocorrer veranicos, durante os quais a demanda evapotranspirométrica é elevada. Lâminas de irrigação complementar de mais de 520 mm foram observadas em semeaduras do início de abril. Este tipo de informação pode auxiliar no planejamento da exploração agrícola, levando em consideração o interesse do produtor e o uso de recursos hídricos. Se há restrição ao uso de água, deve-se optar pela semeadura no período de menor necessidade de irrigação, que é em outubro e novembro, esperando, entretanto, obter

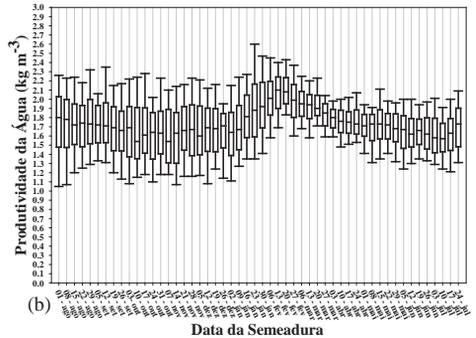
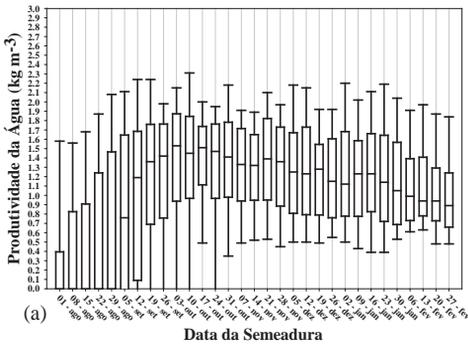
uma produtividade mediana da cultura cerca de  $2000 \text{ kg ha}^{-1}$  menor do que a máxima esperada para o ano. Por outro lado, se o interesse do produtor é produzir mais, a melhor janela de semeadura no regime irrigado é a segunda quinzena de fevereiro (ANDRADE et al., 2009b), período no qual a cultura requer cerca de 320 mm de irrigação suplementar no ciclo (Figura 6). A amplitude nos valores da produtividade da água, ou eficiência no uso da água, é consideravelmente maior no sistema de produção de sequeiro do que no irrigado (Figuras 7a e 7b), devido ao marcante efeito das condições climáticas, sobretudo o estresse hídrico, na produtividade de grãos da cultura. Valores medianos máximos da produtividade da água simulada pelo modelo foram de cerca de  $1,50 \text{ kg m}^{-3}$  no regime de sequeiro e de cerca de  $2,10 \text{ kg m}^{-3}$  no irrigado. Tanto no sistema de sequeiro quanto no irrigado, os maiores valores de produtividade da água foram observados no período que coincide com a época mais recomendada de semeadura da cultura para a região (ANDRADE et al., 2009a, 2009b).



**Figura 05** – Boxplot, indicando percentis (25% menores, 50% centrais, 25% maiores) e valor mediano da evapotranspiração da cultura para diferentes datas de semeadura, em sistemas de cultivo de sequeiro (a) e irrigado (b), Sete Lagoas, MG



**Figura 06** – Boxplot, indicando percentis (25% menores, 50% centrais, 25% maiores) e valor mediano da lâmina de irrigação complementar aplicada durante o ciclo da cultura do milho, Sete Lagoas, MG



**Figura 7** – Boxplot, indicando percentis (25% menores, 50% centrais, 25% maiores) e valor mediano da produtividade da água, calculada em função da evapotranspiração da cultura no ciclo, para diferentes datas de semeadura, em sistemas de produção de sequeiro (a) e irrigado (b), Sete Lagoas, MG

## Aplicação no manejo de nitrogênio

As recomendações de nitrogênio para milho são baseadas em ensaios, nos quais a produtividade da cultura, em termos de grãos ou fitomassa, é avaliada para diferentes doses de nitrogênio (N). Geralmente, uma curva é ajustada aos dados observados e análises econômicas são, então, realizadas para se determinar o ótimo econômico. Esta metodologia, embora largamente utilizada, tem limitações, pois há uma grande variabilidade climática interanual, limitando a aplicação de resultados de um ano para outro e em outros locais (BOWEN; BAETHGEN, 1998). Devido às peculiaridades da dinâmica de N no solo, é difícil estimar a capacidade de suprimento deste elemento para as plantas e, assim, estimar a quantidade adicional requerida como fertilizante. As calibrações de campo são, geralmente, realizadas com poucos pontos obtidos em poucos locais e em condições climáticas limitadas. Uma alternativa é o uso de modelos de simulação que são capazes de simular os principais processos envolvidos na dinâmica de N no solo e na planta. Os modelos não substituem os ensaios de campo, mas ampliam a capacidade de extrapolação dos resultados de um ano para outro e de um local para outro. Outra grande vantagem da utilização de modelagem para investigar o manejo da fertilização nitrogenada é a possibilidade de estudar as interações desta fertilização com outros fatores, como lâmina de irrigação, cultivares, população de plantas, data de semeadura e condições climáticas.

São vários os exemplos de aplicação de modelos de crescimento para investigar o manejo da fertilização nitrogenada e suas interações. Em uma pesquisa realizada no Quênia, utilizou-se o modelo CERES-Maize, juntamente com dados históricos de clima, para avaliar a resposta da cultura do milho a vários fatores de manejo, como doses de nitrogênio, densidade de plantas e data da adubação de cobertura (KEATING et al., 1990). Os resultados permitiram uma avaliação de longo prazo do efeito

médio destes fatores e o risco climático associado, além de nortear os futuros trabalhos de pesquisa na região, objetivando melhorar a produtividade da cultura. Estudo semelhante foi realizado por Singh e Srividas (2007) na Índia, no qual se trabalhou com doses de N para diferentes populações de plantas e datas de semeadura. Em outro trabalho realizado na África, verificou-se que o risco de perda de safra por não se utilizar nitrogênio é substancial, apesar da resposta à fertilização nitrogenada ter variado drasticamente de ano para ano, devido às instabilidades climáticas. A melhor eficiência de uso de nitrogênio foi obtida com a aplicação de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ . A eficiência de uso de N foi menor em locais mais nublados e mais chuvosos (JAGTAP et al., 1999).

A simulação pode ser empregada também para o planejamento e otimização da fertilização nitrogenada em diferentes classes de solos. Attanandana et al. (1999) utilizaram o modelo CERES-Maize para auxiliar na seleção das melhores regiões e solos para a produção de milho na Tailândia. O manejo de N foi definido em função do teor de carbono orgânico do solo, de forma a otimizar a renda. Na Índia, o modelo foi empregado para estimar a dose ótima de nitrogênio para a produção de milho em dois tipos de solos e também avaliar o risco associado à variabilidade climática (SINGH; SRIVIDAS, 2007). Uma descrição completa com exemplos de aplicação de modelagem para investigar o manejo de nitrogênio é apresentada por Bowen e Baethgen (1998).

Um viés importante na utilização de modelos de crescimento é a avaliação do risco de contaminação ambiental por nitrato, geralmente, envolvendo interação com o clima e com outras práticas, como dose, datas de semeadura e irrigação. A lixiviação de N é indesejável do ponto de vista agrônomo, econômico e ambiental. Verificou-se, por exemplo, que a irrigação com 30% de déficit afetou pouco a produtividade de milho, mas reduziu sensivelmente a percolação de água e a lixiviação de N. Neste mesmo estudo, constatou-se que os fatores que mais afetam o risco de contaminação são, nesta ordem, manejo da irrigação, variabilidade climática e dose de nitrogênio (PANG et al., 1998). Em outro estudo,

investigou-se a relação entre o manejo da irrigação, incluindo a uniformidade de aplicação de água, e o manejo de nitrogênio na produtividade de milho e na lixiviação de nitrato, utilizando-se o modelo CERES-Maize. Sob condições de irrigação não uniforme, é impossível manejar água e nitrogênio para se obter alta produtividade sem lixiviação considerável de N. Altas produtividades de milho com baixa lixiviação de nitrato podem ser compatibilizadas com o manejo apropriado de N e irrigação com coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) acima de 90% (PANG et al., 1997a, 1997b).

Na Europa, as áreas agrícolas são pequenas e empregam-se grandes quantidades de insumos, gerando uma enorme pressão ao ambiente. Nestas situações, modelos de simulação de sistemas de produção em conjunto com modelos hidrológicos podem ser empregados para avaliar a sustentabilidade de longo prazo de práticas de manejo. Esta abordagem é necessária porque dados experimentais coletados em condições diversas de ambiente resultam em conclusões diversas com relação ao risco potencial de contaminação da água. Simulações confiáveis oferecem uma solução para este tipo de impasse. Em um trabalho realizado na Itália, empregou-se o modelo CROPSYST (STÖCKLE; NELSON, 1994; STÖCKLE; DONATELLI, 1997) para simular sistemas de produção diversos e avaliar a lixiviação de nitrato com o manejo convencional, de uso corrente na região, e com um novo método de manejo de nitrogênio proposto. A aplicabilidade da simulação para minimizar a lixiviação de nitrato foi demonstrada.

Como muitas das decisões a serem tomadas por agricultores ou consultores requerem o conhecimento de informações, muitas delas dependentes de prognósticos, tais informações passam a ter um valor estratégico ou mesmo econômico. Thornton e MacRobert (1994) desenvolveram uma metodologia para estimar o valor econômico da informação referente ao manejo ótimo do nitrogênio em milho, empregando o modelo CERES-Maize. O manejo ótimo de nitrogênio em qualquer estação foi altamente dependente das condições climáticas. A análise ex-

*post* mostrou que o valor da informação comparada com a melhor estratégia *ex-ante* foi de aproximadamente U\$ 65 ha<sup>-1</sup>. Considerou-se a possibilidade de usar o modelo de cultura para prognosticar a produtividade de milho no âmbito de fazendas e tentar capturar pelo menos parte destes benefícios *ex-ante*. Concluiu-se que, em fazendas com alto risco climático, o uso de prognóstico, junto com a otimização dos insumos, pode resultar em benefício econômico moderado a longo prazo.

Em se tratando de outras fontes de fertilização nitrogenada, alguns modelos são capazes de simular a utilização de adubação verde e de dejetos de animais. Bowen et al. (1993) adaptaram o modelo CERES-Maize para simular o uso de adubação verde em milho. Testaram o modelo com dez tipos de leguminosas e avaliaram a absorção de N pelo milho, a mineralização e a lixiviação de N. Ajustaram um fator de adsorção de N para as camadas subsuperficiais em solos tropicais para que a lixiviação fosse melhor simulada. Um modelo, acoplado ao CERES-Maize, foi desenvolvido por Hoffmann e Ritchie (1993) para simular os processos envolvidos no uso de dejetos na lavoura de milho. Foram considerados os processos de volatilização de amônia, lixiviação de amônio e de nitrogênio orgânico e mineralização antes e depois da incorporação. Simulações foram realizadas para avaliar o efeito do manejo do dejetos e do uso continuado de dejetos no conteúdo de N orgânico, mineralização, absorção pelo milho e lixiviação de N. Shayya et al. (1993) desenvolveram um sistema denominado *Animal Waste Management Programe (AWMP)* para avaliar o impacto econômico e ambiental da aplicação de dejetos animal em áreas agrícolas. O modelo AWMP emprega o CERES-Maize para simular o crescimento da cultura em conjunto com rotinas para simular as transformações de dejetos animal e esterco no solo. O modelo foi utilizado para avaliar o efeito de diferentes cenários de manejo de dejetos na produtividade, absorção e lixiviação de nitrogênio e decomposição da matéria orgânica.

## **Aplicação na avaliação de risco climático e no prognóstico de safras**

Risco e incerteza estão constantemente presentes no ambiente em que a agricultura é praticada. Modelos de simulação podem ser empregados para gerar expectativas de produção associadas a certa distribuição de probabilidade. O risco envolvido na produção de alimentos em certas regiões está relacionado com a segurança alimentar em nível familiar, regional ou nacional (THORNTON; WILKENS, 1998). Parte do manejo do risco consiste em lidar com as variabilidades interanuais de produção, decorrentes de diversos fatores, entre os quais, as incertezas climáticas. O modelo DSSAT dispõe de rotinas para análises sazonais, empregando dados de clima observados ou gerados estocasticamente. Algumas ferramentas estatísticas de avaliação da eficiência e do risco estão incorporadas no modelo. Variabilidade nos preços e custos também pode ser considerada, permitindo que se separem os efeitos do risco referente ao clima, daquele referente ao preço dos produtos. Os autores demonstraram o uso do modelo DSSAT para definir os riscos e as práticas adequadas de manejo, incluindo da adubação nitrogenada, para o cultivo de milho semeado em três épocas da estação chuvosa em regiões da África.

A avaliação dos efeitos da variabilidade climática nos sistemas de produção e nas alternativas de manejo demoraria décadas. Há duas formas em que resultados de simulação podem influenciar ou ajudar agricultores a tomarem decisão: 1 - diretamente, fornecendo aos mesmos as informações necessárias sobre o resultado esperado e o risco associado e 2 - indiretamente, através de mudanças da política agrícola que influencia a decisão dos agricultores. Inevitavelmente, os agricultores tomam decisão mediante muitas incertezas. Fornecendo-se novas informações sobre o ambiente no qual os agricultores estão operando ou sobre os resultados esperados com manejos alternativos, as incertezas

podem ser reduzidas (BYERLEE; ANDERSON, 1982 citados por MEINKE et al., 2001). A aplicação bem sucedida desses conceitos com o modelo APSIM tem sido realizada na Austrália para avaliar o risco climático e o aproveitamento dos recursos hídricos na produção de grãos (MEINKE et al., 2001). O efeito da seca e das condições do El Niño na produção de cereais foi estudado para gerar recomendações que auxiliem os produtores na tomada de decisão, levando em consideração, inclusive, a rentabilidade das explorações. Neste caso, a estratégia é de manejar culturas em grandes áreas com poucos recursos e alta variabilidade climática. Estudo semelhante foi realizado com agricultores do Uruguai para avaliar o efeito na produção e planejar os plantios em anos de El Niño, La Niña e neutro. O modelo DSSAT foi empregado para adaptar práticas de manejo para conviver com estas anomalias climáticas. Como na Austrália, no Uruguai, cultivam-se grandes áreas com baixo nível de insumos. Alberto et al. (2006) empregaram modelos determinísticos para avaliar os efeitos do fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) na disponibilidade de água do solo para as culturas de trigo, milho e soja em Santa Maria, Rio Grande do Sul. A menor disponibilidade de água está relacionada com anos neutros, enquanto a maior com eventos El Niño. Anos La Niña são mais favoráveis à cultura de trigo, enquanto anos El Niño propiciam melhor rendimento das culturas de milho e soja. Anos neutros são de maior risco de perda de rendimento para as culturas de verão de milho e soja em consequência da menor disponibilidade de água no solo.

Secas ou instabilidades climáticas ocorrem em várias partes do mundo. O entendimento da ocorrência de secas e seus efeitos nas culturas são essenciais para o desenvolvimento de estratégias de cultivo, como data de semeadura, população de plantas e adubação, que minimizem os seus efeitos. Como as interações entre planta, solo e clima são complexas, modelos podem ser empregados para estudar abordagens estratégicas (de longo prazo) e táticas (curto prazo – na estação de cultivo) para convivência com este tipo de problema (SINGH; SRINIVAS, 2007). A

abordagem estratégica compreende três etapas: 1 – a caracterização do risco climático e da vulnerabilidade da região para se conviver com a seca. Além da chuva, deve-se levar em consideração a capacidade de retenção de água do solo e outros elementos climáticos que afetam o crescimento das culturas, como a temperatura do ar; 2 – a otimização do manejo das culturas em função da disponibilidade hídrica; 3 – a identificação de culturas e sistemas de produção com alta probabilidade de sucesso. Os autores demonstraram a utilização da modelagem para avaliar o risco envolvido na produção de soja em algumas regiões da Índia e indicaram as melhores estratégias para cada região.

Uma vez calibrados e validados, modelos podem ser empregados para ajustar o manejo cultural visando a obter produtividades ótimas em um ambiente de risco climático. Variedades com diferentes ciclos podem ser selecionadas, bem como população de plantas, espaçamento, resposta ao manejo de nitrogênio e à irrigação, além da data de semeadura, procurando-se as opções que permitam um aproveitamento melhor da umidade do solo. Singh e Srinivas (2007) empregaram a modelagem para otimizar data de plantio, população de plantas, doses de nitrogênio para vários sistemas de produção envolvendo a cultura do milho de sequeiro e irrigado na Índia. Os sistemas estudados consistiram na combinação da sucessão de soja, grão-de-bico e milho. Neste estudo, a sucessão de milho com grão-de-bico é a que produziu mais. Entretanto, a combinação de soja com grão-de-bico é a que proporcionou maior retorno econômico.

A modelagem pode ser empregada também de forma tática, na qual as decisões são tomadas durante a estação ou ciclo da cultura. Em geral, os modelos são alimentados com dados prognosticados e, à medida que o tempo passa, dados prognosticados são substituídos por dados observados. Desta forma, é possível utilizar as simulações para auxiliar na tomada de decisões. Singh e Srinivas (2007) usaram esta técnica na Índia para recomendar adubações nitrogenadas, visando a reduzir a lixiviação em anos muito chuvosos, para gerar mapas de prognósticos de umidade do solo, para analisar o efeito do início da estação chuvosa no

desempenho das culturas e para avaliar os efeitos, no desempenho das culturas, das anomalias climáticas decorrentes do fenômeno El Niño. Este tipo de estudo dá uma indicação das estratégias que devem ser tomadas para se tirar o melhor proveito das condições climáticas e também para se conviver com adversidades, como antecipação ou atraso no período das chuvas.

No cinturão oeste do milho dos Estados Unidos, a cultura é produzida tanto de sequeiro quanto irrigada. Dados de 20 anos de clima, de 18 locais e modelos de simulação e de correlação foram empregados para avaliar as limitações na produtividade de milho dessa região. Identificaram-se gradientes geoespaciais para radiação solar, temperatura, chuva e demanda evaporativa sazonal. A produtividade potencial com irrigação não exibiu nenhum padrão geoespacial, dependendo, ao contrário, do regime de radiação e temperatura específico para cada local e sua interação com a fenologia da cultura. Respostas lineares e parabólicas, para o efeito da radiação solar acumulada e temperatura média após florescimento, na produtividade foram observadas. A produtividade de sequeiro seguiu o gradiente longitudinal observado na precipitação sazonal e demanda evaporativa. Os cultivos de sequeiro no oeste dos EUA estão sujeitos a veranicos que podem ocorrer próximo e após o florescimento. Ter umidade inicial do solo adequada ajuda, mas não elimina os efeitos do estresse hídrico (GRASSINI et al., 2009).

A capacidade de prognosticar a colheita de certa cultura é importante para o agronegócio e para a segurança alimentar das populações. O uso de modelo com dados de clima prognosticados pode ser uma ferramenta interessante para se fazer a previsão de colheita. Dados observados são empregados no modelo até a data do prognóstico e os demais dados, até o final do ciclo da cultura, são prognosticados a partir de dados históricos, empregando-se geradores estatísticos de clima. Em geral, empregam-se várias séries sintéticas de dados de clima, permitindo que se obtenha no final uma média de produtividade e um intervalo de confiança. Para datas de prognósticos do começo do ciclo da cultura, os intervalos de confiança

são grandes. À medida que dados prognosticados são substituídos por dados reais, o intervalo de confiança diminui e a previsão da safra fica mais correta (THORNTON; WILKENS, 1998). Os autores mostraram um exemplo para milheto na África e demonstraram que a colheita pode ser predita com antecedência suficiente para que se tomem providências de abastecimento, por exemplo.

Em termos de Brasil, o modelo CERES-Maize foi utilizado para fazer a previsão de safra de milho no período de safrinha em Piracicaba, São Paulo. Dados de uma série histórica diária foram sendo gradativamente substituídos por dados diários observados no ano de 2002. O modelo foi capaz de fornecer uma previsão de safra aproximadamente 45 dias antes da colheita para todos os híbridos testados. Os resultados se mostraram promissores para agricultores e tomadores de decisão, uma vez que eles poderiam ter acesso a informações acuradas da colheita antes do final da safra (SOLER et al., 2007).

Uma das maiores limitações para aplicação dos modelos de culturas em análises de risco climático e previsão de safras está na obtenção de dados representativos das condições reinantes nas unidades de simulação. Mesmo em países desenvolvidos, onde há facilidade de análises diversas, observa-se que dados regionais representativos das fazendas são difíceis de serem obtidos. Em estudo realizado com o modelo WOFOST na Europa, observou-se discrepância em valores observados e simulados, estando estas discrepâncias relacionadas principalmente ao uso ou não de irrigação e ao tamanho da propriedade (REIDSMA et al., 2009).

## **Aplicação na análise da sustentabilidade de sistemas de sucessão de culturas**

A modelagem pode ser empregada para avaliar a resposta de certo sistema ao ambiente e a fatores de manejo a longo prazo. O modelo DSSAT permite simular certa sequência de cultivos para qualquer número

de anos e avaliar a sustentabilidade empregando dados de clima medidos ou gerados (BOWEN et al., 1998). Dados de saída de uma cultura tornam-se dados de entrada de outra. Normalmente, os usuários não estão interessados em diferenças diárias, mas sim em tendências no final do ciclo das culturas, como produtividade, nitrogênio extraído e nível de carbono orgânico no solo. Uma simulação pode apontar a tendência de queda na produtividade de uma cultura com o tempo, indicando que o sistema de produção não é sustentável. Vários exemplos bem sucedidos de aplicação do modelo DSSAT foram descritos pelos autores, incluindo o uso de adubação verde antes do plantio de milho no Cerrado do Brasil. As limitações na aplicação deste procedimento estão relacionadas com processos que ocorrem no solo e ainda não são bem descritos pelos modelos, como, por exemplo, o plantio direto e a decomposição da palhada deixada na superfície.

## **Aplicação em estudos de variabilidade espacial e em manejo sítio-específico**

Um grande desafio com que muitos agricultores se deparam é a tomada de decisão para cultivo em áreas ou glebas com características diferentes. Tais diferenças podem ser de atributos do solo, clima, manejo da cultura ou da fertilização. As questões básicas são: o que plantar, onde, com que cultivar e com que nível tecnológico, quais as implicações na rentabilidade e no ambiente e como manejar a área, como única ou considerando as diferenças entre elas? Modelos de culturas podem ser empregados para ajudar agricultores a decidirem que cultura plantar, em que campo ou em que parte do campo, qual a rentabilidade esperada, qual o risco de lixiviação de nitrogênio, quais práticas devem ser melhoradas. A escala de aplicação ou unidade de simulação pode também variar deste uma quadrícula (*grid*) de uma gleba até uma região para a qual pretende-se estudar alternativas de cultivo, levando em consideração vários fatores que

afetam a composição de custos e preços de produtos. Em geral, utilizam-se os modelos junto com sistemas de informação geográfica para gerar mapas. A aplicação desta técnica pressupõe que cada unidade de simulação seja homogênea, com as mesmas condições de solo, clima e também as mesmas condições iniciais e de manejo cultural. Cada campo é tratado individualmente, mas o que interessa é a variabilidade entre os campos e o resultado final de vários campos. O maior problema neste tipo de aplicação é a obtenção dos dados de entrada dos modelos, requerendo, muitas vezes, a interpolação e o prognóstico de dados. Ferramentas de sensoriamento remoto podem ser utilizadas para auxiliar na definição de áreas homogêneas, na obtenção de alguns dados de entrada dos modelos e na assimilação de dados para dentro dos modelos, especialmente para validação dos mesmos (LEENHARDT et al., 2006).

Em estudo realizado por Cora et al. (1999), o modelo CERES-Maize demonstrou ser uma ferramenta interessante para estimar a variabilidade espacial da produtividade de milho. Na calibração, a produtividade foi simulada com 2% de acurácia. Para o ano de 1995, o modelo simulou muito bem a produtividade ( $r^2 = 0,85$ ), com diferenças em torno de 300 kg ha<sup>-1</sup>. Para 1996, o modelo subestimou a produtividade por não considerar fluxos horizontais de água e a contribuição do lençol freático. Sob condições não estressantes, o modelo simulou bem a produtividade média, mas subestimou a variabilidade da produtividade. Em outra pesquisa, o mesmo modelo foi empregado com dados históricos de clima para estudar a variabilidade e definir estratégias de manejo de milho e soja (SEIDL et al., 1999). Conseguiu-se explicar 59% e 68% da variabilidade da produtividade de milho e soja, respectivamente. Os resultados indicaram que a população ótima variou de ano para ano e entre quadrículas. A análise permitiu recomendar uma população menor em áreas de topo, mais secas e populações maiores nas encostas e baixadas.

Em se tratando de manejo de nitrogênio, a dose ótima para cada quadrícula depende da predição acurada da produtividade de milho e da resposta da cultura a este fertilizante. Em um trabalho realizado por Paz et

al. (1999), é demonstrada a utilização do modelo Ceres-Maize para a realização deste tipo de análise. O modelo foi calibrado com três anos de dados de 224 quadrículas de uma área de 16 hectares e simulou bem a produtividade de milho ao longo de transversais, explicando aproximadamente 57% da variabilidade. Posteriormente, utilizou-se o modelo para otimizar a dose de nitrogênio que maximizasse o retorno econômico líquido para cada local. Foram empregados 22 anos de dados históricos de clima. Os resultados demonstraram alta distribuição espacial das recomendações de nitrogênio ao longo do campo. O manejo de N por quadrículas empregou menos nitrogênio na lavoura, proporcionou maior produtividade e maior renda do que o manejo baseado nas transversais ou no campo todo (única dose).

Em um trabalho realizado no Brasil, o modelo CERES-Maize foi calibrado e empregado para avaliar a aplicabilidade desta ferramenta em estudos de agricultura de precisão. O modelo se mostrou útil para determinar o potencial produtivo das diferentes glebas de um pivô central. As diferenças nas produtividades simuladas foram decorrentes das interações entre as condições do solo e do manejo da cultura com o clima, mascarando, desta forma, o que se esperava de efeito da variabilidade espacial do solo. A adubação nitrogenada ótima econômica foi de 100 kg ha<sup>-1</sup> para uma das glebas do pivô e uma dose menor para a outra, indicando a recomendação para o manejo sítio-específico neste caso. Concluiu-se que a modelagem é mais útil quando os contrastes entre as glebas ou quadrículas são grandes, pois o modelo não é capaz de capturar pequenas diferenças de solo e manejo (SANTOS; PRADO, 2002).

Uma das vantagens de utilizar técnicas de manejo sítio-específico está na possibilidade de minimizar a lixiviação de nitrogênio (N), aplicando na lavoura doses diferenciadas de fertilizantes, empregando, para tal, distribuidores a taxa variável. Entretanto, a resposta da cultura, a eficácia na redução da lixiviação e mesmo a rentabilidade esperada podem ser previamente estudadas mediante simulações. Utilizam-se, normalmente, séries históricas de dados climáticos e simulam-se diferentes doses de N

para, então, selecionar aquela que promove melhor produtividade ou menor lixiviação. Há necessidade, todavia, de um grande número de parâmetros que podem ser obtidos via sensoriamento remoto. A assimilação deste tipo de dado para dentro dos modelos de culturas melhora a simulação, como foi demonstrado em trabalho feito por Guérif et al. (2006).

## **Aplicação no planejamento de uso da terra e dos recursos naturais**

A pressão para produzir mais alimentos, por um lado, e para preservar o ambiente, por outro, tem levado a muitos conflitos no meio rural e também entre os formuladores de políticas públicas. Nos países desenvolvidos, a disponibilidade de novas terras para uso na agricultura é praticamente inexistente, enquanto em países emergentes, como Brasil e Índia, há ainda espaço para alguma expansão e, sobretudo, para aumento da produtividade das áreas já incorporadas ao processo produtivo. No caso do milho no Brasil, existe um grande potencial para aumento da produção sem abertura de novas áreas, sobretudo na região amazônica. Modelagem é uma ferramenta que pode ser empregada para estudar este tipo de questão e ajudar na formulação de políticas que permitam o aumento da produção de alimentos com menor impacto ao ambiente.

O planejamento do uso da terra e dos recursos naturais está relacionado com a avaliação do desempenho da terra para algum propósito, no caso específico, para o uso agrícola (BEINROTH et al., 1998). O modelo DSSAT foi acoplado a um sistema de informações geográficas (SIG), proporcionando ao usuário uma interface (AEGIS) que facilita a geração de mapas. Este sistema foi empregado em algumas regiões para estudos e planejamento da exploração agrícola. Em um estudo realizado em Porto Rico, foram simulados cenários de manejo envolvendo culturas, variedades, datas de semeadura, irrigação e fertilização nitrogenada.

Áreas anteriormente utilizadas com cana-de-açúcar deveriam ser empregadas com outras culturas e o impacto ao ambiente avaliado. Mapas de produtividade, de fitomassa, de enxurrada e de lixiviação de nitrato foram gerados. O cultivo de tomate, seguido de outra cultura, demonstrou ser o mais rentável e com potencial para reduzir o risco de erosão e de lixiviação de nitrato, em comparação com vários outros cenários de sucessão de culturas. Em outro exemplo, empregou-se o AEGIS para avaliar o uso de água em uma bacia hidrográfica na Colômbia, indicando a variabilidade do uso da água pela cultura do feijão e a redução esperada na vazão do rio.

O Cerrado brasileiro apresenta um grande potencial para a produção agropecuária, com condição de produzir mais de 200 milhões de toneladas de grãos, 12 milhões de toneladas de carne e 90 milhões de toneladas de produtos de culturas perenes (MACEDO, 1995). Entretanto, as produtividades observadas estão ainda muito aquém do potencial que se espera para esta região. Uma das razões para tal discrepância é a ocorrência de instabilidades climáticas, sobretudo veranicos, que, associados a altas taxas de evapotranspiração, baixa capacidade de retenção de água e barreiras químicas presentes nos solos que limitam o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, podem causar severas quebras de produtividade das principais culturas. A produção de milho na região do Triângulo Mineiro foi estudada por Alves e Nortcliff (2000), que observaram diferenças na produção potencial (sem estresse de água e fertilizantes) e de sequeiro entre as cidades da região. O trabalho apontou a necessidade de incorporar este tipo de informação quando da análise de propostas para solicitação de crédito agrícola. Alguns locais apresentam um maior risco climático do que outros e necessitam ter tratamento diferenciado da instituição de crédito agrícola.

## **Aplicação na genética e melhoramento e na análise da interação genótipo x ambiente**

O melhoramento de plantas é um processo de otimização, no qual o melhorista integra conhecimentos de diversas áreas. Modelos de cultura podem ajudar neste processo através da integração de conhecimentos de fisiologia, bioquímica, práticas agronômicas, ambiente e genética. Dentre as diversas formas de aplicação de modelos no suporte ao melhoramento vegetal, destacam-se: 1 - caracterização ambiental para teste de genótipos; 2 - avaliação de características putativas (não comprovadas) específicas para o desenvolvimento (projeto) de tipos melhorados de plantas; 3 - análise da resposta de genótipos-sonda para melhoria da interpretação de resultados de ensaios multiambiente; 4 - otimização da combinação de genótipos e manejo para ambientes-alvo (SHORTER et al. 1991; COOPER; HAMMER, 1996 citados por MESSINA et al., 2006).

A aplicação mais objetiva da modelagem em melhoramento de plantas é, todavia, a análise de interação genótipo x ambiente (GxA). A variação do desempenho de cultivares entre ambientes usualmente força os melhoristas a avaliarem materiais promissores em múltiplos ambientes ou em múltiplas estações. Métodos estatísticos foram desenvolvidos para analisar as interações GxA. Uma das abordagens consiste em caracterizar cada ambiente com a média de produtividade de todos os materiais e empregar esta média como índice de produtividade para este local. Uma análise de regressão é, então, feita entre a produtividade individual das cultivares e os índices, de forma que a declividade da linha de regressão é interpretada como um indicador de estabilidade ou de responsividade de certa cultivar. Este procedimento recebe críticas, pois o índice viola regras estatísticas de independência e porque este índice é difícil de relacionar com fatores ambientais, como déficit hídrico ou estresse por temperatura. Modelos de simulação podem gerar estimativas independentes de produtividade para os vários sítios e permitem a avaliação dos efeitos de

fatores ambientais específicos. Analisando respostas a fatores como temperatura, fotoperíodo, umidade do solo ou nutrientes, pode-se identificar qual fator é o mais crítico ou qual mecanismo de adaptação está envolvido (WHITE, 1998). Alguns autores consideram que a análise da interação GxA pode ser melhorada com a utilização de modelagem, uma vez que uma ampla faixa de condições edafoclimáticas pode ser analisada (JEUFFROY et al., 2006).

Como os programas de melhoramento normalmente requerem a avaliação de genótipos em um grande número de ambientes, de forma que se tenha uma amostragem, a caracterização dos ambientes é crucial. Modelos de simulação podem ser empregados para caracterizar a população de ambientes-alvo, identificando variáveis do clima ou do solo que afetam o desempenho da cultura. A amostragem adequada dos ambientes onde os ensaios deverão ser conduzidos pode, então, ser melhorada. Ajudam também na análise de resultados de ensaios multiambiente, permitindo que se corrijam erros de amostragem inadequada, colocando pesos na hora de analisar os resultados (CHAPMAN et al., 2002, citados por MESSINA et al., 2006). Modelos permitem integrar os efeitos de solo, clima e manejo da cultura, facilitando a análise do desempenho da cultura. Heinemann et al. (2009) caracterizaram a região produtora de milho no estado de Goiás em função da deficiência hídrica para a safra e safrinha. Nesse estudo, foi determinada a tipologia e probabilidade de ocorrência dos diferentes padrões de deficiência hídrica na região. Para isso, utilizou-se a relação transpiração real/transpiração potencial, que é um resultado de saída do modelo de cultura para o milho (ECOTROP, 2009). Os autores observaram que a deficiência hídrica na safra das águas não é restrição para o desenvolvimento da cultura do milho. Entretanto, para o milho safrinha, a deficiência hídrica passa a ser uma restrição ao desenvolvimento e sua severidade é altamente relacionada com a data de semeadura. Quanto mais tarde a semeadura, maior é a severidade da deficiência hídrica. A fase de enchimento de grãos é a que apresenta a maior probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica. Além do mais, no

caso de pesquisas com estresse hídrico, modelos podem ser empregados para mapear os locais adequados para os estudos e as épocas mais prováveis de plantio para se obter o estresse no momento adequado.

Modelos de simulação podem ser empregados como parte de uma estratégia de melhoramento para avaliar o desempenho potencial de protótipos ou ideótipos de híbridos de milho em regiões-alvo com diferentes condições climáticas (PRECIADO-ORTIZ et al., 1995; JEUFFROY et al., 2006; MESSINA et al., 2006). Neste caso, características das plantas são combinadas para maximizar a produtividade de grãos. Em um trabalho realizado por Hammer et al. (1996) citados por Messina et al. (2006), os parâmetros do modelo foram variados para otimizar produtividade de grãos, permitindo, assim, identificar características que contribuem para o aumento da produção potencial, entre os quais, fotossíntese da folha, *stay green*, maior sincronismo na adição de frutos, período de enchimento de grãos maior, maior profundidade do sistema radicular e ajustamento osmótico no caso de seca. Os autores propuseram um método para gerar ideótipos que combina um modelo de crescimento com um algoritmo para otimizar características da cultura e do manejo para um certo ambiente. Em outro estudo, protótipos de genótipos de milho com diferentes requerimentos de somas térmicas para os períodos vegetativos e reprodutivos foram empregados com o modelo CERES-Maize para simular a produtividade potencial. As simulações indicaram que os protótipos de genótipos com período vegetativo curto e período reprodutivo longo produziram mais que os híbridos comerciais de controle. Estes resultados indicam que os melhoristas podem empregar este tipo de característica como critério de seleção para ambientes específicos (PRECIADO-ORTIZ et al., 1995). No Brasil, Soler et al. (2001) empregaram o mesmo modelo para avaliar o desempenho de protótipos de cultivares de milho de ciclo curto, médio e longo e com diferentes números de grãos por planta em cultivos de safrinha. Tanto de sequeiro, quanto sob irrigação e fertilização nitrogenada, os rendimentos mais elevados foram obtidos com genótipos de ciclo longo

e maior número de grãos por espiga. Vários outros exemplos são descritos na literatura e demonstram a utilização de modelos de simulação do crescimento de culturas como ferramenta de auxílio ao melhoramento, envolvendo a análise de interações de genótipos com clima, solo e diversas práticas de manejo da cultura (KOVACS; NEMETH, 1995; WHITE, 1998; JEUFFROY et al., 2006).

Algumas características da planta manipuladas pelos melhoristas são controladas por um único gene, mas a maioria do esforço de melhoramento lida com características controladas por diversos genes. O fenótipo de uma cultura é resultado do genótipo (G), do ambiente (A) e da interação GxA. Com o advento dos marcadores moleculares, permitiu-se separar características complexas pelo uso de marcadores moleculares e de *quantitative trait loci* (QTL). Desta forma, a resposta fenotípica pode ser estimada por um modelo linear que soma a contribuição de cada alelo e seu QTL correspondente, o efeito do ambiente e as interações entre alelos e ambiente. Todavia, muitos efeitos fisiológicos são fortemente não-lineares. Messina et al. (2006) mostram a integração de informações de marcadores moleculares com modelos de crescimento de culturas mediante o uso de um modelo linear simples. Esta abordagem constitui-se em um grande avanço, pois, em tese, podem-se obter alguns coeficientes genéticos utilizados nos modelos de culturas através de análises de marcadores moleculares ou QTLs. Entretanto, as pesquisas ainda necessitam avançar nesta linha para obter resultados práticos (JEUFFROY et al., 2006).

O melhoramento tem feito grande esforço para identificar grupo de características as quais os melhoristas podem selecionar para aumentar a produtividade das culturas indiretamente. Com modelos de simulação, os efeitos das características poderiam ser acessados através da análise de sensibilidade, em que os coeficientes referentes às características são variados e os efeitos no crescimento ou produtividade avaliados. White (1998) cita vários exemplos de aplicação, mas aponta limitações. Os modelos variam grandemente no nível de detalhes usados para

representar diferenças genéticas entre espécies e cultivares. Alguns nem consideram estas diferenças (JEUFFROY et al., 2006). Como a base do melhoramento está na variabilidade genética, falha na representação dessas variações genéticas limita o uso de modelos. Os modelos DSSAT são de uma categoria que separam cultivares empregando-se “coeficientes genéticos”. Todavia, esses não estão diretamente associados a alguma característica das cultivares. São obtidos pela iteração entre valores medidos e simulados. Alguns coeficientes gerados para um local não funcionam bem para outros.

Não há dúvidas quanto ao potencial de aplicação de modelos de culturas como auxílio ao melhoramento de plantas. O grande desafio, todavia, está no estabelecimento de uma base de dados de clima, solos e cultura capaz de atender às necessidades de parametrização dos modelos de crescimento e das análises das interações GxA. O número de cultivares de milho que são lançadas anualmente é grande, demandando um enorme trabalho para a obtenção dos dados necessários. O máximo possível de dados de ensaios de melhoramento deve ser coletado e um algoritmo de otimização pode ser empregado para parametrização do modelo. A assimilação de dados de marcadores moleculares ou de QTLs poderá, no futuro, facilitar este trabalho (JEUFFROY et al., 2006).

## **Aplicação na simulação do efeito de pragas, doenças e plantas daninhas**

Em se tratando de pragas ou doenças, as ferramentas de suporte à decisão podem ser desde uma regra simples que utiliza relações empíricas, alguns dados de campo e uma calculadora, até *softwares* de otimização com múltiplos critérios (TENG et al., 1998). Uma forma mais aplicável seria um sistema de computador interativo que utiliza modelos de simulação de culturas, base de dados e algoritmos de decisão, agrupados de forma integrada. O ponto central no processo de decisão em manejo de

pragas e doenças é a informação sobre o efeito que certa população de praga ou doença causa no produto econômico da cultura. Este efeito tem que levar em consideração o estágio de desenvolvimento da cultura, condições climáticas, potencial de produção do genótipo e habilidade do genótipo em compensar o dano. Estes mesmos autores descrevem com detalhes os conceitos envolvidos na modelagem dinâmica de populações de insetos, doenças e plantas daninhas (pestes), os métodos para quantificar a dinâmica das pestes e os modelos matemáticos mais empregados. Citam exemplos de modelos integrados de crescimento de culturas e dinâmica de pestes, incluindo os modelos do sistema DSSAT. Os principais avanços nesta linha foram realizados no modelo de simulação de crescimento e dinâmica de pestes para a cultura do arroz.

Em um estudo realizado por Retta et al. (1991), alguns modelos que incorporam a simulação de pestes foram avaliados para acessar o impacto da infestação de sorgo selvagem (*Sorghum bicolor*) e da broca europeia do milho (*Ostrinia nubilalis*) na produtividade e crescimento do milho. Compararam-se dados de índice de área foliar, fitomassa total e de grãos e componentes de colheita de milho. O modelo CERES-Maize, modificado para computar fenologia e crescimento de folhas, proporcionou previsões mais acuradas da data de florescimento do que os outros modelos e se mostrou sensível às reduções de luz e de água causadas pela competição de plantas daninhas e insetos.

A aplicação de modelos de culturas pode ser feita para auxiliar em decisão estratégica e tática. Decisão estratégica é aquela baseada em um tempo mais longo, tentando responder questões do tipo: que cultivar deve ser plantado na próxima estação em resposta a um surto de praga ou doença que ocorreu na estação passada. Decisão tática é baseada no curto prazo, do tipo: quando e se é econômico aplicar certo fungicida em uma lavoura.

## Aplicação nos estudos de mudanças climáticas

Cientistas preveem substancial aquecimento global nas próximas décadas como consequência do aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, entre os quais, dióxido de carbono. O regime hidrológico também deverá sofrer mudanças. Apesar dos avanços tecnológicos, como variedades melhoradas e irrigação, o clima ainda é o fator preponderante na produtividade das culturas. Existem hoje modelos de circulação global ou modelos de circulação regional que permitem a projeção para o futuro de dados das variáveis de clima, a partir da perturbação de dados de séries históricas. Da mesma forma, existem modelos de simulação que podem ser empregados para avaliar o efeito das mudanças climáticas (concentração de CO<sub>2</sub>, aumento de temperatura e precipitação) na produtividade das culturas e também estudar mecanismos de adaptação, como, por exemplo, usar ou não irrigação, novas datas de plantio, novas cultivares, população, espaçamento, entre outros (ROSENZWEIG; IGLESIAS, 1998).

O sistema DSSAT, juntamente com modelos de circulação, foram empregados para avaliar o efeito no desempenho das culturas de arroz, trigo, milho e soja, com consequências de alterações na temperatura, concentração de CO<sub>2</sub> e precipitação. De uma forma geral, os estudos indicaram que haverá aumento da produtividade das culturas em locais de altas latitudes e redução naqueles de baixa latitude. O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> incrementa a taxa de fotossíntese líquida (fotossíntese total menos respiração) e reduz a abertura estomatal de algumas plantas, reduzindo assim a transpiração por unidade de área foliar. Entretanto, a evapotranspiração sazonal poderá não alterar ou mesmo aumentar, devido ao aumento da área foliar. Em geral, tem-se um aumento da eficiência de uso da água. Um aumento de 2 °C na temperatura do ar favoreceu a produtividade de trigo, arroz, soja e milho no mundo, enquanto um aumento de 4 °C reduziu o rendimento

principalmente do arroz. O aumento de CO<sub>2</sub> compensou o aumento da temperatura para a maioria das culturas. Observou-se o encurtamento do ciclo, sobretudo no período de enchimento de grãos, e a redução na disponibilidade de água, devido ao aumento da evapotranspiração, à maior perda da umidade do solo e, em alguns casos, redução da precipitação, como no Brasil. No Brasil, haverá redução considerável da produtividade das culturas, que deverá ser compensada pelo aumento em outras regiões de maior latitude, onde o aumento da temperatura e da concentração de CO<sub>2</sub> será benéfico (ROSENZWEIG; IGLESIAS, 1998).

Como forma de adaptação das culturas às mudanças climáticas, pode-se plantar mais cedo para evitar altas temperaturas ou, mais tarde, em alguns países. As simulações demonstraram um aumento do requerimento de água e da necessidade de irrigação da maioria das culturas. Em alguns casos, o aumento do uso de nitrogênio pode compensar os efeitos das mudanças climáticas. Ocorrerão mudanças na distribuição geográfica das culturas. Algumas migrarão para latitudes maiores para fugirem de altas temperaturas. O estudo concluiu que o efeito do aumento de CO<sub>2</sub> afetará as culturas de forma diferente nas diversas regiões do globo. Regiões da latitude média a alta serão menos drasticamente afetadas. Os benefícios virão do incremento da produtividade de algumas culturas em decorrência do aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, embora o milho aproveite menos esta condição. Os malefícios principais advêm do encurtamento do ciclo, da menor disponibilidade de água devido ao aumento da evapotranspiração das culturas e também do efeito na vernalização de cereais de inverno. A adaptação do manejo da cultura, como data de plantio, cultivares, adubação, beneficiará mais os países desenvolvidos. Pesquisas deverão abordar questões mais estratégicas dos países para enfrentarem reduções nas colheitas, com estudos de adaptações mais detalhados e regionalizados, programas de melhoramento voltados para estresse de calor e de seca, manutenção e aumento de banco de germoplasmas e melhoria do sistema de monitoramento do clima, da umidade do solo e de requerimento de nutrientes das culturas, além de

infestação por pragas e doenças (ROSENZWEIG; IGLESIAS, 1998).

Para as condições do Brasil, Siqueira et al. (1994) simularam a produtividade de cultivares de trigo, milho e soja em vários locais no país. Dados históricos de clima (22 anos) foram empregados para gerar cenários de mudanças climáticas. As simulações foram realizadas com dados de concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera variando de 330 a 555 ppm. O ciclo e a produtividade de trigo e de milho seriam reduzidos com o aquecimento global, mas a soja seria beneficiada pelas maiores concentrações de CO<sub>2</sub>. A redução na produção nacional seria de 1,2 e 3,5 milhões de toneladas, respectivamente, para trigo e milho. A soja aumentaria em 2,8 milhões de toneladas. Regiões mais vulneráveis foram identificadas e modificações na irrigação, dose de nitrogênio e manejo que poderiam compensar as mudanças climáticas foram sugeridas.

Os impactos de mudanças climáticas globais e regionais, induzidas pelo maior efeito estufa e pelo desmatamento da Floresta Amazônica, foram avaliados em termos de efeito na fenologia e produtividade de milho. Utilizou-se o modelo CERES-Maize. Os cenários de efeito estufa assumiram: (a) - aumento de temperatura e chuva e redução da insolação, (b) - aumento da temperatura e radiação solar e redução das chuvas. O efeito estufa causado pelo aumento de CO<sub>2</sub> provocou redução na produtividade das cultivares nos três locais estudados, enquanto o efeito estufa causado pelo desmatamento da floresta teve pouco efeito. O maior efeito do aumento da temperatura está na redução do período de enchimento de grãos. O aumento da precipitação não causou efeito na produtividade, pois os locais têm precipitação adequada. Não se avaliaram os efeitos negativos do excesso de chuva na cultura. O aumento da luminosidade causou aumento da produtividade e compensou o decréscimo devido ao aumento da temperatura (MAYTÍN et al., 1995).

Utilizaram-se modelos de circulação global e o modelo CERES-Maize para avaliar o efeito potencial das mudanças climáticas na produção de milho no Zimbábue. Os cenários estudados sugerem que a produtividade de milho irá decrescer drasticamente em condições de sequeiro e irrigado em

algumas das regiões produtoras. As reduções se devem, principalmente, ao aumento da temperatura do ar, que causa encurtamento do período de crescimento da cultura, especialmente o período de enchimento de grãos. Se as mudanças climáticas se concretizarem, os agricultores poderão considerar a atividade de produção extremamente de alto risco. Adaptações podem estar disponíveis, mas os custos poderão ser proibitivos para os pequenos produtores (MAKADHO, 1996).

Em estudos realizados na Espanha utilizando o modelo CERES-Maize para avaliar o impacto potencial das mudanças climáticas em cinco regiões produtoras de milho, constataram que os efeitos dependem da severidade das alterações e do efeito fisiológico do aumento do CO<sub>2</sub> na cultura. Todavia, as simulações realizadas empregando as práticas correntes de manejo da cultura indicam que a produtividade provavelmente deverá decrescer em todas as áreas de produção, devido ao encurtamento do ciclo, decorrente do aumento da temperatura. O uso de cultivares com ciclo mais longo e a semeadura mais cedo compensaram os efeitos em apenas duas regiões. Sugere-se que os altos custos de produção e limitação de água para irrigação poderão forçar ao abandono da produção de milho em algumas das regiões (IGLESIAS; MINGUEZ, 1995). Neste mesmo estudo, observou-se que as taxas de evapotranspiração deverão aumentar ao longo da maior parte do ciclo das culturas, em todos os locais, devido ao aumento da temperatura. Entretanto, o requerimento de água projetado no ciclo variou de -17 a +18% (IGLESIAS et al., 1994).

Simulações do efeito do aumento da temperatura e concentração de CO<sub>2</sub> no desempenho das culturas de trigo, milho e soja foram realizadas para Santa Maria, no Rio Grande do Sul, empregando-se modelos mecanísticos e 100 anos de dados de clima sintéticos (STRECK; ALBERTO, 2006a). O rendimento dessas culturas será afetado pelas mudanças climáticas, podendo o efeito benéfico do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> ser anulado pelo efeito do aumento da temperatura, que encurta o ciclo das culturas e pode induzir também deficiência hídrica. A fração da água disponível no solo deverá diminuir devido ao aumento da temperatura e da

concentração de CO<sub>2</sub>, sendo que o efeito será mais acentuado nas culturas de verão de soja e milho (STRECK; ALBERTO, 2006b).

## **Aplicação como ferramenta de educação e transferência de tecnologia**

Embora com poucos exemplos de aplicação bem sucedida, acredita-se que os modelos de crescimento de culturas são ferramentas de grande potencial para a educação à distância. Em um curso básico de produção de grãos na Costa Rica, o sistema DSSAT foi empregado para os estudantes desenvolverem o senso de visão integrada dos sistemas de produção e avaliarem o efeito das interações dos fatores que afetam a produtividade das culturas (ORTIZ, 1998).

A ferramenta educacional denominada *N-Show* é um programa de computador que produz uma representação gráfica dinâmica dos resultados gerados pelo modelo CERES-Maize. O programa permite ao usuário observar e comparar os resultados de várias rodadas do modelo, o qual foi selecionado para demonstrar o efeito do tipo de solo e dose de nitrogênio na lixiviação de nitrato. O *N-Show* mostra gráficos dinâmicos do conteúdo de água e nitrogênio inorgânico no solo, nitrogênio na planta e nitrogênio lixiviado. Uma característica única do *N-Show* é a de permitir que o usuário mova o gráfico para frente e para trás no tempo, permitindo, assim, a análise dos eventos que ocorrem em tempos específicos. O *N-Show* pode ser usado em cursos de solos e fitotecnia, em âmbito de graduação e no treinamento de extensionistas e agricultores (CABRERA, 1994).

No Quênia, o modelo CERES-Maize foi utilizado para simular diferentes combinações de manejo da cultura do milho e demonstrar para os agricultores a importância de utilizarem insumos na lavoura. Os resultados das simulações foram também empregados para definir trabalhos de pesquisa. O uso do modelo permitiu também que os agricultores

tomassem decisões, levando em consideração as implicações econômicas da adoção da nova tecnologia (WAFULA, 1995).

## **Limitações dos modelos de crescimento de culturas**

Um grande esforço em termos de pesquisa foi feito para o desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão (SSD) com o objetivo de melhorar a capacidade dos produtores e seus consultores de tomarem decisões. Essas iniciativas têm sido estimuladas parcialmente pelo aumento da complexidade da produção primária induzido pela globalização, pela necessidade de produção sustentável e pelo aumento do volume e velocidade de troca de informações. Sistemas de suporte à decisão podem ajudar produtores a tomarem melhores decisões mediante a integração de informações de uma forma mais amigável, permitindo alterar os sistemas de produção, melhorar a habilidade de manejo e reduzir custos de produção. Apesar desses benefícios, a adoção de SSD por produtores tem sido limitada e questionada (MEINKE et al., 2001). As razões para tal incluem a falta de avaliação pelo usuário final antes e durante o processo de desenvolvimento do SSD, o fato de as saídas geradas pelo modelo não atenderem ao estilo do produtor, a complexidade necessária para operar o SSD, ou, ainda, a quantidade de dados de entrada necessários (NEWMAN et al., 1999).

Uma grande dificuldade na aplicação da maioria dos modelos é a necessidade de dados climáticos diários (JAGTAP et al., 1998), de preferência uma série histórica consistente com, pelo menos, 30 anos. Alia-se a isso a necessidade de dados do perfil do solo, incluindo retenção de água e informações de impedimento químico e físico, de dados fenológicos e de fitomassa das mais diversas cultivares disponíveis para os produtores em certa região ou país.

## Potencialidades de aplicação de modelos de simulação de culturas no Brasil

No que diz respeito à pesquisa científica, há amplas possibilidades de aplicação de modelos de simulação da cultura do milho, principalmente nas áreas de avaliação de interações genótipo x ambiente, caracterização de ambientes para instalação de ensaios, caracterização de seca, manejo de nitrogênio e de água, épocas de semeadura, avaliação de efeitos de mudanças climáticas no desempenho das culturas, entre outros. Com relação às questões ambientais, modelos de simulação podem ser empregados para avaliar riscos de lixiviação de nitrato, tanto em sistemas de produção que envolvam fertilização química quanto naqueles que empregam dejetos de animais. Uma vez devidamente calibrados, modelos de simulação poderão ser utilizados para avaliar cenários de manejo da cultura que possibilitem aumentar o estoque de carbono no solo, contribuindo, assim, para reduzir as emissões.

O zoneamento de risco climático poderá ser aprimorado com o emprego de modelos mais completos, que permitem a avaliação das diversas interações da cultura com o solo e com o clima, embora haja a necessidade da utilização de uma base de dados de clima e de solo mais complexa. Janelas de plantio, atreladas à probabilidade de quebra ou sucesso da safra, poderão ser melhor definidas.

Há grandes possibilidades de aplicação de modelos de simulação de culturas na transferência de tecnologia. Cenários de manejo da cultura podem ser facilmente simulados, demonstrando aos produtores o resultado, em termos de produção ou de rentabilidade, das interações que a cultura sofre com o solo e com o clima, ao longo do seu ciclo. Extensionistas e consultores podem utilizar modelos para comparar cultivares e avaliar os efeitos da correção do solo, da fertilização e da irrigação no desempenho e na rentabilidade da cultura.

Embora as academias estejam mais interessadas em treinar seus

estudantes no desenvolvimento de modelos, pacotes prontos podem ser empregados para capacitar alunos nas questões relacionadas à visão global e sistêmica dos processos, entre as quais, processos de produção de alimentos, efeitos de longo prazo no ambiente, no uso de insumos e na produtividade da cultura.

## Referências

- ALBERTO, C. M.; STRECK, N. A.; HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; MEDEIROS, S. L. P. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 7, p. 1067-1075, jul. 2006.
- ALVES, H. M. R.; NORTCLIFF, S. Assessing potential production of maize using simulation models for land evaluation in Brazil. **Soil Use and Management**, Oxford, n. 16, p. 49-55, 2000.
- ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; SILVA, D. F.; HEINEMANN, A. B.; GARCIA Y GARCIA, A.; HOOGENBOOM, G.; MAGALHÃES, P. C.; ARAUJO, S. G. A. Utilização do modelo CERES-maize como ferramenta na definição de estratégias de semeadura de milho: 1 - Sistema de produção de sequeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., 2009, Belo Horizonte. **Mudanças climáticas, recursos hídricos e energia para uma agricultura sustentável**: resumos. Belo Horizonte: SBA; Viçosa: UFV; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009a. 1 CD-ROM.
- ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; SILVA, D. F.; GARCIA Y GARCIA, A.; HOOGENBOOM, G.; GUIMARÃES, D. P.; OLIVEIRA, A. C.; SANTANA, C. B. Utilização do modelo CERES-maize como ferramenta na definição de estratégias de semeadura de milho: 2 - Sistema de produção irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., 2009, Belo Horizonte. **Mudanças climáticas, recursos hídricos e energia para uma agricultura sustentável**: resumos. Belo Horizonte: SBA; Viçosa: UFV; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009b. 1 CD-ROM.
- ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; SILVA, D. F.; GARCIA Y GARCIA, A.; HOOGENBOOM, G.; GUIMARÃES, D. P.; OLIVEIRA, A. C.; SANTANA, C. B. Utilização do modelo CERES-maize como ferramenta na definição de estratégias de semeadura de milho: 3 - Requerimento e produtividade da água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., 2009, Belo Horizonte. **Mudanças climáticas, recursos hídricos e energia para uma agricultura sustentável**: resumos. Belo Horizonte: SBA; Viçosa:

UFV; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009c. 1 CD-ROM.

ANDRADE, C. de L. T. de; BORGES JUNIOR, J. C. F.; LIMA, R. B. M.; OLIVEIRA, F. G. de; FERREIRA, P. A.; EGÍDIO, M.A. R.; CUNHA, L. de M. V. da; DYKSTRA, M. P. **Avaliação de estratégias de produção em agricultura irrigada no perímetro de irrigação do Gorutuba**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. 105 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 73).

ATTANANDANA, T.; SUWANNARAT, C.; VEARASILP, T.; KONGTON, S.; MEESAWAT, R.; BOONAMPOL, P.; SOITONG, K.; CHAROENSAKSIRI, A.; TASNEE, A.; CHAIRERK, S.; TAWEESEK, V.; SAHASCHAI, K.; RING, M.; PRADIT, B.; KUKIAT, S.; ARUNEE, C. Nitrogen fertilizer recommendation for grain yield of corn using a modeling approach. **Thai Journal of Agricultural Science**, v. 32, n. 1, p.73-83, 1999.

BEINROTH, F. H.; JONES, J. W.; KANAPP, E. B.; PAPAJORGJI, P.; LUYTEN, J. Evaluation of land resources using crop models and GIS. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORTHON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. London: Kluwer, 1998. p. 293-311.

BERGEZ, J. E.; GARCIA, F.; WALLACH, D. Representing and optimizing management decisions with crop models. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 173-208.

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; FERREIRA, P. A.; HEDEN-DUNKHORST, B.; ANDRADE, C. L. T. Modelo computacional para suporte à decisão em áreas irrigadas. Parte I: desenvolvimento e análise de sensibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n.1, p. 13-11, 2008.

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; ANDRADE, C. L. T.; FERREIRA, P. A. Avaliação de estratégias de produção em agricultura irrigada no perímetro de irrigação do Jaíba. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 72 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 69).

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; FERREIRA, P. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA JÚNIOR, A. G. Sistemas de drenagem agrícola. Parte I: desenvolvimento do modelo e análise de sensibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3. p. 369-375, 2001.

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, v. 85, n. 1, p. 153-159, 1993.

BOWEN, W. T.; THORNTON, P. K.; HOOGENBOOM, G. The simulation of cropping sequences using DSSAT. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. London: Kluwer, 1998. p. 313-327.

BOWEN, W. T.; BAETHGEN, W. E. Simulation as a tool for improving nitrogen management. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. London: Kluwer, 1998. p.189-204.

BRISSON, N.; WERY, J.; BOOTE, K. Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 257-280.

CABRERA, M. L. N-Show: an educational computer program that displays dynamic graphs of nitrogen in soil. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, Madison, v. 23, n. 1, p. 43-45, 1994.

CAI, X.; MCKINNEY, D. C.; LASDON, L. S. Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Austin, v. 129, n. 1, p. 4-17, 2003.

CARDOSO, C. O.; FARIA, R. T.; FOLEGATTI, M. V. Simulação do rendimento e risco climáticos para o milho safrinha em Londrina-PR, utilizando o modelo CERES-Maize. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 291-300, 2004a.

CARDOSO, C. O.; FARIA, R. T.; FOLEGATTI, M. V. Aplicação do modelo CERES-Maize na análise de estratégias de irrigação para milho “safrinha” em Londrina-PR. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 37-45, 2004b.

CORA, J. E.; PIERCE, F. J.; BASSO, B.; RITCHIE, J. T. Simulation of within field variability of corn yield with CERES-Maize model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, Minnesota. **Proceedings...** Madison: ASA, 1999. p. 1309-1319.

CARDOSO, C. O.; SOCCOL, O. J. Corn performance with late sowing in planalto catarinense, Brazil, simulated with CERES-Maize model. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 51, n. 4, p. 655-664, 2008.

ECOTROP: plateforme ECOTROP (anciennement Sarrah). Montpellier: CIRAD, [2009?]. Disponível em: <<http://ecotrop.cirad.fr/index.php.pgr/votes/Ecobio/Ecobio/index.php?Repertoire=Sarrah>>. Acesso em: 17 out. 2009.

FANG, Q.; MA, L.; YU, Q.; AHUJA, L. R.; MALONE, R. W.; HOOGENBOOM, G. Irrigation strategies to improve water use efficiency of wheat-maize double cropping systems in North China Plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, 2009. No prelo.

FERREIRA, P. A.; GARCIA, G. O.; MATOS, A. T.; RUIZ, H. A.; BORGES JÚNIOR, J. C. F. Transporte no solo de solutos presentes na água residuária de café conilon. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 1, p. 29-35, 2006.

FREITAS, P. S. L.; MANTOVANI, E. C.; REZENDE, R.; GONÇALVES, A. C. A.; BERTONHA, A. Análise econômica de lâminas de água e de doses de nitrogênio, na cultura do milho, *Zea mays* L., utilizando o modelo CERES-Maize. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1139-1147, 2001.

FREITAS, P. S. L.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Simulação da produtividade do milho pelo modelo CERES-Maize em função

da lâmina e da uniformidade de aplicação de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2/3, p. 225-232, 2004.

GRASSINI, P.; YANG, H.; CASSMAN, K. G. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149, n. 8, p.1254-1265, 2009.

GUÉRIF, M.; HOULÈS, V.; MAKOWSKI, D.; LAUVERNET, C. Data assimilation and parameter estimation for precision agriculture using the crop model STICS. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 391-398.

HEINEMANN, A. B.; ANDRADE, C. L. T.; GOMIDE, R. L.; AMORIM, A. O; PAZ, R. L. Padrões de deficiência hídrica para a cultura do milho (safra normal e safrinha) no estado de Goiás e suas consequências para o melhoramento genético. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1026-1033, 2009.

HOFFMANN, F.; RITCHIE, J. T. Model for slurry and manure in CERES and similar models. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 170, n. 5, p. 330-340, 1993.

HOOKE, J. E. Using crop models to plan water withdrawals for irrigation in drought years. **Agricultural Systems**, Barking, v. 45, n. 3, p. 271-289, 1994.

IGLESIAS, A.; LOPEZ-CORCOLES, H.; CANADAS, W.; MINGUEZ, M. I. Current and future strategies for water use optimization in corn hybrids of different growth durations under climate change scenarios. In: CONGRESS OF THE EUROPEAN SOCIETY FOR AGRONOMY, 1994, Abano-Padova. **Proceedings...** Abano-Padova: Padova University, 1994. p. 374-375.

IGLESIAS, A.; MINGUEZ, M. I. Prospects for maize production in Spain under climate change. In: ROSENZWEIG, C. (Ed.). **Climate change and agriculture: analysis of potential international impacts**. Madison: American

Society of Agronomy, 1995. p. 259-273. (ASA Special Publication, 59).

JAGTAP, S. S.; ALIBI, R. T.; ADELEYE, O. The influence of maize density on resource use and productivity: an experimental and simulation study. **African Crop Science Journal**, v. 6., n. 3, p. 259-272, 1998.

JAGTAP, S. S.; ABAMU, F. J.; KLING, J. G. Long-term assessment of nitrogen and variety technologies on attainable maize yields in Nigeria using CERES-maize. **Agricultural Systems**, Barking, v. 60, n. 2, p. 77-86, 1999.

JEUFFROY, M. H.; BARBOTTIN, A.; JONES, J. W.; LECOEUR, J. Crop models with genotype parameters. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 281-308.

JONES, J. W.; TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; HUNT, L. A.; THORTON, P. K.; IMAMURA, D. T.; BOWEN, W. T.; SINGH, U. Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT v3. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORTON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. London: Kluwer, 1998. p.157-177.

JONES, J. W.; MAKOWSKI, D.; WALLACH, D. Introduction to section II. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 251-256.

KEATING, B. A.; GODWIN, D. C.; WATIKI, J. M. Optimizing nitrogen inputs in response to climatic risk. In: MUCHOW, R. C.; BELLAMY, J. A. (Ed.). **Climatic risk in crop production: models and management for the semiarid tropics and subtropics**.

Wallingford: CAB International, 1991. p. 329-358.

KOVACS, G.; NEMETH, T. Modelling of yield and nitrate accumulation and its comparison with measurements in a long-term experiment. **Agrokemia es Talajtan**, v. 44, n. 1/2, p. 89-100, 1995.

LEENHARDT, D.; WALLACH, D.; MOIGNE, P. LE; GUÉRIF, M.; BRUAND, A.; CASTERAD, M. A. Using crop models for multiple fields. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 209-250.

MACEDO, J. **Prospective for the rational use of the Brazilian Cerrados for food production**. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, 1995. 19 p.

MAKADHO, J. M. Potential effects of climate change on corn production in Zimbabwe. **Climate Research**, Oldendorf, v. 6, n. 2, p. 147-151, 1996.

MANTOVANI, E. C.; VICENTE, M. R.; MUDRIK, A. Irrigação do cafeeiro: em que condições a irrigação é necessária e como irrigá-lo nestas condições. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **Produção integrada de café**. Viçosa: UFV, 2003. p. 279-318.

MARTIN, E. C.; RITCHIE, J. T.; BAER, B. D. Assessing investment risk of irrigation in humid climates. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 9, n. 2, p. 228-233, 1996.

MATTHEWS, R. B.; STEPHENS, W. **Crop-soil simulation models: application in developing countries**. Wallingford: CABI Publishing, 2002. 280 p.

MAYTÍN, C. E.; ACEVEDO, M. F.; JAIMEZ, R.; ANDRESSEN, R.; HARWELL, M. A.; ROBOCK, A.; AZOCAR, A. Potential effects of global climatic change on the phenology and yield of maize in Venezuela. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 29, n. 2, p.189-211, 1995.

MEINKE, H.; BAETHGEN, W. E.; CARBERRY, P. S.; DONATELLI, M.; HAMMER, G. L.; SELVARAJU, R.; STÖCKLE, C. O. Increasing profits and reducing risks in crop production using participatory systems simulation approaches. **Agricultural Systems**, Barking, v. 70, p. 493-513, 2001.

MESSINA, C. D.; BOOTE, K. J.; LÖFFLER, C.; JONES, J. W.; VALLEJOS, C.

E. Model-assisted genetic improvement of crops. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 309-336.

NEWMAN, S.; LYCH, T.; PLUMMER, A. A. Success and failure of decision support systems: learning as we go. **Proceedings of the American Society of Animal Science**, Western, p.1-12, 1999.

OR, D.; WRAITH, J. M. **Agricultural and environmental soil physics**. Logan: USU, 1997. 218 p.

ORTIZ, R. A. Crop simulation models as an education tool. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORTHON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. London: Kluwer, 1998. p. 383-388.

OTEGUI, M. E.; RUIZ, R. A.; PETRUZZI, D. Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in humid temperate region. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 47, n. 2/3, p. 169-178, 1996.

PANG, X. P.; LETEY, J.; WU, L. Yield and nitrogen uptake prediction by CERES-Maize model under semiarid conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 254-256, 1997a.

PANG, X. P.; LETEY, J.; WU, L. Irrigation quantity and uniformity and nitrogen application effects on crop yield and nitrogen leaching. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 257-261, 1997b.

PANG, X. P.; GUPTA, S. C.; MONCRIEF, J. F.; ROSEN, C. J.; CHEN, H. H. Evaluation of nitrate leaching potential in Minnesota glacial outwash soils using the CERES-maize model. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 27, n. 1, p. 75-85, 1998.

PAZ, J.; BATCHELOR, W. D.; BABCOCK, B. A.; COLVIN, T. S.; LOGSDON, S. D.; KASPAR, T. C.; KARLEN, D. L. Model-based technique to determine

variable rate nitrogen for corn. **Agricultural Systems**, Barking, v. 61, p. 69-75, 1999.

PRAJAMWONG, S.; MERKLEY, G. P.; ALLEN, R. G. Decision support model for irrigation water management. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Delaware, v. 123, n. 2, p. 106-113, 1997.

PRECIADO-ORTIZ, R.; WEISS, A.; JOHNSON, B. E. Developing prototype maize (*Zea mays* L.) hybrids by crop modeling for specific rainfed regions. **Maydica**, Bergamo, v. 40, n. 2, p. 191-197, 1995.

REICOSKY, D. C.; LAMB, J. A.; DOWDY, R. H. Impact of crop water use on groundwater quality. In: CLEAN WATER - CLEAN ENVIRONMENT, 1995, Kansas City. **Proceedings...** Missouri: USDA, 1995. p. 211-214.

REIDSMA, P.; EWERT, F.; BOOGAARD, H.; DIEPEN, K. Regional crop modelling in Europe: the impact of climatic conditions and farm characteristics on maize yields. **Agricultural Systems**, Barking, v. 100, n. 1/3, p. 51-60, 2009.

RETTA, A.; VANDERLIP, R. L.; HIGGINS, R. A.; MOSHIER, L. J.; FEYERHERM, A. M. Suitability of corn growth models for incorporation of weed and insect stresses. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, n. 4, p. 757-765, 1991.

ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A. The use of crop models for international climate change impact assessment. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORTHON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. London: Kluwer, 1998. p. 267-292.

SANTOS, A. O.; PRADO, H. Análise de interações solo-planta-clima em zonas diferenciadas de área de cultivo de milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 101-106, 2002.

SHAYYA, W. H.; BERNUTH, R. D.; RITCHIE, J. T.; PERSON, H. L. **A simulation model for land application of animal manure**. St. Joseph:

American Society of Agricultural Engineers, 1993. 26 p. Paper n. 93-2012.

SIQUEIRA, O. J. F.; FARIAS, J. R. B.; SANS, L. M. A.; Potential effects of global climate change on Brazilian agriculture and studies of adaptation for wheat, maize and soyabean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 115-129, 1994.

SINGH, P.; SRINIVAS, K. Crop simulation models as decision-making tools for managing agricultural droughts. In: RAMAKRISHNA, Y. S.; RAO, G. G. S. N.; SASTRY, P. S. N.; RAO, V. U. M. (Ed.). **Agricultural droughts: aspects of micrometeorology: a lecture notes of 4th SERC School**. Hyderabad: CRIDA, 2007.

SKAGGS, R. W. Drainage simulation models. In: SKAGGS, R. W.; VAN SCHILFGAARDE, J. **Agricultural drainage**. Madison: American Society of Agronomy, 1999. p. 469-500.

SEIDL, M.; PAZ, J. O.; BATCHELOR, W. D.; FALLICK, J. B. Prescription evaluation through a crop growth model GIS linkage. In: ASAE/CSAE-SCGR ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 1999, Ontario, Canada. **[Proceedings]**. St. Joseph: ASAE, 1999. p. 1-16. Paper n. 99-3045.

SOLER, C. M. T.; FOLEGATI, M. V.; FARIA, R. T. Uso do modelo CERES-Maize para a identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho “safrinha”. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 339-346, 2001.

SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Application of the CSM-CERES - Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 27, p. 165-177, 2007.

STEELE, D. D.; STEGMAN, E. C.; GREGOR, B. L. Field comparison of irrigation scheduling methods for corn. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 37, n. 4, p. 1197-1203, 1994.

STEELE, D. D.; GREGOR, B. L.; SHAE, J. B. Irrigation scheduling methods for popcorn in the northern Great Plains. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 40, n. 1, p. 149-155, 1997.

STÖCKLE, C. O.; DONATELLI, M. The CropSyst model: a brief description. In: PLENTINGER, M. C.; PENNING DE VRIES, F. W. T. **Rotation models for ecological farming**. Pullman: Washington State University, 1997. p. 35-43.

STÖCKLE, C. O.; NELSON, R. **CROPSYST user's manual**. Pullman: Washington State University, 1994.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 9, p.1351-1359, set. 2006a.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 424-433, 2006b.

TENG, P. S.; BATCHELOR, W. D.; PINNSCHIMIDT, H. O. WILKERSON, G. G. Simulation of pest effects on crops using coupled pest-crop models: the potential for decision support. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORTHON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. London: Kluwer, 1998. p.221-266.

THORNTON, P. K.; MACROBERT, J. F. The value of information concerning near-optimal nitrogen fertilizer scheduling. **Agricultural Systems**, Barking, v. 45, n. 3, p. 315-330, 1994.

THORTHON, P. K.; WILKENS, P. W. Risk assessment and food security. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORTHON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. London: Kluwer, 1998. p. 329-345.

TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORTHON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. London: Kluwer, 1998. 399 p.

WAFULA, B. M. Applications of crop simulation in agricultural extension and research in Kenya. **Agricultural Systems**, Barking , v. 49, n. 4, p. 399-412, 1995.

WALLACH, D. The two forms of crop models. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. **Working with dynamic crop models**: evaluation, analysis, parameterization and applications. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 3-9.

WALLACH, D.; MAKOWSKI, D. JONES, J. W. **Working with dynamic crop models**: evaluation, analysis, parameterization and applications. Amsterdam: Elsevier, 2006. 449 p.

WHITE, J. W. Modeling and crop improvement. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORTHON, P. K. **Understanding options for agricultural production**. London: Kluwer, 1998. p. 179-188.

WORMAN, F. O.; BIERE, A. W.; HOOKER, M. L.; VANDERLIP, R. L.; KANEMASU, E. T. **Simulation analysis using physiological crop-response models**: alternative cropping strategies for southwest Kansas. Manhattan: Kansas State College of Agriculture and Applied Science, 1988. 31 p. (Kansas Agricultural Experimental Station Bulletin, 653).

**Embrapa**

---

*Milho e Sorgo*

**Ministério da  
Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento**

