

ISSN 1678-9644

Dezembro, 2010

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Arroz e Feijão
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 264

Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade na pesquisa agronômica

*Alexandre Bryan Heinemann
Luís Fernando Stone
Silvando Carlos da Silva*

Embrapa Arroz e Feijão
Santo Antônio de Goiás, GO
2010

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Arroz e Feijão

Rod. GO 462, Km 12
Caixa Postal 179
75375-000 Santo Antônio de Goiás, GO
Fone: (0xx62) 3533 2110
Fax: (0xx62) 3533 2123
www.cnpaf.embrapa.br
sac@cnpaf.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: *Luís Fernando Stone*
Secretário-Executivo: *Luíz Roberto Rocha da Silva*
Membro: *Ana Lúcia Delalibera de Faria*
Camilla Souza de Oliveira
Alcido Elenor Wande
Henrique César de Oliveira Ferreira
Alberto Baêta dos Santos
Jaison Pereira de Oliveira

Supervisor editorial: *Camilla Souza de Oliveira*
Revisão de texto: *Camilla Souza de Oliveira*
Normalização bibliográfica: *Ana Lúcia D. de Faria*
Tratamento de ilustrações: *Fabiano Severino*
Editoração eletrônica: *Fabiano Severino*

1ª edição

Versão online (2010)

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 Arroz e Feijão

Heinemann, Alexandre Bryan.

Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade na pesquisa agrônômica / Alexandre Bryan Heinemann, Luís Fernando Stone, Silvano Carlos da Silva. - Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2010.

26 p. - (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644 ; 264)

1. Modelo de simulação. 2. Sistema de cultivo – Simulação do crescimento. 3. Pesquisa – Produtividade. I. Stone, Luís Fernando. II. Silva, Silvano Carlos da. III. Embrapa Arroz e Feijão. IV. Série.

CDD 003.3 (21. ed.)

© Embrapa 2010

Autores

Alexandre Bryan Heinemann

Engenheiro agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO, alexbh@cnpaf.embrapa.br

Luís Fernando Stone

Engenheiro agrônomo, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO, stone@cnpaf.embrapa.br

Silvando Carlos da Silva

Engenheiro agrícola, Mestre em Agrometeorologia, pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO, silvando@cnpaf.embrapa.br

Apresentação

Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas são funções dinâmicas do sistema solo-planta-atmosfera. Esses modelos integram os conhecimentos dos processos biofísicos que regem o sistema solo-água-planta, permitindo identificar e avaliar as incertezas na produção, associadas às diferentes opções de manejo. Também, permitem aperfeiçoar a eficiência da pesquisa, por meio da análise do desempenho de cultivares em diferentes solos, condições climáticas, datas de semeadura, populações de plantas, manejos da irrigação e épocas de aplicação de nitrogênio. Geralmente são utilizados para prever o desempenho de uma determinada cultura, devido aos manejos ou decisões relacionadas com o impacto da agricultura no ambiente. Assim, são considerados importante ferramenta nas decisões agrônômicas, uma vez que os efeitos das ações de manejo dependem das interações complexas entre o solo, clima e outras decisões relacionadas ao manejo.

Os autores

Sumário

Introdução	9
Características dos modelos de culturas.....	10
Sistema de suporte à decisão agronômica	12
DSSAT	12
APSIM.....	13
ECOTROP	14
Exemplo de aplicações de modelos de culturas	14
Otimização dos recursos naturais.....	14
Aplicação de modelos de culturas no melhoramento vegetal.....	17
Referências	23

Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade na pesquisa agronômica

Alexandre Bryan Heinemann

Luís Fernando Stone

Silvando Carlos da Silva

Introdução

Neste documento, modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas são considerados funções dinâmicas do sistema solo-planta-atmosfera e serão referidos como “modelos de culturas”. Esses modelos integram os conhecimentos dos processos biofísicos que regem o sistema solo-água-planta, permitindo identificar e avaliar as incertezas na produção, associadas às diferentes opções de manejo. Também, permitem aperfeiçoar a eficiência da pesquisa, por meio da análise do desempenho de cultivares em diferentes solos, condições climáticas, datas de semeadura, populações de plantas, manejos da irrigação e épocas de aplicação de nitrogênio. A quantidade de modelos de cultura desenvolvidos nos últimos 30 anos aumentou consideravelmente devido ao incremento da capacidade computacional, possibilitando o estudo de sistemas complexos. Eles são desenvolvidos por diferentes razões, dependendo dos objetivos específicos de quem os desenvolve. Entretanto, as razões do desenvolvimento desses modelos, de uma maneira genérica, podem ser agrupadas em duas categorias: a) sintetizar o conhecimento sobre os diferentes aspectos do desenvolvimento e crescimento de uma determinada cultura, considerando a cultura como parte de um sistema. Ou seja, esses modelos são desenvolvidos para verificar

se o conhecimento sobre fisiologia e os processos de crescimento das plantas podem ser agregados para prever as respostas do crescimento, desenvolvimento e rendimento de culturas a diferentes condições climáticas, de solos e fatores de manejo; b) prever o desempenho de uma determinada cultura, devido aos manejos ou decisões relacionadas com o impacto da agricultura no ambiente. Assim, esses modelos são considerados importante ferramenta nas decisões agrônomicas, uma vez que os efeitos das ações de manejo dependem das interações complexas entre o solo, clima e outras decisões relacionadas ao manejo (WALLACH et al., 2006).

O enfoque nesse documento será na segunda categoria, na qual os modelos de culturas não são considerados o objetivo final, e sim, utilizados como uma ferramenta para alcançar objetivos mais aplicados relacionados ao sistema de cultivo e suas práticas de manejo.

Características dos modelos de culturas

Geralmente, modelos de culturas representam uma área ou parcela na qual uma determinada cultura é cultivada. Assume-se que essa área seja homogênea em termos de solo, clima e práticas de manejo. A maioria dos conceitos utilizados pelos modelos de culturas é baseada nessa hipótese (cálculo do balanço hídrico, índice de área foliar (IAF), desenvolvimento da cultura, entre outros). Entretanto, sabe-se que no campo dificilmente a área é homogênea para a maioria dos critérios descritos acima. Assim, os parâmetros e as variáveis que descrevem o sistema nos modelos de culturas representam as suas médias (BRISSON et al., 2006). Essa consideração é importante para a estimativa dos parâmetros utilizados nos modelos de culturas.

Os modelos de culturas considerados nesse documento possuem como intervalo de tempo o espaço de um dia para o cálculo das variáveis de estado que descrevem o sistema. Isso porque as variáveis climáticas utilizadas como dados de entrada na maioria dos modelos são diárias. Assim, as variáveis de saída do modelo (resposta), como IAF, quantidade de matéria seca acumulada, balanço hídrico, entre outros,

são geralmente fornecidas diariamente durante o ciclo de crescimento da cultura. Entretanto, há alguns processos que podem ser calculados no intervalo de tempo horário. Dentre esses processos destaca-se a fotossíntese de uma determinada folha, que nos modelos CROPGRO e CERES-RICE é calculada a cada hora. Maiores detalhes desse processo foram descritos por Boote et al. (1998) e Lizaso et al. (2005).

Para executar um modelo de cultura, é necessário fornecer informações referentes ao clima, solo, práticas de manejo e condições iniciais desse sistema. Essas informações se referem aos dados de entrada necessários para a execução do modelo de cultura e representam uma determinada unidade espacial (parcela ou área), na qual se desenvolve a cultura a ser simulada. As informações sobre as condições iniciais desse sistema dependem do histórico da unidade espacial, como água disponível no solo, resíduos da cultura anterior, entre outros. Para a obtenção dos dados de entrada, há a necessidade de se realizar medidas locais. Alguns desses valores obtidos possuem incertezas devido aos erros sistemáticos e randômicos e variação temporal. Esses erros agregados aos dados de entrada podem gerar imprecisões que se propagam nas variáveis respostas dos modelos de culturas. Um exemplo de erro agregado está no pluviômetro, equipamento usado para medir a quantidade de precipitação pluvial diária. De acordo com Heinemann et al. (2002a), a acurácia nas observações pluviométricas é crítica para a simulação da produtividade de grãos e a variabilidade nas variáveis respostas ou de saída dos modelos de culturas está diretamente correlacionada com a precisão dos dados de entrada nos modelos de culturas.

As variáveis respostas são consideradas variáveis de estado ou funções das variáveis de estado. Essas variáveis podem ser agrônômicas, como data da colheita, produtividade de grãos, consumo de água e de nitrogênio, entre outras, ou ambientais, como lixiviação de nitrato, percolação de água.

Atualmente, os modelos de culturas são desenvolvidos em módulos ou compartimentos conectados por fluxos de massas controlados

pela energia disponível no sistema. A razão da utilização de módulos é que a mesma permite a adição de novos componentes e facilita as modificações e manutenções, possibilitando uma maior integração do conhecimento de diferentes disciplinas, tornando a predição dos modelos o mais próximo da realidade (JONES et al., 2001).

Sistema de suporte à decisão agrônômica

Atualmente, os modelos de culturas estão incorporados aos sistemas de suporte à decisão. Essa incorporação possibilita a simulação de sistemas agrícolas complexos e de seus respectivos manejos. A seguir, são descritas, resumidamente, as características de três sistemas de suporte à decisão.

DSSAT

O sistema de suporte à decisão para a transferência de agrotecnologia (DSSAT - <http://www.icasa.net/dssat/>) é um produto do projeto IBSNAT (International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer) que iniciou em 1982 (UEHARA; TSUJI, 1998). O DSSAT foi elaborado para permitir seus usuários avaliarem o sistema de produção em razão dos riscos referentes às opções de manejo da cultura. Os componentes centrais do DSSAT são os modelos de simulação de culturas e interfaces para facilitar a suas aplicações em diferentes regiões do mundo. Esses componentes permitem aos usuários: (a) inserir, organizar e armazenar dados sobre a cultura, solo e clima; (b) analisar e disponibilizar os dados; (c) validar e calibrar os modelos de crescimento de culturas; (d) simular práticas de manejo e (e) avaliar o risco econômico associado às diferentes opções de práticas de manejo. Uma característica desse sistema de suporte à decisão é que o mesmo foi desenvolvido por diferentes instituições em diferentes regiões do mundo. O DSSAT foi elaborado baseado na necessidade mínima de um conjunto de dados para permitir a aplicação dos modelos de culturas em diferentes regiões do mundo e na padronização dos formatos e protocolos para armazenagem de dados. Atualmente, o DSSAT está na versão 4.0, disponibilizando 15 modelos de culturas, programas para analisar os riscos biofísicos e econômicos de práticas de manejo.

APSIM

O simulador de produção de sistemas agrícolas (APSIM - <http://www.apsim.apsim.info/wiki/>) é a plataforma dos modelos elaborados pela Unidade de Pesquisa em Sistemas de Produção Agrícolas (APSUR) pertencente ao CSIRO e à Universidade do Estado de Queensland. Essa plataforma foi desenvolvida para simular os processos biofísicos que ocorrem no sistema de produção agrícola, particularmente relacionados aos fatores econômicos e ecológicos nas práticas de manejo em face ao risco climático. O APSIM é estruturado de acordo com a planta, solo e módulos de manejo. Esse sistema de suporte à decisão foi desenvolvido baseado em uma série de módulos separados que se interligam via uma estrutura de comunicação para representar o sistema a ser simulado. Essa plataforma foi desenvolvida baseada numa estrutura que permite que módulos individuais de componentes chaves dos sistemas agrícolas sejam acoplados ao sistema. Esses módulos podem ser biológicos, ambientais, de gerenciamento ou econômicos e são interligados por meio do "programa central" do APSIM. Esse sistema inclui módulos para simulações agrosilvopastorís, processos do solo, como balanço de água, pH, erosão, entre outros, e de gerenciamento, controle. A estrutura dos módulos no APSIM é composta pelos seguintes componentes:

- Um conjunto de módulos biofísicos, que simulam processos biológicos e físicos em sistemas agrícolas;
- Um conjunto de módulos de manejo que permite ao usuário especificar quais serão as regras gerenciais (manejo) aplicadas para caracterizar o cenário a ser simulado;
- Módulos que facilitam a entrada e saída de dados utilizados nas simulações;
- Núcleo que controla os processos da simulação, facilitando a comunicação entre os módulos independentes.

Essa plataforma vem sendo utilizada para dar suporte às tomadas de decisões por agricultores; otimização dos recursos naturais nos

sistemas de produção agrícola; predição da produção agrícola; desenvolvimento de práticas conservacionistas de manejo de água; suporte na quantificação de riscos agrícolas e na educação. Atualmente, há 22 modelos de culturas na plataforma APSIM.

ECOTROP

ECOTROP (<http://ecotrop.cirad.fr>) é uma plataforma para modelos de culturas desenvolvida pelo CIRAD (França). Essa plataforma é derivada da plataforma SARRAH, que teve seu desenvolvimento iniciado nos anos 70, com objetivo de calcular o balanço hídrico e o diagnóstico hídrico de diferentes culturas para fins de zoneamento agrícola. Atualmente, a plataforma ECOTROP possui diferentes modelos de culturas acoplados a uma biblioteca de módulos e a várias ferramentas para análise de sensibilidade, otimização de parâmetros utilizados pelos modelos de culturas, base de dados e interface gráfica. Essa plataforma possui modelos de simulação para as seguintes culturas: arroz, milho e sorgo.

Exemplo de aplicações de modelos de culturas

Otimização dos recursos naturais

Os modelos de culturas são ferramentas que foram desenvolvidas para múltiplas aplicações na pesquisa agropecuária (JONES et al., 2003). Eles podem ser utilizados para integrar os conhecimentos dos processos biofísicos que regem o sistema solo-água-planta, permitindo identificar e avaliar as incertezas na produção associadas às opções de manejo. Os modelos também tornam possível aperfeiçoar a eficiência da pesquisa, permitindo a análise do desempenho de cultivares em diferentes solos, condições climáticas, datas de semeadura, populações de plantas, manejo da irrigação e épocas de aplicação de nitrogênio (HEINEMANN et al., 2000, 2002b; ZHANG et al., 2007). Um exemplo de otimização dos recursos naturais, como precipitação pluvial, temperatura e radiação, por meio de modelos de culturas é a determinação de épocas de semeadura que permitem a cultura expressar seu potencial produtivo. Heinemann e Stone (2008) utilizaram o modelo de cultura

ORYZA/APSIM para determinar as datas de semeadura de arroz de terras altas que possibilitam uma alta produtividade com base em um conjunto de dados climáticos de 1983 a 2008 do município de Santo Antônio de Goiás, GO. Encontra-se na Figura 1 a dispersão da produtividade do arroz de terras altas para as datas de semeadura 1/11, 15/11, 30/11, 15/12, 30/12 e 15/01. Já na Figura 2 acha-se a probabilidade de exceder a produtividade para as diferentes datas de semeadura. De acordo com os autores, o período que maximiza a utilização dos recursos naturais, precipitação, temperatura máxima e mínima e radiação global, é a semeadura no mês de novembro, ou seja, para as datas de 1/11, 15/11 e 30/11.

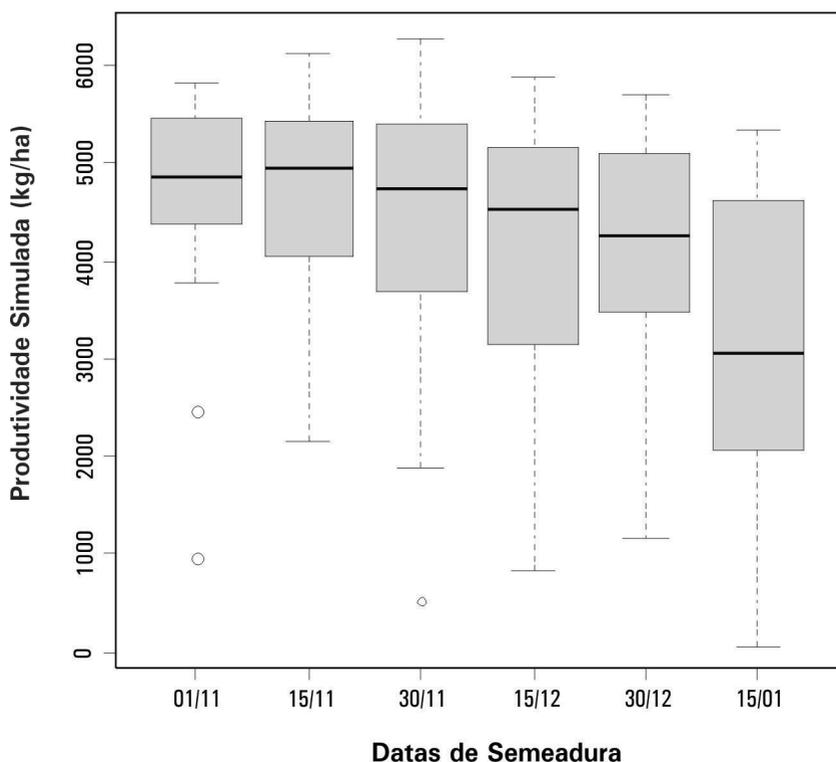


Figura 1. Dispersão e mediana da produtividade do arroz de terras altas simuladas para as diferentes datas de semeadura em Santo Antônio de Goiás, GO.

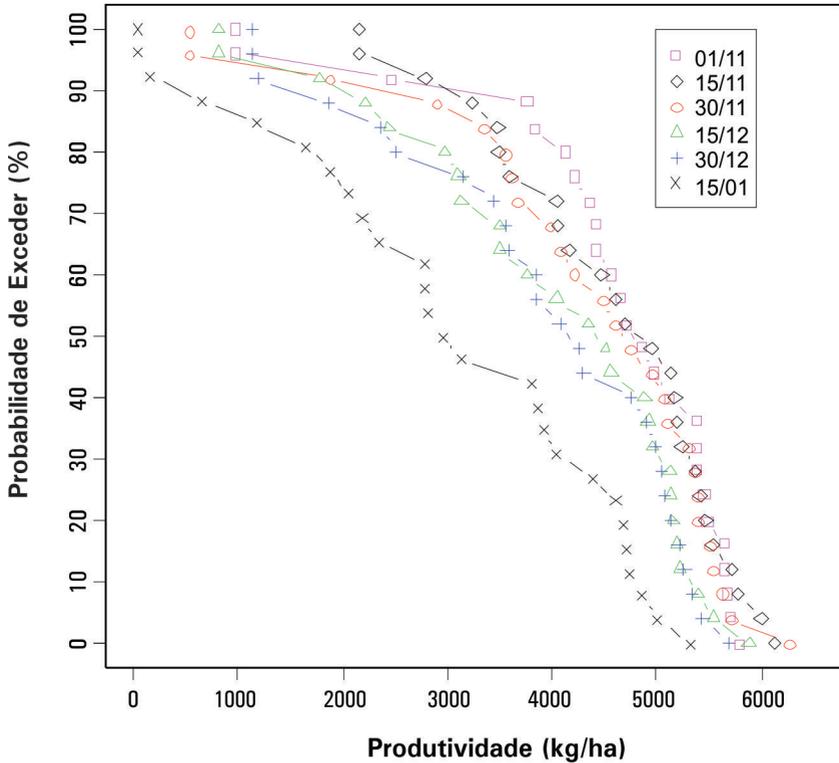


Figura 2. Probabilidade de exceder a produtividade de arroz de terras altas para diferentes datas de semeadura em Santo Antônio de Goiás, GO.

Dentro do item otimização de recursos naturais, modelos de culturas podem ser utilizados para quantificar a demanda por culturas do recurso hídrico e minimizar o impacto ambiental de insumos, definindo estratégias que possibilitem o planejamento e o manejo apropriado da cultura. Heinemann et al. (2002b) quantificaram para a bacia do Tibaji, no Estado do Paraná, as lâminas de irrigação, escoamento superficial, lixiviação de nitrato para a cultura de milho. Nesse estudo, foi utilizado o modelo de cultura CERES-MAIZE. Os autores concluíram que a região sul da bacia do rio Tibaji é potencialmente suscetível ao escoamento superficial e lixiviação de N. A recomendação

de aplicação de N na cultura de milho deveria ser reavaliada devido ao alto potencial de lixiviação de N e o modelo de cultura combinado com sistema de informação geográfica pode ser uma importante ferramenta de suporte à decisão para os tomadores de decisões no planejamento regional. A Embrapa Arroz e Feijão vem utilizando o modelo de cultura ORYZA/APSIM para avaliar estratégias de manejo da adubação nitrogenada, visando determinar aquela que mais contribui para a maximização da produtividade e minimização da lixiviação de nitrogênio (N), contribuindo para a sustentabilidade do sistema de produção de arroz de terras altas. Para tanto, considerou-se a aplicação da dose de 100 kg/ha de N em cinco modos de aplicação: TP - 1/5 na semeadura, 2/5 no início do perfilhamento (IP) e 2/5 na diferenciação da panícula (DP); T1 - todo na semeadura; T2 - todo aos 20 dias antes da semeadura; T3 - 1/5 na semeadura e 4/5 no IP e T4 - 1/5 na semeadura e 4/5 na DP. Os modos de aplicação foram combinados com cinco datas de semeadura: 01/11, 15/11, 01/12, 15/12 e 31/12. Na Figura 3 encontra-se a probabilidade de exceder para a produtividade do arroz de terras altas e lixiviação de N para as diferentes datas de semeadura. Baseado nesse estudo, pode-se concluir que o parcelamento da adubação nitrogenada se mostrou como a estratégia com maior probabilidade de resultar em altas produtividades do arroz de terras altas; existe maior probabilidade de se obter altas produtividades em datas de semeadura mais precoces, a partir de 01 de novembro, e a semeadura tardia do arroz contribui para redução nas perdas de nitrogênio por lixiviação.

Aplicação de modelos de culturas no melhoramento vegetal

A habilidade do modelo de cultura em simular o crescimento e produtividade de culturas em diversos ambientes torna-o uma interessante ferramenta para ser utilizada no melhoramento de plantas. Tem potencial para auxiliar a avaliação de linhagens em diversos ambientes, compreender a natureza das interações genótipo x ambiente e identificar características desejadas para um determinado ideótipo de planta.

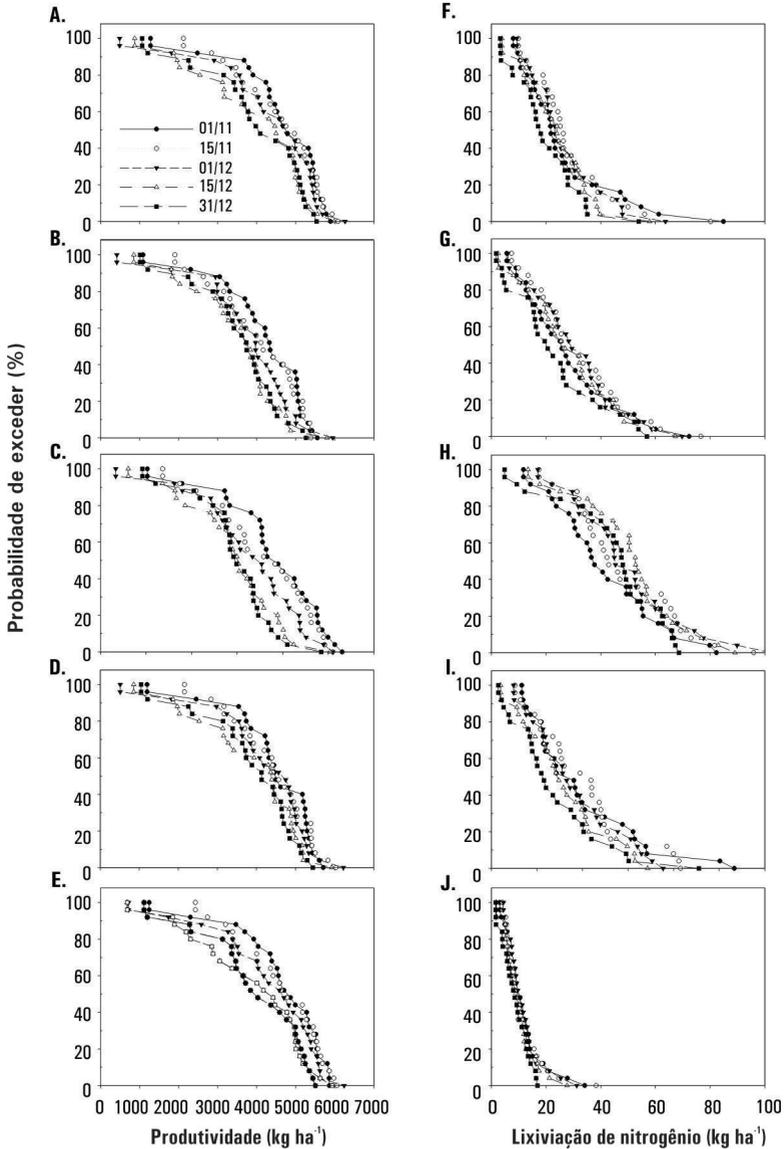


Figura 3. Probabilidade de exceder a produtividade do arroz de terras e a lixiviação de nitrogênio de acordo com a data de emergência da cultura para os manejos de nitrogênio (A e F) - 1/5 na semeadura, 2/5 no início do perfilhamento (IP) e 2/5 na diferenciação da panícula (DP); (B e G) - todo na semeadura; (C e H) - todo aos 20 dias antes da semeadura; (D e I) - 1/5 na semeadura e 4/5 no IP e (E e J) - 1/5 na semeadura e 4/5 na DP.

Para um programa de melhoramento vegetal que visa a adaptação de cultivares a ambientes locais, há a necessidade de se dividir a região produtora em mega-ambientes. Mega-ambientes pode ser definido como uma região (não necessariamente contínua) de produção de determinada cultura, na qual as condições climáticas são relativamente homogêneas (BRAUN et al., 1996) e as respostas dos genótipos determinadas ao longo dos anos. Essa classificação tem como objetivo reduzir as interações complexas que ocorrem na interação genótipo x ambiente. Também irá auxiliar o programa de melhoramento na escolha de linhagens, com a finalidade de aumentar a herdabilidade na seleção e consequente eficiência do programa de melhoramento (HERNANDEZ-SEGUNDO et al., 2009). Nessa classificação, geralmente utilizam-se dados provenientes dos ensaios regionais. Entretanto, esses apresentam como limitação a cobertura regional na área de produção, ou seja, devido ao alto custo desses ensaios, os mesmos não contemplam toda a região de produção. Nesse caso, os modelos de culturas podem ser utilizados para gerar dados de produtividades de diferentes cultivares em diversos locais e as suas respostas ambientais (produtividade) analisadas e agrupadas de acordo com suas similaridades, determinando os mega-ambientes. Patanothai et al. (2007) utilizaram o modelo CSM-CROPGRO-Peanut do sistema de suporte à decisão DSSAT para analisar se as áreas de produção de amendoim na Tailândia são suficientemente diversas para justificar a sua divisão em mega-ambientes. Esse modelo foi utilizado para simular a produtividade de 17 linhagens de amendoim em 57 ambientes no início do período chuvoso, 26 ambientes no meio do período chuvoso e 47 ambientes no período seco, totalizando 130 ambientes por ano e 30 anos de dados climáticos por ambiente. Os autores concluíram que na Tailândia deve-se considerar somente um mega-ambiente para o melhoramento de amendoim.

Entretanto, para melhorar o desempenho de genótipos de arroz de terras altas, além de identificar os mega-ambientes, o programa de melhoramento necessita de informações relacionadas à probabilidade intra e inter anual da ocorrência de déficit hídrico, como também, os padrões de déficit hídrico que prevalecem, sua duração e intensidade de acordo com a classe de solo, relacionados à fase de desenvolvimento da cultura para os diferentes mega-ambientes (HEINEMANN et al.,

2008). Nesse caso, os mega-ambientes passam a ser designados como ambientes para populações-alvo (TPE – “target population Environment”). TPE é definido como um conjunto de ambientes (locais x manejo), incluindo sua variabilidade temporal e espacial, no qual as cultivares geradas por um programa de melhoramento devem apresentar um bom desempenho (NYQUIST, 1991; COOPER et al., 1997). Trata-se, portanto, da caracterização ambiental, levando-se em consideração não somente os aspectos climáticos básicos como precipitação pluvial e temperatura, mas também os efeitos da interação genótipo x ambiente. Com as informações obtidas nos TPEs, um componente significativo das interações genótipo x ambiente para a produtividade pode ser explicado e predito, possibilitando a otimização de ambientes para avaliações de genótipos para a tolerância à deficiência hídrica. Uma excelente ferramenta para a caracterização de TPEs são os modelos de culturas. Chapman et al. (2000) utilizaram o modelo de cultura “sorghum” do sistema de suporte à decisão APSIM para determinar os padrões de deficiência hídrica da cultura do sorgo baseado em informações do solo e dados climáticos históricos da região de Queensland, Austrália. No Brasil, Heinemann et al. (2008) e Heinemann (2010) utilizaram o modelo de cultura RICE06 do sistema de suporte à decisão ECOTROP para caracterizar os padrões de deficiência hídrica para cultivares de arroz de terras altas de ciclo médio e curto. Considerou-se onze locais no Estado de Goiás: Aragarças, Ceres, Sto. Antônio de Goiás, Goiânia, Iporá, Itaberaí, Itumbiara, Porangatu, Quirinópolis, Vianópolis e Vicentinópolis, além de um local no Distrito Federal: Planaltina. Na área de estudo, o solo mais comum, que representou 46% da área total, foi o Latossolo (SISTEMA..., 1999). Nesse solo, há possibilidade do desenvolvimento limitado do sistema radicular de algumas culturas devido ao elevado nível de Alumínio (Al) tóxico nas camadas subsuperficiais do perfil. Assim, dois cenários foram criados: a) solo profundo, caracterizado pelo desenvolvimento máximo do sistema radicular até 0,8 m de profundidade, e b) solo raso, desenvolvimento máximo do sistema radicular até 0,4 m de profundidade, com a intenção de reproduzir o efeito da toxidez de Al. O nível de estresse hídrico da planta é avaliado por meio da fração da água disponível do solo na zona das raízes removida via transpiração. A variável FTSW, que é a relação entre a lâmina de água transpirada e

a lâmina de água disponível na zona efetiva radicular, normalizada para a escala 0 a 1, é calculada diariamente (SINCLAIR; LUDLOW, 1986). Essa variável atua como um fator de redução no cálculo da transpiração e assimilação de carbono, utilizando o fator de depleção p (ALLEN et al., 1998). O nível de estresse da planta é representado pela variável $CSTR$ (transpiração real/transpiração potencial, variando de 0 a 1). As simulações foram efetuadas levando-se em consideração as datas de semeadura do arroz no Estado de Goiás. As datas de semeadura para o arroz de ciclo curto e médio foram de 1 de novembro a 31 de dezembro e de 15 de outubro a 31 de dezembro, respectivamente, com intervalos de 15 dias para ambos os ciclos. O arroz de ciclo médio possui um período maior de oportunidade de semeadura devido à maior duração do período vegetativo. Especificamente para os locais Planaltina e Vicentinópolis, as datas de semeadura foram restritas ao mês de novembro, devido ao menor período chuvoso. Devido ao fato de as datas de semeadura terem sido fixadas *a priori* no modelo, independente da ocorrência de chuva, uma restrição foi imposta, permitindo que a germinação ocorresse somente se a umidade na primeira camada do solo fosse maior ou igual a 70% da capacidade de campo, nos dez dias subsequentes à semeadura. O início das simulações se deu em julho, para permitir um estabelecimento mais realístico do perfil de água do solo, baseado nas ocorrências de precipitação pluvial antes das datas de semeadura. Para o arroz de ciclo curto foram determinados três diferentes padrões de estresse hídrico em função da análise de cluster realizada (Figura 4a). Esses três padrões de estresse foram denominados L (não estresse), M (estresse no período reprodutivo) e T (estresse no período terminal). Para o arroz de ciclo médio, também foram determinados três padrões de estresse com base na análise de cluster realizada (Figura 4b). Esses três padrões de estresse hídrico foram denominados L (não estresse), V (estresse no período vegetativo) e MT (estresse no período reprodutivo e terminal). A probabilidade de ocorrência dessas deficiências hídricas, tanto para o arroz de ciclo curto como o de ciclo médio, está ilustrada na Figura 5. Os autores concluíram que na área de estudo há probabilidade de ocorrência de três tipos de deficiência hídrica para o arroz de ciclo curto e de ciclo médio e que para as regiões que apresentam impedimento ao desenvolvimento do sistema radicular é interessante aplicar a seleção

indireta, considerando os tipos de estresse que ocorrem nos ensaios regionais de seleção.

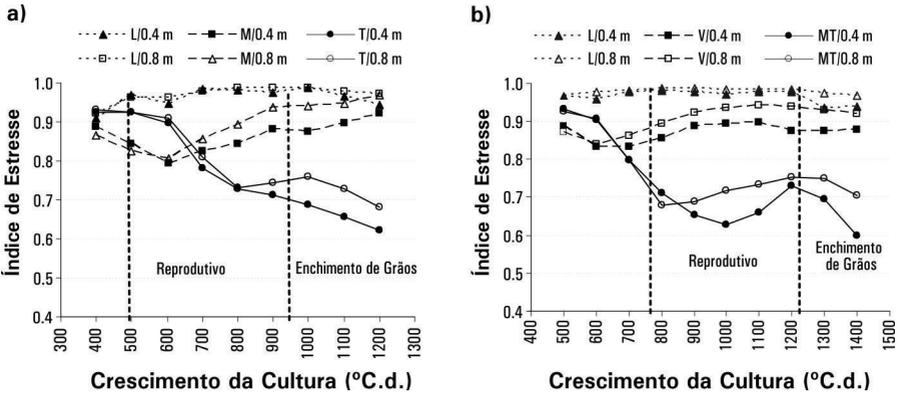


Figura 4. Padrões de estresse hídrico em função dos estádios de desenvolvimento da cultura do arroz a) ciclo curto b) ciclo médio para os cenários de profundidade de solos 0,4 e 0,8 m (L - não estresse, V - estresse no período vegetativo, MT - estresse no período reprodutivo e terminal e T - estresse no período terminal).

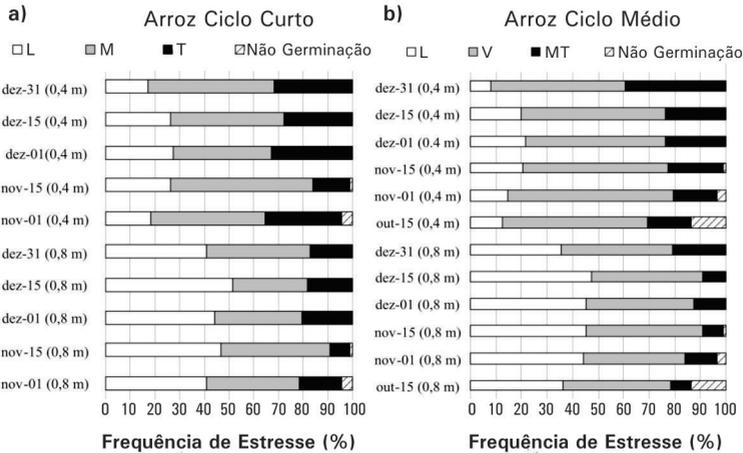


Figura 5. Distribuição dos padrões de estresse hídrico (L - não estresse, V - estresse no período vegetativo, MT - estresse no período reprodutivo e terminal e T - estresse no período terminal) para (a) arroz ciclo curto e (b) arroz ciclo médio, em função das datas de plantio e cenários profundidade de solo (0,4 e 0,8 m).

Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N. B. The CROPGRO model for grain legumes. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Norwell: Kluwer, 1998. p. 99-128.
- BRAUN, H. J.; RAJARAM, S.; VAN GINKEL, M. CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation. **Euphytica**, Wageningen, v. 92, n. 1/2, p. 175-183, 1996.
- BRISSON, N.; WERY, J.; BOOTE, K. Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. (Ed.). **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization, and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 257-280.
- CHAPMAN, S.; HAMMER, G. L.; BUTLER, D. G.; COOPER, M. Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. III. Temporal sequences and spatial patterns in the target population of environments. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 51, n. 2, p. 223-233, 2000.
- COOPER, M.; STUCKER, R. E.; DELACY, I. H.; HARCH, B. D. Wheat breeding nurseries, target environments, and indirect selection for grain yield. **Crop Science**, Madison, v. 37, n. 4, p. 1168-1176, July/Aug. 1997.
- HEINEMANN, A. B. Caracterização dos padrões de estresse hídrico para a cultura do arroz (ciclo curto e médio) no Estado de Goiás e suas consequências para o melhoramento genético. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 29-36, jan./fev. 2010.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F. Determining optimum sowing date for early upland rice cultivar using modelling approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING; BRAZILIAN CONGRESS OF AGRICULTURAL ENGINEERING, 37.; INTERNATIONAL LIVESTOCK ENVIRONMENT SYMPOSIUM - ILES, 8., 2008, Foz do Iguaçu. **Technology for all: sharing the knowledge for development: proceedings...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2008. 1 CD-ROM.

HEINEMANN, A. B.; DINGHUN, M.; LUQUET, D.; COMBRES, J. C.; CHAPMAN, S. Characterization of drought stress environments for upland rice and maize in central Brazil. **Euphytica**, Wageningen, v. 162, n. 3, p. 395-410, Aug. 2008.

HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G.; CHOJNICKI, B. The impact of potential errors in rainfall observation on the simulation of crop growth, development and yield. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 157, n. 1, p. 1-21, Nov. 2002a.

HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G.; FARIA, R. T. Determination of spatial water requirements at county and regional levels using crop models and GIS - an example for the State of Parana, Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 52, n. 3, p. 177-196, Jan. 2002b.

HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G.; GEORGIEV, G. A.; FARIA, R. T.; FRIZZONE, J. A. Center pivot irrigation management optimization of dry beans in humid areas. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 43, n. 6, p. 1507-1516, Nov./Dec. 2000.

HERNANDEZ-SEGUNDO, H.; CAPETTINI, F.; TRETOWAN, R.; VAN GINKEL, M.; MEJIA, A.; CARBALLO, A.; CROSSA, J.; VARGAS, M.; BALBUENA-MELGAREJO, A. Mega-environment identification for barley based on twenty-seven years of global grain yield data. **Crop Science**, Madison, v. 49, n. 5, p. 1705-1718, Sept./Oct. 2009.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. L. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3/4, p. 235–265, Jan. 2003.

JONES, J. W.; KEATING, B. A.; PORTER, C. H. Approaches to modular model development. **Agricultural Systems**, Essex, v. 70, n. 2/3, p. 421–443, Nov./Dec. 2001.

LIZASO, J. I.; BATCHELOR, W. D.; BOOTE, K. J.; WESTGATE, M. E. Development of a leaf-level canopy assimilation model for CERES-Maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 3, p. 722-733, May/June 2005.

NYQUIST, W. E. Estimation of heritability and prediction of selection response in plant population. **Critical Review in Plant Science**, Boca Raton, v. 10, n. 3, p. 235–322, 1991.

PATANOTHAI, A.; PANNANGPETCH, K.; JOGLOY, S.; HOOGENBOOM, G. Applications of crop simulation model in peanut breeding. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASIAN SIMULATION & MODELING, 2., 2007, Chiang Mai, Thailand. **Towards sustainable livelihood and environment: proceedings**. Disponível em: <<http://www.mcc.cmu.ac.th/ASIMMOD2007/mini/3Appl%20of%20CSM%20in%20PN%20Breeding%20-%20Abstract.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2011.

SINCLAIR, T. R.; LUDLOW, M. M. Influence if soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 13, n. 3, p. 329-341, 1986.

SISTEMA brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

UEHARA, G.; TSUJI, G.Y. Overview of IBSNAT. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Norwell: Kluwer, 1998. p. 1-7.

WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. (Ed.). **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization, and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2006. 447 p.

ZHANG, X.; LEE, J. H. C.; ABAWI, Y.; KIM, Y.; MCCLYMONT, D.; KIM, H. Testing the simulation capability of APSIM-ORYZA under different levels of nitrogen fertiliser and transplanting time regimes in Korea. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 47, n. 12, p. 1446–1454, 2007.

