

Calibração e Validação do Modelo ORYZA/APSIM para Arroz de Terras Altas

*Alexandre Bryan Heinemann
Rogério Lorençoni
Durval Dourado Neto*

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

Documentos 238

Calibração e Validação do Modelo ORYZA/APSIM para Arroz de Terras Altas

*Alexandre Bryan Heinemann
Rogério Lorençoni
Durval Dourado Neto*

Embrapa Arroz e Feijão
Santo Antônio de Goiás, GO
2009

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 2100
Fax: (0xx62) 3533 2123
www.cnpaf.embrapa.br
sac@cnpaf.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: *Luís Fernando Stone*
Secretário-Executivo: *Luiz Roberto Rocha da Silva*
Membro: *Alberto Baeta dos Santos*

Supervisor editorial: *Camilla Souza de Oliveira*
Normalização bibliográfica: *Ana Lúcia D. de Faria*
Revisão de texto: *Camilla Souza de Oliveira*
Capa: *Sebastião José de Araújo*
Editoração eletrônica: *Fabiano Severino*

1ª edição

1ª impressão (2009): 500 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 Arroz e Feijão

Heinemann, Alexandre Bryan.

Calibração e validação do modelo ORYZA/APSIM para arroz de terras altas / Alexandre Bryan Heinemann, Rogério Lorençoni, Durval Dourado Neto. - Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2009.
36 p. - (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644 ; 238)

1. Modelo de simulação. 2. Arroz sequeiro - crescimento. I. Lorençoni, Rogério. II. Dourado Neto, Durval. III. Título. IV. Embrapa Arroz e Feijão. V. Série.

CDD 003 (21. ed.)

© Embrapa 2009

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

Rogério Lorençoni

Engenheiro agrônomo, estudante de mestrado no departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP, Piracicaba,SP,
rogeriolorenconi@usp.br

Durval Dourado Neto

Engenheiro agrônomo, Doutor em Agronomia, professor do departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP, Piracicaba, SP,
dourado@usp.br

Apresentação

Modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas são ferramentas que foram desenvolvidas para múltiplas aplicações na pesquisa agropecuária. Eles podem ser utilizados para integrar os conhecimentos dos processos biofísicos que regem o sistema solo-água-plantas, permitindo identificar e avaliar as incertezas na produção, associadas às diferentes 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, densidades de plantas, manejo da irrigação e épocas de aplicação de nitrogênio. Permitem também estudos do impacto das mudanças climáticas e quantificação das interações Genótipo x Ambiente x Manejo, particularmente sob situações com variabilidade climática, como também, identificação e avaliação de características desejáveis em um determinado genótipo, conduzindo a um ideótipo de planta para um determinado ambiente.

Assim, é importante que a Embrapa Arroz e Feijão faça uso dessas ferramentas para auxiliar no suporte às decisões técnicas.

Os autores

Sumário

| | |
|---|-----------|
| Introdução | 11 |
| Material e Métodos | 12 |
| Crescimento e Desenvolvimento no Modelo ORYZA/APSIM | 13 |
| Balanço Hídrico | 17 |
| Dinâmica do nitrogênio | 19 |
| Esquema Sequencial de Cálculos do Modelo | 20 |
| Parâmetros de Entrada do Modelo | 20 |
| Dados Experimentais | 21 |
| Partição de assimilados..... | 22 |
| Resultados | 23 |
| Calibração da fenologia..... | 23 |
| Avaliação da calibração fenológica | 24 |
| Calibração do crescimento | 29 |
| Partição de assimilados..... | 29 |
| Área Específica foliar..... | 30 |
| Avaliação do crescimento | 32 |
| Referências | 33 |

Calibração e Validação do Modelo ORYZA/APSIM para Arroz de Terras Altas

Alexandre Bryan Heinemann

Rogério Lorençon

Durval Dourado Neto

Introdução

A otimização dos recursos naturais, aliada às práticas de manejo adaptadas a diferentes ambientes inseridos na área de produção de arroz de terras altas, pode contribuir para minimizar a variabilidade temporal e espacial da produtividade. Modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas são ferramentas que foram desenvolvidas para múltiplas aplicações na pesquisa agropecuária (HOOGENBOOM et al., 1999; 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 diferentes 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, densidades de plantas, manejo da irrigação e épocas de aplicação de nitrogênio (HEINEMANN et al., 2000, 2002; ZHANG et al., 2007). Permitem tanto estudos do impacto das mudanças climáticas e quantificação das interações Genótipo x Ambiente x Manejo, particularmente sob situações com variabilidade climática (CHAPMAN et al., 2000; HEINEMANN et al., 2008a; TAO et al., 2008), como também identificação e avaliação de

características desejáveis em um determinado genótipo, conduzindo a um ideótipo de planta ideal para um determinado ambiente (HEINEMANN et al., 2008b). Um desses modelos é o ORYZA 2000, que foi desenvolvido pela Universidade de Wageningen e o Instituto Internacional de Pesquisa em Arroz (IRRI), nos anos 90. Esse modelo simula a dinâmica do crescimento e desenvolvimento da cultura do arroz para condições ótimas, que levam ao rendimento potencial (KROPFF et al., 1994), para condições limitantes de nitrogênio (BOUMAN; LAAR, 2006), ou para a otimização da aplicação de nitrogênio, assumindo-se que, em todas essas situações a cultura está bem protegida e não sofre reduções de produtividade devido a doenças, pragas e plantas daninhas. Recentemente, o modelo ORYZA 2000 foi incorporado ao sistema de suporte à decisão “Agricultural Production Systems sIMulator” (APSIM) e vem sendo utilizado para embasar decisões agronômicas e de alocação de recursos na Austrália para a cultura do arroz; para rotações de culturas (ZHANG et al., 2004; GAYDON et al., 2006), permitindo a realização de estudos sobre a sustentabilidade do sistema de produção de arroz de terras altas, isto é, rotação de culturas como arroz de terras altas e sorgo ou milho safrinha; e também para determinar regiões no Brasil Central nas quais variedades de arroz de terras altas de ciclo curto possam ser utilizadas como segunda cultura.

Modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas utilizam um conjunto de dados relacionados à planta (fenotípicos), ao solo (físico-hídrico) e ao clima (meteorológicos).

O objetivo desse estudo é calibrar e validar o modelo de simulação do crescimento e desenvolvimento ORYZA/APSIM para uma cultivar de arroz de terras altas.

Material e Métodos

O fluxograma de funcionamento do modelo ORYZA/APSIM é descrito pela Figura 1.

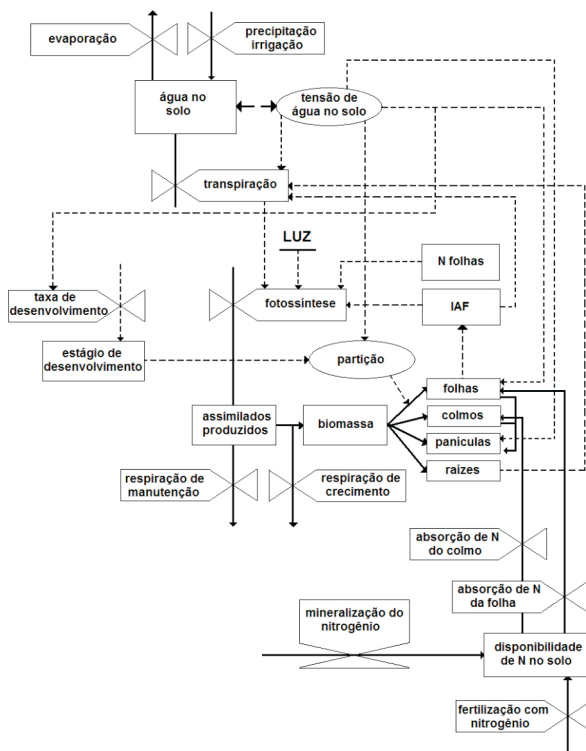


Fig. 1. Fluxograma do funcionamento do modelo ORYZA/APSIM.

Crescimento e Desenvolvimento no Modelo ORYZA/APSIM

O crescimento e desenvolvimento da cultura de arroz no modelo ORYZA/APSIM é determinado pela temperatura, radiação e características varietais específicas. O modelo calcula diariamente as taxas de produção de matéria seca dos órgãos e o desenvolvimento fenológico da planta. Por meio da integração dessas taxas no tempo, a produção de matéria seca é simulada para o ciclo da cultura (BOUMAN et al., 2001).

A taxa de assimilação de CO_2 pelo dossel é calculada em função da radiação diária total, temperatura média diária, índice de área foliar, dia do ano, latitude, coeficiente de extinção de luz no dossel, distribuição

de N no dossel, conteúdo de N na folha, eficiência inicial de uso da luz e taxa máxima da assimilação de CO_2 . A taxa bruta assimilada diária é calculada por meio da integração das taxas instantâneas de assimilação de CO_2 em função do perfil do dossel. Para esses cálculos, assume-se um curso senoidal da radiação durante o dia e sua extinção exponencial em função do perfil do dossel. A fotossíntese nos perfis do dossel é obtida com base nas características fotossintéticas de folhas unitárias que, por sua vez, são dependentes da concentração de N, radiação incidente, concentração de CO_2 no estômato e temperatura. A fotossíntese líquida é obtida por meio da diferença entre a fotossíntese bruta e os respectivos gastos com as respirações de manutenção e crescimento. A taxa de respiração total (respiração de crescimento e de manutenção) é subtraída da taxa de assimilação bruta diária para se obter o crescimento líquido diário expresso em kg de carboidrato/ha dia. A respiração de manutenção é calculada em função da massa seca dos órgãos a serem mantidos, dos seus respectivos coeficientes de manutenção, da sua idade fisiológica e da temperatura (PENNING DE VRIES; LAAR, 1982). A respiração de crescimento é calculada com base nas massas dos diferentes órgãos formados, seus respectivos fatores de conversão e tipos de compostos constituintes (PENNING DE VRIES et al., 1989).

A taxa de crescimento diário é obtida em função da taxa de assimilação bruta diária de CO_2 , dos gastos com a respiração de manutenção, da quantidade de reservas disponíveis nos colmos para o crescimento e do requerimento de assimilados para produção de matéria seca.

A conversão dos carboidratos em matéria seca estrutural é baseada nas equações definidas por Penning de Vries e Laar (1982) e particionada entre os vários órgãos da planta em função do estágio de desenvolvimento e dos seus respectivos coeficientes de partição.

Os estádios de desenvolvimento de uma planta definem a sua idade fisiológica, sendo caracterizado pela formação, aparecimento de órgãos e mudança na translocação de assimilados. O modelo ORYZA/ APSIM divide o desenvolvimento fenológico da planta em três fases:

T_{opt} – temperatura ótima (°C), considerada 30 °C;

Thigh – temperatura máxima (°C), considerada 42 °C, acima da qual não há desenvolvimento da planta;

HUH – calor horário efetivo (°Cd h⁻¹);

h – hora variando de 1 a 24.

$$HU = \sum_{h=1}^{24} (HUH) \quad (\text{Eq. 2}),$$

em que HU – calor diário efetivo (°Cd d⁻¹).

A DVR é calculada pela divisão da ordem cronológica do modelo (0,65 para o período vegetativo, 0,35 para o período reprodutivo e 1 para o período de maturação fisiológica) pela somatória da quantidade de graus dias acumulada nesse período. O somatório da multiplicação diária entre o HU e a DVR para cada fase é responsável pelo cálculo do desenvolvimento cronológico da cultura no modelo (DVS), indo de 0 a 2, conforme ilustra a Figura 2.

O crescimento foliar é dividido em duas fases. A primeira, quando o índice de área foliar é igual ou inferior a 1, é caracterizada pelo crescimento exponencial do IAF em função da soma térmica ocorrida no período. A segunda, quando o índice de área foliar é superior a 1, é caracterizada pelo crescimento linear do IAF em função da área foliar específica (AFE, ha kg⁻¹).

Na fase inicial do crescimento foliar (exponencial), o IAF foi calculado em função da soma térmica e da taxa de crescimento relativo da área foliar (RGRL, °C dia⁻¹). O cálculo do IAF é efetuado utilizando a seguinte equação:

$$IAF_t = IAF_{t_0} e^{RGRL \cdot t} \quad (\text{Eq. 3}),$$

em que IAF_t se refere ao índice de área foliar (m².m⁻²) em uma soma de temperatura específica após a emergência t_s (°C.dia) e IAF_{t₀} ao índice de área foliar (m².m⁻²) na soma de temperatura zero (t₀, °C.dia).

A *RGRL* é estimada a partir da inclinação da relação entre $\ln(IAF)$ e a soma das unidades de calor efetivo diário (HU , °C.dia):

$$RGRL = \frac{\ln(IAF_{t_2}) - \ln(IAF_{t_1})}{H} \quad (\text{Eq. 4}),$$

em que IAF_{t_2} é o índice de área foliar na soma de temperatura final da fase exponencial e IAF_{t_1} é o índice de área foliar na soma da temperatura no início da fase exponencial.

O rápido crescimento da área foliar do genótipo de arroz de terras altas durante a fase exponencial impossibilitou a coleta de dados do *IAF* nessa fase. Devido à falta de dados, o valor da *RGRL* foi obtido por meio de simulações, em que foram testados diferentes valores para a *RGRL*.

Na segunda fase do crescimento foliar (linear), a taxa de crescimento foi obtida em função da área foliar específica. A área foliar específica (*AFE*, ha folha por kg de folha) foi obtida pela equação:

$$AEF = A + Be^{C(DVS-D)} \quad (\text{Eq. 5}),$$

em que *A*, *B*, *C* e *D* são parâmetros da função. Esses parâmetros determinam o formato e o patamar da curva.

Balanço Hídrico

O modelo de balanço hídrico utilizado no ORYZA/APSIM é unidimensional, com multicamadas (determinadas pelo usuário). O sistema utilizado nesse modelo (efeito cascata) é o mesmo utilizado nos modelos CERES (JONES; KINIRY, 1986) e PERFECT (LITTLEBOY et al., 1992). Os algoritmos para a distribuição da água nas camadas do perfil foram herdados dos modelos da família CERES. As características da água no solo são especificadas em termos de conteúdo de água de saturação do solo (θ_s , $m^3 m^{-3}$); capacidade de campo (θ_{cc} , $m^3 m^{-3}$); e ponto de murcha permanente (θ_{pmp} , $m^3 m^{-3}$).

O movimento da água é descrito por algoritmos separados para fluxos saturados e insaturados para as diferentes camadas. Os

cálculos do balanço hídrico levam em conta: (i) modificação do escoamento superficial e da evaporação potencial do solo em função da cobertura vegetal; (ii) pequenos eventos de chuva são perdidos no primeiro estágio de evaporação e não pelo processo mais lento da segunda fase da evaporação; e (iii) especificações do coeficiente de evaporação da segunda fase são usadas como um parâmetro de entrada no modelo, proporcionando uma maior flexibilidade para descrever a secagem do solo em longo prazo em função da textura e dos efeitos ambientais. A simulação do balanço hídrico responde a alterações da quantidade de resíduos na superfície do solo e ao tipo de cobertura vegetal. O escoamento superficial é calculado pelo método da curva número, utilizando a precipitação total de um dia para estimar o escoamento superficial. Essa relação exclui a duração e a intensidade da chuva.

Quando a irrigação é aplicada, o modelo assume não ocorrer escoamento superficial. O usuário deve fornecer um número da curva para condições médias de precipitação. A partir desse valor, as curvas de alto e baixo escoamento são calculadas. O modelo usa as curvas entre esses dois extremos para calcular o escoamento superficial em função da umidade do solo. O cálculo da evaporação atual do solo é baseado em dois estágios, um constante e outro com queda de velocidade. No primeiro estágio, a evaporação da superfície do solo é limitada pelo parâmetro U. No momento que a evaporação atinge o valor do limite máximo (parâmetro U), a evaporação decresce proporcionalmente ao tempo gasto no segundo estágio. Maiores detalhes são descritos por Ritchie (1972).

Quando o teor de água de uma camada está acima da *capacidade de campo* (θ_{cc} , $m^3 m^{-3}$), uma fração de água migra para a camada inferior mais próxima (efeito cascata). Para conteúdos de água abaixo da *capacidade de campo*, o movimento torna-se dependente do gradiente do conteúdo de água e da difusividade entre as duas camadas. A difusividade é obtida em função de dois parâmetros definidos pelo usuário (*diffus_const* e *diffus_slope*) no conjunto de

parâmetros do modelo (APSIM, 2009). Fluxos insaturados podem mover-se tanto no sentido de camadas superiores, quanto para camadas inferiores.

Por meio do balanço hídrico simulado nas diferentes camadas, o modelo determina a tensão da água no solo. Essa tensão determina os fatores de estresse hídrico que são considerados nos cálculos diários de assimilação de CO_2 . A tensão de água no solo é obtida por meio da interpolação logarítmica a partir dos valores fornecidos da saturação do solo, capacidade de campo e ponto de murcha permanente (BOUMAN et al., 2001).

Dinâmica do nitrogênio

A dinâmica do nitrogênio calcula a demanda, absorção, distribuição e translocação do nitrogênio no dossel e também computa os fatores de estresse do crescimento e desenvolvimento causados pela limitação de nitrogênio (ALVAREZ et al., 2006).

O modelo calcula a demanda potencial diária de nitrogênio dos vários órgãos da cultura, baseada nas suas massas, taxas de crescimentos e em seus conteúdos máximos e mínimos de nitrogênio, e posteriormente computa a quantidade de nitrogênio que pode ser translocada diariamente das folhas, colmos e raízes para os órgãos de armazenagem. A quantidade diária de nitrogênio translocável é subtraída da demanda potencial diária do nitrogênio absorvido do solo. A quantidade de nitrogênio absorvida é distribuída entre os diferentes órgãos da planta com base nas suas demandas relativas. O fluxo total de nitrogênio (absorção do solo e translocação) é integrado na quantidade total de nitrogênio nos órgãos e na planta inteira. São calculados fatores de estresse de nitrogênio para o crescimento e o desenvolvimento da cultura. Quando a cultura é bem suprida com nitrogênio ou o modelo é rodado sem a simulação do balanço de nitrogênio, os valores desses fatores de estresse de nitrogênio são considerados 1 (sem estresse) e a cultura não sofre limitações de crescimento

e desenvolvimento por estresse de nitrogênio (ALVAREZ et al., 2006).

Esquema Sequencial de Cálculos do Modelo

O modelo apresenta o seguinte esquema sequencial de cálculos:

(i) realização do balanço hídrico e determinação das taxas de evaporação potencial do solo e transpiração potencial da cultura; (ii) cálculo da transpiração atual, das taxas de absorção de água pela cultura (função das taxas de transpiração potencial), tensão da água no solo na região das raízes e o cálculo dos fatores de estresse hídrico presente ou não nesse período; (iii) cálculo da demanda potencial e da absorção atual de nitrogênio da cultura, da distribuição e translocação do nitrogênio no dossel e dos efeitos dos fatores de estresse de limitações de nitrogênio no crescimento e desenvolvimento da cultura; e (iv) cálculo do crescimento e desenvolvimento do arroz em função de dados climáticos, características da cultura e parâmetros de gerenciamento, levando em conta fatores de estresse hídrico ou não e os efeitos de limitações pela disponibilidade de nitrogênio.

Parâmetros de Entrada do Modelo

Dados externos fornecidos ao modelo

| Parâmetro | Unidade |
|-----------|---------|
|-----------|---------|

Meteorológicos

| | |
|---------------------------|--|
| Radiação global diária | (MJ. m ⁻² . d ⁻¹) |
| Temperatura diária máxima | (°C) |
| Temperatura mínima diária | (°C) |
| Precipitação diária | (mm. d ⁻¹) |
| Latitude | (°graus) |

Solo

| | |
|--|-----------------------|
| Número de camadas no perfil do solo | (-) |
| Espessuras das camadas no perfil do solo | (m) |
| Reflexão da superfície (albedo) | (-) |
| Densidade do solo nas diferentes camadas | (g cm ⁻³) |
| Saturação | (mm) |
| Capacidade de campo | (mm) |
| Ponto de murcha permanente | (mm) |

Dados Experimentais

Os dados observados para a calibração e validação do modelo ORYZA/APSIM foram obtidos por meio de dois experimentos realizados na Embrapa Arroz e Feijão (16°29'46.7" S, 49°17'41.5" W), localizada no Município de Santo Antonio de Goiás, GO, durante os meses de novembro de 2008 a abril de 2009. O solo local é classificado como Latossolo Vermelho distrófico.

A cultivar de terras altas BRS Primavera foi utilizada em ambos os experimentos. A adubação de base consistiu em 400 kg ha⁻¹ do formulado 5-30-15 e foram aplicados 45 kg de N como cobertura duas semanas antes da iniciação da panícula. A semeadura foi feita com 90 sementes por metro, com um espaçamento entre linhas de 0,45 m, proporcionando uma densidade aproximada de 200 plantas m⁻². O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados com quatro repetições. Foram anotadas as datas da emergência, iniciação da panícula, florescimento e maturação fisiológica. Em cada uma dessas datas foi determinada a massa seca das folhas (MSF) e colmos (MSC). Nas datas do florescimento e maturação fisiológica, também foi determinada a massa seca das panículas. Entre a emergência e a iniciação da panícula, foi avaliada a emissão de folhas. Os índices de área foliar (IAF; cm² folha/cm² solo) e área foliar específica (IAF/MSF) foram calculados em função de amostras de folhas obtidas em 1 m e passadas no medidor de área foliar. Na maturação fisiológica, determinou-se o número de grãos por panícula, número de grãos vazios por metro, número de grãos por metro, número de panículas por metro quadrado, massa de 1000 sementes (g), produtividade (kg ha⁻¹). Os dados diários de temperatura máxima e mínima (°C), precipitação (mm) e radiação global (MJ m⁻² s⁻¹) foram coletados durante o período experimental. A Figura 3 ilustra as variáveis climáticas: temperatura máxima, mínima, radiação global e precipitação e os estádios da cultura no período do experimento.

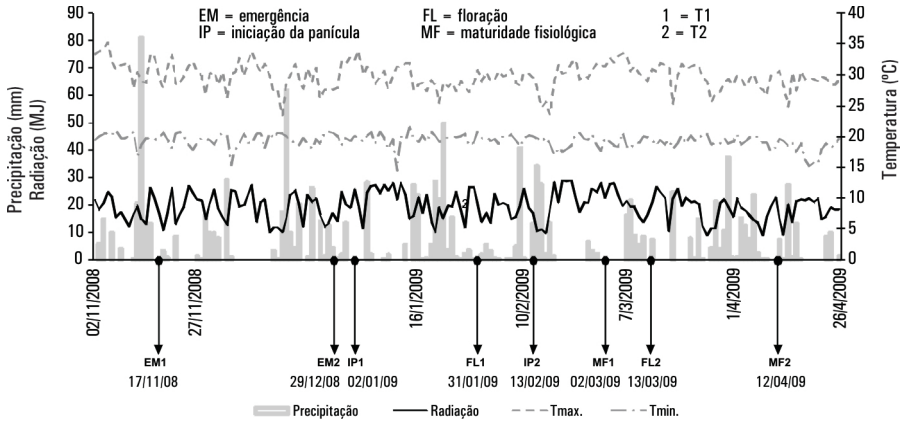


Fig. 3. Dados climáticos observados durante o ciclo da cultivar BRS-Primavera para o ano de 2008/2009. T1 – experimento 1 e T2 – experimento 2. EM – emergência ; FL – florescimento ; MF – maturação fisiológica.

Partição de assimilados

A partição de novos assimilados foi determinada em função da fração de matéria seca dos órgãos contidas na biomassa seca total da parte aérea observada nos experimentos.

Os cálculos para determinar as frações de novos assimilados são apresentados nas equações abaixo.

Fração da matéria seca da parte aérea alocada para folhas (FLV, kg ha⁻¹):

$$FLV = \left[\frac{MSF_{t2} - MSF_{t1}}{MST_{t2} - MST_{t1}} \right] \quad (\text{Eq. 6})$$

Fração da matéria seca alocada para colmos (FST, kg ha⁻¹):

$$FST = \left[\frac{MSC_{t2} - MSC_{t1}}{MST_{t2} - MST_{t1}} \right] \quad (\text{Eq. 7})$$

Fração da matéria seca da parte aérea alocada nos órgãos de armazenagem (FSO, kg ha⁻¹):

$$FSO = \left[\frac{MSP_{t2} - MSP_{t1}}{MST_{t2} - MST_{t1}} \right] \quad (\text{Eq. 8})$$

sendo:

MSF – matéria seca das folhas, kg ha⁻¹;

MSC – matéria seca dos colmos, kg ha⁻¹;

MSP - matéria seca das panículas, kg ha⁻¹;

MST - matéria seca total, kg ha⁻¹;

t1 e t2 – instantes iniciais e finais referentes ao início e fim do período de avaliação.

A fração da massa de matéria seca de colmos de reserva (*FSTR*, kg kg⁻¹) é assim calculada:

$$FSTR = \frac{\beta - \delta}{\beta} \quad (\text{Eq. 9}),$$

em que β se refere à massa máxima do colmo (kg) no florescimento e δ à massa do colmo (kg) na colheita.

Resultados

Calibração da fenologia

Para a calibração da fenologia da cultura do arroz no modelo ORYZA/ APSIM é importante verificar se a cultivar a ser calibrada é sensível ao fotoperíodo. Isso porque o modelo divide a fase vegetativa em não sensível (DVS 0 a 0,4) e sensível ao fotoperíodo (DVS 0,4 a 0,65). Para a verificação de fotoperíodo, utilizou-se os dados observados, referentes à cultivar BRS Primavera de diferentes anos, dos experimentos de Valor de Cultivo e Uso (VCU) conduzidos pelo programa de melhoramento de arroz de terras altas da Embrapa Arroz e Feijão.

Por meio da Figura 4, é possível verificar que não há um padrão ou tendência entre a data de semeadura e o número de dias após o plantio até o florescimento.

Devido à insensibilidade fotoperiódica observada na cultivar, os estádios básicos do desenvolvimento fenológico considerados para a calibração do modelo foram distribuídos em: Fase vegetativa, da

emergência (DVS = 0) à iniciação da panícula (DVS 0,65); Fase reprodutiva, da iniciação da panícula (DVS = 0,65) ao florescimento (DVS 1); Fase de enchimento de grãos, do florescimento (DVS = 1) à maturidade fisiológica (DVS = 2). Os valores utilizados na calibração do modelo são apresentados na Tabela 1. Esses valores foram obtidos em função dos dois experimentos realizados na Embrapa Arroz e Feijão.

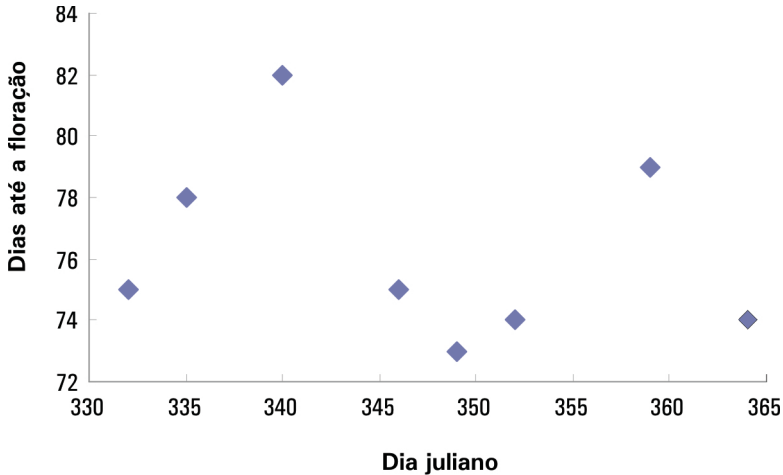


Fig. 4. Relação entre a data da floração, em dias até a floração, e data de semeadura para a cultivar BRS Primavera para diferentes anos de plantio em Santo Antônio de Goiás, GO.

Tabela 1. Valores das variáveis utilizadas na calibração fenológica do modelo para a cultivar BRS Primavera.

| Data da emergência | DVS 0 a 0,65 (vegetativo) | | | DVS 0,65 a 1 (reprodutivo) | | | DVS 1 a 2 (enchimento de grão) | | |
|--------------------|---------------------------|----------|----------|----------------------------|-----------|----------|--------------------------------|----------|----------|
| | DAE (d) | HU (°Cd) | DVR | DAE (d) | HUH (°Cd) | DVR | DAE (d) | HU (°Cd) | DVR |
| 17/11/08 | 0-46 | 750 | 0.000869 | 46-75 | 461 | 0.000744 | 75-105 | 460 | 0.002284 |
| 29/12/08 | 0-46 | 748 | 0.000864 | 46-74 | 470 | 0.000744 | 74-104 | 438 | 0.002064 |
| Média | 46 | 749 | 0.000867 | 46-75 | 465 | 0.000744 | 75-105 | 449 | 0.002174 |

Avaliação da calibração fenológica

A calibração fenológica do modelo foi avaliada por meio da comparação da data de florescimento simulada e observada. Para isso, utilizaram-

se os dados observados de florescimento e data de semeadura obtidos nos experimentos de VCU realizados pela Embrapa Arroz e Feijão nos últimos anos, em diferentes regiões (latitudes) produtoras de arroz de terras altas. Os locais selecionados dos experimentos de VCU para essa avaliação foram: Santo Antônio de Goiás, GO (Latitude: 16°S), Sorriso, MT (Latitude: 13°S), Gurupi, TO (Latitude: 12°S) e Teresina, PI (Latitude: 5°).

A Figura 5 ilustra a validação da calibração fenológica do modelo ORYZA/APSIM.

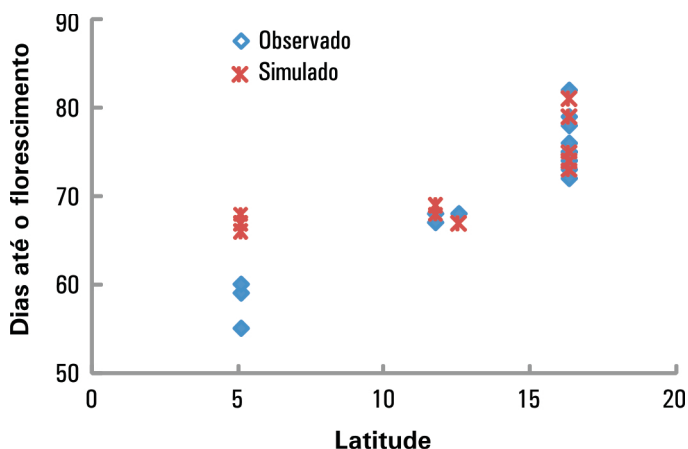


Fig. 5. Comparação entre os dias até o florescimento, simulados e observados em função da latitude.

Observa-se que o modelo superestima o número de dias da emergência à floração a medida que a latitude diminui. As maiores diferenças entre o número de dias simulados e observados ocorreram em Teresina, PI (Latitude 5°S). A razão disso em latitudes menores é ocasionada por uma penalização no cálculo das unidades de calor efetivo (HU) (equação 1 e 2). O modelo penaliza o desenvolvimento quando a temperatura local está entre os valores T_{opt} e $Thigh$. A medida que a latitude diminui, há um aumento médio de 2 graus na temperatura média. Uma representação gráfica dessa metodologia de cálculo é demonstrada na Figura 6.

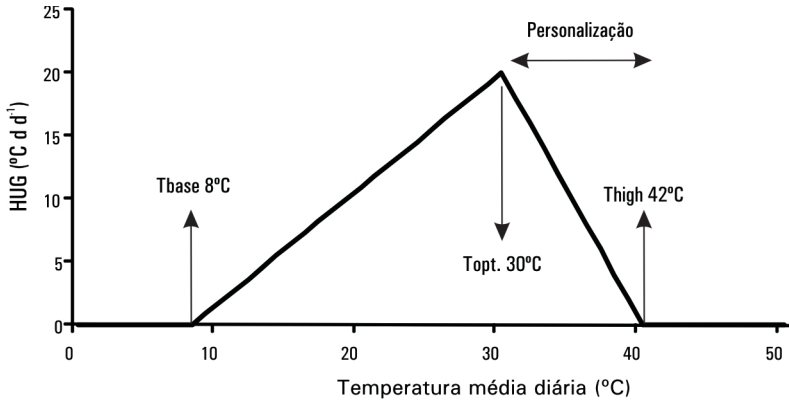


Fig. 6. Unidades de calor efetivo diário (HUH, °C dia dia⁻¹) em função da temperatura média (°C), com temperatura máxima de 42 °C (Thigh, °C) (Tbase: temperatura basal – 8 °C, Topt: temperatura ótima – 30 °C) (valores adotados no modelo ORYZA-APSIM).

Conforme ilustra a Tabela 2, o Município de Teresina apresenta temperaturas mais elevadas que as de Santo Antônio de Goiás.

Tabela 2. Temperaturas máximas, mínimas e médias dos municípios de Santo Antônio de Goiás, GO e Teresina, PI.

| Mês do ano Média mensal | Santo Antônio de Goiás, GO | | | Teresina, PI | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| | Tmax* (°C) | Tmin** (°C) | Tmed*** (°C) | Tmax. (°C) | Tmin. (°C) | Tmed. (°C) |
| Jan. | 29,1 | 18,5 | 23,8 | 32,4 | 22,7 | 27,6 |
| Fev. | 29,7 | 18,4 | 24,1 | 32 | 22,4 | 27,2 |
| Mar. | 29,5 | 18 | 23,8 | 31,9 | 22,5 | 27,2 |
| Abr. | 28,6 | 16,3 | 22,5 | 32 | 22,8 | 27,4 |
| Mai | 27 | 13,7 | 20,4 | 32,2 | 22,4 | 27,3 |
| Jun. | 26,2 | 11,8 | 19 | 32,8 | 21,4 | 27,1 |
| Jul. | 26 | 11,5 | 18,8 | 33,6 | 20,7 | 27,15 |
| Ago. | 27,9 | 12,8 | 20,4 | 35,4 | 20,8 | 28,1 |
| Set. | 29 | 15,2 | 22,1 | 36,5 | 22 | 29,3 |
| Out. | 29,3 | 17,1 | 23,2 | 37 | 22,9 | 30 |
| Nov. | 28,7 | 17,9 | 23,3 | 36,2 | 23,2 | 29,7 |
| Dez. | 28,4 | 18,3 | 23,4 | 35 | 23,2 | 29,1 |
| Média anual | 28,3 | 15,8 | 20,1 | 33,9 | 22,3 | 28,2 |

* Tmax : temperatura máxima ; **Tmin : temperatura mínima; e ***Tmed : temperatura média
Fonte: Heinemann et al. (2007).

Na tentativa de ajustar o modelo para latitudes menores e minimizar as penalizações que aumentaram o ciclo do desenvolvimento fenológico da cultura, elevou-se a Thigh de 42 °C a 50 °C. Para verificar os efeitos dessa mudança no HU para as localidades de Santo Antônio de Goiás, GO, local em que o cultivar foi calibrado e Teresina, PI, local em que os dados de floração simulados foram maiores que os observados, desenvolveu-se um “script” no programa R que calcula o HU para as duas localidades, conforme o modelo. As Figuras 7a e 7b ilustram as regressões entre os HUs calculados com a temperatura Thigh de 42 e 50 °C para as localidades de Santo Antônio de Goiás, GO e Teresina, PI.

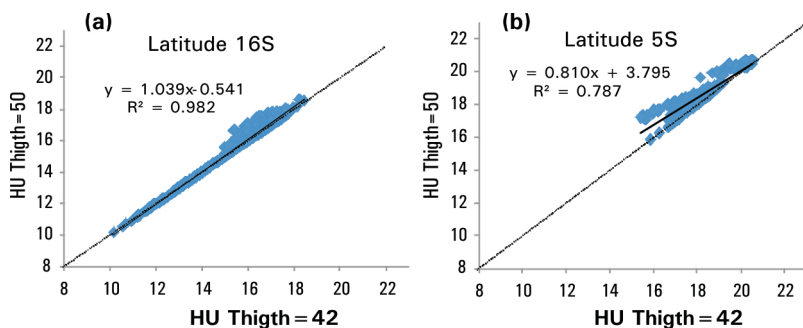


Fig. 7. Correlação entre os HU com Thigh igual a 42 e 50 °C para as localidades de (a) Santo Antônio de Goiás e (b) Teresina.

Observa-se que pelo aumento da Thigh de 42 °C para 50 °C, basicamente não houve mudanças no cálculo do HU em Santo Antônio de Goiás, GO, local no qual foi realizada a calibração do cultivar (Fig. 7a). Entretanto, para Teresina, houve mudanças, ou seja, diminuição da penalização no cálculo de HU, conseqüentemente reduzindo o ciclo da cultura.

Conforme ilustra a Figura 8, o aumento da Thigh para 50 °C reduziu o ciclo da cultura. Entretanto, essa redução não foi suficiente para igualar as data de floração simuladas e observadas em Teresina, PI. Assim, somente o aumento da Thigh não é suficiente para que o modelo possa simular a fenologia de maneira adequada para baixas latitude.

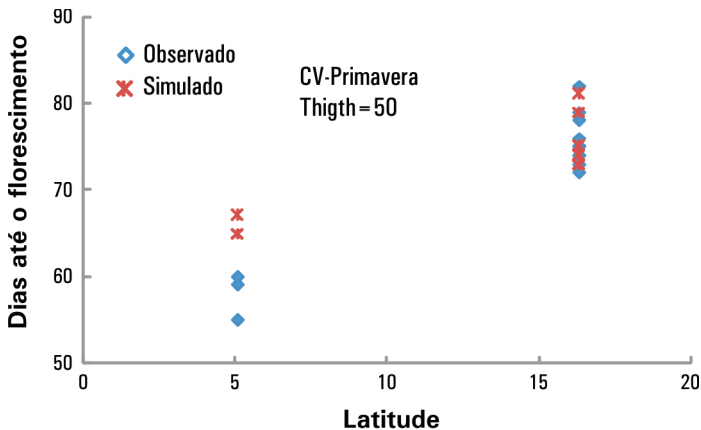


Fig. 8. Comparação entre as datas de florescimento simuladas com Thigh igual a 50 °C e observadas.

Uma nova tentativa foi realizada mudando-se os valores da temperatura ótima (Topt). A mudança da Topt de 30 °C para 33 °C teve influência sobre o ciclo da cultura, promovendo uma diminuição satisfatória do mesmo para Teresina (Fig. 9a). Entretanto, essa mudança também influenciou o ciclo da cultura em Santo Antônio de Goiás (Fig. 9b). Assim, caso se optasse pelo aumento da Topt, isso invalidaria os dados de calibração ilustrados na Tabela 1. A mudança da Topt também impossibilitaria a comparação entre genótipos calibrados em diferentes regiões do Brasil. Conclui-se que a mudança da Topt não é a melhor opção para a correção do ciclo da cultura simulado em baixas latitudes. Para corrigir esse problema no modelo, o ideal seria modificar a equação que o modelo utiliza para calcular o HU.

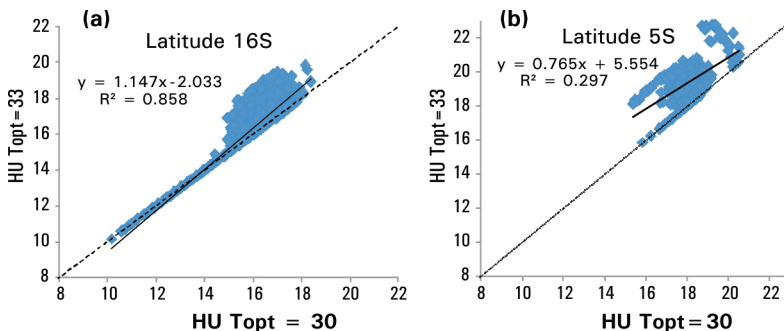


Fig. 9. Correlação entre os HUs com Topt igual a 30 °C e 33 °C para as localidades de (a) Santo Antônio de Goiás e (b) Teresina.

Para que o modelo ORYZA/APSIM possa ser utilizado para a faixa de latitude da área de produção de arroz de terras altas, o cálculo de HU poderia ser modificado utilizando-se a forma trapezoidal (Fig. 10) ao invés da triangular (Fig. 6).

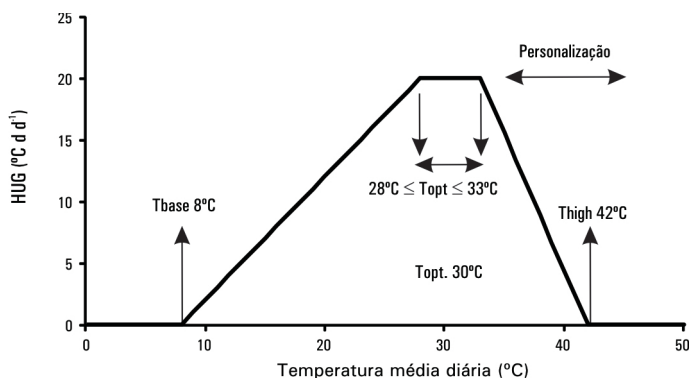


Fig. 10. Unidades de calor efetivo diário (HUE , $^{\circ}\text{C dia dia}^{-1}$) em função da temperatura média (T_{md} , $^{\circ}\text{C}$) (T_b : temperatura basal - 8°C e T_{high} : temperatura máxima - 42°C) com a adição de uma faixa de variação para a temperatura ótima (T_{opt} , $^{\circ}\text{C}$).

No cálculo trapezoidal, tem-se uma faixa de temperatura ótima mínima e máxima. Isso possibilitaria maior flexibilidade no cálculo do HU.

Calibração do crescimento

Foram realizadas calibrações do modelo ORYZA/APSIM para a determinação da massa de matéria seca da parte aérea e de folhas verdes, índice de área foliar (I_{AF} , m^2m^{-2}) e produtividade, na variedade cultivada BRS Primavera, em dois experimentos (duas datas de semeadura) em Santo Antônio de Goiás, GO (Embrapa Arroz e Feijão) na safra 2008/2009.

Foram calibradas as curvas de partição de assimilados para folhas, colmos, órgãos de armazenagem e índice de área foliar.

Partição de assimilados

A Figura 11 (a, b e c) ilustra as partições de assimilados para as folhas (Fig. 11a), colmo (Fig. 11b) e órgãos armazenadores (reprodutivos)

(Fig. 11c), para a cultivar BRS-Primavera (observados e ajustados) e para a cultivar IR-72, utilizada como padrão no modelo ORYZA/APSIM. Observa-se que a cultivar BRS-Primavera difere da cultivar IR-72 na partição de assimilados para a folha por apresentar uma redução no consumo de assimilados no DVS 0,25, enquanto que na cultivar irrigada IR-72 apresenta essa redução para o DVS 0,5 (Fig. 11a). Já para os colmos, a BRS-Primavera apresenta um aumento no consumo de assimilados no DVS 0,25, enquanto que na cultivar IR-72, esse aumento somente ocorre no DVS 0,5 (Fig. 11b). Ambas as cultivares, BRS-Primavera e IR-72, apresentaram a maior diferença na partição de assimilados para os órgãos de armazenamento (Fig. 11c). Para cultivar de terras altas, há um aumento gradual, no qual os órgãos de armazenamento passam a ser drenos absolutos de assimilados somente no DVS igual 1,5. Já na cultivar irrigada, isso ocorre para um DVS igual a 1,2.

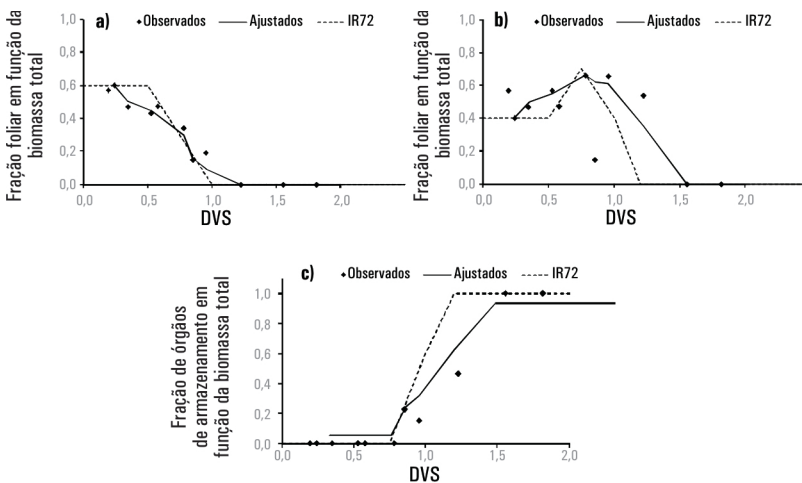


Fig. 11. Partição de assimilados para as (a) folhas (FLV , kg kg^{-1}), (b) colmos (FST , kg kg^{-1}) e (c) órgãos armazenadores (FSO , kg kg^{-1}) em função do tempo cronológico do modelo (DVS) para as variedades cultivadas, de terras altas, a BRS-Primavera (observado e ajustado), e irrigada, a IR-72.

Área Específica foliar

Conforme já explicado em Material e Métodos, a fase exponencial de desenvolvimento do IAF é dependente da dinâmica da AEF (Eq. 5). O

ajuste da equação da AEF é ilustrado pela Figura 12. A cultivar de terras altas apresenta valores menores de alocação de biomassa por unidade de área, apresentado um custo menor na produção de folhas em relação à irrigada. Provavelmente isso seja uma estratégia de adaptação das cultivares de arroz de terras altas a condições de solo não saturado.

Os valores dos parâmetros empíricos referentes à estimativa da área foliar específica, da fração da massa de matéria seca de colmos de reserva utilizados na calibração do modelo e da taxa de crescimento relativo da área foliar são demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros (*A*, *B*, *C* e *D*) empíricos referentes à estimativa da área foliar específica, fração da massa de matéria seca de colmos de reserva (*FSTR*, kg.kg⁻¹) e taxa de crescimento relativo da área foliar (*RGRL*, (°C.dia)⁻¹)

| Dados da calibração | <i>A</i> ha.kg ⁻¹ | <i>B</i> ha.kg ⁻¹ | <i>C</i> - | <i>D</i> - | <i>FSTR</i> Kg.kg ⁻¹ | <i>RGRL</i> (°C.dia) ⁻¹ |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|---------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Valores | 0,0019 | 0,0005 | -4,5** | 0,14** | 0,171 | 0,02* |

* valor obtido através de ajuste no modelo em função dos dados observados no campo;

** valores da variedade cultivada padrão (IR-72) estabelecidos no modelo.

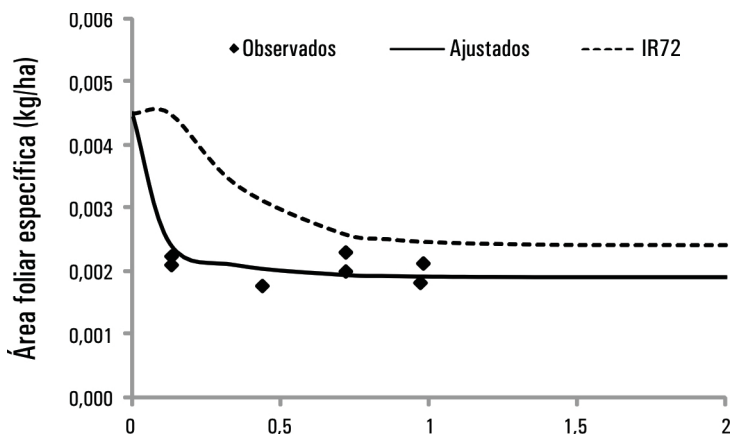


Fig. 12. Curva da área foliar específica (AFE, ha de folha por kg de folha) para a cultivar BRS-Primavera (ajustada em função da equação 5), em função dos valores observados, e para a cultivar IR-72.

Avaliação do crescimento

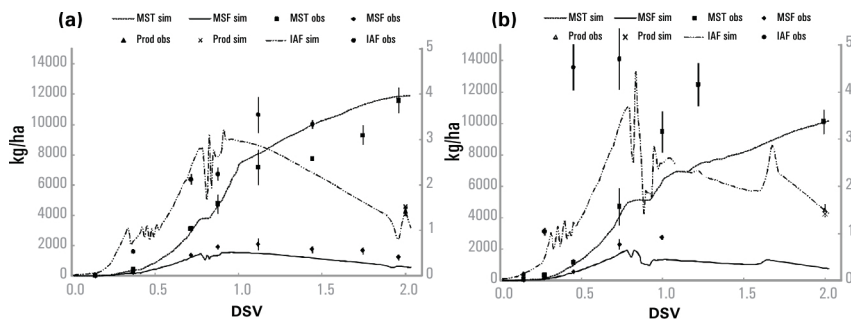


Fig. 13. Valores observados (obs) e simulados (sim), pelo modelo ORYZA-APSIM, das variáveis (MST, kg ha⁻¹; MSF, kg ha⁻¹; IAF, m².m⁻²; P, kg ha⁻¹) para os experimentos (a) 1 e (b) 2.

As Figuras 13a e 13b comparam as variáveis observadas referentes ao crescimento da cultura (MST, MSF, IAF e P) com as simuladas para o conjunto de dados obtidos nos experimentos 1 e 2. Como referência para os valores observados, é ilustrado o desvio padrão. Os melhores resultados foram obtidos para o experimento 1, para a variável MS_t (Figura 13a). Para essa variável, até o florescimento (DVS = 1), os valores simulados estão próximos ao observado. Esses dados estão de acordo com Bouman e Laar (2006), que também observaram maior consistência nos dados simulados de MST. Os valores simulados para a MSF também podem ser considerados adequados, uma vez que mostraram a mesma tendência que os observados. Os valores simulados de IAF foram os que apresentaram as maiores dispersões. A razão disso é que o modelo, originalmente feito para condições irrigadas, é extremamente sensível ao déficit hídrico. Esse modelo utiliza três fatores que penalizam o crescimento. Esses fatores representam, em função do grau de intensidade do estresse hídrico, o enrolamento das folhas, o não crescimento das folhas e a senescência das folhas. No experimento 1 (data de emergência 17/11/2008), houve um curto veranico próximo ao florescimento (DVS = 1), conforme ilustram as Figuras 3 e 13a, o que ocasionou um decréscimo no IAF

simulado. Entretanto, esse veranico não afetou o IAF observado. Já no experimento 2 (data de emergência 29/12/2008), o veranico foi mais intenso, conforme ilustra a Figura 3. Assim, os dados simulados de IAF para o experimento 2 (Fig. 13b) são subestimados pelo modelo. O decréscimo acentuado no IAF simulado no experimento 2 indica que parte da biomassa das folhas foi considerada como senescência (folha morta). Isso explica a paralisação no crescimento da MST e queda na MSF próximo ao florescimento ($DVS = 1$). Apesar do modelo sobrestimar os efeitos do estresse hídrico na MST, MSF e IAF, tanto para os experimentos 1 e 2, a produtividade foi simulada com precisão para ambos os experimentos (Fig. 13a e 13b). Outro fator que pode estar reduzindo o desempenho do IAF simulado é o fato de o crescimento do IAF ser baseado na AEF (Eq. 5). De acordo com Oosterom et al. (2010), o nitrogênio foliar específico apresentou uma melhor correlação com o crescimento foliar que a AEF.

Referências

- ALVAREZ, R. C. F.; CRUSCIOL, C. A. C.; RODRIGUES, J. D.; ALVAREZ, A. C. C. Marcha de absorção de nitrogênio de cultivares de arroz de terras altas com diferentes tipos de plantas. **Científica**, Jaboticabal, v. 34, n. 2, p. 162-169, 2006.
- APSIM. AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEMS SIMULATOR. 2009. Disponível em: <<http://www.apsim.info/apsim/releases/Apsim70/Documentation/4%20Module%20Reference/SoilWat.htm>>. Acesso em: 25 jun. 2009.
- BOUMAN, B. A. M.; LAAR, H. H. van. Description and evaluation of rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. **Agricultural Systems**, Essex, v. 87, n. 3, p. 249-273, Mar. 2006.
- BOUMAN, B. A. M.; KROPFF, M. J.; TUONG, T. P.; WOPEREIS, M. C. S.; TEN BERGE, H. F. M.; LAAR, H. H. van. **ORYZA2000**: modeling lowland rice. Los Baños: International Rice Research Institute, 2001. 235 p.

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. 223-234, 2000.

GAYDON, D.S.; LISSON, S.N.; XEVI, E. **Application of APSIM 'multi-paddock' to estimate whole-of-farm water-use efficiency, system water balance and crop production for a rice-based operation in the Coleambally Irrigation District, NSW.** 2006. Disponível em: <http://www.regional.org.au/au/asa/2006/concurrent/water/4632_gaydond.htm>. Acesso em: 11 ago. 2009.

HEINEMANN, A. B.; LUQUET, D.; DINGHUN, M.; CHAPMAN, S. **Crop model assisted characterization of appropriate traits for rice TPE in Brazilian Cerrados.** 2008a. Disponível em: <http://www.generationcp.org/UserFiles/File/c2_6_heinemann.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2009.

HEINEMANN, A. B.; LUQUET, D.; DINGHUN, M.; 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. 2008b.

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 American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v. 43, n. 6, p. 1507-1516, Nov./ Dec. 2000.

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 Paraná, Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 52, n. 3, p. 177-196, Jan. 2002.

HEINEMANN, A. B.; SILVA, S. C. da; LOPES JUNIOR, S.; AMORIM, A. de O.; ANDRADE, C. de L. T. de; BASTOS, E. A.; PAZ, R. L. da. **Características climáticas dos municípios de Santo Antônio de Goiás (GO), Porangatu (GO), Janaúba (MG), Sete Lagoas (MG), Parnaíba (PI) e Teresina (PI), Brasil.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2007. 36 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 214).

HOOGENBOOM, G.; WILKENS P. W.; TSUJI G. Y. (Ed.). **DSSAT:** version 3. Honolulu: University of Hawaii, 1999. v. 4.

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

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**, Amsterdam, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, Jan. 2003.

KROPFF, M. J.; LAAR, H. H. van; MATTHEWS, R. B. **ORYZA-1:** an ecophysiological model for irrigated rice production. Wageningen: DLO-Research Institute for Agrobiological and Soil Fertility: International Rice Research Institute, 1994. 110 p.

LITTLEBOY, M.; SILBURN, D. M.; FREEBAIRN, D. M.; WOODRUFF, D. R.; HAMMER, G. L.; LESLIE, J. K. Impact of soil erosion on production in cropping systems. I. Development and validation of a simulation model. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 30, n. 5, p. 757-774, 1992.

OOSTEROM, E. J. van; BORRELL, A. K.; CHAPMAN, S. C.; BROAD, I. J.; HAMMERA, G. L. Functional dynamics of the nitrogen balance of sorghum: I. N demand of vegetative plant parts. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 115, n. 1, p. 19-28, Jan. 2010.

PENNING DE VRIES, F. W. T.; LAAR, H. H. van (Ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. 308 p. (Simulations monographs).

PENNING DE VRIES, F. W. T.; JANSEN, D. M.; TEN BERGER, H. F. N.; BAKENA, A. **Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops**. Wageningen: Pudoc, 1989. 271 p. (Simulations monographs).

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.

TAO, F.; HAYASHI, Y.; ZHANG, Z.; SAKAMOTO T.; YOKOZAWA, M. Global warming, rice production, and water use in China: Developing a probabilistic assessment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, n. 1, p. 94-110, Jan. 2008.

ZHANG, X.; MEINKE, H.; DEVOIL, P.; LAAR, G. van; BOUMAN, B. A. M.; ABAWI, Y. **Simulating growth and development of lowland rice in APSIM**. 2004. Disponível em: <http://www.cropscience.org.au/icsc2004/poster/2/8/1212_zhang.htm>. Acesso em: 28 jun. 2009.

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