**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Aplicação do modelo ORYZA-DSSAT para a estimativa da
produtividade do arroz de terras altas como subsídio ao
zoneamento de risco climático no Estado de Goiás, Brasil**

Lucas Fernandes de Souza

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Física do
Ambiente Agrícola

**Piracicaba
2013**

Lucas Fernandes de Souza
Engenheiro Agrícola

**Aplicação do modelo ORYZA-DSSAT para a estimativa da produtividade do
arroz de terras altas como subsídio ao zoneamento de risco climático no
Estado de Goiás, Brasil**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CESAR SENTELHAS**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Física do
Ambiente Agrícola

Piracicaba
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Souza, Lucas Fernandes de

Aplicação do modelo ORYZA-DSSAT para a estimativa da produtividade do arroz de terras altas como subsídio ao zoneamento de risco climático no Estado de Goiás, Brasil / Lucas Fernandes de Souza. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
198 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. ORYZA-DSSAT 2. Arroz de terras altas 3. Zoneamento de risco climático

I. Título

CDD 633.18
S729a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter permitido a realização do Doutorado e por Sua infinita misericórdia por mim. A Ele toda a honra, toda a glória e todo o louvor.

À minha amada esposa Letícia, pelo carinho, amor, paciência, sabedoria e apoio total em todos os momentos. Ao meu filho querido, Isaac, pela alegria contagiante.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio e ensinamentos passados a mim.

Ao Prof. Dr. Paulo Cesar Sentelhas, pela orientação, amizade, apoio e paciência durante todo o período de realização deste trabalho, sejam nos momentos de alegria ou dificuldades.

Ao Dr. Alexandre Heinemann, pelo conhecimento e acolhida durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Luiz Roberto Angelocci, pelo incentivo em vir para a ESALQ/USP e todo o apoio dado a mim.

Aos demais professores e profissionais que contribuíram de alguma forma para minha formação e conclusão deste trabalho.

A todos os amigos da “Cúpula”: Leonardo Monteiro, Daniel Nassif, Rafael Battisti, Leandro Garcia, Murilo, Alessandro Toyama, Cristian, Alexandre, Éder e Ester, pela amizade, companheirismo, confraternizações, troca de conhecimento e apoio nos momentos difíceis.

Aos meus grandes amigos da PIB: Leandro Garcia, Sarah, Benjamin, Lucas Gabriel, Priscila, Bernardo, Diego, Viviane, Pr. Marcelo, Marjorie, Liz, Marcelo Bonin, Melissa, Miguel, Pr. Clóvis, Juliana, Pr. Josimar, Vanessa, Anderson, Priscila, Marcos, Regiane, Marcos Soares, Léia, pela amizade e companheirismo.

A todos os amigos que fiz nesse período em Piracicaba, pelo apoio e companhia.

A Washington State University e ao Dr. Gerrit Hoogenboom, pela oportunidade de passar um período nos Estados Unidos e a todos os amigos que fiz em Prosser, WA.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização deste doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas.

À Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) por ter permitido a realização deste doutorado.

À Embrapa Arroz e Feijão, ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional de Águas (ANA), ao Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás (SIMEHGO), à Federação de Agricultura do Estado de Goiás (FAEG) pelos dados utilizados neste estudo.

A todos que de qualquer forma contribuíram para a conclusão deste doutorado e pela minha formação, seja profissional ou pessoal.

MUITO OBRIGADO

“Pois Dele, por Ele e para Ele
são todas as coisas.
A Ele seja a glória para sempre! Amém.
Romanos 11:36

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Revisão Bibliográfica	18
1.1.1 Cultura do Arroz	18
1.1.1.1 Importância da Cultura do Arroz.....	18
1.1.1.2 Ecossistemas do arroz	19
1.1.1.3 Considerações sobre o cultivo do arroz inundado	21
1.1.2 Arroz de sequeiro ou terras altas	22
1.1.3 Fatores determinantes da produtividade do arroz de terras altas	24
1.1.4 Cultivar de arroz de terras altas BRS-Primavera.....	28
1.1.5 Zoneamento Agrícola	28
1.1.5.1 Critérios para o cultivo do arroz de terras altas em condições de baixo risco climático	29
1.1.6 Modelos de simulação de cultura	30
1.1.7 DSSAT	31
Referências	32
2 CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO ORYZA-DSSAT PARA O ARROZ DE TERRAS ALTAS NO ESTADO DE GOIÁS, BRASIL	43
Resumo	43
Abstract	43
2.1 Introdução	44
2.2 Material e Métodos	46

2.2.1 Descrição do modelo ORYZA-DSSAT	46
2.2.1.1 Crescimento e desenvolvimento da cultura do arroz no modelo ORYZA-DSSAT	46
2.2.1.2 Dinâmica da água e balanço hídrico do modelo ORYZA-DSSAT	48
2.2.2 Descrição dos dados experimentais	50
2.2.3 Calibração do modelo ORYZA-DSSAT	56
2.2.3.1 Taxa de desenvolvimento fenológico (DVR)	61
2.2.3.2 Parâmetros de partição de assimilados	61
2.2.3.3 Parâmetros de desenvolvimento da área foliar e crescimento da cultura do arroz	62
2.2.3.4 Parâmetro de crescimento de espiguetas (SPGF)	63
2.2.3.5 Parâmetros relacionados ao crescimento radicular	63
2.2.3.6 Parâmetros relacionados ao estresse hídrico	64
2.3 Avaliação do modelo ORYZA-DSSAT	64
2.3 Resultados e Discussão	65
2.3.1 Calibração do modelo ORYZA-DSSAT	65
2.3.1.1 Desenvolvimento fenológico	65
2.3.1.2 Biomassa e Índice de Área Foliar (IAF)	67
2.3.1.3 Componentes do estresse hídrico	71
2.3.2 Avaliação do modelo ORYZA-DSSAT	76
2.3.2.1 Avaliação da fenologia	77
2.3.2.2 Avaliação da biomassa e IAF	78
2.4 Conclusões	85
Referências	86
3 DETERMINAÇÃO DAS ÉPOCAS PREFERENCIAIS DE SEMEADURA PARA A CULTURA DO ARROZ DE TERRAS ALTAS, BASEADA NO RISCO CLIMÁTICO E NA PRODUTIVIDADE, ESTIMADA PELO MODELO ORYZA-DSSAT, PARA O ESTADO DE GOIÁS	91

Resumo	91
Abstract	92
3.1 Introdução	93
3.2 Material e Métodos	95
3.2.1 Caracterização da área de estudo	95
3.2.1.1 Caracterização climática do Estado de Goiás	95
3.2.1.2 Caracterização do solo do Estado de Goiás	96
3.2.2 Dados Meteorológicos	96
3.2.3 Simulação do crescimento da cultura utilizando o ORYZA-DSSAT	100
3.2.3.1 Variáveis de entrada do modelo ORYZA-DSSAT	102
3.2.4 Aplicação do modelo ORYZA-DSSAT para estimativa da produtividade potencial e atingível do arroz de terras altas no Estado de Goiás.....	103
3.2.5 Extrapolação e mapeamento das produtividades potencial e atingível simuladas para a cultura do arroz de terras altas no Estado de Goiás	105
3.2.6 Determinação das épocas preferenciais de semeadura para a cultura do arroz de terras altas no Estado de Goiás	107
3.2.6.1 Determinação das épocas preferenciais de semeadura em função do ISNA ponderado	109
3.2.6.2 Determinação das épocas preferenciais de semeadura em função do custo de produção	110
3.3 Resultados e Discussão	113
3.3.1 Produtividade potencial do arroz de terras altas para o Estado de Goiás	113
3.3.2 Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás	120
3.3.2.1 Mapeamento da produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás	122
3.3.3 ISNA ponderado	143
3.3.4 Determinação das épocas preferencias de semeadura do arroz de terras altas no Estado de Goiás	150
3.3.4.1 Anápolis	151

3.3.4.2 Aragarças	153
3.3.4.3 Caiapônia.....	155
3.3.4.4 Catalão	158
3.3.4.5 Formosa.....	160
3.3.4.6 Porangatu	162
3.4 Conclusões	164
Referências.....	166
APÊNDICES	173
ANEXOS.....	185

RESUMO

Aplicação do modelo ORYZA-DSSAT para a estimativa da produtividade do arroz de terras altas como subsídio ao zoneamento de risco climático no Estado de Goiás, Brasil

O arroz é considerado o alimento mais importante para a segurança alimentar da população, sendo cultivado em várias localidades e diferentes condições climáticas ao redor do mundo. No Brasil, a maior parte do arroz é proveniente da produção no sistema inundado. Devido ao aumento da demanda por esse alimento e aos problemas sócio-ambientais causados pelo uso excessivo da água nesse sistema de produção, tem havido o interesse de se expandir a produção de arroz para outras regiões do país. Nas regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste, onde o arroz é produzido principalmente no sistema de terras altas, ou seja, de sequeiro, o principal fator limitante é o déficit hídrico. A fim de se minimizar os riscos climáticos associados à cultura do arroz de terras altas e maximizar os lucros, agricultores e órgãos governamentais devem buscar estratégias para identificar as melhores épocas de semeadura. Nesse contexto, as tomadas de decisão, podem ser auxiliadas pelo uso de modelos de simulação de culturas, os quais são ferramentas muito úteis, podendo prever a variabilidade da produtividade, auxiliando na definição das épocas preferenciais de semeadura. Com base nisso, o presente estudo teve como objetivos: 1) calibrar e avaliar o desempenho do modelo ORYZA-DSSAT para simular o desenvolvimento e a produtividade do arroz de terras altas no Estado de Goiás; 2) aplicar o modelo calibrado e testado para determinar as épocas preferenciais de semeadura, juntamente com o índice de satisfação da necessidade de água (ISNA) de todas as fases da cultura e o custo de produção, e compará-las com as épocas propostas pelo Ministério da Agricultura (MAPA), através do zoneamento de risco climático; e 3) indicar as melhores regiões do Estado de Goiás para produção do arroz de terras altas, por meio de mapas, de modo a subsidiar a recomendação de cultivares e a adoção de políticas públicas. Para a calibração do modelo foram utilizados dados de um experimento conduzido no período de 2010-2011, em Santo Antônio de Goiás, GO. Para avaliar o modelo, dados de dois experimentos independentes foram utilizados, sendo um em Santo Antônio de Goiás, GO no período de 2008-2009, e outro em Porangatu, GO, no período de 2009-2010. Já a avaliação das épocas preferenciais de semeadura empregou dados meteorológicos e dos solos de 26 localidades para séries históricas que variaram de 15 a 30 anos. A cultivar utilizada foi a BRS-Primavera, de ciclo médio. Os resultados obtidos indicaram que o modelo simulou satisfatoriamente o desenvolvimento e a produtividade do arroz de terras altas para as condições de Goiás. Foram encontradas diferenças entre as épocas preferenciais de semeadura obtidos neste estudo e as recomendadas pelo MAPA. O modelo mostrou-se eficiente em simular a produtividade potencial e atingível do arroz de terras altas em Goiás em função da variação temporal e espacial das condições climáticas, possibilitando gerar mapas para subsidiar a expansão da cultura no estado de GO, a alocação de cultivares e avaliar o risco climático de diferentes épocas de semeadura.

Palavras-chave: ORYZA-DSSAT; Arroz de terras altas; Zoneamento de risco climático

ABSTRACT

Application of ORYZA-DSSAT model to estimate upland rice yield as a subsidy to climate risk zoning in the State of Goiás, Brazil

Rice is the most important crop for food security, growing in many locations and different climate conditions around the world. In Brazil, rice is grown mainly under flood conditions. Due the increase of rice demand and social and environmental problems caused by the excessive use of water in the flood production system, there has been interest of expanding rice production to other regions of Brazil. In these regions, where rice production system is under rainfed conditions (upland rice), the main factor limiting rice yield is the water stress. To minimize the climatic risks and maximize profits, farmers and government agencies should find out strategies to identify the best sowing dates for upland rice. In such context, the decisions can be done based on crop simulation models, which are very useful tools to predict the variability of yield, defining the best sowing dates. Based on that, the objectives of the present study were: 1) to calibrate and evaluate ORYZA-DSSAT model to estimate the development and yield of upland rice in the State of Goiás, Brazil; 2) to apply the model for determining the best sowing dates, together with the crop water requirement satisfaction index (ISNA) for all phenological phases and production costs, and to compare these dates with those recommended by the Climatic Risk Zoning of Minister of Agriculture, Livestock and Food Supply (MAPA); and 3) to determine the best regions of Goiás State to grown upland rice, through yield maps, in order to support the recommendation of rice cultivars and adoption of public policies. To calibrate the model, data from one field experiment carried out in Santo Antônio de Goiás, GO during 2010-2011 season was used. To evaluate the model data from two other independent field experiments were used, with the first carried out in Santo Antônio de Goiás, GO, during 2008-2009 season, and the second in Porangatu, GO, during 2009-2010 season. The upland Brazilian rice cultivar BRS-Primavera (normal season) was the one used in these experiments. The results showed that the model was able to estimate development and yield of upland rice in Goiás State. Differences were found among the best sowing dates determined by this study and those recommended by MAPA. The model ORYZA-DSSAT was efficient for simulating the upland rice potential and attainable upland rice yields in the state of Goiás, in function of temporal and spatial climate variability, making possible to generate maps to subsidize the crop expansion in the state, to allocate the best cultivars to each region and to evaluate the climatic risk of the different sowing dates.

Keywords: ORYZA-DSSAT; Brazilian upland rice; Climatic risk zoning

1 INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) representa um dos principais cereais cultivados em todo o mundo, sendo considerado o produto mais importante para a segurança alimentar, fornecendo um balanceamento nutricional excelente, além de ser uma cultura extremamente rústica, possuindo o maior potencial de aumento de produção para o combate da fome do mundo (BARATA, 2005).

O arroz é cultivado em uma grande gama de localidades ao redor do mundo, com diferentes condições climáticas, e regimes hidrológicos, além dos aspectos culturais (ARTACHO et al., 2011). No Brasil, a maior parte do arroz é produzida essencialmente no sistema de várzeas inundadas (LORENÇONI, 2009). A produção de arroz estimada para a safra 20012/2013 é de 11,9 milhões de toneladas, com a maior parte produzida na Região Sul (77%) e na Região Centro-Oeste (6%) (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2013).

Devido ao aumento da demanda mundial por arroz e aos problemas sócio-ambientais acarretados pelo uso excessivo de água para produzir esta cultura no sistema inundado, está havendo um aumento no interesse de se expandir o cultivo do arroz para as Regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil, onde o arroz é produzido principalmente no sistema de terras altas, ou seja, sequeiro (LORENÇONI, 2009).

Apesar do interesse em se cultivar o arroz de terras altas, este sistema de produção apresenta uma baixa produtividade em relação ao sistema de cultivo inundado, devido principalmente à grande variabilidade climática, de solos, e à baixa utilização de tecnologias, como o uso de cultivares não adaptadas ao ambiente (LORENÇONI, 2009).

De acordo com Heinemann e Stone (2009), um dos principais fatores que contribuem para a baixa produtividade do arroz de terras altas é a variabilidade interanual e sazonal das chuvas, que acarretam alta variabilidade da disponibilidade de água nos solos, até mesmo durante o período chuvoso, quando as precipitações ficam abaixo da demanda hídrica da cultura, havendo a ocorrência de estresse hídrico.

Desse modo, o fator meteorológico apresenta-se como uma das principais causas de risco para a produtividade do arroz de terras altas, sendo o responsável

pelas quebras de safras, acarretando grandes prejuízos econômicos aos agricultores e ao governo.

Devido ao risco de ocorrência de quebras de safras, determinadas decisões devem ser tomadas por parte dos produtores, com a finalidade de minimizar os riscos e maximizar os lucros (KINIRY et al., 1997). Além disso, é importante fazer uso da predição da produtividade das culturas, tanto por parte dos produtores, visando a um manejo mais adequado da cultura, quanto por parte dos órgãos governamentais, visando à adoção de políticas públicas para o manejo das reservas de alimentos (HOOGENBOOM, 2000). Nesse sentido, os modelos de simulação de culturas são muito úteis, podendo predizer a variabilidade da produtividade devido às condições ambientais (GUNGULA et al., 2003).

Além disso, os modelos de simulação de culturas são capazes de identificar o potencial produtivo de uma determinada cultura numa dada região, assim como as práticas culturais mais adequadas para seu cultivo (QUIRING; LEGATES, 2008) e também analisar o desempenho de cultivares em diferentes solos, condições climáticas e datas de semeadura (HURTADO et al., 2005; NOUNA et al., 2003; SOLER; SENTELHAS; HOOGENBOOM, 2009), possibilitando se conhecer o desempenho médio da cultura antes mesmo dela ser cultivada em diferentes condições.

No Brasil, a predição de produtividade é realizada por meio de estimativas anuais, utilizando questionários que são respondidos diretamente pelos produtores e entidades envolvidas na produção agrícola, sendo considerada uma metodologia com certo grau de subjetividade e incerteza (CARDOSO; FARIA; FOLEGATTI, 2004; FONTANA et al., 2000).

Um tipo de modelagem utilizado no Brasil é o zoneamento agrícola de risco climático, que determina os melhores locais e épocas de semeadura para uma determinada cultura. O zoneamento é realizado por meio da análise probabilística da disponibilidade hídrica apenas durante as fases mais críticas das culturas (floração – enchimento dos grãos). Como resultado, as datas e locais de semeadura são classificados qualitativamente como aptos ou inaptos (BRASIL, 2012b).

Outros exemplos de modelos que vêm sendo muito utilizados na agricultura são àqueles baseados em processos, ou seja, são modelos mecanísticos que explicam todos os processos envolvidos na produção vegetal. Normalmente, esses modelos são compartimentalizados em submodelos, nos quais estão relacionados

com processos específicos relacionados ao crescimento e desenvolvimento das plantas (JAME; CUTFORTH, 1996).

Alguns modelos mecanísticos têm sido utilizados com bastante frequência em várias partes do mundo para a cultura do arroz. Entre eles estão o ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2001); ORYZA-APSIM (ZHANG et al., 2007); e CERES-Rice (JONES et al., 2003). Atualmente o modelo ORYZA2000 foi incorporado ao sistema DSSAT, (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), atualmente desenvolvido e mantido pelo grupo ICASA, (*International Consortium for Agricultural Systems Applications*), sendo conhecido como ORYZA-DSSAT.

Todos os modelos citados acima vêm sendo utilizado nos estudos de produção potencial, manejo da cultura, previsão da produtividade do arroz, melhores épocas de semeadura e impactos das mudanças climáticas sobre a cultura do arroz. Porém, pouco se sabe sobre o desempenho do modelo ORYZA2000 recentemente incorporado ao DSSAT, chamado de CSM-ORYZA *Rice Model*, também conhecido como ORYZA-DSSAT, pois ainda se trata de uma versão beta.

Diante do exposto acima, a hipótese deste trabalho é que o zoneamento de risco climático para a cultura do arroz de terras altas pode ser melhor determinado com o auxílio de um modelo mecanístico de simulação da cultura, desde que este esteja devidamente calibrado e testado para as condições específicas de interesse, ou seja, não apenas baseado na disponibilidade hídrica, mas em função de todos os processos relacionados ao crescimento e desenvolvimento da cultura, e não somente nos períodos críticos da cultura, mas em todas as suas fases fenológicas. Além disso, considera-se, ainda, que a produtividade simulada da cultura sirva como uma informação quantitativa de extrema importância para definir a rentabilidade da atividade, auxiliando assim na definição das épocas preferenciais de semeaduras. Sendo assim, os objetivos do presente estudo são:

1 - Calibrar e avaliar o desempenho do modelo ORYZA-DSSAT, versão beta, para estimar a produtividade e o desenvolvimento da cultura do arroz de terras altas no Cerrado brasileiro;

2 - Aplicar o modelo devidamente calibrado e testado, para determinar as épocas preferenciais de semeadura do arroz de terras altas, cv. BRS-Primavera, no Estado de Goiás, comparando-se esses resultados com as datas recomendadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA);

3 - Elaborar mapas de produtividade potencial e atingível para a cultura do arroz de terras altas no Estado de Goiás, de modo a subsidiar a recomendação de cultivares e a adoção de políticas públicas quanto às melhores regiões para a produção de arroz de terras altas.

1.1 Revisão Bibliográfica

1.1.1 Cultura do Arroz

1.1.1.1 Importância da Cultura do Arroz

O arroz é uma das culturas mais importantes no mundo, tanto em termos econômicos, quanto para a segurança alimentar, pois, além de fornecer um excelente balanceamento nutricional, é uma cultura extremamente rústica, o que faz dela a espécie de maior potencial de aumento de produção para o combate à fome em várias regiões do mundo (BARATA, 2005; SHEEHY; MITCHELL; HARDY, 2000).

O arroz é a base da alimentação para mais da metade da população mundial, sendo que a maioria desta é extremamente vulnerável à elevação dos preços desse produto. Na maioria dos países subdesenvolvidos e/ou em desenvolvimento, a cadeia produtiva do arroz é capaz de influenciar diretamente na renda, saúde, meio ambiente e no bem estar social dessas populações (LORENÇONI, 2009).

No mundo, mais de três bilhões de pessoas dependem do arroz para suprir mais de 35% das suas calorias diárias (FAGERIA; SLATON; BALIGAR, 2003). O arroz é o segundo cereal mais cultivado no mundo, atrás apenas do trigo. Ao contrário do trigo, 95% da produção do arroz ocorrem em países menos desenvolvidos, principalmente Ásia, África e América Latina, sendo que a China e Índia são os maiores produtores e consumidores mundiais desse produto (FAGERIA, 2007).

A área colhida de arroz no mundo na safra de 2011/2012 foi de cerca de 159 milhões de hectares, cuja produção alcançou o valor de aproximadamente 691 milhões de toneladas (ESTADOS UNIDOS, 2012). No Brasil, a produção de arroz na safra 2011/2012 correspondeu a 1,8% da produção mundial e 51% da América do Sul, estabelecendo-se como um dos dez maiores produtores de arroz do mundo (ESTADOS UNIDOS, 2012). Além de grande produtor, o Brasil destaca-se como um

dos maiores consumidores mundiais de arroz, absorvendo cerca de 5% do volume das exportações mundiais, com um consumo médio per capita de cerca de 70 kg ano⁻¹ (FNP, 2007).

Economicamente, a cultura do arroz destaca-se como uma das mais importantes da agricultura brasileira, tendo movimentado em 2011, R\$ 7,7 bilhões em receita bruta, sendo o quinto produto em renda, atrás apenas da soja, cana-de-açúcar, milho e café (BRASIL, 2012a). Apesar de ser o quinto produto em renda, o setor arroseiro destaca-se como o terceiro maior em produção de grãos, apenas atrás da soja e do milho, porém, o arroz é o principal produto de consumo humano produzido no Brasil, já que a maior parte da produção de soja é destinada à exportação e a do milho é destinada à fabricação de rações para animais (CONAB, 2012). Outro indicativo importante é que 34% da produção do arroz produzido no Brasil advém da agricultura familiar (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2006), indicando que essa cultura possui um importante papel social no país (EMBRAPA, 2005; WALTER; MARCHEZAN; AVILA, 2008)

Nos últimos anos, a produção mundial de arroz aumentou 1,09%, enquanto que a população mundial cresceu 1,32% e o consumo de arroz, 1,27% (SANTOS; RABELO, 2004). Estima-se que em 2025 seja necessário aumentar a produção do arroz em 60% para suprir a demanda da população mundial. Essas estimativas são baseadas no crescimento contínuo da população, na drástica redução da produção de arroz durante a década de 1990 (BROWN, 1996, 1997) e ao aumento do poder aquisitivo das populações de menor renda (FAGERIA, 2007).

O mesmo quadro deve ser observado no Brasil, onde a atual demanda já supera a oferta do arroz. Na safra 2011/2012, o Brasil produziu 11,6 milhões de toneladas, porém, o consumo superou a produção, alcançando 12,1 milhões de toneladas, ou seja, um déficit de 500 mil toneladas, sendo este suprido com o estoque de passagem e com as importações (CONAB, 2012).

1.1.1.2 Ecossistemas do arroz

De acordo com Fageria (2007), um ecossistema é definido como um ambiente de cultivo de determinada cultura. Ainda segundo o autor, o arroz é provavelmente a cultura mais versátil do mundo, já que possui alta adaptabilidade aos diferentes tipos de habitats, os quais, na maioria, são caracterizados unicamente por seus estados

hidrológicos (NGUYEN et al., 1997). Essa cultura pode ser cultivada desde ambientes localizados ao nível do mar até elevadas altitudes, além de poder ser cultivado em ambientes inundados ou secos (SANTOS et al., 2003).

A espécie de arroz mais cultivada no mundo é a *Oryza sativa*, e pode ser dividida basicamente em dois grupos de acordo com sua distribuição geográfica: *japônica*, cultivada principalmente em regiões temperadas; e *indica*, cultivada em regiões tropicais e subtropicais (TAKAHASHI, 1984).

O arroz pode ser classificado em cinco diferentes grupos: irrigado - cultivado em várzeas (inundado); seco - cultivado em várzeas; águas profundas; sequeiro (terras altas); e pântanos, utilizando a água da maré. Esses grupos são baseados no regime hídrico sazonal (déficit, excesso ou ótimo); na drenagem (pobre ou boa); na temperatura do ar (ótima ou baixa); nos solos (normais ou problemáticos); e na topografia (plano ou ondulado) (INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE – IRRI, 1984).

O arroz cultivado em várzeas inundadas (irrigado) é produzido em ambientes com topografia relativamente plana com controle da lâmina de água, deixando o arroz inundado na maior parte de seu ciclo. A maior parte do arroz cultivado no mundo (55% da área colhida) é proveniente desse tipo de sistema, contribuindo com cerca de 76% da produção (FAGERIA; SLATON; BALIGAR, 2003). O arroz cultivado em ambientes secos, com solos bem drenados, sem acumulação de água na superfície e dependente da precipitação é chamado de arroz de sequeiro ou de terras altas ou, ainda, arroz cultivado em ambiente aeróbico (FAGERIA, 2001).

No Brasil, o arroz é cultivado predominantemente em dois tipos de sistemas: sistema de produção irrigado em várzeas (inundado) e o sistema de sequeiro. A Figura 1 indica a localização dos sistemas produtivos e os principais fluxos de comercialização e consumo.

Aproximadamente 77% do arroz produzido no Brasil é proveniente da Região Sul (PR, SC e RS), onde é cultivado no sistema de várzeas inundadas, com o Rio Grande do Sul sendo o maior produtor nacional, responsável por 67% do total, com uma produção de 7,7 milhões de toneladas na safra 2011/2012 (CONAB, 2012). Em média, a produtividade do arroz cultivado no sistema inundado é de cerca de 5.000 kg.ha⁻¹ (IBGE, 2006).

Figura 1 - Localização dos sistemas produtivos de arroz e os principais fluxos de comercialização e consumo no Brasil

Fonte: Ferreira e Wander (2005)

1.1.1.3 Considerações sobre o cultivo do arroz inundado

Aproximadamente 70% da água doce do planeta utilizada pelo homem é destinada à irrigação, e 40% dos alimentos são produzidos sob o sistema irrigado (CHAVES; OLIVEIRA, 2004). Como visto anteriormente, a maior parte do arroz é produzido no sistema inundado, principalmente na maior região produtora do mundo, a Ásia, onde são encontradas as maiores produtividades da cultura. Apesar das elevadas produtividades, o sistema de produção de arroz inundado utiliza uma grande quantidade de água para o bom funcionamento do sistema. Sendo assim, para produzir 1 kg de grãos de arroz em casca é necessário cerca de 2.500 L de água, sendo que 55% desse total é utilizado na evapotranspiração e o restante é perdido por escoamento superficial (*runoff*) ou, drenagem profunda (MEINKE et al., 2009), acarretando em aumento da competição pela água com as indústrias e o uso doméstico. Além disso, outros fatores contribuem para esse problema, como a poluição da água, depreciação dos recursos hídricos, mudanças climáticas, mudanças no regime de precipitação, e a limitação da área disponível para aumento

da produção nas regiões produtoras que utilizam esse sistema, principalmente pelo alto impacto ambiental e social (BOUMAN; TUONG, 2001; HEINEMANN; STONE, 2009). Na Ásia, o aumento da população e a crescente urbanização têm gerado significativa redução da disponibilidade de água para a irrigação (LAFITTE et al., 2006).

Outro fator importante é o risco de desabastecimento do cereal, caso ocorram problemas climáticos, como os fenômenos *El Niño* e *La Niña*, que possam causar uma perda significativa da produtividade nas regiões que concentram grande parte da produção de arroz inundado (LORENÇONI, 2009).

Portanto, fica evidente a necessidade de expansão do cultivo de arroz para outras regiões do país e do mundo, utilizando outros sistemas de produção, descentralizando, assim, a produção, e fazendo com que se aumente o interesse nos sistemas de produção de arroz de sequeiro, como já vem se estabelecendo na Região Centro-Oeste do Brasil.

1.1.2 Arroz de sequeiro ou terras altas

O arroz de sequeiro ou terras altas caracteriza-se pelo seu desenvolvimento em áreas planas ou inclinadas, com semeadura direta em condições de seca e dependente da precipitação, podendo ou não ocorrer irrigação suplementar, caracterizado pela condição aeróbia de desenvolvimento radicular (DE DATTA, 1975). O cultivo não ocorre em solos hidromórficos de baixadas (várzeas inundadas) e não utiliza sistema de irrigação por inundação e/ou subirrigação (ALVAREZ et al., 2006).

O arroz de sequeiro é cultivado em três continentes, na maioria das vezes por pequenos agricultores voltados para a subsistência em regiões mais pobres. Na América do Sul, o arroz produzido no sistema de sequeiro é uma das culturas mais importantes, cujo cultivo é realizado principalmente no sistema de rotação com a soja e feijão (FAGERIA, 2010). As maiores produtividades são obtidas na América Latina, porém, menores que as obtidas pelo sistema inundado (DE DATTA, 1975; FAGERIA, 2002). Em média, a produtividade do arroz de sequeiro no Brasil é da ordem de 2.000 kg.ha⁻¹ (IBGE, 2006). De acordo com Fageria (2002), em outras regiões do mundo, a produtividade do arroz de sequeiro é semelhante à obtida no Brasil. A baixa produtividade do arroz de sequeiro se deve aos fatores ambientais,

como a variabilidade climática, e à baixa tecnologia empregada pelos agricultores (HEINEMANN et al., 2009).

Na zona tropical brasileira, o arroz de sequeiro predomina em relação ao irrigado (MORAIS et al., 2005), sendo cultivado principalmente na Região Central do Brasil, conhecida como “Cerrado”, geralmente sendo utilizado como a primeira cultura a ser cultivada em áreas abertas para estabelecimento de pastagens (FAGERIA, 2010; HEINEMANN et al., 2009; MENDES, 2010). Essa região é caracterizada pelo predomínio de solos com baixa fertilidade natural e acidez elevada, com alta heterogeneidade, com clima variando de úmido a subúmido, e com ocorrência de períodos curtos de estiagem durante o período das águas, denominados veranicos (MENDES, 2010; PIGGIN et al., 1998).

Na safra 2010/2011, a produção do arroz de sequeiro representou aproximadamente 22% do total produzido no Brasil. Apesar da baixa produção, a área cultivada nesse sistema totalizou a metade (50%) da área total na mesma safra (CONAB, 2011). Porém, a área cultivada do arroz de sequeiro vem diminuindo consideravelmente, devido à concorrência com a soja e o milho, culturas mais lucrativas, além da dificuldade de abertura de novas áreas, uma vez que a preferência do seu cultivo se dá nessas áreas (CONAB, 2011).

Apesar da diminuição da área, o sistema de produção de terras altas vem sendo aperfeiçoado, com a profissionalização do setor e o desenvolvimento de tecnologias agrícolas mais apropriadas, como a utilização de irrigação complementar, manejo da cultura mais eficiente, estudos agrometeorológicos para definição das melhores épocas de semeadura, caracterização dos locais mais aptos à produção, e melhoramento genético e desenvolvimento de novas cultivares (FAGERIA, 2007; FARIA; FOLEGATTI, 2001; HEINEMANN; STONE, 2009; HEINEMANN et al., 2009; HEINEMANN, 2010; MORAIS et al., 2005; SOARES, 2001).

Todos os esforços para o aperfeiçoamento do sistema de produção de terras altas visam ao aumento da produtividade, contudo, o cultivo de arroz de terras altas está longe do que o sistema é capaz de produzir. Em cultivos bem conduzidos, em áreas com distribuição de chuvas favoráveis, como no Centro-Norte do estado do Mato Grosso, as produtividades podem alcançar mais de 4 t ha^{-1} , e em nível experimental, até 6 t ha^{-1} (FAGERIA, 2007; LORENÇONI, 2009; PINHEIRO, 2003).

1.1.3 Fatores determinantes da produtividade do arroz de terras altas

A cultura do arroz de terras altas está sujeita a vários fatores, tanto bióticos quanto abióticos, que afetam a produtividade final. Dentre esses fatores se podem citar as doenças, como o bruzone (PRABHU et al., 2003); a deficiência de macro e micro nutrientes (ARTACHO et al., 2011; FAGERIA, 2000); a competição com plantas daninhas (YOSHIDA, 1975); e impedimentos físicos ou químicos dos solos (HEINEMANN, 2010). Além desses fatores, os elementos climáticos são de extrema importância para a cultura, já que ela é considerada como de alto risco climático, pois é extremamente dependente da precipitação (SILVA; ASSAD, 2001). Dentre os fatores climáticos que podem limitar a produtividade do arroz de terras altas, a temperatura do ar, a radiação solar e a chuva são os principais (FARIA; FOLEGATTI, 2001; HEINEMANN; STONE, 2009; MALABUYOC; REAL; De DATTA, 1993; PINHEIRO, 2003; SPOHR, 2003; STEINMETZ; MEIRELES, 1999; YOSHIDA; SATAKE; MACKILL, 1981).

A temperatura do ar é um fator importante para o crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do arroz, sendo um dos elementos climáticos que mais afeta a produtividade (HEINEMANN; STONE; SILVA, 2009; SPOHR, 2003). A temperatura ótima para o desenvolvimento do arroz situa-se entre 20 e 35°C, entretanto, a sensibilidade da cultura varia em função da fase fenológica (YOSHIDA; PARAÓ, 1976).

A temperatura atua diretamente na duração do ciclo do arroz. Para as cultivares sem sensibilidade fotoperiódica e com ausência de estresse hídrico, o período da emergência até a floração é regulado principalmente pela temperatura do ar (STEINMETZ; MEIRELES, 1999). Um dos conceitos mais importantes na caracterização do desenvolvimento da cultura do arroz é a soma térmica, ou graus-dia, que expressa a disponibilidade energética do meio e baseia-se no acúmulo diário de temperatura situada na faixa entre a condição mínima e máxima exigida pela cultura (OMETTO, 1981). Portanto, dependendo da temperatura do ar, o ciclo da cultura pode se estender, deixando-a mais exposta às adversidades climáticas, aumentando, assim, o risco de se obter baixas produtividades (MATTHEWS et al., 1997; SASEENDRAN et al., 1998).

A produtividade da cultura do arroz é dependente da matéria seca acumulada até a emissão das panículas, e esta é determinada principalmente pela fotossíntese

e pelas perdas por respiração, as quais são sensíveis à temperatura do ar (YOSHIDA, 1981). Assim, a temperatura tem grande influência sobre o processo fotossintético na fase vegetativa, e também, na extensão desse na fase reprodutiva (YOGESWARA RAO et al., 1999).

Quando a cultura do arroz é exposta a temperaturas maiores do que 35°C, a planta começa a apresentar distúrbios fisiológicos, especialmente durante pré-floração e a floração (YOSHIDA; SATAKE; MACKILL, 1981).

O principal mecanismo da planta prejudicado pelas altas temperaturas é a polinização, tornando-se ineficaz durante a floração. Além disso, a exposição das panículas às temperaturas elevadas por poucas horas durante o dia pode induzir, durante a floração, à esterilidade das espiguetas, acarretando na diminuição da produtividade final (BAKER et al., 1992; JULIA; DINGKUHN, 2012). Além disso, temperaturas noturnas, superiores a 29°C aumentam a susceptibilidade à esterilidade de espiguetas (SATAKE; YOSHIDA, 1978), além de causar redução na taxa de translocação de matéria seca (YANG et al., 2005).

Outros efeitos das altas temperaturas no arroz são: redução na massa dos grãos (YAMAKAWA et al., 2007); redução no ciclo vegetativo da cultura; e, de maneira indireta, redução na quantidade de ferro disponível no solo, acarretando deficiência deste micronutriente na cultura de arroz de terras altas (FAGERIA; STONE, 2008).

Além das altas temperaturas, baixas temperaturas também podem afetar a produtividade final do arroz. De acordo com Cruz e Milach (2000), pelo fato do arroz ser de origem tropical, em princípio, todas as suas fases fenológicas são sensíveis às baixas temperaturas, porém, algumas são mais afetadas que outras. As fases mais sensíveis ao frio são a germinação, o desenvolvimento inicial das plântulas e a fase reprodutiva (CRUZ; MILACH, 2000; TERRES; GALLI, 1985).

Durante o período de germinação, temperaturas inferiores a 20°C podem acarretar em retardamento da fase, alongando o ciclo da cultura (PEDROSO, 1989; RAMOS, 1985). No período reprodutivo, os sintomas causados pelas baixas temperaturas são: esterilidade das espiguetas; má emissão das panículas, ou seja, a panícula fica parcialmente ou totalmente dentro da bainha da folha bandeira; manchas nas espiguetas; e má formação de grãos. Todos esses aspectos levam à maior esterilidade floral, comprometendo a produtividade final (CRUZ; MILACH, 2000; TERRES; GALLI, 1985).

Na região do Cerrado brasileiro, dentro das épocas recomendadas para a semeadura, em princípio, as baixas temperaturas não exercem grandes influências sobre a cultura, já que na maioria das localidades a temperatura mínima média, durante o período reprodutivo, é superior a 17°C. Entretanto, em localidades de maior altitude, é possível que haja alguma influência dessa variável na cultura do arroz (HEINEMANN; STONE; SILVA, 2009).

A influência das baixas temperaturas acentua-se ainda mais quando o arroz de terras altas é semeado fora dos períodos recomendados, na região do Cerrado, acarretando em altos índices de esterilidade das espiguetas e, conseqüentemente, baixos níveis de produtividade, mesmo utilizando a irrigação complementar (FAGERIA, 1984; LOBATO; SILVA, 1995). Nas semeaduras efetuadas entre fevereiro e setembro em Goiânia/GO, a cultura do arroz de sequeiro apresentou prolongamento do ciclo, diminuição do porte da planta, do índice de área foliar e da produtividade (LOBATO; SILVA, 1995).

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é a fonte de energia para a fotossíntese e para a evapotranspiração das plantas. No processo de fotossíntese, as plantas utilizam uma pequena porção da radiação incidente, denominada de radiação fotossinteticamente ativa (RFA). Na cultura do arroz, a radiação tem uma relação direta com a produtividade final, principalmente durante o estágio reprodutivo e de enchimento de grãos (EVANS; DE DATTA, 1979; MOTA, 1995).

No estágio vegetativo, excesso de dias nublados leva a reduções nas produtividades. Nesta fase, a interceptação da radiação solar deve ser máxima (HEINEMANN; STONE; SILVA, 2009). Contudo, quando o sombreamento ocorre durante as fases reprodutivas (floração e enchimento de grãos), a produtividade também fica comprometida, devido à redução do número de espiguetas e a percentagem de grãos obtida (YOSHIDA; PARAÓ, 1976).

Nos modelos de simulação de culturas, a quantidade de RFA interceptada é uma variável essencial, já que esta é utilizada para no cálculo da eficiência do uso da radiação, a qual, por sua vez é empregada na simulação do acúmulo de biomassa, na produtividade e, portanto, para determinar a produtividade potencial (HEINEMANN; STONE; SILVA, 2009).

De acordo com Silva e Assad (2001), a semeadura do arroz de terras altas na região Centro-Oeste do Brasil deve ser realizada no período entre outubro e dezembro, no qual o único fator climático limitante à produção é a chuva.

A região Centro-Oeste, principal região produtora de arroz de terras altas, apresenta heterogeneidade temporal e espacial da produtividade. Um dos principais fatores que contribui para a depreciação da produtividade é a baixa disponibilidade de água do solo, a qual é função do balanço entre as chuvas e a evapotranspiração. Como a variabilidade interanual da evapotranspiração é muito pequena, o principal fator climático a influenciar a disponibilidade hídrica do solo e a produtividade do arroz de terras altas é a chuva (HEINEMANN, 2010; SILVA; ASSAD, 2001; TUONG et al., 2000), já que até mesmo durante o período chuvoso podem ocorrer períodos sem chuva ou com chuva abaixo da demanda hídrica da cultura, resultando em diminuição da disponibilidade de água no solo, expondo a cultura a breves períodos de estresse hídrico (HEINEMANN, 2010).

A cultura do arroz de terras altas é altamente sensível ao déficit hídrico, sendo seu efeito na produtividade variável com a intensidade do estresse hídrico em combinação com o período de sua ocorrência, os processos fisiológicos determinantes da produtividade, e a tolerância relativa das plantas à falta de água. Portanto, para o arroz de terras altas, a quantidade e a distribuição das chuvas são muito importantes (PINHEIRO, 2006). Em relação ao estresse hídrico, este é considerado moderado quando a redução da produtividade causada pelo mesmo é inferior a 50%. Acima desse valor, o estresse é considerado severo (HEINEMANN, 2010).

A deficiência hídrica interfere em todos os processos fisiológicos da cultura do arroz e, conseqüentemente, interfere na produção e na produtividade de grãos. Os sintomas na planta causados pelo estresse hídrico dependem da fase em que a cultura se encontra, sendo o crescimento o mais sensível de todos (TAIZ; ZIEGER, 2004). Assim, dependendo da intensidade da deficiência hídrica haverá um maior ou menor impacto sobre a produtividade (LIU et al., 2006).

Durante o período vegetativo, os primeiros processos debilitados pelo estresse hídrico são o perfilhamento e o alongamento da folha, acarretando em um baixo índice de área foliar, reduzindo, assim, seu potencial produtivo (PINHEIRO; GUIMARÃES, 1990), além de atrasar o ciclo de cultivo pelo prolongamento do período vegetativo, anterior à iniciação da panícula (DE DATTA et al., 1975). Na fase reprodutiva, a cultura é extremamente sensível ao déficit hídrico, principalmente no período entre 20 dias antes e 10 dias após o florescimento (BRASIL, 1992). A deficiência hídrica inibe a emissão das panículas, resultando em panículas mal

expostas, ou, até mesmo não emitidas, além da ocorrência do dessecamento parcial ou total das espiguetas. Assim, a deficiência hídrica compromete a fertilidade das espiguetas e, conseqüentemente, leva à diminuição da produtividade dos grãos (PINHEIRO; STONE; SILVA, 2000).

1.1.4 Cultivar de arroz de terras altas BRS-Primavera

A cultivar BRS-Primavera trata-se de uma cultivar do tipo moderno, de ciclo médio (HEINEMANN et al., 2009), produtiva e com ampla adaptação a diferentes sistemas agrícolas, sendo uma das cultivares de arroz de terras altas mais importantes, por se tratar da cultivar mais plantada na maioria das regiões produtoras (LANA; FERREIRA; BARRIGOSI, 2003; LORENÇONI, 2009).

Essa cultivar foi desenvolvida pela EMBRAPA Arroz e Feijão, lançada em 1997, significando grande avanço na qualidade do grão tipo agulhinha (longo fino) para as condições de terras altas. Apresenta altura intermediária (média de 101 cm), perfilhamento médio, baixa resistência ao acamamento, principalmente em plantios realizados em solos com boa fertilidade, sendo susceptível à brusone (SOARES et al., 2001).

É indicada para o plantio em áreas de abertura e em áreas velhas, pouco ou moderadamente férteis (SOARES et al., 2001). Em algumas regiões do Centro-Oeste e Norte do país, a cultivar BRS-Primavera se sobressai em relação às demais, sendo a mais produzida e comercializada, devido à sua qualidade (PLANETA ARROZ, 2005).

1.1.5 Zoneamento Agrícola

O zoneamento agrícola foi implantado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), inicialmente para a cultura do trigo, em 1996, com o objetivo de reduzir os riscos climáticos para a cultura e, conseqüentemente, reduzir as taxas de sinistros na agricultura brasileira, forçando os produtores a usarem as tecnologias de suporte para as tomadas de decisão no Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (PROAGRO). Além disso, tal zoneamento vem servindo de referencial para as empresas privadas que atuam na área securitária no Brasil (CUNHA; ASSAD, 2001). Com isso, diversos estudos sobre zoneamento de riscos

climáticos para diversas culturas em diversas localidades do Brasil foram feitos, como para o trigo (CUNHA et al., 2001), a soja (FARIAS et al., 2001), o milho (SANS et al., 2001), o arroz de terras altas (SILVA; ASSAD, 2001), entre outros.

Esse zoneamento, por meio dos estudos de riscos climáticos, permite ao MAPA recomendar as épocas preferenciais de semeadura para as mais diversas culturas com base no Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), que nada mais é do que a evapotranspiração relativa da cultura nas fases fenológicas críticas, ou seja, entre o florescimento e o enchimento de grãos, determinada pelo balanço hídrico (ASSAD et al., 1998).

1.1.5.1 Critérios para o cultivo do arroz de terras altas em condições de baixo risco climático

Um dos critérios utilizados para se definir o risco climático é o ISNA, obtido pela relação entre a evapotranspiração real (ET_r) e a evapotranspiração máxima da cultura (ET_c), ou seja, a relação entre a quantidade de água que a planta efetivamente consumiu e a que seria desejável a fim de garantir sua máxima produtividade, de acordo com a demanda atmosférica, o tipo da cultura e sua área foliar. Segundo Brunini et al. (2001), o ISNA é a variável mais importante do balanço hídrico na definição dos riscos climáticos. O ISNA é calculado a partir do balanço hídrico da cultura em determinada região. O balanço hídrico é simulado por meio do SARRAZON (Sistema de Análise Regional dos Riscos Agroclimáticos), que é um modelo de simulação de balanço hídrico que representa uma categoria dos modelos SARRA (SARRAMET e SARRABIL), desenvolvido por Baron e Clopes (1996).

Para um determinado local no Estado de Goiás ser considerado de baixo risco climático pelo MAPA para a cultura do arroz de sequeiro, o valor do ISNA deve ser maior ou igual a 0,65, em 80% dos anos analisados. Além disso, o valor médio da temperatura mínima do ar na fase de germinação/emergência deve ser maior ou igual a 15°C e o valor médio da temperatura máxima do ar na fase de florescimento/enchimento de grãos deve ser menor ou igual a 35°C (BRASIL, 2012b).

1.1.6 Modelos de simulação de cultura

Existem muitas maneiras de se interpretar o conceito de modelos de simulação, variando desde modelos simples e empíricos, até modelos muito complexos. Modelo é uma representação simplificada de um sistema e simulação é o estudo do sistema e seu desempenho utilizando modelos. Portanto, modelo de simulação de cultura nada mais é que a simplificação de um sistema vegetal (cultura), sendo utilizado nos estudos do desenvolvimento/crescimento da cultura para verificar seu desempenho em função do ambiente (AMJED et al., 2012; DOURADO-NETO et al., 1998). Os modelos, em geral, não simulam apenas o estado final da biomassa e a produtividade da cultura, mas também geram informações a respeito dos principais processos envolvidos no crescimento e desenvolvimento da planta (JAME; CURTFORTH, 1996). Os modelos podem ser classificados em descritivos e explicativos.

Os modelos descritivos simulam o sistema de maneira simplificada, descrevendo as relações entre os fatores e as respostas dos cultivos sem explicar as mesmas, tendo como exemplo os modelos estatísticos, que utilizam a regressão para descrever a relação entre as variáveis envolvidas. As informações obtidas a partir dos modelos descritivos são limitadas aos locais para os quais os mesmos foram gerados, sendo, portanto, de aplicação restrita (JAME; CURTFORTH, 1996).

Por outro lado, os modelos explicativos descrevem quantitativamente os mecanismos e os processos que norteiam o funcionamento do sistema. Dentre os modelos explicativos podem ser citados os modelos matemático-fisiológicos e os modelos mecanísticos. De acordo com Battisti (2012), apesar de serem classificados dessa maneira, um ponto importante no uso de modelos é a sua aplicabilidade, a qual deve estar associada à confiabilidade das informações geradas.

Os modelos de simulação de cultura são utilizados para diversas finalidades, como pesquisa, ensino, treinamento e transferência de tecnologia, além de auxiliar os agricultores e agentes governamentais na tomada de decisão (HOOGENBOOM, 2000; MATTHEWS et al., 2000).

Atualmente, vários modelos de simulação de culturas são utilizados. Entre eles, dois se destacam pela extensa utilização, principalmente em pesquisa: o APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*) (KEATING et al., 2002), desenvolvido na Austrália com a finalidade de auxiliar na recomendação de

diferentes cultivos, possuindo um grande número de módulos; e o DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), desenvolvido inicialmente na Universidade do Havaí, possuindo atualmente 28 modelos de simulação de cultura (HOOGENBOOM et al., 2012). O DSSAT surgiu a partir da necessidade de tornar os vários modelos existentes compatíveis entre si.

1.1.7 DSSAT

O DSSAT é um sistema que simula o crescimento e desenvolvimento de 28 culturas diferentes, integrando os efeitos do solo, do clima e das condições de manejo na fenologia da cultura, na produção e partição da biomassa da planta e na produtividade.

Atualmente, o DSSAT está na versão 4.6.0.8, disponível a partir de 2013 (HOOGENBOOM et al., 2012). No DSSAT, todos os modelos são combinados em um sistema modular denominado *Crop System Model* (CSM). Esse sistema utiliza o mesmo conjunto de submódulos para simular a dinâmica de água, carbono, nitrogênio, fósforo e matéria orgânica, enquanto que o desenvolvimento e o crescimento da planta são simulados a partir de diferentes módulos como o CROPGRO (BOOTE; JONES; HOOGENBOOM, 1998) e CERES (JONES et al., 2003), como indicado na Figura 2. Esses módulos possuem um submódulo de pragas e doenças, porém pouco desenvolvido. O sistema utiliza seis passos operacionais (executar a inicialização, inicialização sazonal, cálculo das taxas, integração, saída diária e o sumário). Cada módulo funciona de maneira independente dos demais, sendo interligados apenas por algumas interfaces.

Os modelos do DSSAT são capazes de simular o crescimento da cultura utilizando diferentes cenários de manejo. No modo sazonal, a cultura é simulada por vários anos seguidos, considerando-se as mesmas condições iniciais do solo. Já no modo sequencial, o modelo simula um sistema de rotação de culturas ao longo de vários anos, sendo as condições do solo inicializadas somente no início da simulação. Finalmente, no modo espacial, o modelo simula o crescimento de uma ou mais culturas no espaço, além do modo simples que simula apenas uma única safra (JONES et al., 2003).

Figura 2 - Esquema dos componentes e estrutura modular do CSM-DSSAT

Fonte: Hoogenboom et al. (2010)

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.
- AMJED, A.; SANJANI, S.; HOOGENBOOM, G.; AHMAD, A.; KHALIQ, T.; WAJID, S.A.; NOORKA, I.R.; AHMAD, S. Application of crop growth models in agriculture of developing countries: a review. **New Horizons in Science & Technology**, Brampton, v. 1, n. 4, p. 95-99, 2012.
- ARTACHO, P.; MEZA, F.; ALCALDE, J.A. Evaluation of the ORYZA2000 rice growth model under nitrogen-limited conditions in an irrigated Mediterranean environment. **Chilean Journal of Agricultural Research**, Chillán, v. 71, n. 1, p. 23-33, 2011.
- ASSAD, E.D.; SANO, E.E.; BEZERRA, H.S.; SILVA, H.S.; LOBATO, E.J.E. Uso de modelos numéricos de terrenos na espacialização de épocas de plantio. In: ASSAD, E.D.; SANO, E.E. **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Brasília: EMBRAPA, SPI; EMBRAPA Cerrados, 1998. p. 311-327.
- BAKER, J.T.; ALLEN Jr., L.H.; BOOTE, K.J. Temperature effects on rice at elevated CO₂ concentration. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 43, p. 959-964, 1992.
- BARATA, T.S. **Caracterização do consumo de arroz no Brasil: um estudo na Região Metropolitana de Porto Alegre**. 2005. 91 p. Dissertação (Mestrado em

Agronegócios) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BARON, C.; CLOPES, A. **Sistema de Análise Regional dos Riscos Agroclimáticos (SARRAMET/SARRAZON)**. Montpellier: Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agrônômica para o Desenvolvimento; SARRA; CIRAD, 1996. 45p.

BATTISTI, R. **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. 2013. 261 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: Marcel Dekker, 1998. chap. 18, p. 651-692.

BOUMAN, B.A.M.; TUONG, T.P. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 49, p. 11-30, 2001.

BOUMAN, B.A.M.; KROPFF, M.J.; TUONG, T.P.; WOPEREIS, M.C.S.; TEN BERGE, H.F.M.; VAN LAAR, H.H. **ORYZA2000**: modeling lowland rice. Los Baños: International Rice Research Institute; Wageningen: Wageningen University and Research Centre, 2001. 235 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Estatísticas e dados básicos de economia agrícola**. Brasília, 2012a. 44 p.

_____. **Zoneamento agrícola 2012**. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-Agricola/portarias-segmentadas-por-uff>>. Acesso em: 15 ago. 2012b.

_____. Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária. Secretaria de Administração. Secretaria de Administração Estratégica. **Recomendações técnicas para arroz em regiões com deficiência hídrica**: zonas 10,16, 19, 20, 58, 59, 60, 61 e 91. Brasília: Embrapa, SPI, 1992. 130 p.

BROWN, L.R. **Tough choices**: facing the challenge of food scarcity. New York: Norton, 1996. 159p.

_____. **The agricultural link**: how environmental deterioration could disrupt economic progress. Washington: Worldwatch Institute, 1997. 73p. (Worldwatch Paper, 136).

BRUNINI, O.; ZULLO JÚNIOR, J.; PINTO, H.S.; ASSAD, E.; SAWAZAKI, E.; DUARTE, A.P.; PATTERNIANI, M.E.Z. Riscos climáticos para a cultura de milho no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 519-526, 2001.

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

CHAVES, M.M.; OLIVEIRA, M.M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 55, p. 2365-2384, 2004.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira 2011**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_12_08_10_58_12_08.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2012.

_____. **Estudos de prospecção de mercado: safra 2012/2013**. 2012. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=529&t=2>>. Acesso em: 10 out. 2012.

_____. **Acompanhamento da safra brasileira 2013**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

CRUZ, R.P.; MILACH, S.C.K. Melhoramento genético para tolerância ao frio em arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 909-917, 2000.
CUNHA, G.R.; HAAS, J.C.; MALUF, J.R.T.; CARAMORI, P.H.; ASSAD, E.D.; BRAGA, H.J.; ZULLO JR., J.; LAZZAROTTO, C.; GONÇALVES, S.; WREGE, M.; BRUNETTA, D.; DOTTO, S.R.; PINHO, H.S.; BRUNINI, O.; THOMÉ, V.M.R.; ZAMPIERI, S.L.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M.B.M.; PANDOLFO, C. Zoneamento agrícola e época de semeadura para trigo no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, p. 400-414, 2001.

CUNHA, R.G.; ASSAD, E.D. Uma visão geral sobre zoneamento agrícola Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 377-385, 2001.

DE DATTA, S.K. Upland rice around the world. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Major research in upland rice**. Los Baños, 1975. p. 1-11.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 46-50, 1998.

EMBRAPA CLIMA TEMPERADO. **Cultivo de arroz irrigado no Brasil**: importância econômica, agrícola e alimentar do arroz. 2005. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/cap01.htm>>. Acesso em 10 jul. 2013.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Field crops production**. 2012. Disponível em: <<http://www.nal.usda.gov/find-field-crop-statistics-and-data>>. Acesso em 10 fev. 2013.

EVANS, L.T.; DE DATTA, S.K. The relations between irradiance and grain yield of irrigated rice in the tropics, as influenced by cultivar, nitrogen fertilizer application and month of planting. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 2, p. 1-17, 1979,

FAGERIA, N.K. **Fertilization and mineral nutrition of rice**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1984. 341p.

_____. Resposta de arroz de terras altas à correção de acidez em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 11, p. 2303-2307, 2000.

_____. Nutrient management for improving upland rice productivity and sustainability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 32, p. 2603-2629, 2001.

_____. Nutrient management for improving upland rice productivity and sustainability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 32, p. 2603-2629, 2002.

_____. Yield physiology of rice. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 30, p. 843-879, 2007.

_____. Optimal nitrogen fertilization timing for upland rice. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE 19., 2010, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: International Union of Soil Science, 2010. 1 CD-ROM.

FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. Deficiency problems in South America. In: ALLOWAY, B.J. **Micronutrient deficiencies in global crop production**. New York: Springer, 2008. p. 247-268.

FAGERIA, N.K.; SLATON, N.A.; BALIGAR, V.C. Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 80, p. 63-152, 2003.

FARIA, R.T.; FOLEGATTI, M.V. Efeito de épocas de semeadura e regimes hídricos em duas cultivares de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 43-48, 2001.

FARIAS, J.R.B.; ASSAD, E.D.; ALMEIDA, I.R. de; EVANGELISTA, B.A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, p. 415-421, 2001.

FERREIRA, C.M.; WANDER, A.E. Mudanças na distribuição geográfica da produção e consumo do arroz no Brasil. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 35, n. 11, p. 36-46, 2005.

FNP CONSULTORIA. Arroz. In: _____. **AGRIANUAL 2007: anuário da agricultura brasileira**. São Paulo, 2007. p. 389-394.

FONTANA, D.C.; WEBER, E.; DUCATI, J.; FIGUEIREDO, D.C.; BERLATO, M.A.; GERGAMASHI, H. Monitoramento e previsão de safras no Brasil. In: LATIN AMERICAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 9., 2000, Puerto Iguazú. **Anais...** 2000. Puerto Iguazú: SELPER, 2000. p.1-11.

GUNGULA, D.T.; KLING, J.G.; TOGUN, A.O. CERES-MAIZE predictions of maize phenology under nitrogen-stressed conditions in Nigeria. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 892-899, 2003.

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, p. 29-36, 2010.

HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F. Efeito da deficiência hídrica no desenvolvimento e rendimento de quatro cultivares de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 2, p. 134-139, 2009.

HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F.; SILVA, S.C. da. Arroz. In: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009. cap. 4, p. 65-79.

HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F.; FAGERIA, N.K.; CASTRO, L.M. Evaluation of physiological traits in upland rice for adaptation to no-tillage system. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos dos Goytacazes, v. 21, n. 2, p. 113-122, 2009.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, p. 137-157, 2000.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, B.; HUNT, B.T.; GIJSMAN, A.J.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; BOWEN, W. Overview of DSSAT v 4.5 Cropping System Model (CSM). In: HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; PORTER, C.H.; WILKENS, P.W.; BOOTE, K.J.; HUNT, L.A.; TSUJI, G.Y. **Overview: introduction to DSSAT v 4.5**. Honolulu: University of Hawaii, 2010. v. 1, chap. 1, p. 1-35.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; HUNT, L.A.; SINGH, U.; LIZASO, J.L.; WHITE, J.W.; URYASEV, O.; ROYCE, F.S.; OGOSHI, R.; GIJSMAN, A.J.; TSUJI, G.Y.; KOO, J. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)**. Honolulu: University of Hawaii, 2012. 1 CD-ROM.

HURTADO, S.M.C.; PAGLIS, C.M.; VON PINHO, R.G. Eficiência do modelo CERES-MAIZE na predição da produtividade de milho em áreas com presença de variabilidade espacial. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 6, p. 1153-1160, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2006/Agropecuário.pdf>>. Acesso em 03 fev. 2013.

INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Terminology for rice growing environments**. Los Baños, 1984. 38 p.

JAME, Y.W.; CUTFORTH, H.W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 76, p. 9-19, 1996.

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.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.18, p. 235-265, 2003.

JULIA, C.; DINGKUHN, M. Variation in time of day of anthesis in rice in different climatic environments. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 43, p. 166-174, 2012.

KEATING, B.A.; CARBERRY, P.S.; HAMMER, G.L.; PROBERT, M.E.; ROBERTSON, M.J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N.I.; HARGREAVES, J.N.G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; McLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.O.; DIMES, J.P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, S.; BRISTOW, K.L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.C.; McCOWN, R.L.; FREEBAIRN, D.M.; SMITH, C.J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, p. 267-288, 2002.

KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R.; VANDERLIP, R.L.; ATWOOD, J.D.; REICOSKY, D.C.; MULLIKEN, J.; COX, W.J.; MASCAGNI, H.J. Jr.; HOLLINGER, S.E.; WIEBOLD, W.J. Evaluation of two maize models for nine U.S. locations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 421-426, 1997.

LAFITTE, H.R.; LI, Z.K.; VIJAYAKUMAR, C.H.M.; GAO, Y.M.; SHI, Y.; XU, J.L.; FU, B.Y.; YU, S.B.; ALI, A.J.; DOMINGO, J.; MAGHIRANG, R.; TORRES, R.; MACKILL, D. Improvement of rice drought tolerance through backcross breeding: evaluation of donors and selection in drought nurseries. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 97, p. 77-86, 2006.

LANA, A.C.; FERREIRA, C.M.; BARRIGOSI, J.A.F. **Impacto ambiental e econômico da cultura de arroz de terras altas: caso da cultivar BRS-Primavera**. Brasília: EMBRAPA, 2003. 3 p. (Comunicado Técnico, 58).

LIU, J.X.; LIAO, D.Q.; OANE, R.; ESTENOR, L.; YANG, X.E.; LI, Z.C.; BENNETT, J. Genetic variation in the sensitivity of anther dehiscence to drought stress in rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 97, n. 1, p. 87-100, 2006.

LOBATO, E.J.V.; SILVA, S. C. **Parâmetros meteorológicos, fenologia e produtividade do arroz de sequeiro sob condições de cerrado**. Goiânia: EMBRAPA, CNPAF, 1995. 11 p. (EMBRAPA. CNPAF. Comunicado Técnico, 30).

LORENÇONI, R. **Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil**. 2009. 81 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MALABUYOC, J.A.; REAL, J.G.; De DATTA, S.K. Grain yield as a function of rainfall, soil moisture and solar radiation in upland rice (*Oryza sativa* L.). **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 34, p. 37–45, 1993.

MATTHEWS, R.B.; KROPFF, M.J.; HORIE, T.; BACHELET, D. Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptations. **Agricultural Systems**, Essex, v. 54, p. 399-425, 1997.

MATTHEWS, R.B.; STEPHENS, W.; HESS, T.; MASON, T.; GRAVES, A.R. **Applications of crop/soil simulation models in developing countries**. Silsoe: Grandfield University at Silsoe, 2000. 172p. (Final Report, PD 82).

MEINKE, H.; BASTIAANS, L.; BOUMAN, B.; DINGKUHN, M.; GAYDON, D.; HASEGAWA, T.; HEINEMANN, A.B.; KIEPE, P.; LAFARGE, T.; LUQUET, D.; MASOOD, A.; VAN OORT, P.; RODENBURG, J.; YAN, J.; YIN, X. **An international collaborative research network helps to design climate robust rice systems**, 2009. Tsukuba: National Institute for AGr-Evironmental Sciences, 2009. 11 p.

MENDES, F.L. **Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pelas culturas de cana-de-açúcar e de arroz**. 2010. 116 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MORAIS, O.P.; CORNÉLIO, V.M.O.; REIS, M.S.; SOARES, P.C.; SANTOS, P.G.; SOUSA, M.A. **BRS-MG Curinga**: cultivar de arroz de terras altas de ampla adaptação para o Brasil. Brasília: EMBRAPA, CNPAF, 2005. 8 p. (CNPAF. Comunicado Técnico, 114). 2005.

MOTA, F.S. da. Disponibilidade de radiação solar e risco de frio no período reprodutivo do arroz irrigado em diferentes regiões do Rio Grande do Sul. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 48, n. 424, p. 8-10, 1995.

NGUYEN, H.T.; BABU, R.C.; BLUM, A. Breeding for drought tolerance in rice: physiology and molecular genetics considerations. **Crop Science**, Madison, v. 37, p. 1426-1434, 1997.

NOUNA, B.B.; KATERJI, N.; MASTRORILLI, M. Using the CERES-MAIZE model in a semi-arid Mediterranean environment: new modeling of leaf area and water stress functions. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 19, p. 115-123, 2003.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 425 p.

PEDROSO, B.A. **Arroz irrigado**: obtenção e manejo de cultivares. 3. ed. Porto Alegre: Sagra, 1989. 179 p.

PIGGIN, C.; COURTOIS, B.; GEORGE, T.; PANDEY, S.; LAFITTE, R.; KIRK, G.; KONDO, M.; LEUNG, H.; NELSON, R.; OLOFSDOTTER, M.; PROT, J.C.; REVERSAT, G. **The IRRI upland rice research program**. Los Baños: International Rice Research Institute, 1998. 32p. (IRRI. Discussion Paper Series, 25).

PINHEIRO, B.S. **Cultivo do arroz de terras altas**: características da cultura. 2003. Embrapa Arroz e Feijão. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/index.htm>>. Acesso em 04 fev. 2013.

_____. Características morfológicas da planta relacionadas à produtividade. In: SANTOS, A.B. dos; STONE, L.F.; VIEIRA, N.R.A. **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. p. 209-256.

PINHEIRO, B.S.; GUIMARÃES, E.P. Índice de área foliar e produtividade do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 6, p. 863-872, 1990.

PINHEIRO, B.S.; STONE, L.F.; SILVA, S.C. da. **Minimização do risco por deficiência hídrica em arroz de sequeiro na região dos cerrados**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 39p. (Circular Técnica, 36).

PLANETA ARROZ. **O peso da qualidade**: mercado premia o diferencial e não o peso. 2005. Disponível em: <http://www.planetaarroz.com.br/edicoes/15/06_negocio_capa_pag01.php>. Acesso em: 19 jun. 2013.

PRABHU, A.S.; ARAÚJO, L.G.; FAUSTINA, C.; BERNI, R.F. Estimativa de danos causados pela brusone na produtividade de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 9, p. 1045-1051, 2003.

QUIRING, S.M.; LEGATES, D.R. Application of CERES-MAIZE for within-season prediction of rainfed corn yields in Delaware, USA. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v. 148, p. 964–975, 2008.

RAMOS, M.G. **Manual de produção do arroz irrigado**. Florianópolis: EMPASC; ACARESC, 1985. 225 p.

SANS, L.M.A.; ASSAD, E.D.; GUIMARÃES, D.P.; AVELLAR, G. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura de milho na região centro-oeste do Brasil e para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 527-535, 2001.

SANTOS, A.B.; RABELO, R.R. **Cultivo do arroz irrigado no Estado do Tocantins**: introdução e importância econômica. EMBRAPA Arroz e Feijão. 2004. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoTocantins/>>. Acesso em 03 mar. 2013.

SANTOS, G.R.; KORNDÖRFER, G.H.; PELÚZIO, J.M.; DIDONET, J.; REIS FILHO, J.C.D.; CÉSAR, N.S. Influência de fontes de silício sobre a incidência e severidade de doenças e produtividade do arroz irrigado. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 19, p. 65-72, 2003.

SASEENDRAN, S.A.; RATHORE, L.S.; SINGH, K.K.; NISHA, M.; SINGH, S.V. Validation of CERES-Rice v3. model for the tropical humid agroclimate of Kerela state. **Meteorological Applications**, Cambridge, v. 5, p. 385-392, 1998.

SATAKE, T.; YOSHIDA, S. High temperature-induced sterility in indica rice at flowering. **Japanese Journal of Crop Science**, Tokyo, v. 47, p. 6-10, 1978.

SHEEHY, J.E.; MITCHELL, P.L.; HARDY, B. Redesigning rice photosynthesis to increase yield. In: WORKSHOP ON THE QUEST TO REDUCE HUNGER: REDESIGNING RICE PHOTOSYNTHESIS, 2000, Makati City. **Proceedings...** Los Baños: International Rice Research Institute; Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2000. p. 3-12.

SILVA, S.C.; ASSAD, E.D. Zoneamento de riscos climáticos para o arroz de sequeiro nos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Tocantins e Bahia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 536-543, 2001.

SOARES, A.A.; CORNÉLIO, V.M.O.; SOARES, P.C.; SANTOS, P.G.; REIS, M.S. Primavera: cultivar de arroz com grãos agulhinha para cultivo em terras altas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 48, n. 277, p. 381-388, 2001.

SOLER, C.M.T.; SENTELHAS, P.C.; HOOGENBOOM, G. The impact of El Niño Southern Oscillation phases on off-season maize yield for a subtropical region of Brazil. **International Journal of Climatology**, Cambridge, v. 30, n. 7, p. 1056-1066, 2009.

SPOHR, R.B. **Sequência de cultivos irrigados de verão com arroz de terras altas e milho ou sorgo silagem**. 2003. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

STEINMETZ, S.; MEIRELES, E.J.L.M. Clima. In VIEIRA, N.R.S.; SANTOS, A.B.; SANT'ANA, E.P. (Ed.). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA Arroz e Feijão, 1999. p. 58-87.

TAIZ, L.; ZIEGER, E. **Fisiologia vegetal**. Trad. E.R. Santarém et al. 3. ed. Porto Alegre: Artemed, 2004. 719 p.

TAKAHASHI, N. Differentiation of ecotypes in *Oryza sativa* L. In: TSUNODA, S.; TAKAHASHI, N. (Ed.). **Biology of rice**. Amsterdam: Elsevier, 1984. chap. 2, p. 31-67.

TERRES, A.L.; GALLI, J. Efeito do frio em cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul – 1984. In: EMBRAPA, Centro de Pesquisa Agropecuária de Terras Baixas e Clima Temperado. **Fundamentos para a cultura do arroz irrigado**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 83-94.

TUONG, T.P.; SINGH, A.K.; SIOPONGCO, J.; WADE, L.J. Constraints to high yield of dry-seeded rice in the rainy season in a humid tropic environment. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 3, p. 164-172, 2000.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. de. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1184-1192, 2008.

YAMAKAWA, H.; HIROSE, T.; KURODA, M.; YAMAGUCHI, T. Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 144, p. 258-277, 2007.

YANG, Z.; INOUE, N.; FUJITA, K.; KATO, M.; HAKIWARA, M. Modeling of translocation rate of dry matter from vegetative organs to panicle as influenced by air temperature in rice. **Japanese Journal of Crop Science**, Tokyo, v. 74, n. 1, p. 65-71, 2005.

YOGESWARA RAO, A.; REDDY, D.R.; VENKANNA, K.; NARASIMHA RAO, S.B.S. Simple bio-meteorological model for yield forecasting of low land rice in Andhra Pradesh. In: NATIONAL WORKSHOP ON DYNAMIC CROP SIMULATION MODELING FOR AGROMETEOROLOGICAL ADVISORY SERVICES IN INDIA, 1999, New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: Department of Science and Technology, 1999. p. 305-313.

YOSHIDA, S. Factors that limit the growth and yields of upland rice. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Major research in upland rice**. Los Baños, 1975. chap. 3, p. 46-71.

YOSHIDA, S.; PARAO, F.T. Climatic influence on yield components of lowland rice in tropics. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Climate and rice**. Los Baños: IRRI, 1976. p. 471-491.

YOSHIDA, S.; SATAKE, T.; MACKILL, D.S. **High-temperature stress in rice**. Los Baños: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE, 1981. 20 p. (IRRI RESEARCH PAPER SERIES, 67).

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.

2 CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO ORYZA-DSSAT PARA O ARROZ DE TERRAS ALTAS NO ESTADO DE GOIÁS, BRASIL

Resumo

Este trabalho teve o objetivo de calibrar e avaliar o modelo ORYZA-DSSAT, versão beta, para o arroz de terras altas no Estado de Goiás. Para isso foram utilizados três experimentos de campo, sendo um deles para a calibração do modelo e os outros dois para sua avaliação. Os experimentos foram conduzidos em Santo Antônio de Goiás, nos períodos de 2008-2009 e 2010-2011, e em Porangatu, GO, no período de 2009-2010. O modelo foi calibrado e avaliado para a cultivar de arroz de terras altas de ciclo médio BRS-Primavera. Os parâmetros sujeitos à calibração foram: (i) taxas de desenvolvimento fenológico para cada estágio; (ii) de partição de assimilados entre as folhas, colmo e órgãos de reserva (FLV, FST e FSO, respectivamente); (iii) de desenvolvimento da área foliar e crescimento da cultura; (iv) de crescimento de espiguetas (SPGF); (v) de crescimento radicular; e (vi) de estresse hídrico. Na avaliação do modelo, foram comparados valores simulados com valores observados da duração das fases fenológicas, do peso seco total, de folhas, de colmos, e de panículas, além da produtividade e do índice de área foliar (IAF). Para a fenologia, o modelo apresentou desempenho satisfatório na simulação, apresentando pequena diferença entre os valores observados e simulados. Para a biomassa, o modelo não apresentou bom desempenho em simular o peso seco de folhas e das panículas para Porangatu, pelo fato do mesmo ter penalizado a cultura excessivamente em função do estresse hídrico. Para os demais componentes de produção, o modelo simulou com precisão e acurácia a cultivar de arroz de terras altas BRS-Primavera.

Palavras-chave: Arroz de terras altas; Modelo de simulação de cultura; Calibração

Abstract

The purpose of this study was to calibrate and evaluate the ORYZA-DSSAT model, beta version, for upland rice in the State of Goiás, Brazil. The data used for calibration and evaluation was obtained from three field experiments, being one for calibration and the others two for evaluation. The field experiments were carried out in Santo Antônio de Goiás, GO, during 2008-2009 and 2010-2011 seasons, and in Porangatu, Go, during 2009-2010 season. The model was calibrated and evaluated for upland rice, cultivar BRS-Primavera. The following parameters were calibrated: (i) phenological development rates at each crop stage; (ii) partition of assimilates between leaves, stems and storage organs (FLV, FST e FSO, respectively); (iii) leaf area and crop growth; (iv) spikelet growth (SPGF); (v) root growth; and (vi) water stress. To evaluate the model, simulated values were compared with observed duration of phenological phases, total biomass dry weight, leaves, stems and panicles dry weight, yield and leaf area index (LAI). To phenology, the model presented satisfactory performance, with little difference between simulated and observed duration of crop phases. For biomass, the model showed poor performance for simulating leaves and panicles dry weight for Porangatu, which was caused by the excessive water stress penalization. For other crop variables, the model simulations presented good precision and accuracy.

Keywords: Upland rice; Crop simulation model; Calibration

2.1 Introdução

O arroz é cultivado em vários locais do mundo, em diferentes condições climáticas (ARTACHO; MEZA; ALCALDE, 2011). No Brasil, o arroz é cultivado predominantemente em dois tipos de sistemas: sistema de produção irrigado em várzeas (inundado) e o sistema de sequeiro. A maior parte do arroz cultivado pelo sistema inundado é proveniente da região Sul do país. Já o arroz de sequeiro, ou de terras altas, é cultivado predominantemente na região Centro-Oeste, no ambiente de Cerrado (FAGERIA, 2001).

A produtividade média do arroz de terras altas é menor que a do arroz inundado. Isso é devido à baixa tecnologia empregada pelos produtores, além da variabilidade climática, principalmente em função da ocorrência, duração e intensidade da precipitação pluvial (TUONG et al., 2000).

Mesmo durante o período chuvoso, a cultura do arroz pode sofrer estresse devido à deficiência hídrica, ocasionada pelos períodos com precipitações abaixo da demanda hídrica da cultura, o que acarreta em variação interanual da produtividade, o que dificulta a predição da mesma. Neste caso, modelos de simulação de cultura podem ser utilizados com o propósito de se conhecer melhor os impactos do estresse hídrico na cultura do arroz de terras altas, e com isso se estabelecer as épocas de semeadura que minimizem os riscos climáticos (HEINEMANN, 2010; HEINEMANN; STONE, 2008).

Os modelos de simulação de cultura utilizam vários processos para simular o crescimento e desenvolvimento das culturas sobre diferentes condições de solo, de clima e de manejo. Para a cultura do arroz, vários modelos vêm sendo utilizados, como o ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2001), o CERES-Rice (JONES et al., 2003), o Infocrop (AGGARWAL et al., 2006a, 2006b) e o APSIM-ORYZA (ZHANG et al., 2007). Cada um desses modelos pode ser empregado para as mais diversas finalidades, como, por exemplo, se avaliar o efeito da rotação de culturas, avaliar a produtividade potencial, estudar os efeitos de diferentes tipos de manejos da cultura, prever safras, e avaliar o impacto da variabilidade e das mudanças climáticas no crescimento e desenvolvimento da cultura (ARTACHO; MEZA; ALCALDE, 2011;

GAYDON et al., 2012; HEINEMANN; STONE, 2011; LARIJANI et al., 2011; PATHAK et al., 2003; WALTER et al., 2012).

O modelo ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2001), desenvolvido pelo *International Rice Research Institute* (IRRI), simula a dinâmica do crescimento e desenvolvimento da cultura do arroz para condições ótimas de manejo (KROPFF; VAN LAAR; MATTHEWS, 1994), para condições limitantes de água e de nitrogênio (BOUMAN; LAAR, 2006). O modelo ORYZA2000 foi incorporado à plataforma do *Agricultural Production Systems Simulator* (APSIM) (ZHANG et al., 2007). Porém, para que o modelo funcionasse perfeitamente, necessitaria de significantes modificações nos códigos fontes, resultando em uma versão do ORYZA na qual a manutenção seria muito complicada, não trazendo benefícios para o modelo ORYZA2000 que funciona no modo *stand-alone*.

Por essa razão, decidiu-se migrar o modelo ORYZA2000 para a plataforma DSSAT-CSM, uma vez que as sub-rotinas de crescimento de planta do ORYZA2000 não sofreriam mudanças significativas nos códigos fonte, permitindo, assim, uma manutenção contínua por parte do IRRI, necessitando apenas algumas atualizações requeridas pela plataforma DSSAT.

Na plataforma do DSSAT, as rotinas de crescimento da planta do ORYZA2000 funcionam no módulo das culturas do *Crop Simulation Model* (CSM) e todos os demais processos necessários para o funcionamento do modelo, como os relativos ao solo, ao clima e ao manejo da cultura são provenientes da plataforma do DSSAT.

Vários trabalhos vêm sendo realizados utilizando o modelo ORYZA2000/APSIM, na otimização de práticas de manejo para a cultura do arroz, inclusive para o arroz de terras altas (ARTACHO; MEZA; ALCALDE, 2011; HEINEMANN; STONE, 2011; LORENÇON; DOURADO-NETO; HEINEMANN, 2010). Recentemente, Lorençoni (2009) realizou a avaliação e calibração do modelo ORYZA2000/APSIM, cultivar BRS-Primavera do arroz de terras altas em diversas regiões produtoras do Brasil. Entretanto, devido à recente incorporação do modelo ORYZA2000 à plataforma DSSAT, não existem trabalhos sobre a avaliação e calibração do mesmo nesta base para a cultura do arroz de terras altas.

Portanto, o objetivo desse trabalho foi calibrar e avaliar o modelo ORYZA-DSSAT para a cultivar BRS-Primavera, no Estado de Goiás, Brasil.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Descrição do modelo ORYZA-DSSAT

O modelo ORYZA-DSSAT, disponibilizado em uma versão beta, utiliza a rotina do módulo de crescimento da planta do ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2001), sendo os demais processos necessários à simulação da cultura, como os relativos ao solo, ao clima, ao balanço de água e de nitrogênio e ao manejo da cultura, provenientes do CSM-DSSAT.

2.2.1.1 Crescimento e desenvolvimento da cultura do arroz no modelo ORYZA-DSSAT

ORYZA-DSSAT é um modelo que simula o crescimento e o desenvolvimento do arroz, seja para condições de produção potencial, seja para condições limitantes de nitrogênio e água. Sob condições de crescimento potencial, a radiação, temperatura e características varietais específicas (processos fenológicos, morfológicos e fisiológicos) são os fatores que determinam a taxa de crescimento diário da cultura (BOUMAN et al., 2001).

O modelo ORYZA-DSSAT simula diariamente as taxas de produção de matéria seca dos órgãos da planta, e as taxas de desenvolvimento fenológico. Integrando essas taxas no tempo, a produção de matéria seca e o desenvolvimento fenológico são simulados para todo o ciclo da cultura.

De acordo com Bouman et al. (2001), a taxa de assimilação de CO_2 é calculada em função da radiação solar diária, temperatura média diária, índice de área foliar, dia do ano, latitude, coeficiente de extinção da radiação no dossel, eficiência inicial de uso da radiação, taxa máxima de assimilação de CO_2 , distribuição de nitrogênio no dossel e conteúdo de nitrogênio foliar, em três momentos durante o dia e em três profundidades do dossel. A fotossíntese nos perfis do dossel é baseada nas características fotossintéticas de folhas unitárias. Portanto, ao se integrar a área foliar total em um período de tempo diário, o modelo calcula a taxa de assimilação diária.

A fotossíntese líquida é obtida por meio da diferença entre a fotossíntese bruta e os respectivos gastos com respiração de manutenção e crescimento. A taxa

de crescimento líquido diário da planta é obtida pela diferença entre a taxa de assimilação bruta diária e a taxa de respiração total (crescimento e manutenção). Com isso, a taxa de crescimento líquido é particionada entre os órgãos da planta (raízes, folhas, colmo e panículas), em função do estágio de desenvolvimento e de acordo com os coeficientes de partição definidos pelo usuário.

O estágio de desenvolvimento (DVS) da planta define sua idade fisiológica, sendo importante na determinação e formação de vários órgãos e seus aparecimentos (CASANOVA; GOUDRIAAN; BOSCH, 2000). Como muitos processos fisiológicos e morfológicos mudam em função do estágio de desenvolvimento da planta, a quantificação acurada do desenvolvimento fenológico é determinante para que os modelos de simulação de cultura apresentem resultados acurados (YIN, 1996).

O modelo utiliza os seguintes estádios fenológicos básicos de desenvolvimento, definidos por Van Keulen e Seligman (1987): (i) emergência (DVS = 0); (ii) iniciação da panícula (DVS = 0.65); (iii) florescimento (DVS = 1.00); e (iv) maturidade fisiológica (DVS = 2.00) (Figura 3).

Figura 3 - Esquema representativo dos estádios e fases fenológicas da cultura do arroz utilizado pelo modelo
Adaptado de Heinemann, Lorençoni e Dourado-Neto (2009)

Entre os estádios fenológicos definidos pelo modelo, temos três fases distintas. A primeira (Fase 1), compreendida entre a emergência e a iniciação da panícula é definida como sendo a fase vegetativa; a segunda (Fase 2), entre a iniciação da panícula e o florescimento é definida como sendo a fase reprodutiva; e a última (Fase 3), entre o florescimento e a maturidade fisiológica é definida como a fase de enchimento de grãos (FAGERIA, 2007; HEINEMANN et al., 2009).

O desenvolvimento fenológico é determinado principalmente pela temperatura do ar (VAN KEULEN; PENNING DE VRIES; DREES, 1982). Porém, em cultivares sensíveis ao fotoperíodo, a duração do dia ou fotoperíodo determina a indução floral da planta (BOUMAN et al., 2001). Para determinar o desenvolvimento fenológico, o modelo utiliza unidades de calor efetivo diário (HU, °C dia dia⁻¹) e a taxa de

desenvolvimento do estágio fenológico (DVR, dia^{-1}). Portanto, o estágio de desenvolvimento (DVS) é a integral da taxa de desenvolvimento (DVR) sobre o período expresso em graus-dias.

A área foliar do arroz simulada pelo ORYZA-DSSAT cresce exponencialmente em função da soma térmica, durante o período em que o dossel ainda não está completamente fechado. Após o fechamento do dossel, a área foliar cresce linearmente, sendo calculada em função do peso das folhas e da área específica foliar (BOUMAN et al., 2001; CASANOVA; GOUDRIAAN; BOSCH, 2000). A transição da fase exponencial de crescimento para a linear é suavizada pelo uso de valores ponderados, derivados das taxas de crescimento da área foliar usando a equação exponencial e a equação linear (BOUMAN; VAN LAAR, 2006).

O número de espiguetas no florescimento é determinado a partir da biomassa acumulada durante o período reprodutivo, levando em consideração a esterilidade das espiguetas devido às temperaturas excessivamente altas ou baixas, sendo esta ajustada pelo método descrito por Horie (1993, 1998).

O modelo penaliza o crescimento e desenvolvimento da cultura considerando quatro diferentes fatores de estresse: (i) enrolamento foliar; (ii) redução da taxa de expansão foliar; (iii) aumento da senescência foliar; e (iv) esterilidade das espiguetas (BOUMAN et al., 2001; SWAIN et al., 2007), sendo os três primeiros relacionados ao estresse hídrico e o último relacionado aos estresses térmicos.

2.2.1.2 Dinâmica da água e balanço hídrico do modelo ORYZA-DSSAT

O balanço hídrico do modelo ORYZA-DSSAT é calculado pelo mesmo método utilizado pelos demais modelos de simulação de cultura do DSSAT. Este método de balanço hídrico considera o limite superior da água disponível ou o teor de água na capacidade de campo (DUL) e limite inferior da água disponível ou o teor de água no ponto de murcha permanente (LL) do solo para definir a água disponível em cada camada do perfil de solo (RITCHIE, 1972, 1981a, 1981b, 1998). A Figura 4 ilustra os conceitos adotados no balanço hídrico do DSSAT.

Figura 4 - Esquema representativo do balanço de água no solo simulado pelo DSSAT

Adaptado de Ines et al. (2001)

Legenda: DUL: teor de água na capacidade de campo; LL: teor de água no ponto de murcha permanente; SAT: teor de água na saturação; e SW: conteúdo de água no solo

A água nas camadas superiores do perfil é drenada para as camadas mais inferiores, imitando um processo de uma série de reservatórios lineares. A infiltração é calculada como a diferença da chuva/irrigação e escoamento superficial (*runoff*). A drenagem ocorre se a infiltração e a água presente na camada exceder sua capacidade de retenção e é estimada por meio de uma aproximação do efeito cascata, onde o excesso de água, acima da capacidade de campo, flui para a camada seguinte.

O fluxo ascendente de água é causado pela ascensão de água pela raiz devido à transpiração e evaporação do solo. A máxima extração de água pelas raízes depende da água disponível em cada perfil. A extração de água pelas raízes no modelo ORYZA-DSSAT se baseia na densidade de massa do sistema radicular,

diferentemente do utilizado pelo DSSAT, baseado na densidade de comprimento da raiz. O runoff é calculado pelo método do número da curva modificado do USDA-SCS (WILLIAMS, 1991).

A evapotranspiração potencial pode ser calculada de duas maneiras pelo DSSAT. A primeira é por meio do método de Priestley e Taylor (1972), o qual necessita apenas de dados diários de radiação solar e temperatura máxima e mínima do ar. A segunda, é por meio do método Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), que além das variáveis citadas acima, necessita ainda de dados de umidade relativa do ar e velocidade do vento.

O estresse hídrico do modelo ORYZA2000 é baseado na curva característica da água, definida em função do potencial da água do solo na zona radicular. A vantagem em expressar a resposta do estresse hídrico como função da tensão da água no solo é que ele pode ser utilizado em qualquer tipo de solo (BOUMAN et al., 2001). O modelo ORYZA-DSSAT utiliza o mesmo método, porém, a curva característica da água passou a ser obtida em função dos valores do limite superior e inferior da água disponível e o teor de água na saturação para cada camada no perfil de solo (PORTER; LI, 2011).

2.2.2 Descrição dos dados experimentais

O modelo foi calibrado e avaliado utilizando dados provenientes de experimentos realizados nos campos experimentais da Embrapa Arroz e Feijão nos municípios de Santo Antônio de Goiás (latitude 16.48° S, longitude 49.3° O e 823 m de altitude) e Porangatu (latitude 13.44° S, longitude 49.15° O e 496 m de altitude), no Estado de Goiás. Para a calibração foram utilizados dados do experimento conduzido durante a safra 2010-2011 em Santo Antônio de Goiás. Para avaliar o modelo foram utilizados dados independentes, provenientes de experimentos conduzidos em Santo Antônio de Goiás, na safra 2008-2009, e em Porangatu, na safra 2009-2010.

Para Santo Antônio de Goiás, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho Eutroférico e na localidade de Porangatu, como Latossolo Vermelho distrófico, cujas características químicas são apresentadas na Tabela 1.

Em todos os experimentos foi utilizada a Cultivar do arroz de terras altas BRS-Primavera, de ciclo médio (HEINEMANN et al., 2009). No experimento conduzido

nos anos de 2010-2011, a cultura foi semeada no mês de Dezembro de 2010, com a adubação consistindo de 450 kg ha⁻¹ do formulado 5-30-15 adicionado de 25 kg ha⁻¹ de sulfato de zinco como adubação de base e duas aplicações de nitrogênio, aplicados em cobertura, sendo a primeira com 40 kg ha⁻¹, aplicada 20 dias após a emergência, e a segunda com 60 kg ha⁻¹, aplicada 10 dias antes da data de iniciação da panícula. O espaçamento utilizado no experimento foi de 0,35 m, resultando em uma densidade de 200 plantas m⁻².

Foi realizada irrigação durante o ciclo da cultura, totalizando 50 mm, sendo a primeira realizada logo após a emergência e a última um dia antes da maturidade fisiológica, com a finalidade de manter o experimento com o mínimo possível de estresse hídrico. Foi utilizado o delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. Durante o experimento não houve ocorrência de pragas ou doenças na cultura.

Somente para o experimento conduzido em Porangatu, na safra 2009-2010, ocorreu irrigação complementar, com duas aplicações, totalizando 80 mm de água. Em ambos os experimentos foi utilizado o delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. As demais informações relativas ao manejo da cultura do arroz em ambos os experimentos são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 - Características químicas dos solos dos experimentos utilizados para a calibração e avaliação do modelo em Santo Antônio de Goiás (SAG) e Porangatu (POR), GO

Local	Ano	Prof. (cm)	Aplicação	pH	Ca	Mg	Al	H + Al	P	K	Cu	Zn	Fe	Mn	M.O.
				água	cmol _c /dm ³			mg/dm ³			(%)				
SAG	2010-11	0-10	Calibração	4,7	1,2	0,4	0,2	5,5	5,5	140,0	3,5	3,7	50,0	56,0	2,0
POR	2009-10	0-10	Avaliação	6,4	1,8	0,8	0,0	2,5	11,2	163,8	2,6	7,0	83,0	19,0	1,3
SAG	2008-09	0-10	Avaliação	5,4	1,6	0,5	0,1	4,9	3,5	126,0	2,9	1,5	64,0	34,0	2,0

Tabela 2 - Características de manejo agrônomo dos experimentos realizados em Porangatu - POR (2009-2010) e Santo Antônio de Goiás - SAG (2008-2009), utilizados para a avaliação do modelo ORYZA-DSSAT

Local	Ano	Dados de manejo				
		Data semeadura	Espaçamento entre linhas	Profundidade semeadura	Densidade de plantas	Adubação
			(m)	(m)	(Plantas)	(kg N ha ⁻¹)
POR	2009-10	16/11/2009	0,35	0,05	230	100
SAG	2008-09	12/11/2008	0,45	0,05	200	60

Para todos os experimentos foi medido o teor de água no solo durante o ciclo da cultura, por meio de uma sonda de capacitância Diviner da Sentek. No experimento utilizado para a calibração do modelo, o teor de água no solo foi avaliado em sete camadas, com 0,1 m de profundidade cada. Nos experimentos utilizados para a avaliação do modelo, o número de camadas avaliadas e a profundidade foram diferentes, sendo três camadas, com 0,2 m de profundidade cada, para o experimento conduzido em Porangatu, e quatro camadas com 0,1 m de profundidade cada para o experimento realizado em Santo Antônio de Goiás.

A curva de retenção do solo foi determinada para cada experimento. Com isso, foi possível determinar as umidades de saturação (SAT, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), capacidade de campo (DUL, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e ponto de murcha permanente (LL, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), cujos valores são apresentados na Tabela 3. Esses dados foram posteriormente calibrados, processo que será descrito a seguir.

Tabela 3 - Valores de umidade do solo em várias profundidades para os experimentos utilizados no presente estudo, em Santo Antônio de Goiás (SAG) e em Porangatu (POR), GO

Local	Ano	Aplicação	Prof. (cm)	Umidade		
				SAT	DUL	LL
				cm³ cm⁻³		
SAG	2010-11	Calibração	0-10	0,48	0,39	0,31
			10-20	0,43	0,41	0,34
			20-30	0,40	0,38	0,32
			30-40	0,46	0,39	0,27
			40-50	0,48	0,36	0,24
POR	2009-10	Avaliação	0-20	0,44	0,36	0,25
			20-40	0,44	0,34	0,23
			40-60	0,51	0,34	0,22
			60-80	0,51	0,36	0,23
			0-10	0,47	0,32	0,23
SAG	2008-09	Avaliação	10-20	0,42	0,34	0,25
			20-30	0,41	0,34	0,26
			30-40	0,44	0,36	0,24
			40-50	0,47	0,33	0,22
			50-60	0,48	0,33	0,20
			60-70	0,53	0,40	0,21

Prof.: profundidade; SAT: umidade do solo no ponto de saturação; DUL: umidade do solo na capacidade de campo; e LL: umidade do solo no ponto de murcha

Além disso, foram obtidos dados de granulometria, densidade do solo e condutividade hidráulica saturada, cujos valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados de granulometria, densidade e condutividade hidráulica saturada dos solos para cada experimento em Santo Antônio de Goiás (SAG) e Porangatu (POR), GO

Local	Ano	Aplicação	Prof. (cm)	Granulometria			Densidade do solo*	Ksat*
				Silte	Argila	Areia		
				g kg ⁻¹			g m ⁻³	cm h ⁻¹
SAG	2010-11	Calibração	0-10	113	562	325	1,35	1,49
			10-20				1,48	1,56
			20-30				1,54	1,71
			30-40		-		1,30	1,66
			40-50				1,20	1,66
POR	2009-10	Avaliação	0-20	80	429	491	1,48	1,56
			20-40	80	449	471	1,50	1,66
			40-60	80	489	431	1,31	1,66
			60-80	60	549	391	1,30	2,00
			0-10	120	569	311	1,21	1,49
SAG	2008-09	Avaliação	10-20	100	589	311	1,33	1,56
			20-30	80	649	271	1,41	1,71
			30-40	160	589	251	1,24	1,66
			40-50	140	589	271	1,11	1,66
			50-60	120	629	251	1,02	1,66
			60-70	120	629	251	1,08	1,66

*Valores médios; Prof.: Profundidade; Ksat: condutividade hidráulica saturada do solo; -: Sem medição

Os dados meteorológicos diários das temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação e radiação solar global do período em que os experimentos foram realizados foram obtidos por estações meteorológicas automáticas localizadas nos locais dos experimentos. As Figuras 5 e 6 indicam a variação dos elementos meteorológicos (radiação solar, temperatura máxima e mínima do ar e precipitação) durante o ciclo da cultura para os três experimentos. Observou-se uma maior temperatura do ar, tanto para a máxima quanto para a mínima durante o experimento em Porangatu (Figuras 5b e 5c), além de uma menor precipitação (Figura 6), quando comparado à Santo Antônio de Goiás.

Figura 5 – Variação da radiação solar (a) e temperatura máxima (b) e mínima (c) do ar durante o ciclo da cultura em Porangatu (2009-2010), cujo plantio ocorreu em 16/11/2009 e Santo Antônio de Goiás (2008-2009 e 2010-2011), com plantio realizado em 12/11/2008 e 09/12/2010, respectivamente

Figura 6 – Variação da precipitação durante o ciclo da cultura em Porangatu (2009-2010), com plantio realizado em 16/11/2009 (a) e Santo Antônio de Goiás, safras 2008-2009 (b) e 2010-2011 (c), cujos plantios ocorrem em 12/11/2008 e 09/12/2010, respectivamente

2.2.3 Calibração do modelo ORYZA-DSSAT

O modelo ORYZA-DSSAT foi calibrado de acordo com os procedimentos descritos em Bouman et al. (2001) e Casanova, Goudriaan e Bosch (2006). O modelo simulou os dados com a rotina de nitrogênio desligada, ou seja, não ocorreu nenhum tipo de estresse relacionado a esse nutriente.

Antes de calibrar os parâmetros relacionados à cultura, foi necessário se realizar a calibração dos componentes que afetam o balanço hídrico do modelo, com a finalidade de obter o ajuste entre os valores de teor de água observado e simulado. Os seguintes componentes foram modificados: teor de água na saturação (SAT); teor de água na capacidade de campo (DUL); teor de água no ponto de murcha permanente (LL); e o fator de crescimento radicular (SRGF), que representa a quantidade de raiz em cada camada do solo em termos percentuais. Foi utilizado o método iterativo, sendo os parâmetros modificados até se obter o melhor ajuste entre os dados simulados e observados.

As Figuras 7, 8 e 9 indicam a umidade do solo observada e simulada, após calibração dos componentes que afetam o balanço hídrico do modelo, para os experimentos de campo realizados em Santo Antônio de Goiás (2010-2011), utilizado para a calibração do modelo; e em Santo Antônio de Goiás (2008-2009) e Porangatu (2009-2010), utilizados para a avaliação do modelo, respectivamente.

Figura 7 – Umidade do solo simulada e observada durante o ciclo da cultura em Santo Antônio de Goiás (2010-2011) para as camadas com profundidade de 0-10 cm; 10-20 cm; 20-30 cm; e 30-40 cm

Figura 8 – Umidade do solo simulada e observada durante o ciclo da cultura em Santo Antônio de Goiás (2008-2009) para as camadas com profundidade de 0-10 cm; 10-20 cm; 20-30 cm; e 30-40 cm

Figura 9 – Umidade do solo simulada e observada durante o ciclo da cultura em Porangatu (2008-2009) para as camadas com profundidade de 0-20 cm; 20-40 cm; e 40-60 cm

Em relação à cultura, os seguintes parâmetros foram objeto de calibração: taxa de desenvolvimento fenológico (DVR); partição de assimilados entre as folhas, colmo e órgãos de reserva (FLV, FST e FSO, respectivamente); desenvolvimento da área foliar e crescimento da cultura; crescimento de espiguetas (SPGF); crescimento radicular; e estresse hídrico. Todos os demais parâmetros da cultura permaneceram iguais aos dados da cultivar tropical padrão IR 72, inserido no modelo ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2001).

2.2.3.1 Taxa de desenvolvimento fenológico (DVR)

Os parâmetros do desenvolvimento fenológico calibrados foram: taxa de desenvolvimento da fase juvenil DVRJ ($^{\circ}\text{C dia}^{-1}$); taxa de desenvolvimento da fase sensível ao fotoperíodo DVRI ($^{\circ}\text{C dia}^{-1}$); taxa de desenvolvimento da formação da panícula DVRP ($^{\circ}\text{C dia}^{-1}$); e a taxa de desenvolvimento da fase reprodutiva DVRR ($^{\circ}\text{C dia}^{-1}$). Para realizar a calibração, foram anotadas as datas de emergência, florescimento e maturação fisiológicas observadas durante o experimento. A data de iniciação da panícula foi estimada, pois ela só foi observada quando a mesma já estava visível, uma vez que a maneira correta de coletar essa informação é observá-la ainda dentro do colmo, com pelo menos 1 mm de comprimento (LI et al. 2011), de preferência com o auxílio de um microscópio.

Esses parâmetros foram calibrados por meio do método iterativo, que consiste em mudar os valores dos fatores do desenvolvimento fenológico até que as datas simuladas se igualem ou se aproximem das datas observadas nos experimentos de campo.

Além dos parâmetros de desenvolvimento, a temperatura base (T_b) da cultura utilizada pelo modelo foi modificada de 8°C para 10°C . De acordo com Dingkuhn e Asch (1999); Miller (1990); Sié et al. (1998), a T_b considerada para a cultura do arroz variou entre 8 e 10°C . As temperaturas ótima (30°C) e máxima (42°C) mantiveram-se inalteradas em relação à cultivar IR 72.

Apesar de o modelo levar em consideração o fotoperíodo para o cálculo do desenvolvimento fenológico, a cultivar BRS-Primavera não é sensível a essa variável ambiental (LORENÇONI, 2009).

2.2.3.2 Parâmetros de partição de assimilados

O modelo particiona os assimilados para as folhas, os colmos e os órgãos de reserva (direcionados para a formação de grãos), sendo que a fração de assimilados para cada órgão da planta é determinada pelos coeficientes FLV, FST e FLV, respectivamente. Em cada coeficiente, as frações sofrem alterações em função do estágio de desenvolvimento da cultura (DVS). As frações foram obtidas experimentalmente por meio da análise da produção de matéria seca distribuída pelos órgãos da planta entre duas coletas subsequentes, durante o ciclo da cultura

de arroz. No experimento destinado à calibração, o intervalo de tempo utilizado nas coletas de matéria seca foi de sete dias. Mesmo após a obtenção dos valores experimentais, foi necessária a realização de um ajuste nestes coeficientes. Esse ajuste foi realizado manualmente até que se alcançasse o melhor ajuste entre os dados observados e os simulados.

2.2.3.3 Parâmetros de desenvolvimento da área foliar e crescimento da cultura do arroz

A área foliar das plantas determina a quantidade de radiação que ela absorve e, conseqüentemente, a assimilação de CO₂. Portanto, os parâmetros de desenvolvimento da área foliar têm papel importante na simulação da cultura. Foram quatro os parâmetros que sofreram modificação: taxa máxima de crescimento relativo da área foliar (RGRLMX); taxa mínima de crescimento relativo da área foliar (RGRLMN); área foliar específica (SLA); área específica dos colmos (SSGA).

Quando o dossel não está fechado, as plantas crescem exponencialmente em função da soma térmica e a partir desse ponto, a área foliar cresce linearmente (CASANOVA; GOUDRIAAN; BOSCH, 2000). Portanto, de acordo com os mesmos autores citados anteriormente, os fatores RGRLMX e RGRLMN foram obtidos a partir da derivada da equação de ajuste (equação polinomial de ordem 2), obtida da relação entre o logaritmo do índice de área foliar (IAF) e a soma térmica (°C dia), em que:

$$y = \pm ax^2 + bx + c \quad (1)$$

$$y' = \pm 2ax + b \quad (2)$$

em que: $y = \ln(\text{IAF})$; x = soma térmica (°C dia); e y' = taxa de crescimento relativo da área foliar (RGRL).

Portanto, a equação 2 indica que, quando a variável x tende a zero, ou seja, no início do ciclo da cultura, a taxa de crescimento tem seu valor máximo e é igual ao valor de “ b ”, sendo, assim, o valor do fator RGRLMX é igual ao valor de “ b ”. No decorrer do ciclo, quando o dossel se fecha, a taxa de crescimento se aproxima do

seu menor valor. Com isso, substituindo o valor de “x” pela soma térmica correspondente ao estágio em que ocorre o fechamento do dossel, calcula-se o fator RGRLMN.

A área foliar específica é utilizada para o cálculo da área foliar, a partir do momento em que o sombreamento do dossel se torna substancial e também no cálculo de biomassa. O modelo calcula esse parâmetro através da seguinte equação:

$$SLA = A + B \cdot e^{C \cdot (DVS - D)} \quad (3)$$

em que A, B, C e D são coeficientes do modelo.

Para definir os valores dos coeficientes da equação 3, foi realizada uma análise de sensibilidade, a qual consistiu em modifica-los, executar o modelo e analisar as variáveis dependentes do SLA.

Em relação à área específica dos colmos (SSGA), foi empregado o método iterativo. Esse parâmetro afeta tanto a área foliar quanto o crescimento da cultura. Quanto maior o valor de SSGA, maior será o valor da área foliar e da massa seca final.

2.2.3.4 Parâmetro de crescimento de espiguetas (SPGF)

O modelo utiliza esse parâmetro para o cálculo da produtividade final. O parâmetro foi modificado por meio do método iterativo, buscando o melhor ajuste entre as produtividades finais simuladas e observadas.

2.2.3.5 Parâmetros relacionados ao crescimento radicular

Três parâmetros relacionados ao crescimento radicular foram modificados em relação ao arquivo padrão da cultivar IR72: profundidade máxima do sistema radicular quando não houver estresse hídrico (ZRTMCW, m); profundidade máxima do sistema radicular quando ocorrer estresse hídrico (ZRTMCD, m); e profundidade máxima do sistema radicular (MAXD, cm). Mais uma vez, a maneira empregada para calibrar esses parâmetros foi o da tentativa e erro, buscando-se o melhor ajuste

entre os valores observados e simulados dos componentes de crescimento (massa seca total, massa seca de folhas, massa seca de colmos, massa seca de panículas e IAF) e da produtividade.

2.2.3.6 Parâmetros relacionados ao estresse hídrico

O modelo utiliza seis parâmetros que definem o estresse hídrico: enrolamento foliar (ULLS; LLLS); expansão foliar (ULLE; LLLE); e morte foliar (ULDL; LLDL). Para definir os valores desses parâmetros, foi realizada uma análise de sensibilidade, a qual consistiu em modificar os parâmetros, executar o modelo e analisar as variáveis de desenvolvimento fenológico, crescimento/desenvolvimento da cultura e produtividade final.

2.3 Avaliação do modelo ORYZA-DSSAT

A avaliação do modelo foi realizada comparando-se os dados simulados com os observados em dois experimentos independentes, realizados em dois locais e anos diferentes, sendo um em Porangatu, GO, na safra 2009-2010, e outro em Santo Antônio de Goiás, GO, na safra 2008-2009.

Dados simulados e observados de matéria seca total, matéria seca de folhas, matéria seca de colmos, produtividade final e IAF, além dos componentes do desenvolvimento fenológico (data de iniciação da panícula, data de florescimento e data de maturação fisiológica) foram comparados graficamente. O desempenho do modelo para o desenvolvimento fenológico foi avaliado estatisticamente, por meio da raiz quadrada do erro médio absoluto ($RMSE_a$), raiz quadrada do erro médio normalizado ($RMSE_n$) e por meio do índice D de Willmott (WILLMOTT, 1981). Em relação aos componentes de biomassa, o desempenho do modelo foi avaliado utilizando-se apenas o índice D de Willmott.

Os valores de $RMSE_a$ (Equação 4) e de $RMSE_n$ (Equação 5) foram obtidos pela comparação entre os dados simulados e observados para um conjunto de dados com n número de observações:

$$RMSE_a = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (4)$$

$$RMSE_n = \frac{(100 \cdot RMSE_a)}{\frac{\sum_{i=1}^n O_i}{n}} \quad (5)$$

em que: S_i e O_i representam os dados simulados e observados, respectivamente. O índice D de Willmott representa a distância relativa dos valores simulados da reta 1:1, indicando a acurácia do modelo. Esse índice é calculado de acordo com a Equação 6:

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - O_m| + |O_i - O_m|)^2} \quad (6)$$

em que: O_m é a média dos valores observados; e S_i e O_i representam os dados simulados e observados, respectivamente.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Calibração do modelo ORYZA-DSSAT

2.3.1.1 Desenvolvimento fenológico

O processo de calibração do modelo ORYZA-DSSAT, para o desenvolvimento fenológico resultou em ajustes bastante satisfatórios para a cultivar BRS-Primavera, quando se considerou o experimento realizado em Santo Antônio de Goiás, na safra 2010-2011 (Tabela 5), com diferenças não superiores a 2 dias entre as datas observadas e estimadas.

Tabela 5 – Comparação entre as datas observadas e estimadas para o desenvolvimento fenológico da cultivar de arroz BRS-Primavera, obtidas do experimento realizado em Santo Antônio de Goiás, na safra 2010-2011, e simuladas pelo modelo ORYZA-DSSAT calibrado

Calibração ORYZA-DSSAT	Observado	Simulado
	(DAE)	
Iniciação da panícula	49	51
Florescimento	79	79
Maturação fisiológica	107	109

DAE: dias após a emergência

Os valores simulados e observados para a data de florescimento foram iguais a 79. O modelo superestimou a data de iniciação da panícula em 2 dias em relação ao valor observado. Porém, a diferença pode ser justificada pela grande dificuldade em se medir essa variável no campo, uma vez que a data de iniciação da panícula observada no campo foi estimada. Observou-se também uma diferença de 2 dias para a data de maturação fisiológica, indicando que o modelo superestimou a última fase da cultura (Fase 3). Apesar disso, o valor simulado pelo modelo está coerente com o que ocorre no campo, uma vez que a planta alcança o estágio de maturação fisiológica aproximadamente 30 dias após o florescimento (HEINEMANN et al., 2008).

Comparando os valores dos parâmetros obtidos nesse trabalho com os observados para a cultivar de arroz inundado IR 72, padrão do ORYZA2000, observou-se que todos os valores foram maiores, considerando a temperatura base de 10°C para a cultivar BRS-Primavera e 8°C para a cultivar IR72. O maior aumento foi observado para o parâmetro (DVRR), referente à fase reprodutiva, sendo 40% maior. Já o menor aumento, em torno de 12%, foi para o parâmetro relacionado ao fotoperíodo (Tabela 6).

Tabela 6 – Comparação dos parâmetros de desenvolvimento fenológico entre as cultivares IR 72 e BRS-Primavera, após a calibração do modelo ORYZA-DSSAT

Parâmetros (°C dia ⁻¹)	Cultivar	
	IR 72	BRS-Primavera
DVRJ	0,000773	0,000985
DVRI	0,000758	0,000850
DVRP	0,000784	0,000935
DVRR	0,001784	0,002501

Legenda: DVRJ: taxa de desenvolvimento da fase juvenil; DVRI: taxa de desenvolvimento da fase sensível ao fotoperíodo; DVRP: taxa de desenvolvimento da formação da panícula; e DVRR: taxa de desenvolvimento da fase reprodutiva

2.3.1.2 Biomassa e Índice de Área Foliar (IAF)

Os parâmetros de partição de assimilados foram definidos com base nas frações de assimilados disponíveis para cada órgão da planta, obtidos experimentalmente, conforme indicado na Tabela 7.

Tabela 7 - Fração de assimilados obtidos experimentalmente em função do estágio fenológico (DVS) para as folhas (FLV), colmos (FST) e órgãos de reserva (FSO) destinados à formação dos grãos, em Santo Antônio de Goiás, GO, na safra 2010-2011

DVS	FLV	FST	FSO
	g g ⁻¹		
0,14	0,57	0,43	0,00
0,31	0,49	0,51	0,00
0,59	0,42	0,58	0,00
0,68	0,32	0,68	0,00
0,85	0,20	-	0,00
0,93	0,12	0,67	0,21
1,10	0,10	0,37	0,54

- Não foi realizada a medição para o DVS correspondente

A partir dos valores indicados na Tabela 7, e após realização de um último ajuste, foram obtidos os valores calibrados dos parâmetros para a cultivar BRS-Primavera. A Figura 6 apresenta a dinâmica da partição de assimilados da cultivar BRS-Primavera (a) e da cultivar de arroz IR 72 (b).

Figura 10 – Dinâmica da partição dos assimilados entre as folhas (FLV), os colmos (FST), e os órgãos de reserva (FSO) em função do desenvolvimento fenológico para as cultivares de arroz BRS-Primavera (a) e IR 72 (b)

No início do ciclo da cultura, a maior parte dos assimilados é direcionada para as folhas (FLV) nas duas cultivares, com uma fração um pouco maior para a cultivar BRS-Primavera (Figura 10a). A FLV apresentada pela cultivar IR 72 permaneceu constante até o DVS = 0.5, caindo rapidamente até zero no estágio de florescimento (Figura 10b). De maneira diferente, a FLV apresentada pela cultivar BRS-Primavera diminuiu progressivamente, atingindo zero após o florescimento (DVS = 1).

A fração de assimilados destinada aos colmos, no início do ciclo, apresenta valores semelhantes entre as cultivares. A FST permanece constante até o DVS = 0,5 para a cultivar IR 72, ocorrendo um aumento e posteriormente diminuindo rapidamente até zero em um período um pouco a frente do florescimento (Figura 6b). A dinâmica da FST para a cultivar BRS-Primavera apresentou variação diferente da cultivar IR 72, aumentando seu valor desde o início, atingindo seu máximo em um período bem próximo ao ocorrido para a cultivar IR 72, caindo a partir desse ponto, de maneira mais suave (Figura 10a).

Os assimilados foram direcionados aos órgãos de reserva para as duas cultivares praticamente no mesmo estágio fenológico, antes do florescimento (Figuras 10a e 10b). Para a cultivar IR 72, 100% dos assimilados são translocados para os órgãos de reserva antes do DVS = 1,5 (Figura 10b). Nesse mesmo estágio, para a cultivar BRS-Primavera, cerca de 50% dos assimilados são translocados para os órgãos de reserva e a outra metade para os colmos (Figura 10a).

O desenvolvimento da área foliar é dependente do fator RGRL, representado pelos valores mínimo (RGRLMN) e máximo (RGRLMX). Esses valores foram obtidos pela relação entre $\ln(\text{IAF})$ e a soma térmica (ST), conforme Figura 11. Observou-se que até determinado ponto ($ST \approx 800^\circ\text{Cd}$, correspondente ao período entre a iniciação da panícula e o florescimento e $\text{IAF} = 1,1$) o crescimento da planta ocorreu de forma acelerada e, após esse ponto, o crescimento ocorreu de maneira mais lenta, quase que linearmente. Outra observação importante é que o RGRL não é um valor constante, e sim variável, pois se trata, na verdade, da inclinação da reta da curva ajustada, obtida por meio da derivada desta (Figura 11).

Figura 11 - Relação entre o logarítmico natural do índice de área foliar (IAF) da cultivar de arroz BRS-Primavera e a soma térmica ($^\circ\text{Cd}$, $T_{\text{base}} = 10^\circ\text{C}$), para o experimento realizado em Santo Antônio de Goiás no período de 2010-2011, e a equação da curva ajustada. Cada ponto em uma mesma soma térmica representa uma repetição

A curva que melhor se ajustou aos dados experimentais ($R^2 = 0,92$) foi a polinomial de segunda ordem, indicando concordância com Casanova; Goudriaan e Bosch (2000). Com isso, se obteve $\text{RGRL} = 0,011 - 0,00001\text{ST}$, implicando que RGRL teve seu valor máximo igual a 0,010 no início do ciclo, diminuindo até alcançar seu valor mínimo (0,0040), quando a soma térmica da cultura atingiu o

valor de aproximadamente 800°Cd, momento em que o sombreamento se torna substancial.

Na segunda fase de crescimento (linear), a área foliar foi obtida em função da área foliar específica (SLA), por meio da Equação 3. Pela análise de sensibilidade, pôde-se constatar que tanto a área foliar quanto a biomassa são muito sensíveis ao coeficiente A da Equação 3. Em função disso, apenas este coeficiente foi modificado, mantendo-se os demais inalterados e, portanto, iguais aos da cultivar IR 72. Apesar de apenas um coeficiente ter sido modificado, notou-se uma diferença nas curvas de SLA entre as duas cultivares, sendo que a curva correspondente à cultivar BRS-Primavera foi ajustada em função dos dados experimentais, conforme indicado na Figura 12.

Figura 12 - Dinâmica da área foliar específica (SLA) da cultivar de arroz BRS-Primavera, cultivada em Santo Antônio de Goiás, no período entre 2010-2011 (círculos vazios) e valores de SLA simulados pelo modelo ORYZA-DSSAT obtidos após a calibração (linha contínua) e da cultivar IR 72 (linha tracejada) durante o ciclo da cultura

O ajuste da curva calibrada em relação aos dados observados não foi o mais adequado (Figura 12), porém, com essa curva, os valores de IAF e biomassa

estimados pelo modelo ficaram próximos dos valores observados experimentalmente (Figuras 13 e 14).

A produtividade final foi calculada pelo modelo por meio do produto entre o número de espiguetas em formação durante o período reprodutivo (SPGF) e o peso máximo de um grão (WGRMX). Em relação ao parâmetro WGRMX, analisando-se os dados experimentais, não houve alteração em relação à cultivar padrão IR 72, porém, houve significativa redução no valor do parâmetro SPGF (Tabela 8).

Tabela 8 – Parâmetros do modelo ORYZA-DSSAT relacionados ao crescimento da espiguetas (SPGF) e ao peso máximo de um grão (WGRMX) da cultura do arroz para a cultivar padrão IR 72 e os valores calibrados para a cultivar BRS-Primavera

CULTIVAR DE ARROZ	SPGF	WGRMX
	n° kg ⁻¹	kg grão ⁻¹
IR 72	64900	0,0000249
BRS-Primavera	33000	0,000025

2.3.1.3 Componentes do estresse hídrico

Mesmo após a modificação dos parâmetros relacionados à cultura, o modelo superestimou o estresse hídrico em relação ao experimento utilizado para a calibração, uma vez que o modelo ORYZA2000 simula o desenvolvimento, crescimento e produtividade do arroz inundado (BOUMAN et al., 2001; BOUMAN; LAAR, 2006). Como solução, foram modificados os parâmetros relacionados ao sistema radicular, conforme indicado na Tabela 9.

Essa mudança foi baseada no fato de que o balanço hídrico e a dinâmica de água no DSSAT são realizados por camadas, ou seja, a água disponível é função do número de camadas no solo (RITCHIE, 1998). Assim, quanto maior o número de camadas de solo com a presença do sistema radicular, maior a quantidade de água disponível, reduzindo, assim, o estresse hídrico, uma vez que a extração potencial de água pelas raízes depende da quantidade de água disponível no perfil do solo (INES et al., 2001).

Tabela 9 – Parâmetros do modelo ORYZA-DSSAT relacionados ao sistema radicular da cultura do arroz para a cultivar padrão IR 72 e os valores calibrados para a cultivar BRS-Primavera

Variáveis	Cultivar	
	IR 72	BRS-Primavera
ZRTMCW (m)	0,25	0,60
ZRTMCD (m)	0,40	0,80
MAXD (cm)	50,00	80,00
ULLS (Kpa)	74,13	74,13
LLLS (Kpa)	794,33	794,33
ULDL (Kpa)	630,95	630,95
LLDL (Kpa)	1584,89	1584,89
ULLE (Kpa)	1,45	120,45
LLLE (Kpa)	1404,00	1404,00

ZRTMCW: profundidade máxima do sistema radicular sem estresse hídrico; ZRTMCD: profundidade máxima do sistema radicular com ocorrência do estresse hídrico; MAXD: profundidade máxima do sistema radicular; ULLS: limite superior do potencial da água do solo para ocorrer enrolamento foliar; LLLS: limite inferior do potencial da água do solo para ocorrer enrolamento foliar; ULDL: limite superior do potencial da água do solo para ocorrer morte foliar; LLDL: limite inferior do potencial da água do solo para ocorrer morte foliar; ULLE: limite superior do potencial da água do solo para sessar a expansão foliar; e LLLE: limite inferior do potencial da água do solo para sessar a expansão foliar

Inicialmente, a profundidade radicular máxima utilizada no modelo foi de 40 cm, a mesma utilizada por Heinemann e Stone (2011), no modelo ORYZA-APSIM. Utilizando essa profundidade efetiva máxima do sistema radicular, o modelo ORYZA-DSSAT penalizava excessivamente o crescimento da cultura ao limitar o sistema radicular a essa profundidade. Portanto, o aumento da profundidade do sistema radicular no modelo ORYZA-DSSAT para 80 cm mostrou-se adequado para minimizar a penalização excessiva a que a cultura do arroz estava sendo submetida.

Além do sistema radicular, parâmetros que afetam diretamente o estresse hídrico do modelo foram modificados. Por meio de análise de sensibilidade, o parâmetro mais sensível ao estresse hídrico foi o limite superior do potencial da água do solo para sessar a expansão foliar (ULLE), o qual relaciona o potencial da água do solo (KPa) com a taxa de expansão foliar. A Tabela 9 indica os valores de potencial da água do solo relacionados aos parâmetros de estresse hídrico correspondente às cultivares IR 72 e BRS-Primavera.

De acordo com a Tabela 9, o valor de potencial da água do solo relacionado à interrupção da expansão foliar foi aumentado consideravelmente, em relação à cultivar IR 72, de 1,45 para 120, 45 KPa. De acordo com Wopereis et al. (1996), a

expansão foliar de uma cultivar de arroz produzido no sistema inundado cessa completamente quando o potencial de água do solo situa-se entre -50 e -250 KPa. Analisando o efeito do potencial de água na folha na antemanhã ao enrolamento foliar de uma cultivar de arroz de terras altas nas Filipinas, O'Toole e Cruz (1980) constataram que o início do enrolamento foliar se deu a partir de um potencial de água na folha medido na antemanhã de aproximadamente -4 MPa. Os mesmos autores afirmaram que o potencial de água na folha medido na antemanhã é um bom indicativo do potencial de água no solo. Dentre os sintomas presentes na cultura do arroz causados pelo estresse hídrico, a expansão foliar é a primeira a surgir, seguida pelo fechamento estomático e enrolamento foliar (BOUMAN; TUONG, 2001).

Esse aumento no valor de ULLE significa que para que haja diminuição na taxa de expansão foliar para a cultivar BRS-Primavera, a disponibilidade de água no solo deve ser muito menor do que para a cultivar IR 72, o que é justificável pelo fato de que esta é uma cultivar adaptada ao sistema de produção inundado.

Todos os outros parâmetros utilizados pelo modelo ORYZA-DSSAT foram obtidos da cultivar padrão IR 72 do modelo ORYZA2000. Na Tabela 10 é apresentado um resumo dos valores dos principais parâmetros calibrados para a cultivar de arroz de terras altas BRS-Primavera.

Tabela 10 - Resumo dos valores calibrados para os principais parâmetros do modelo ORYZA-DSSAT para a cultivar de arroz de terras altas BRS-Primavera

Parâmetro de modelo	Valor calibrado
Temperatura base (°C)	10
DVRJ (°C d ⁻¹)	0,000985
DVRI (°C d ⁻¹)	0,00085
DVRP (°C d ⁻¹)	0,000935
DVRR (°C d ⁻¹)	0,002501
RGRL (°C d ⁻¹)	0,010 (máximo); 0,0040 (mínimo)
SLA (ha folha kg ⁻¹ folha)	A = 0,0018; B = 0,0025; C = -4,5; D = 0,14; SLAMAX = 0,0045
SSGA (ha colmo kg ⁻¹ colmo)	[DVS, SSGA]: 0,00, 0,0001; 0,9, 0,0001; 2,1, 0,00
SPGF (n° kg ⁻¹)	33000
WGRMX (kg grão ⁻¹)	0,000025
FLV	[DVS, FLV]: 0,00, 0,65; 0,14, 0,60; 0,44, 0,45; 0,61, 0,39; 0,95, 0,26; 1,20, 0,00
FST	[DVS, FST]: 0,00, 0,35; 0,14, 0,40; 0,44, 0,55; 0,61, 0,61; 0,95, 0,54; 1,20, 0,49
FSO	[DVS, FSO]: 0,00, 0,00; 0,14, 0,00; 0,44, 0,00; 0,61, 0,00; 0,95, 0,20; 1,20, 0,51

DVRJ: taxa de desenvolvimento para a fase vegetativa; DVRI: taxa de desenvolvimento para a fase sensível ao fotoperíodo; DVRP: taxa de desenvolvimento para a fase de formação da panícula; DVRR: taxa de desenvolvimento para a fase de enchimento de grãos; RGRL: taxa relativa de crescimento foliar; SLA: área foliar específica; SSGA: área de colmos específica; SPGF: fator de crescimento das espiguetas; WGRMX: peso máximo de 1 grão; FLV, FST e FSO: parâmetros de partição de assimilados para folhas, colmos e órgãos de reserva, respectivamente

As Figuras 13 e 14 apresentam a variação do IAF e da biomassa total (peso seco de folhas, peso seco de colmos e peso seco de panículas), ao longo do ciclo da cultura do arroz, observados e simulados pelo modelo ORYZA-DSSAT calibrado.

Figura 13 – Variação do IAF observado (círculos) e simulado (linha) pelo modelo ORYZA-DSSAT durante o ciclo da cultura do arroz, cultivar BRS-Primavera, para o experimento realizado em Santo Antônio de Goiás, na safra 2010-2011

No início do ciclo da cultura do arroz, os valores de IAF simulado e observado foram praticamente iguais. A partir de 30 dias após a emergência, o modelo superestimou os valores de IAF, superando o valor máximo observado (IAF = 3,75). O máximo valor estimado (IAF = 4,07) ocorreu apenas 12 dias após o valor máximo observado (Figura 13). Apesar da diferença temporal em alcançar o valor máximo, a dinâmica de IAF foi razoavelmente simulada em relação aos dados observados.

Figura 14 – Variação da biomassa: peso seco de folhas (a); peso seco de colmos (b); peso seco das panículas (c); e peso seco total (d), observados (círculos) e simulados (linhas) pelo modelo ORYZA-DSSAT durante o ciclo da cultura do arroz, cultivar BRS-Primavera, para o experimento utilizado no processo de calibração, em Santo Antônio de Goiás, na safra 2010-2011

Em relação à biomassa, observou-se, em geral, um bom ajuste para a simulação de todas as variáveis. No entanto, analisando-se separadamente cada uma delas, nota-se uma discrepância nos valores de peso seco de folhas (Figura 14a), a partir do momento em que se inicia o acúmulo de biomassa nas panículas. A partir desse momento, o modelo subestimou a biomassa de folhas. O mesmo comportamento foi observado em relação ao peso seco de colmos (Figura 14b).

Em relação ao peso seco de panículas (Figura 14c), o modelo não atingiu o valor máximo obtido experimentalmente, porém, durante o ciclo o modelo simulou adequadamente essa variável. Apesar disso, a biomassa total do arroz foi similar entre os dados simulados e observados (Figura 14d), atingindo um valor final de 12436 kg ha^{-1} e 12472 kg ha^{-1} , respectivamente. A produtividade final simulada (4362 kg ha^{-1}) foi maior do que a observada (3763 kg ha^{-1}), em torno de 600 kg ha^{-1} .

2.3.2 Avaliação do modelo ORYZA-DSSAT

Após a obtenção dos parâmetros calibrados para a cultivar de arroz de terras altas BRS-Primavera, os mesmos foram utilizados para a avaliação do modelo ORYZA-DSSAT, com dados independentes. Para tanto, dados observados em dois experimentos conduzidos em Santo Antônio de Goiás, na safra 2008-2009, e em Porangatu, na safra 2009-2010, foram utilizados para testar o modelo calibrado. Como ocorreu com o processo de calibração, a rotina de nitrogênio do modelo foi desligada, não ocorrendo, portanto, nenhum tipo de estresse decorrente desse nutriente.

2.3.2.1 Avaliação da fenologia

Os valores observados e simulados da duração das fases fenológicas (vegetativo, reprodutivo e enchimento de grãos) da cultura do arroz de terras altas, cultivar BRS-Primavera são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Estádios fenológicos da cultura do arroz de terras altas, cultivar BRS-Primavera observados e simulados pelo modelo ORYZA-DSSAT, na fase de avaliação dos modelos, nas localidades de Porangatu (POR) e Santo Antônio de Goiás (SAG), GO

Local	Período	Data de iniciação da panícula (DAE)		Data de florescimento (DAE)		Data de maturação fisiológica (DAE)	
		Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
POR	2009-2010	-	46	72	70	96	97
SAG	2008-2009	46	48	75	75	105	103

DAE: dias após a emergência; Obs: observado; Sim: simulado

Para ambos os experimentos, todos os valores simulados se mantiveram próximos dos valores observados, com exceção da data de iniciação da panícula em Porangatu, na qual não foi possível realizar a medição. Porém, o valor simulado foi semelhante ao valor observado em Santo Antônio de Goiás, indicando que a estimativa se encontra dentro da ordem de grandeza esperada para essa fase.

Heinemann et al. (2009) obtiveram para um experimento realizado em casa de vegetação, em três datas de semeadura, para Santo Antônio de Goiás no ano de 2008 valores da data de iniciação da panícula variando entre 43 e 45 dias após a emergência.

A análise estatística do desempenho do modelo ORYZA-DSSAT para simular a fenologia da cultura do arroz (florescimento e maturidade fisiológica), cultivar BRS-Primavera, é apresentada na Tabela 12. Para ambas as fases, a diferença apresentada pelos valores médios entre os dados observados e simulados foi muito pequena. A data de maturidade fisiológica apresentou um valor de desvio padrão maior em relação aos demais, o que ocorreu devido à diferença do ciclo entre os locais, decorrente da diferença de temperatura do ar entre Porangatu e Santo Antônio de Goiás, sendo menor nesta última (Figuras 5b e 5c).

Tabela 12 - Análise estatística das simulações da fenologia da cultura do arroz, cultivar BRS-Primavera, com o modelo ORYZA-DSSAT, na fase de teste do modelo com dados independentes

Fase fenológica	n	Média (DP) _{obs}	Média (DP) _{sim}	RMSE _a	RMSE _n (%)	Índice-D
Florescimento	2	74 (2)	73 (4)	1	2	0.88
Maturidade fisiológica	2	101 (6)	100 (4)	2	2	0.96

Legenda: n: número de amostras; DP_{obs}: desvio padrão dos dados observados; DP_{sim}: desvio padrão dos dados simulados; RMSE_a: raiz quadrada do erro médio; RMSE_n: raiz quadrada do erro médio normalizado

Observa-se na Tabela 12 que o valor de RMSE absoluto foi praticamente o mesmo, com pequena variação entre os diferentes estádios fenológicos. Além disso, o modelo simulou a data de florescimento e a data de maturidade fisiológica com boa acurácia, indicado pelo baixo valor de RMSE e o elevado valor do índice D de Willmott. Não foi possível realizar a análise estatística para a data de iniciação da panícula, uma vez que essa variável não foi medida em Porangatu.

2.3.2.2 Avaliação da biomassa e IAF

Para testar o modelo em relação à área foliar, foram utilizados somente os dados de IAF provenientes de Santo Antônio de Goiás, já que esses dados não

foram medidos em Porangatu. A Figura 15 apresenta o IAF observado e o simulado durante todo o ciclo da cultura.

Observa-se pouca diferença entre os dados observados e simulados, com ambos atingindo seu valor máximo, respectivamente 3,27 e 3,51 na mesma data, indicando também um bom desempenho do modelo em simular o crescimento da cultivar de arroz BRS-Primavera.

É importante que o modelo simule bem a dinâmica da área foliar, principalmente nos estádios iniciais da cultura, quando ainda não há um sombreamento substancial. Vários processos relacionados à simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura do arroz pelo modelo ORYZA-DSSAT ocorrem em função da área foliar, como a evapotranspiração (INES et al., 2001) e a assimilação de CO₂ que, além de outros fatores, depende da interceptação de radiação solar pelo dossel (BOUMAN; LAAR, 2006; BOUMAN et al., 2001).

Figura 15 - Variação ao longo do ciclo do índice de área foliar (IAF) da cultura do arroz, cultivar BRS-Primavera, observado (círculos) e simulado (linha) pelo modelo ORYZA-DSSAT para o experimento utilizado no processo de avaliação do modelo, realizado em Santo Antônio de Goiás na safra 2008-2009

A Figura 16 apresenta a variação dos componentes de biomassa durante o ciclo da cultura do arroz, no experimento de Santo Antônio de Goiás, em 2008-2009. Apesar de se manter subestimando os dados de peso seco de folhas e panículas, o

modelo ORYZA-DSSAT apresentou valores simulados mais próximos dos observados (Figuras. 16a e 16c). Além disso, os dados simulados e observados de biomassa total final ficaram próximos, indicando que o modelo funcionou adequadamente, mesmo que o valor simulado de produtividade final tenha se distanciado um pouco mais do valor observado em relação à Porangatu (Tabela 14).

Figura 16 – Variação da biomassa: peso seco de folhas (a); peso seco de colmos (b); peso seco das panículas (c); e peso seco total (d), observados (círculos) e simulados (linhas) pelo modelo ORYZA-DSSAT durante o ciclo da cultura do arroz, cultivar BRS-Primavera, durante experimento realizado em Santo Antônio de Goiás na safra 2008-2009, utilizado no processo de avaliação do modelo

Em Porangatu, o modelo não apresentou bom desempenho ao simular o peso seco de folhas. Apesar de no início do ciclo os valores terem sido semelhantes em relação aos dados observados, no decorrer do ciclo o modelo subestimou o peso seco de folhas, apresentando uma queda rápida e expressiva (Figura 17a). Possivelmente, isso ocorreu devido às condições meteorológicas do local, as quais fizeram com que o modelo penalizasse excessivamente a produção de folhas, devido ao estresse hídrico, uma vez que um dos primeiros sintomas da falta de água

é a diminuição da expansão foliar (BOUMAN; TUONG, 2001), sendo este um dos meios pelo qual o modelo penaliza a produtividade.

De modo semelhante, o peso seco das panículas apresentou a mesma tendência, com os valores simulados sendo similares aos observados no início do ciclo e decaindo posteriormente (Figura 17c). No entanto, o modelo apresentou bom desempenho ao simular o peso seco de colmos, com pouca diferença entre os valores simulados e observados. Devido ao bom desempenho desse componente, o modelo apresentou bom desempenho ao simular a biomassa total, compensando os demais erros.

Figura 17 – Variação da biomassa: peso seco de folhas (a); peso seco de colmos (b); peso seco das panículas (c); e peso seco total (d), observados (círculos) e simulados (linhas) pelo modelo ORYZA-DSSAT durante o ciclo da cultura do arroz, cultivar BRS-Primavera, durante experimento realizado em Porangatu na safra 2009-2010, utilizado no processo de avaliação do modelo

A Tabela 13 apresenta a análise estatística dos componentes de biomassa durante o ciclo da cultura do arroz e também os valores finais de biomassa total e produtividade do experimento realizado em Porangatu. Como indicado na Figura 17a

e 17c, o modelo não apresentou bom desempenho ao simular o peso seco de folhas e o peso seco das panículas, apresentando os menores valores do índice D. No início do ciclo, o modelo simulou adequadamente o peso seco de folhas, com os valores simulados próximos dos observados (Figura 17a). À medida que o ciclo avançou, a diferença entre os dados observados e simulados ficou maior, apresentando um baixo valor de R^2 (0,60). O mesmo caso foi observado para o peso seco das panículas (Figura 17c).

Os valores médios para o peso seco de colmos e peso seco total apresentaram similaridade entre os dados simulados e observados, com alto valor de R^2 ($> 0,87$), indicando boa precisão do modelo (Figuras 17b e 17d), e valores de D próximos da unidade ($> 0,95$), indicando boa acurácia ao simular tais componentes no decorrer do ciclo da cultura do arroz. O modelo apresentou também bom ajuste ao simular a biomassa total final e também a produtividade final, com valores muito próximos aos dos dados observados nos experimentos de campo (Tabela 13).

O modelo apresentou melhores resultados para a simulação realizada em Santo Antônio de Goiás, quando comparado à Porangatu, conforme observado na Tabela 14. A análise estatística indicou valores do índice D de Willmott maiores, indicando razoável acurácia do modelo em simular os componentes de biomassa.

Possivelmente, o que acarretou essa tendência foi novamente a penalização excessiva do modelo em relação ao estresse hídrico, uma vez que o modelo foi desenvolvido para simular a cultura no sistema de produção inundado (BOUMAN; LAAR, 2006).

Tabela 13 – Análise estatística das simulações dos componentes da biomassa da cultura do arroz, cultivar BRS-Primavera, com o modelo ORYZA-DSSAT, na fase de teste do modelo com dados independentes, do experimento realizado em Porangatu, na safra 2009-2010

Biomassa (kg ha ⁻¹)	n	Média _{obs} (DP)	Média _{sim} (DP)	R ²	Índice D	Valor Final (obs)	Valor Final (sim)
Total	6	3177 (3113)	2562 (2708)	0,98	0,98	-	-
Folhas	6	1273 (968)	496 (351)	0,60	0,63	-	-
Colmos	6	1398 (1270)	1479 (1608)	0,87	0,95	-	-
Panículas	3	1013 (1574)	654 (735)	0,96	0,83	-	-
Biomassa total	1	-	-	-	-	8418	7251
Produtividade	1	-	-	-	-	1481	1233

n: número de amostras; DP_{obs}: desvio padrão dos dados observados; DP_{sim}: desvio padrão dos dados simulados;

Tabela 14 – Análise estatística das simulações dos componentes da biomassa da cultura do arroz, cultivar BRS-Primavera, com o modelo ORYZA-DSSAT, na fase de teste do modelo com dados independentes, do experimento realizado em Santo Antônio de Goiás, na safra 2008-2009

Biomassa (kg ha ⁻¹)	n	Média _{obs} (DP)	Média _{sim} (DP)	R ²	Índice D	Valor Final (obs)	Valor Final (sim)
Total	8	5500 (4151)	5099 (4239)	0,97	0,99	-	-
Folhas	8	1298 (782)	940 (620)	0,96	0,91	-	-
Colmos	8	2787 (1907)	2557 (1984)	0,92	0,98	-	-
Panículas	4	2969 (2403)	2348 (1275)	0,92	0,85	-	-
Biomassa total	1	-	-	-	-	11615	10430
Produtividade	1	-	-	-	-	4659	3342

n: número de amostras; DP_{obs}: desvio padrão dos dados observados; DP_{sim}: desvio padrão dos dados simulados

O modelo simulou adequadamente e com boa precisão e acurácia os dados de peso seco de colmos e peso seco total, com valores elevados de R^2 ($> 0,91$) e do índice D ($> 0,85$), além de apresentar os valores simulados próximos dos observados (Figuras. 16b e 16d).

O melhor ajuste proporcionado pelo modelo ORYZA-DSSAT para a localidade de Santo Antônio de Goiás foi devido ao fato de a calibração do modelo ter sido realizada com dados provenientes desse mesmo local.

Ao analisar o modelo utilizando-se os dois experimentos em conjunto, observou-se que o modelo ORYZA-DSSAT simulou a biomassa da cultura do arroz adequadamente, principalmente o peso seco de colmos e peso seco total, e o peso seco de panículas, conforme observado por meio da análise do índice D de Willmott, apesar de apresentar alguns problemas ao simular a massa de folhas (Tabela 15).

Tabela 15 – Análise estatística das simulações dos componentes da biomassa da cultura do arroz, cultivar BRS-Primavera, com o modelo ORYZA-DSSAT, na fase de teste do modelo com dados independentes, dos experimentos realizados em Santo Antônio de Goiás (2008-2009) e em Porangatu (2009-2010)

Biomassa (kg ha ⁻¹)	n	Média _{obs} (DP)	Média _{sim} (DP)	R ²	Índice D
Total	14	4505 (3799)	4012 (3767)	0,97	0,99
Folhas	14	1287 (830)	750 (553)	0,62	0,76
Colmos	14	2192 (1757)	2095 (1850)	0,90	0,97
Panículas	7	2131 (2192)	1622 (1346)	0,90	0,90
Biom. final	2	10017 (2261)	8841 (2248)	-	-
Produtividade	2	3070 (2247)	2288 (1491)	-	-

n: número de amostras; DP_{obs}: desvio padrão dos dados observados; DP_{sim}: desvio padrão dos dados simulados

2.4 Conclusões

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que o modelo ORYZA-DSSAT:

- 1) Simulou com razoável precisão e acurácia o desenvolvimento fenológico do arroz de terras altas, cultivar BRS-Primavera nas localidades de Santo Antônio de Goiás e Porangatu, no Estado de Goiás.
- 2) Apresentou bom desempenho ao simular os componentes da biomassa: peso seco de colmos e peso seco total para as duas localidades testadas.
- 3) Não apresentou bom desempenho ao simular os componentes da biomassa: peso seco de folhas e peso seco das panículas para as duas localidades, principalmente para Porangatu.
- 4) Simulou adequadamente a produtividade final na localidade de Porangatu e subestimou a produtividade final para Santo Antônio de Goiás.

Referências

- AGGARWAL, P.K.; KALRA, N.; CHANDER, S.; PATHAK, H. InfoCrop: a dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 89, p. 1-25, 2006a.
- AGGARWAL, P.K.; BANERJEE, B.; DARYAEI, M.G.; BHATIA, A.; BALA, A.; RANI, S.; CHANDER, S.; PATHAK, H.; KALRA, N. InfoCrop: a dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. II. Performance of the model. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 89, p. 47-67, 2006b.
- 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).
- ARTACHO, P.; MEZA, F.; ALCALDE, J.A. Evaluation of the ORYZA2000 rice growth model under nitrogen-limited conditions in an irrigated Mediterranean environment. **Chilean Journal of Agricultural Research**, Chillán, v. 71, n. 1, p. 23-33, 2011.
- BOUMAN, B.A.M.; LAAR, H.H. van. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 87, p. 249-273, 2006.

BOUMAN, B.A.M.; TUONG, T.P. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 49, p. 11-30, 2001.

BOUMAN, B.A.M.; KROPFF, M.J.; TUONG, T.P.; WOPEREIS, M.C.S.; TEN BERGE, H.F.M.; VAN LAAR, H.H. **ORYZA2000**: modeling lowland rice. Los Baños: International Rice Research Institute; Wageningen: Wageningen University and Research Centre, Philippines, 2001. 235 p.

CASANOVA, D.; GOUDRIAAN, J.; BOSCH, A.D. Testing the performance of ORYZA1, an explanatory model for rice growth simulation, for Mediterranean conditions. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 12, p. 175-189, 2000.

DINGKUN, M.; ASCH, F. Phenological responses of *Oryza sativa*, *O. glaberrima* and inter-specific rice cultivars on a toposequence in West Africa. **Euphytica**, Dordrecht, v. 110, n. 2, p. 109-126, 1999.

FAGERIA, N.K. Nutrient management for improving upland rice productivity and sustainability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 32, p. 2603-2629, 2001.

_____. Yield physiology of rice. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 30, p. 843-879, 2007.

GAYDON, D.S.; PROBERT, M.E.; BURESH, R.J.; MEINKE, H.; SURIADI, A.; DOBERMANN, A.; BOUMAN, B.; TIMSINA, J. Rice in cropping systems-modeling transitions between flooded and non-flooded soil environments. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 39, p. 9-24, 2012.

HAI-LONG, L.; YANG, J.; HE, P.; BAI, Y.; JIN, J.; DRURY, C.F.; ZHU, Y.; YANG, X.; LI, W.; XIE, J.; YANG, J.; HOOGENBOOM, G. Optimizing parameters of CSM-CERES-Maize model to improve simulation performance of maize growth and nitrogen uptake in Northeast China. **Journal of Integrative Agriculture**, Amsterdam, v. 11, n. 11, p. 1898-1913, 2012.

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, p. 29-36, 2010.

HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F. Determining optimum sowing date for early upland rice cultivar using modeling approach. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 37., 2008, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: CONBEA, 2008. p. 1-4.

_____. **Uso do modelo de simulação ORYZA/APSIM 2000 na definição da população de plantas para o arroz de terras altas**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2011. 16 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 36).

HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F.; FAGERIA, N.K.; CASTRO, L.M. Evaluation of physiological traits in upland rice for adaptation to no-tillage system. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos dos Goytacazes, v. 21, n. 2, p. 113-122, 2009.

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

HORIE, T. Predicting the effects of climatic variation and effect of CO₂ on rice yield in Japan. **Japan Agricultural Meteorology**, Tokyo, v. 48, p. 567-574, 1993.

_____. The effects of climatic variations on agriculture in Japan: the effects on rice yields in Hokkaido. In: PARRY, M.L.; CARTER, T.L.; DONIJN, N.T. **The impact of climatic variations on agriculture, assessments in cool temperature and cold regions**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1998. chap. 5, p. 809-826.

INES, A.V.M.; DROOGERS, P.; MAKIN, I.W.; DAS GUPTA, A. **Crop growth and soil water balance modeling to explore water management options**. Colombo: International Water Management Institute, 2001. 26 p. (Working Paper, 22).

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.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, p. 235-265, 2003.

KROPFF, M.J.; VAN LAAR, H.H.; MATTHEWS, R.B. ORYZA-1: An ecophysiological model for irrigated rice production. In: SARP RESEARCH, 1994, Manila. **Proceedings...** Manila: International Rice Research Institute, 1994. 110p.

LARIJANI, B.A.; SARVESTANI, Z.T.; NEMATZADEH, Gh.; MANSCHADI, A.M.; AMIRI, E. Simulation phenology, growth and yield of transplanted rice at different seedling ages in Northern Iran using ORYZA2000. **Rice Science**, Amsterdam, v. 18, n. 4, p. 321-334, 2011.

LI, T.; ANGELES, O.; MARCAIDA, M.; MANALO, E. **Protocol for experimentation and data collection for modeling studies using ORYZA2000 (Ver1)**. Los Baños: IRRI, 2011. 57 p.

LORENÇONI, R. **Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil**. 2009. 81 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

LORENÇONI, R.; DOURADO-NETO, D.; HEINEMANN, A.B. Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 605-613, 2010.

MILLER, B.C. A study of rice growth and development designed to develop CARICE: A rice growth model for scheduling management actions and evaluating management strategies under California's direct seeded, continuously flooded culture. **Sciences and Engineering**, Vancouver, v. 50, n. 11, p. 4827B-4828B, 1990.

O'TOLLE, J.C.; CRUZ, R.T. Response of leaf water potential, stomatal resistance, and leaf rolling to water stress. **Plant Physiology**, Waterbury, v. 65, p. 428-432, 1980.

PATHAK, H.; LADHA, J.K.; AGGARWAL, P.K.; PENG, S.; DAS, S.; SINGH, Y.; SINGH, B.; KAMRA, S.K.; MISHRA, B.; SASTRI, A.S.R.A.S.; AGGARWAL, H.P.; DAS, D.K.; GUPTA, R.K. Trends of climatic potential and on-farm yields of rice and wheat in the Indo-Gangetic Plains. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 80, p. 223-234, 2003.

PORTER, C.; LI, T. **DSSAT-ORYZA linkage project**: final report. Los Baños: IRRI, 2011. 14 p.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surfaces heat flux and evaporation, using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

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

_____. Soil water availability. **Plant and Soil**, New York, v. 58, p. 327-338, 1981a.

_____. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere. **Plant and Soil**, New York, v. 58, p. 81-96, 1981b.

_____. Soil water balance and plant water stress. In: TSUJI, G.Y.; GOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. **Understanding options of agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic; International Consortium for Agricultural Systems Applications, 1998. Chap. 3, p. 41-53.

SIÉ, M.; DINGKUHN, M.; WOPEREIS, M.C.S.; MIEZAN, K.M. Rice crop duration and leaf appearance rate in a variable thermal environment. II. Comparison of genotypes. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 58, n. 2, p. 129-140, 1998.

SWAIN, D.K.; HERATH, S.; BHASKAR, B.C.; KRISHNAN, P.; RAO, K.S.; NAYAK, S.K.; DASH, R.N. Developing *Oryza* for medium-and-long-duration rice: variety selection under non water stress conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, p. 428-440, 2007.

TUONG, T.P.; SINGH, A.K.; SIOPONGCO, J.; WADE, L.J. Constraints to high yield of dry-seeded rice in the rainy season in a humid tropic environment. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 3, p. 164-172, 2000.

VAN KEULEN, H.; SELIGMAN, N.G. **Simulation of water use, nitrogen and growth of a spring wheat crop**. Wageningen: PUDOC, 1987. 310p.

VAN KEULEN, H.; PENNING DE VRIES, F.W.T.; DREES, E.M. A summary model for crop growth. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: PUDOC, 1982. p. 87-97.

WALTER, L.C.; ROSA, H.T.; STRECK, N.A.; FERRAZ, S.E.T. Adaptação e avaliação do modelo Infocrop para simulação do rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 3, p. 510-521, 2012.

WILLIAMS, J.R. Runonff and water erosion. In: HANKS, R.J.; RITCHIE, J.T. **Modeling soil and plant systems**. Madison: American Society of Agronomy, 1991. p. 439-455.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, Norwich, v. 2, p. 84-194, 1981.

WOPEREIS, M.C.S.; KROPFF, M.J.; MALIGAYA, A.R.; TUONG, T.P. Drought-stress responses of two lowland rice cultivars to soil water status. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 46, n. 1-3, p. 21-39, 1996.

YIN, X. **Quantifying the effects of temperature and photoperiod on phonological development to flowering in rice**. 1996. 173 p. Thesis (PhD in Theorical Production Ecology) – Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1996.

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.

3 DETERMINAÇÃO DAS ÉPOCAS PREFERENCIAIS DE SEMEADURA PARA A CULTURA DO ARROZ DE TERRAS ALTAS, BASEADA NO RISCO CLIMÁTICO E NA PRODUTIVIDADE, ESTIMADA PELO MODELO ORYZA-DSSAT, PARA O ESTADO DE GOIÁS

Resumo

O arroz é uma das culturas mais importantes do mundo, sendo a base da alimentação para mais da metade da população mundial. O Brasil destaca-se como um importante produtor e consumidor de arroz, sendo o principal produto de consumo humano. No Brasil, o arroz é cultivado predominantemente em dois tipos de sistemas: sistema de produção irrigado em várzeas (inundado) e sistema de sequeiro (terras altas). O arroz de terras altas é cultivado principalmente na Região Centro-Oeste do Brasil, como no Estado de Goiás. Nessa região, uma das causas da variabilidade da produtividade do arroz é o fator climático, sendo a chuva o principal. Uma das estratégias utilizadas para minimizar esse risco para a cultura do arroz de terras altas é por meio da definição das épocas preferenciais de semeadura. No Brasil, a definição das épocas preferenciais de semeadura é baseada na análise probabilística do índice de satisfação da necessidade de água (ISNA), na fase fenológica mais crítica da cultura, onde as datas e locais de semeadura são classificados qualitativamente como aptos e inaptos, sem levar em consideração a produtividade. Atualmente, modelos de simulação de culturas vêm sendo utilizados para auxiliar produtores e órgãos públicos para a definição das estratégias mais adequadas para o cultivo do arroz de terras altas. Com isso, o objetivo deste estudo foi determinar as épocas preferenciais de semeadura para essa cultura no Estado de Goiás, com base em novos atributos como as condições climáticas ao longo de todo o ciclo, baseado no ISNA ponderado, a produtividade atingível da cultura, e o custo de produção, comparando-se os resultados obtidos com aqueles recomendados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) por meio do zoneamento de risco climático. Para isso, utilizou-se o modelo ORYZA-DSSAT para a estimativa das produtividades potencial (P_p) e atingível (P_a) da cultura do arroz para 26 localidades do Estado de Goiás, calibrado para a cultivar BRS-Primavera. Para a obtenção do ISNA ponderado ($ISNA_{pond}$), foi realizada uma regressão linear múltipla entre a produtividade relativa (P_a/P_p) e o ISNA correspondente à cada fase da cultura, considerando-se os três tipos de solo predominantes no estado. Foram utilizados dois tipos de custo de produção, um representando a agricultura com alto nível tecnológico e o outro representando a agricultura com menor nível tecnológico (Agricultura Familiar). As datas preferenciais de semeadura foram selecionadas a partir da probabilidade da produtividade atingível ultrapassar o custo de produção e do $ISNA_{pond}$ ser maior ou igual a 0,65, definindo os decêndios aptos para a semeadura. Foram observadas diferenças entre as datas preferenciais de semeadura do arroz propostas neste estudo e as recomendadas pelo MAPA, principalmente nos decêndios iniciais e finais da janela de cultivo. Portanto, conclui-se que a integração do risco climático, definido pelo $ISNA_{pond}$, com a probabilidade da renda obtida da produtividade atingível superar o custo de produção possibilitou se definir as épocas preferenciais de semeadura, de forma a garantir uma maior segurança aos produtores de arroz de terras altas, minimizando as perdas de produtividade e também de sua renda.

Palavras-chave: Arroz de terras altas; ISNA ponderado; Modelo de simulação de cultura; Custo de produção; Zoneamento agrícola

Abstract

Rice is a very important crop for the world, being the basis of food supply for more than half of the world's population. Brazil stands out as an important producer and consumer of rice, being the main product for human consumption in the country. In Brazil, rice is cultivated in two different production systems: flood (lowland rice) and rainfed (upland rice). Upland rice is cultivated mainly in the central part of Brazil, as in Goiás State. In this region, one of the most important factors for upland rice yield variability is the climatic factor, being the rainfall the main one. A strategy to minimize the climatic risk for the crop is through the best sowing dates for upland rice. In Brazil, the best sowing date is based on the probabilistic analysis of crop water requirement satisfaction index (ISNA) at the most critical rice crop phenological phase, being the sowing dates and locations qualitatively classified as suitable or unsuitable for crop growth. Currently, crop simulations models have been used to support growers and government institutions for defining the strategies for upland rice production. Based on that, the aim of this study was to determine the best sowing dates for upland rice in Goiás State, based on new attributes as the climatic conditions during all crop cycle, based on weighted ISNA, the attainable yield, and the production costs, and comparing the sowing window with those recommended by the climate risk zoning of the Minister of Agriculture, Livestock and Food Supply (MAPA). For that, potential (P_p) and attainable (P_a) upland rice yields were estimated by the crop simulation model ORYZA-DSSAT for 26 locations at Goiás State, which was calibrated for the Brazilian upland rice cultivar BRS-Primavera. To estimate weighted ISNA ($ISNA_{pond}$), a multiple linear regression between relative yield (P_a/P_p) and ISNA for each crop phenological phase was developed, considering the main three soils present in the state. Two types of production costs were applied: one representing the agriculture with high technological level and another representing the agriculture with low technological level (Family Agriculture). The best sowing dates were selected considering the probability of attainable yield to exceed the production cost and the probability of $ISNA_{pond}$ be greater than or equal to 0.65. Differences were observed between the best sowing dates proposed by this study and those recommended by MAPA, especially in the initial and final periods of the sowing window. Therefore, it was concluded that the integration of climatic risk, based on $ISNA_{pond}$, with the probability of attainable yield to exceed production cost was able to define the best sowing dates for upland rice crop with the guarantee of lower risks for the grower, minimizing yield losses and profit losses.

Keywords: Upland rice; Weighted ISNA; Crop simulation model; Production cost; Agricultural zoning

3.1 Introdução

A cultura do arroz é cultivada em uma grande diversidade de locais ao redor do mundo, sob diferentes condições térmicas, hídricas, sociais, culturais e sazonais (ARTACHO et al., 2011). No Brasil, a maior parte do arroz é produzida essencialmente no sistema de várzeas inundadas (LORENÇONI, 2009).

Devido ao aumento da demanda mundial por arroz e pelo uso da água, está havendo um crescimento pela demanda do cultivo do arroz de sequeiro ou de terras altas, o qual apresenta uma melhor produtividade da água do que o arroz inundado (MEINKE et al., 2009).

A produtividade média do arroz de terras altas no Brasil é da ordem de 2000 kg ha⁻¹, enquanto que a obtida no sistema inundado fica em torno de 5000 kg ha⁻¹ (IBGE, 2006). De acordo com Heinemann e Stone (2009), provavelmente, um dos principais fatores que contribuem para a baixa produtividade do arroz de terras altas é o estresse hídrico, que muitas vezes ocorre durante a estação chuvosa, quando a demanda hídrica da cultura supera as precipitações.

Na zona tropical brasileira, a área cultivada com arroz de terras altas predomina em relação à da cultura irrigada (MORAIS et al., 2005), sendo os arrozais cultivados principalmente na Região Central do Brasil, conhecida como “Cerrado”, onde anteriormente, o arroz era bastante utilizado como a primeira cultura a ser cultivada em áreas abertas para o estabelecimento de pastagens (FAGERIA, 2010; HEINEMANN et al., 2009; MENDES, 2010). Essa região é caracterizada pelo predomínio de solos de baixa fertilidade natural e acidez elevada, com alta heterogeneidade, e clima variando de úmido a subúmido, e com ocorrência de períodos curtos de estiagem durante a estação chuvosa, denominados veranicos (MENDES, 2010; PIGGIN et al., 1998).

Como se pode constatar, os fatores climáticos apresentam-se como as principais causas de risco para a produtividade dos arrozais na região central do Brasil, uma vez que a cultura do arroz de sequeiro é considerada como de alto risco climático (SILVA; ASSAD, 2001). Dentre os fatores climáticos, podemos citar a: temperatura, a radiação solar e a chuva como os principais para a cultura do arroz de terras altas (FARIA; FOLEGATTI, 2001; HEINEMANN; STONE, 2009; MALABUYOC et al., 1993;

PINHEIRO, 2003; SPOHR, 2003; STEINMETZ; MEIRELES, 1999; YOSHIDA; SATAKE; MACKILL, 1981).

Uma das melhores estratégias para se minimizar os riscos climáticos para a cultura do arroz de sequeiro é por meio da definição das épocas preferenciais de semeadura, período no qual ocorrem as menores perdas de produtividade devido aos fatores climáticos (SILVA; ASSAD, 2001).

A definição das épocas preferenciais de semeadura, de acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) é baseada na análise probabilística do Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), que corresponde à evapotranspiração relativa da cultura, determinada pelo balanço hídrico, nas fases fenológicas críticas entre o florescimento e a frutificação (SILVA; ASSAD, 2001; SILVA; BRITES; ASSAD, 1998). Como resultado, as datas e locais de semeadura são classificados qualitativamente como aptos ou inaptos, sem levar em conta as particularidades de produtividade da cultura.

Dessa forma, estudos sobre os efeitos das variáveis climáticas e do manejo na produtividade atingível das culturas são fundamentais para auxiliar os produtores e os órgãos públicos nas tomadas de decisões. Atualmente, vários estudos com esse propósito vêm sendo realizados por meio da utilização de modelos de estimativa de produtividade e de simulação de culturas (ALVES; NORTCLIFF, 2000; BATTISTI, 2013; GROSSI, 2012; GUNGULA et al., 2003; MONTEIRO et al., 2013; RODRIGUES et al., 2011; SOLER et al., 2007). Esses modelos quando empregados em associação com um Sistema de Informações Geográficas (SIG) permitem a caracterização espaço-temporal das produtividades das culturas e das variáveis climáticas envolvidas (MONTEIRO, 2012; SILVA; ASSAD, 2001).

Para cada modelo de estimativa de produtividade e simulação de cultura, existe um tipo específico de estrutura de dados e arquivos, além de diferentes modos operacionais. A partir da necessidade de tornar os vários modelos existentes compatíveis entre si, surgiu o DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), desenvolvido inicialmente na Universidade do Havaí, possuindo atualmente 28 modelos de simulação de cultura em sua versão 4.6.0.8 (HOOGENBOOM et al., 2012). Esse sistema permite realizar simulações que integram os efeitos do solo, da

produção e partição da biomassa na planta, da fenologia da cultura, do clima e das condições de manejo. Os vários modelos inseridos no DSSAT, entre eles o ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2001), incorporado recentemente, são combinados em um sistema modular (*Crop System Model, CSM*), que utiliza o mesmo conjunto de códigos para simular a dinâmica de água, carbono e nitrogênio no solo (HOOGENBOOM et al., 2010). Mais detalhes sobre o sistema DSSAT podem ser obtidos em Jones et al. (2003).

Considerando-se a importância de se adotar as melhores estratégias para se minimizar os riscos climáticos para a cultura do arroz de terras altas, o principal objetivo deste estudo foi determinar as épocas preferenciais de semeadura para essa cultura para o Estado de Goiás, com base em novos atributos como as condições climáticas ao longo de todo o ciclo, a produtividade atingível da cultura estimada pelo modelo ORYZA-DSSAT, e o custo de produção, comparando-se os resultados obtidos com aqueles recomendados pelo MAPA por meio do zoneamento de risco climático.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Caracterização da área de estudo

O estado de Goiás está localizado na região Centro-Oeste do Brasil, área central dos cerrados, entre as latitudes 13 e 19 graus sul e longitudes 46 e 53 graus oeste. Esse estado foi escolhido pelo fato de ser um dos principais estados produtores de arroz de terras altas e por dispor de uma base de dados meteorológicos suficiente para se realizar um estudo desta natureza.

3.2.1.1 Caracterização climática do Estado de Goiás

O clima do Estado de Goiás é definido como quente, semiúmido, com chuva anual variando entre 1400 e 1600 mm, concentrada de setembro/outubro até abril (NIMER, 1989; SILVA; SANTANA; PELEGRINI, 2006). As regiões do estado com menores índices pluviométricos localizam-se no nordeste e sul do Estado. Em relação à

temperatura do ar, os meses de agosto e setembro apresentam as maiores temperaturas máximas, com média em torno de 34°C, ocorrendo na região noroeste do estado. Os meses de junho e julho apresentam as menores temperaturas mínimas do ano, com média de 12°C, principalmente nas regiões sudeste e sudoeste do Estado (SILVA; SANTANA; PELEGRINI, 2006).

3.2.1.2 Caracterização do solo do Estado de Goiás

No estado de Goiás, predominam os Latossolos, ocorrendo em cerca de 53% da área total, principalmente nas regiões central e sul do Estado. Os Cambissolos ocupam 19% e os Argissolos, 11% da área total de estado (EMBRAPA, 2008). Levando-se em consideração a capacidade de água disponível no solo (CAD) e os critérios definidos por Lopes-Assad et al. (2007), em geral, predominam os solos com média (entre 0,7 e 1,0 mm cm⁻¹) e alta (maior do que 1,0 mm cm⁻¹) capacidade de água disponível.

3.2.2 Dados Meteorológicos

Foram obtidos dados de 26 localidades em todo o Estado, conforme indicado na Figura 1. Os dados meteorológicos utilizados no presente trabalho foram: temperatura máxima e mínima do ar; radiação solar; insolação e precipitação pluviométrica, sendo os mesmos obtidos junto a diferentes instituições públicas: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (Agrimtempo); Agência Nacional de Águas (ANA); e Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás (SIMEHGO).

Figura 1 - Localização geográfica das 26 estações meteorológicas no Estado de Goiás, utilizadas no presente estudo

Em algumas localidades, a séria histórica estava incompleta, havendo, portanto, necessidade de preencher os dados faltantes. Para isso, foram adotados diferentes critérios para cada uma das variáveis, como será descrito a seguir.

Para a precipitação pluviométrica, quando não havia disponibilidade dos dados, os mesmos foram obtidos das estações geograficamente mais próximas. Esses dados foram selecionados junto à rede pluviométrica da ANA.

No caso da radiação solar, em parte do período selecionado, esta variável foi obtida diretamente, principalmente a partir do ano 2000. Quando esta não estava disponível, e havendo disponibilidade da insolação (n), a radiação solar global foi estimada pela equação proposta por Angström-Prescott (equação 1), que utiliza como

variáveis de entrada a insolação (n), a radiação solar global extraterrestre (Q_o) e o fotoperíodo (N), estimados a partir das equações (2) a (6), além dos coeficientes da relação linear “a” e “b”, sendo “a” obtido pela equação (7) e “b” constante igual a 0,52, conforme recomendado por Glover e McCulloch (1958).

$$Qg = Qo \times [a + b \times n/N] \quad (1)$$

$$Qo = 37,6 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \times [\text{sen}\Phi \times \text{sen}\delta \times \text{hn}(\pi/180) + \text{cos}\Phi \times \text{cos}\delta \times \text{senhn}] \quad (2)$$

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left[\frac{360}{365} \times (DJ - 80) \right] \quad (3)$$

$$\text{hn} = \arccos(-\text{tg}\Phi \times \text{tg}\delta) \quad (4)$$

$$\left(\frac{d}{D} \right)^2 = 1 + 0,033 \times \text{cos} \left(\frac{360}{365} \times DJ \right) \quad (5)$$

$$N = \frac{(2 \times \text{hn})}{15} \quad (6)$$

$$a = 0,29 \times \text{cos}\Phi \quad (7)$$

em que: d/D é a distância relativa Terra e Sol; Φ é a latitude local; δ é a declinação solar; hn é o ângulo horário do nascer do Sol e DJ é o dia juliano, variando de 1 a 365/366.

Houve períodos em que a radiação solar não foi medida e também não houve medição da insolação. Nesses casos, a radiação solar foi gerada utilizando-se o modelo WGEN (RICHARDSON; WRIGHT, 1984), inserido no utilitário WeatherMan (Weather data Manager), componente do sistema DSSAT. O modelo gera a radiação solar baseado em processos contínuos estocásticos multivariados, com variação das médias diárias e desvio padrão dependentes dos dias secos ou chuvosos, sendo estes gerados

em função de cadeias de Markov de segunda ordem. Mais informações podem ser obtidas em Sentelhas et al. (2001).

Em relação à temperatura máxima e mínima do ar, quando esses dados eram faltantes, os mesmos foram gerados utilizando-se o pacote do programa R denominado RMAWGEN (*R Multi-Sites Auto-Regressive Weather Generator*), v.1.2.2. Os dados são gerados a partir de modelos autorregressivos vetoriais (VARs), os quais são calibrados para estimar dados diários por meio de séries temporais “Gaussinizadas” (CORDANO; ECCEL, 2013). Esse método foi selecionado por ter sido testado e por ter apresentado resultados satisfatórios na geração da temperatura máxima e mínima do ar no Estado do Mato Grosso (D’AFONSECA et al., 2013), localizado na mesma região geográfica do Estado de Goiás e pela possibilidade de automatizar o processo de estimativa das variáveis climáticas em questão. Mais informações podem ser obtidas em Cordano e Eccel (2013). Após a geração dos dados de temperatura máxima e mínima do ar, foi realizada uma análise para verificação da consistência dos dados, de modo a garantir que a temperatura máxima do ar sempre fosse maior do que a temperatura mínima.

A Tabela 1 apresenta a relação das estações meteorológicas utilizadas no presente trabalho, com suas localizações geográficas, e período dos dados.

Tabela 1 – Relação das estações meteorológicas no Estado de Goiás, suas localizações geográficas e períodos de dados

Estação	Microrregião	Latitude	Longitude	Altitude	Ano		Período total
		(graus)		(m)	Início	Fim	(anos)
Anápolis	Anápolis	-16,32	-48,95	1136	1980	2012	33
Aragarças	Aragarças	-15,90	-52,23	345	1995	2011	17
Aruanã	Rio Verm. ⁴	-14,90	-51,00	578	1980	2012	33
Bom J. GO ¹	Meia Ponte	-18,07	-50,18	429	1980	2012	33
Caiapônia	Sud. GO ⁵	-16,97	-51,82	737	1980	2012	33
Caldas Novas	Meia Ponte	-17,71	-48,61	701	1980	2012	33
Catalão	Catalão	-18,18	-47,95	754	1980	2010	31
Cristalina	Entorno DF ⁶	-17,12	-47,27	826	1980	2012	33
Faina	Rio Verm.	-15,43	-50,37	332	1980	2012	33
Formosa	Entorno DF	-15,53	-47,33	935	1981	2010	30
Goiânia	Goiânia	-16,67	-49,25	741	1980	2012	33
Goiás	Rio Verm.	-15,92	-50,13	512	1994	2010	17
Ipameri	Catalão	-17,72	-48,17	773	1988	2010	23
Itumbiara	Meia Ponte	-18,42	-49,22	449	1994	2012	19
Jataí	Sud. GO	-17,88	-51,72	663	1981	2012	32
Luziânia	Entorno DF	-16,27	-47,98	958	1980	2012	33
Monte Al. GO ²	Chap. V. ⁷	-13,23	-46,88	1253	1980	2012	33
Morrinhos	Meia Ponte	-17,70	-49,11	735	1980	2012	33
Paraúna	V. R. Bois ⁸	-17,51	-50,49	544	1980	2012	33
Pirenópolis	Entorno DF	-15,85	-48,97	740	1980	2010	31
Porangatu	Porangatu	-13,43	-49,13	396	1980	2012	33
Posse	Vão Parana	-14,10	-46,37	826	1980	2010	31
Quirinópolis	Quirinópolis	-18,60	-50,40	544	1980	2012	33
Rio Verde	Sud. GO	-17,80	-50,92	775	1995	2011	17
Santo Ant. GO ³	Goiânia	-16,48	-49,30	823	1983	2012	30
Varjão	Vale R. Bois	-17,09	-49,67	718	1980	2012	33

¹Bom Jesus de Goiás; ²Monte Alegre de Goiás; ³Santo Antônio de Goiás; ⁴Rio Vermelho; ⁵Sudoeste de Goiás; ⁶Entorno de Brasília; ⁷Chapada dos Viadinhos; ⁸Vale do Rio dos Bois

3.2.3 Simulação do crescimento da cultura utilizando o ORYZA-DSSAT

O modelo ORYZA2000 foi recentemente incorporado ao sistema DSSAT, sendo que todo o módulo responsável pelo crescimento e desenvolvimento da cultura permanece o mesmo do ORYZA2000 e o balanço hídrico e de nitrogênio do solo é proveniente do DSSAT. Porém, este modelo ainda não foi lançado oficialmente, sendo que, para a realização deste trabalho, foi utilizada uma versão beta, apenas para testes.

ORYZA-DSSAT é um modelo que simula o crescimento e o desenvolvimento do arroz, seja para condições de produção potencial, seja para condições limitantes de nitrogênio e água. Sob condições de crescimento potencial, a radiação, a temperatura do ar e as características varietais específicas (processos fenológicos, morfológicos e fisiológicos) são os fatores que determinam a taxa de crescimento diário da cultura (BOUMAN et al., 2001).

O modelo simula diariamente as taxas de produção de matéria seca dos órgãos da planta, e as taxas de desenvolvimento fenológico. Integrando essas taxas no tempo, a produção de matéria seca e o desenvolvimento fenológico são simulados para todo o ciclo da cultura.

A taxa diária total de assimilação de CO_2 do dossel é calculada em função da radiação incidente, da temperatura do ar, e do índice de área foliar (IAF). 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 baseada nas características fotossintéticas de folhas unitárias, que são dependentes da concentração de nitrogênio, da radiação incidente, da concentração de CO_2 no estômato e da temperatura do ar (BOUMAN; LAAR, 2006). No presente trabalho, o balanço de nitrogênio foi desativado, portanto, não ocorreu nenhum tipo de estresse causado por esse nutriente.

A taxa de crescimento diária 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 a produção de matéria seca (BOUMAN et al., 2001).

Os carboidratos são convertidos em matéria seca estrutural por meio das equações baseadas nos estudos de Penning de Vries e Laar (1982) e particionada entre os vários órgãos da planta em função do estágio de desenvolvimento e dos fatores relacionados à partição.

O modelo divide o desenvolvimento cronológico da cultura (DVS) em quatro partes: (i) DVS = 0, referente à emergência; (ii) DVS = 0,65, referente à iniciação da panícula; (iii) DVS = 1, referente ao florescimento; e (iv) DVS = 2, referente à maturidade fisiológica. A partir desses valores, o desenvolvimento fenológico da cultura

é dividido em três fases: vegetativa (entre 0 e 0,65); reprodutiva (entre 0,65 e 1); e enchimento de grãos (entre 1 e 2).

O balanço hídrico do solo é baseado no modelo de Ritchie (RITCHIE et al., 1998), o qual é um modelo unidimensional que computa as mudanças diárias no conteúdo de água do solo em cada camada em função da infiltração da precipitação e/ou irrigação, da drenagem vertical, do fluxo insaturado, da evaporação do solo e da ascensão da água pelo sistema radicular. Os processos de estresse da planta e ascensão de água pelo sistema radicular são provenientes do modelo ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2001).

A evapotranspiração máxima da cultura é calculada pelo DSSAT utilizando a evapotranspiração potencial, estimada pelo método de Priestley e Taylor (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972), o índice de área foliar (IAF), estimado pelo modelo ORYZA2000 e um parâmetro relativo ao efeito da arquitetura do dossel, que corresponde ao coeficiente da cultura (K_c). O modelo particiona a evapotranspiração máxima em evaporação máxima do solo e transpiração máxima da planta. A evapotranspiração real também é dividida em evaporação real do solo e transpiração real da planta, sendo ambas calculadas em função da evaporação e transpiração máxima. A transpiração real da planta também é dependente da ascensão da água pelo sistema radicular, sendo que a quantidade de raízes é estimada pelo modelo ORYZA2000.

3.2.3.1 Variáveis de entrada do modelo ORYZA-DSSAT

O modelo ORYZA-DSSAT requer os seguintes dados diários de clima: precipitação, temperatura máxima e mínima do ar e radiação solar. Para o presente estudo, foram utilizadas 26 estações meteorológicas, selecionadas em função do número de dados observados existentes e também com a finalidade de representar todo o Estado de Goiás, conforme indicado na Figura 2.

Em relação à cultura e aos dados de manejo adotados, foi utilizada a variedade de arroz de terras altas BRS-Primavera, de ciclo médio. O espaçamento entre linhas foi de 0,35 m, com semeadura realizada a 5 cm de profundidade e uma densidade populacional de 200 plantas m^{-2} . Foram utilizados três tipos de solos, selecionados em

função da sua capacidade de retenção de água (CAD), cujas características serão descritas posteriormente. Os coeficientes genéticos da cultura utilizados foram os mesmos descritos na Tabela 7 do Capítulo 2.

3.2.4 Aplicação do modelo ORYZA-DSSAT para estimativa da produtividade potencial e atingível do arroz de terras altas no Estado de Goiás

Foram realizadas simulações para 26 localidades, selecionadas com o objetivo de representar todas as regiões do Estado (Figura 1). A mesma cultivar de arroz de terras altas, BRS-Primavera, foi utilizada para todas as datas de semeadura, simuladas decendialmente, ou seja, de 01 de janeiro (decêndio 01) a 21 de dezembro (decêndio 36), com intervalos de 10 dias.

As simulações foram efetuadas no modo sazonal, na qual a cultura é simulada em vários anos consecutivos, considerando-se as mesmas condições iniciais do solo. O número de simulações para cada localidade foi determinado para que se excluísse o primeiro ano, de modo a permitir um estabelecimento mais realístico do perfil de água do solo, baseado nas ocorrências de precipitação antes das datas de semeadura, e também o último ano, pelo fato da última data de semeadura ter sido realizada no fim do ano, postergando seu ciclo até o próximo ano. Portanto, para cada localidade, época de semeadura e tipo de solo obtiveram-se (Período total – 2) simulações.

Conforme descrito anteriormente, para a simulação da produtividade potencial, a radiação solar, a temperatura do ar e as características varietais específicas (processos fenológicos, morfológicos e fisiológicos) são os únicos fatores determinantes (BOUMAN et al., 2001). Portanto, para a simulação da produtividade potencial, o módulo do balanço hídrico do solo também foi desativado.

Para a simulação da produtividade atingível, o módulo do balanço hídrico foi reativado, para que houvesse a penalização pela falta de água, caso ocorresse.

Como o solo não é um fator limitante para a simulação da produtividade potencial, para cada tipo de solo, o valor dessa produtividade foi o mesmo. Já para a produtividade atingível, foram obtidos três valores diferentes para cada localidade e cada época de semeadura, em função dos solos empregados.

Os solos foram selecionados em função da sua capacidade de água disponível (CAD). As variáveis utilizadas para a determinação da CAD foram calculadas em função de seus parâmetros físicos e químicos, utilizando-se funções de pedotransferência do DSSAT. Os parâmetros físicos e químicos foram obtidos do projeto Radam-Brasil (BRASIL, 1981). A Tabela 2 apresenta a classificação, a granulometria e o valor da CAD para cada tipo de solo utilizado.

Tabela 2 – Classificação, análise granulométrica e capacidade de água disponível (CAD) para cada tipo de solo do Estado de Goiás utilizado no presente estudo

Classificação ¹	Tipo	Areia ²	Silte ²	Argila ²	CAD
		(%)			(mm m ⁻¹)
RQ	1	89	4	7	45
LVd	2	71	12	17	73
LV	3	13	34	53	140

¹RQ: Neossolo Quartzarênico; LVd: Latossolo Vermelho Distrófico; e LV: Latossolo Vermelho. ²Valores médios.

Para comparar a produtividade atingível simulada com os dados observados, foram utilizados os valores de produtividade das microrregiões do Estado de Goiás, das quais as localidades utilizadas neste trabalho fazem parte (Tabela 1). As produtividades observadas foram obtidas da base de dados AGROTEC (CHAIB FILHO et al., 2002; GARAGORRY; REGO, 1997), desenvolvida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), que permite recuperar os dados da base de dados do IBGE de uma maneira mais conveniente.

Os dados das microrregiões foram utilizados devido ao fato de representar os dados de modo mais regional e não localizado, além de alguns municípios terem sua região dividida ou até mesmo aumentada nos últimos 35 anos (HEINEMANN; SENTELHAS, 2011). Para obter o valor da produtividade simulada de cada microrregião, foi realizada a média das produtividades obtidas de cada localidade para dois tipos de solo (arenoso e médio), pertencente à sua respectiva microrregião, quando ocorresse mais de uma localidade (Tabela 1). Para as microrregiões com apenas uma localidade, o valor da produtividade observada foi obtida apenas com os

dados dessa mesma localidade. Para obtenção da média, foram utilizadas as produtividades obtidas nas épocas de semeadura recomendadas pelo zoneamento de risco climático do MAPA (BRASIL, 2012).

Para utilizar a série de dados de produtividade do AGROTEC, foi necessário se retirar a tendência tecnológica observada nos últimos anos, de modo que a mesma expressasse apenas o impacto da variabilidade climática na produtividade. Para isso, as produtividades referentes aos demais anos foram ajustadas em função do último ano da série (FERNANDES et al., 2010; HEINEMANN; SENTELHAS, 2011), por meio da regressão polinomial não paramétrica, conhecida como *Loess* (CLEVELAND, 1979), localmente ponderada. As análises foram realizadas no software R v.2.15.3, utilizando-se o pacote *stats*.

3.2.5 Extrapolação e mapeamento das produtividades potencial e atingível simuladas para a cultura do arroz de terras altas no Estado de Goiás

O procedimento realizado foi o mesmo descrito por Monteiro (2012), porém com algumas modificações na estimativa das produtividades. Para a produtividade potencial (P_p), foi utilizada uma equação de regressão linear múltipla, tendo como variáveis independentes as coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude) de cada local. Para a produtividade potencial, apenas esses parâmetros foram necessários, uma vez que para condições de crescimento potencial, o modelo ORYZA-DSSAT utiliza apenas a radiação solar e a temperatura do ar como fatores do ambiente condicionadores dos processos fenológicos, morfológicos e fisiológicos da cultura do arroz, não sofrendo nenhum tipo de estresse (BOUMAN et al., 2001). Portanto, a equação original utilizada para estimar a produtividade potencial em cada pixel representativo do Estado de Goiás foi:

$$P_p = a + b\Phi + c\lambda + d\xi + e\Phi\lambda + f\Phi\xi + g\lambda\xi + h\Phi^2 + i\lambda^2 + j\xi^2 + \varepsilon \quad (12)$$

em que: P_p é a produtividade potencial do arroz (kg ha^{-1}); Φ é a latitude (graus decimais); λ é a longitude (graus decimais); ξ é a altitude (m); a é o coeficiente linear da equação; $b, c, d, e, f, g, h, i, j$ são os coeficientes angulares da equação referentes a cada variável independente; e ε é o erro associado às estimativas.

Para a definição das variáveis independentes a serem incorporadas ao modelo linear de estimativa, utilizou-se o procedimento estatístico denominado de *Stepwise*, o qual seleciona apenas as variáveis com significância estatística. Para tanto, foi utilizada a função “step”, do programa R v.2.15.3.

Assim, para cada época de semeadura e tipo de solo, esse procedimento selecionou as principais variáveis independentes relacionadas à P_p , havendo, desse modo, uma equação para cada época de semeadura.

Para a espacialização da produtividade atingível (P_a) utilizou-se o mesmo procedimento realizado para a P_p , porém, além das coordenadas geográficas a produtividade potencial simulada relativa a cada local também foi utilizada como variável independente. A equação 13 representa o modelo linear empregado na espacialização de P_a .

$$P_a = a + b\Phi + c\lambda + d\xi + e\Phi\lambda + f\Phi\xi + g\lambda\xi + h\Phi^2 + i\lambda^2 + j\xi^2 + kP_p + \varepsilon \quad (13)$$

em que: P_a é a produtividade atingível do arroz (kg ha^{-1}); Φ é a latitude (graus decimais); λ é a longitude (graus decimais); ξ é a altitude (m); a é o coeficiente linear da equação; $b, c, d, e, f, g, h, i, j, k$ são os coeficientes angulares da equação referentes a cada variável independente; P_p é a produtividade potencial (kg ha^{-1}); e ε é o erro associado às estimativas.

De maneira semelhante à estimativa da P_p , foi utilizado o método *Stepwise* para a seleção das variáveis independentes para cada época de semeadura e tipo de solo.

Para a extrapolação e confecção dos mapas, os “layers” relativos às coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude) foram selecionados, por meio da ferramenta *Add Data*, no sistema de informação geográfica (SIG). Com isso, foi possível

realizar a álgebra de mapas, no qual foram considerados os coeficientes das equações de regressão e os “layers” de latitude, longitude e altitude. No caso da confecção dos mapas de P_a para cada época de semeadura foi adicionado o “layer” correspondente à P_p dessa época.

O “layer” de altitude foi obtido por meio de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) em formato GEOTIFF (16 bits) referentes ao modelo digital de elevação (MDE) do terreno de todos os Estados do Brasil (EMBRAPA, 2011) e foi selecionada cada figura (imagem “simples”) do mapa completo do Estado de Goiás. A partir disso foi obtida uma imagem “composta” que representasse o Estado de Goiás. Essa imagem tem uma resolução espacial de 90 x 90 m e está georreferenciada originalmente no Sistema de Coordenadas Geográficas, sendo o sistema de projeção o DATUM WGS 84.

3.2.6 Determinação das épocas preferenciais de semeadura para a cultura do arroz de terras altas no Estado de Goiás

As épocas preferencias de semeadura para a cultura do arroz de terras altas no Estado de Goiás foram definidas em função de diferentes abordagens, ou seja, com base no índice de satisfação da necessidade de água (ISNA) ponderado para diferentes fases da cultura e na receita líquida da cultura (a produtividade menos o custo de produção). Das 26 localidades com dados climáticos, foram selecionadas somente aquelas onde ocorre produção de arroz de terras altas e/ou que representam uma das mesorregiões do Estado de Goiás (Figura 2). Com isso, a análise das épocas preferenciais de semeadura foi realizada ao nível de mesorregião do Estado de Goiás. Apenas na mesorregião sul essa análise levou em consideração duas localidades, em função de sua grande extensão territorial.

Figura 2 – Localidades e mesorregiões consideradas na análise das épocas preferenciais de semeadura para a cultura do arroz de terras altas no Estado de Goiás

3.2.6.1 Determinação das épocas preferenciais de semeadura em função do ISNA ponderado

O ISNA é calculado pela relação entre a evapotranspiração real (ETr) e a evapotranspiração máxima da cultura (ETc) da cultura, indicando a quantidade de água que a planta irá consumir e o total necessário para garantir a sua máxima produtividade.

Ao simular a produtividade atingível, para cada localidade, data de semeadura, tipo de solo e ano, foram obtidos também os valores de ETr e ETc diários, como uma das saídas do modelo. Posteriormente, esses valores foram separados em função das fases fenológicas da cultura (vegetativo, reprodutivo e enchimento de grãos) em cada ano de simulação. O menor valor da série de dados utilizada foi 17 anos (Tabela 1), o que permitiu se simular no mínimo 15 anos, o que é compatível com o período mínimo de dados climáticos utilizados na elaboração do zoneamento agrícola de risco climático do MAPA (BRASIL, 2012).

Com os valores de ETr e ETc diários para cada fase da cultura, foi calculado o valor do ISNA diário. Assim, foi obtido um valor médio do ISNA para cada ano simulado, estágio da cultura, em cada localidade, data de semeadura e tipo de solo.

Com isso, foi realizada uma regressão linear múltipla para cada tipo de solo, entre os valores da produtividade relativa simulada, obtida da relação entre as produtividades atingível e potencial simuladas pelo modelo ORYZA-DSSAT, e os valores do ISNA de cada fase fenológica de todas as localidades (26). Com os coeficientes obtidos a partir da regressão linear múltipla, foi estipulado um peso para cada fase fenológica, sendo estes obtidos pelas equações a seguir:

$$P_{veg} = \frac{COEF_{veg}}{(COEF_{veg} + COEF_{rep} + COEF_{eg})} \quad (8)$$

$$P_{rep} = \frac{COEF_{rep}}{(COEF_{veg} + COEF_{rep} + COEF_{eg})} \quad (9)$$

$$P_{eg} = \frac{COEF_{eg}}{(COEF_{veg} + COEF_{rep} + COEF_{eg})} \quad (10)$$

em que: P_{veg} é o peso relativo à fase vegetativa; P_{rep} é o peso relativo à fase reprodutiva; P_{eg} é o peso relativo à fase de enchimento de grãos; $COEF_{veg}$ é o coeficiente obtido da regressão linear múltipla referente à fase vegetativa; $COEF_{rep}$ é o coeficiente obtido da regressão linear múltipla referente à fase reprodutiva; e $COEF_{eg}$ é o coeficiente obtido da regressão linear múltipla referente à fase de enchimento de grãos.

Obtidos os pesos do ISNA para cada fase fenológica da cultura, foi calculado o ISNA ponderado ($ISNA_{pond}$), em cada localidade, tipo de solo e ano simulado, por meio da seguinte expressão:

$$ISNA_{pond} = (P_{veg} \times ISNA_{veg}) + (P_{rep} \times ISNA_{rep}) + (P_{eg} \times ISNA_{eg}) \quad (11)$$

Finalmente, com a obtenção do ISNA ponderado estabeleceu-se a função de frequência do mesmo, e em seguida adotou-se a seguinte classificação em função do risco climático associado:

Baixo Risco: $ISNA_{pond} \geq 0,65$ com ocorrência em 80% ou mais dos anos;

Médio Risco: $ISNA_{pond} \geq 0,65$ com ocorrência entre 50 e 79% dos anos;

Alto Risco: $ISNA_{pond} \geq 0,65$ com ocorrência em menos de 50% dos anos.

3.2.6.2 Determinação das épocas preferenciais de semeadura em função do custo de produção

Outro fator considerado na determinação das melhores épocas de semeadura foi o custo de produção. O método utilizado foi o mesmo descrito por Battisti (2013), no qual o autor utilizou a probabilidade de a produtividade atingível ultrapassar o custo de

produção como um dos critérios para definir as épocas preferenciais de semeadura da cultura da soja em diferentes localidades do Brasil.

Os custos de produção da cultura do arroz de sequeiro para o Estado de Goiás utilizados no presente trabalho foram baseados nos valores obtidos junto à Federação de Agricultura do Estado de Goiás (FAEG) para as safras compreendidas entre 2009 e 2012. Os custos de produção englobam despesas com: mão-de-obra; maquinário; fertilizantes; transporte; administração; defensivos; armazenamento; entre outras.

Foram definidos dois tipos de custos. O primeiro se refere aos agricultores de maior poder aquisitivo, que possuem condições de produzir com um bom nível tecnológico. Geralmente, no Estado de Goiás, estes produtores já produzem outras culturas, como soja ou milho como cultura principal. Em função disso, algumas despesas foram subtraídas do custo, como preparo do solo, custo com maquinário, entre outros que são pagos pela cultura principal.

O segundo tipo de custo é aquele adotado pelos agricultores com menor poder aquisitivo, o que engloba os agricultores pertencentes à categoria de agricultura familiar, que representam a maioria dos que produzem arroz no Estado de Goiás. Para esse grupo de agricultores, os custos relativos ao maquinário, à mão-de-obra, ao armazenamento e à aquisição de sementes foram reduzidos. O custo da adubação foi mantido para ambos os grupos, devido ao fato das simulações da produtividade terem sido realizadas sem considerar os estresses nutricionais.

O preço médio da saca de 60 kg para o período compreendido entre 2009 e 2012 também foi obtido junto ao site da FAEG (2013). Com isso, foi possível obter o rendimento médio da cultura do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, em kg por hectare, necessário para se cobrir os custos de produção (Tabela 3).

Tabela 3 - Custo de produção da cultura do arroz de terras altas no Estado de Goiás em função do nível tecnológico empregado

Nível tecnológico	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Preço (R\$ sc ⁻¹)	Custo (kg ha ⁻¹)
Alto	1.150,00	34,50	2000
Baixo	575,00	34,50	1000

Fonte: Adaptado da Federação de Agricultura do Estado de Goiás (FAEG, 2013)

Com o custo de produção definido, estabeleceu-se a função de frequência da produtividade real simulada alcançada em cada decêndio para cada tipo de solo e optou-se pela seguinte classificação para a data de semeadura:

Apta: se em 80% ou mais dos anos a produtividade atingida foi capaz de cobrir os custos de produção;

Marginal: se a produtividade atingida foi capaz de cobrir os custos entre 60 e 79% dos anos;

Inapta: se a produtividade atingida foi capaz de cobrir os custos em menos de 60% dos anos.

Com isso, associando-se os fatores apresentados acima, as épocas preferenciais de semeadura foram classificadas em aptas, marginais e inaptas seguindo os critérios apresentados a seguir:

- (i) Apta: quando a data de semeadura apresentar baixo ou médio risco climático, e for apta em cobrir os custos de produção;
- (ii) Marginal: quando a data de semeadura apresentar baixo ou médio risco climático e for classificada como marginal em relação ao custo de produção;
- (iii) Inapta: quando a data de semeadura apresentar um risco climático alto ou for classificada como inapta em relação ao custo de produção.

Após a obtenção da classificação final das datas de semeadura, as mesmas foram comparadas com as datas definidas para a semeadura pelo zoneamento agrícola de risco climático para o arroz de terras altas no Estado de Goiás propostas pelo MAPA (BRASIL, 2012).

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Produtividade potencial do arroz de terras altas para o Estado de Goiás

Após a simulação da cultura pelo modelo ORYZA-DSSAT, foram obtidas as produtividades potenciais do arroz de terras altas para cada uma das 26 localidades do Estado de Goiás empregadas no presente estudo, para cada um dos 36 decêndios do ano, e em cada ano da série empregada. Para realizar a espacialização dessa variável, foram utilizadas as médias de todos os anos para cada localidade, porém, com os mapas sendo confeccionados a partir de um mês antes do indicado pelo zoneamento de risco climático do MAPA, para os decêndios centrais de cada mês, de setembro a janeiro, para a elaboração das equações, cujos coeficientes são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla, selecionados pelo procedimento *Stepwise*, e o erro padrão da estimativa da produtividade potencial do arroz de terras altas no Estado de Goiás

Coeficientes da regressão	Época de Semeadura (Decêndio)				
	26	29	32	35	2
a	-4030,0	2987,2	6471,2*	10210,0**	107400,0*
Φ	-	-	-	-	-
λ	-244,8	-	-	-	3037,0*
ξ	-	-	-	-10,0*	-70,6
$\Phi\lambda$	-	11,3	62,6	84,9*	131,8*
$\Phi\xi$	-0,814*	-0,697*	-0,438	-0,521*	-0,687*
$\lambda\xi$	0,217	0,181	0,111	-	-1,033
Φ^2	-15,6	-30,7	-103,2*	-137,2*	-209,2*
λ^2	-	-	-10,2	-15,0*	-
ξ^2	-	-	-	0,00204	0,00660
R^2	0,32	0,44	0,58	0,61	0,59
Erro Padrão (kg ha ⁻¹)	774,6	596,7	464,1	447,2	550,9

*Significativo ao nível de 5%; **Significativo ao nível de 1%; - variável não foi utilizada na equação de regressão pelo procedimento *Stepwise*; Os demais coeficientes são significativos ao nível de 10%

A simulação realizada no mês de dezembro apresentou a melhor relação entre as variáveis (latitude, longitude e altitude) e a produtividade potencial, com o menor erro padrão. Monteiro (2012), realizando a regressão linear múltipla entre as mesmas

variáveis, para cana-de-açúcar, no Estado de São Paulo, obteve melhores resultados em relação ao valor de R^2 . Possivelmente, essa diferença se deveu ao fato de o autor ter utilizado as normais das variáveis meteorológicas para a estimativa da produtividade potencial, obtendo, assim, um mesmo valor de produtividade para todos os anos.

Com base nos coeficientes da regressão, foi possível especializar a produtividade potencial em todo o Estado de Goiás, para as cinco épocas de semeadura. As Figuras 3 a 7 apresentam a produtividade potencial em cada época de semeadura, onde observa-se que a produtividade potencial variou conforme a época em que a cultura foi cultivada. Inicialmente, nos meses de setembro e outubro, as maiores produtividades potenciais, acima de 6000 kg ha^{-1} , estavam concentradas nas regiões Leste e Sudoeste do estado, e as menores, abaixo de 5000 kg ha^{-1} , concentradas nas regiões Sul, próximo a Posse e Quirinópolis, e Nordeste (Figuras 3 e 4).

Uma mudança mais drástica ocorreu a partir do mês de novembro, quando as maiores produtividades ficaram concentradas apenas na região Centro Leste do estado, aumentando, assim, a área onde a produtividade é menor, especialmente na região Noroeste (Figura 5).

Figura 3 - Produtividade potencial do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de setembro (decêndio 26)

Figura 4 - Produtividade potencial do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de outubro (decêndio 29)

Figura 5 - Produtividade potencial do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de novembro (decêndio 32)

A partir de dezembro, as faixas com maiores produtividades, acima de 6500 kg ha⁻¹ praticamente não ocorrem mais, restringindo-se quase que totalmente à microrregião do Entorno do DF (Figura 6). Além disso, a maior parte do estado apresenta produtividade potencial inferior a 5000 kg ha⁻¹.

Figura 6 - Produtividade potencial do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de dezembro (decêndio 35)

Para o arroz semeado em janeiro, somente uma pequena área do estado tem produtividade potencial acima de 6000 kg ha⁻¹. Somente a partir dessa data de semeadura, a região próxima a Posse apresentou produção potencial elevada (Figura 7).

Figura 7 - Produtividade potencial do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de janeiro (decêndio 02)

Em todas as datas de semeadura avaliadas, observou-se que a região Centro Leste do estado apresentou produtividade potencial sempre acima dos 5500 kg ha⁻¹, indicando que esta região possui as melhores características para produção potencial. Já as regiões próximas a Quirinópolis e Itumbiara apresentaram em todas as épocas de semeadura as menores produtividades potenciais para o arroz de terras altas no Estado de Goiás para a semeadura realizada dentro da janela do zoneamento de risco climático.

Em Santo Antônio de Goiás, foram obtidas produtividades entre 5000 e 6000 kg ha⁻¹, em experimentos com a cultivar BRS-Primavera, sob condições climáticas e nutricionais ótimas (FAGERIA; BRESEGHELLO, 2007; GUIMARÃES et al., 2003), indicando semelhança entre os valores estimados neste trabalho com os observados pelos autores para a mesma região em questão.

3.3.2 Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás

Os dados simulados de produtividade atingível de arroz de terras altas pelo modelo ORYZA-DSSAT foram comparados aos reportados pelos levantamentos do IBGE para as microrregiões do Estado de Goiás, conforme apresentado na Tabela 5.

Os valores de produtividade simulada foram obtidos pela média das produtividades obtidas para os solos tipo 1 e 2, com CADs iguais a 45 e 73 mm m⁻¹, respectivamente. O solo tipo 3 não foi utilizado pelo fato dos solos do Estado de Goiás apresentarem limitação para o desenvolvimento do sistema radicular, principalmente decorrente do elevado nível de Alumínio (Al) tóxico nas camadas subsuperficiais do perfil do solo (HEINEMANN, 2010).

Tabela 5 - Valores médios das produtividades observadas (IBGE) e simuladas pelo modelo ORYZA-DSSAT e o erro médio das microrregiões do Estado de Goiás

Microrregião	Produtividade Observada	Produtividade Simulada	EM ¹
	Kg ha ⁻¹		
Anápolis	2573	2254	-319
Aragarças	1807	1490	-317
Catalão	1910	1811	-99
Chapada dos Viadeiros*	1245	1486	241
Entorno DF	1644	2322	678
Goiânia	2250	2295	45
Meia Ponte	1953	1743	-210
Porangatu	1827	1730	-97
Quirinópolis	1654	1725	71
Rio Vermelho	1835	1843	8
Sudoeste GO	1908	2189	281
Vale do Rio dos Bois	2169	2180	11

¹Erro Médio; *Valor obtido apenas da localidade de Monte Alegre de Goiás, tanto o observado, quanto o simulado

O melhor resultado foi obtido para a microrregião de Rio Vermelho, apresentando o erro médio de apenas 8 kg ha⁻¹, o menor entre todas as microrregiões. A microrregião do Entorno do DF apresentou o pior resultado, com erro médio de 678 kg ha⁻¹. Porém, quando comparada à produtividade média obtida apenas com o solo tipo 1 (produtividade simulada = 1629 kg ha⁻¹), o erro médio diminuiu para apenas 15 kg ha⁻¹.

De acordo com os dados observados, as microrregiões com maiores produtividades são Anápolis, Goiânia e Vale do Rio dos Bois. De maneira semelhante, o modelo simulou de forma adequada as produtividades dessas microrregiões, obtendo valores próximos aos observados, atingindo as maiores produtividades (Tabela 5).

Em geral, o modelo simulou adequadamente a produtividade atingível para o Estado de Goiás, com valores médios de produtividade simulada e observada de 1922 e 1898 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 8). A maior variabilidade observada nos dados do IBGE (Figura 8) provavelmente está relacionada aos aspectos de manejo da cultura, especialmente às questões relativas à adubação e ao controle fitossanitário (BATTISTI, 2013; HEINEMANN; SENTELHAS, 2011).

Figura 8 - Variação da produtividade do arroz de terras altas, observada (IBGE) e simulada pelo modelo ORYZA-DSSAT para o Estado de Goiás, obtida a partir das microrregiões utilizadas no presente trabalho entre os anos de 1981 e 2006

3.3.2.1 Mapeamento da produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás

Os valores de produtividade atingível simulados pelo modelo ORYZA-DSSAT, obtidos para cada tipo de solo e para as épocas de semeadura recomendadas pelo zoneamento de risco climático do MAPA, foram utilizados para a elaboração das equações de regressão linear múltipla, as quais foram empregadas na espacialização da produtividade atingível em todo o Estado de Goiás. Os coeficientes dos modelos lineares são apresentados na Tabela 6. Além da latitude, longitude e altitude, foi acrescentada a produtividade potencial, como variável independente, uma vez que o modelo simula a produtividade atingível a partir da potencial (BOUMAN et al., 2001).

Tabela 6 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla, selecionados pelo procedimento *Stepwise*, e o erro padrão para estimativa da produtividade atingível do arroz de terras altas para cada tipo de solo do Estado de Goiás (continua)

Tipo do solo	Coeficientes da regressão	Época de Semeadura (Decêndio)				
		26	29	32	35	2
Tipo 1	a	9443,0*	-7715,0	-83270,0*	8188,0*	-76050,0**
	Φ	-	-1999,0**	-	-	2742,0**
	λ	-	-	-	-	-3984,0**
	ξ	-22,6*	-21,3*	-	-25,2*	-
	$\Phi\lambda$	47,3**	-	30,6*	40,9*	75,0**
	$\Phi\xi$	-0,213*	-	-0,023	-	-0,236*
	$\lambda\xi$	-0,333*	-0,394*	-	-0,474*	0,072*
	Φ^2	-75,9**	-61,0**	-47,9*	-63,2*	-35,3*
	λ^2	-10,5**	-2,8*	-38,3*	-9,6*	-51,7***
	ξ^2	0,0022*	0,0016*	-	0,0015	-
	Pp	0,123*	0,097	0,183*	0,185*	-
	R ²	0,83	0,75	0,66	0,73	0,61
	Erro Padrão (kg ha ⁻¹)	152	158,7	179,8	172,4	124,7
Tipo 2	a	146700,0*	195500,0**	177100,0*	179500,0*	189600,0**
	Φ	-	-	-	3079,0	6413,0**
	λ	-6036,0*	-7955,0**	-7121,0*	-8240,0*	-9778,0**
	ξ	-4,8*	-3,5**	-3,9	-6,1	-
	$\Phi\lambda$	63,3**	43,2	56,6	126,5*	187,0***
	$\Phi\xi$	-0,352*	-0,273	-0,283	-0,440	-0,586*
	$\lambda\xi$	-	-	-	-	0,179*
	Φ^2	-105,8**	-72,8*	-93,1*	-109,5*	-100,8**
	λ^2	-71,5**	-86,9**	-79,9*	-102,2*	-127,4***
	ξ^2	-	-	-	-	-
	Pp	0,412***	0,345**	0,427*	0,301	-
	R ²	0,87	0,79	0,73	0,72	0,65
	Erro Padrão (kg ha ⁻¹)	274,6	300,0	350,0	371,8	293,7

Tabela 6 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla, selecionados pelo procedimento *Stepwise*, e o erro padrão para estimativa da produtividade atingível do arroz de terras altas para cada tipo de solo do Estado de Goiás (conclusão)

Tipo do solo	Coeficientes da regressão	Época de Semeadura (Decêndio)				
		26	29	32	35	2
Tipo 3	a	-130500,0*	-192800,0**	15060,0	-148100,0	-184900,0*
	Φ	3857,0	-	-	3433,0	5453,0
	λ	-6851,0*	-7874,0**	-	-7085,0	-9403,0*
	ξ	-12,4*	-4,2	-48,2*	-6,7	-9,4*
	$\Phi\lambda$	160,7*	37,2	69,8	127,3	160,5*
	$\Phi\xi$	-0,673**	-0,313	-0,269	-0,464	-0,646*
	$\lambda\xi$	-	-	-0,809*	-	-
	Φ^2	-138,9**	-64,5	-110,5	-99,1	-92,0*
	λ^2	-96,7**	-85,4**	-16,2	-90,8*	-120,1**
	ξ^2	0,0016	-	0,0031	-	-
	Pp	0,331**	0,525***	0,489*	0,455*	-
	R^2	0,88	0,85	0,73	0,70	0,56
	Erro Padrão (kg ha ⁻¹)	285,9	298,1	378,3	414,9	399,0

*Significativo ao nível de 5%; **Significativo ao nível de 1%; ***Significativo ao nível de 0,1%; Os demais coeficientes são significativos ao nível de 10%. - Variável não foi utilizada na equação de regressão pelo procedimento *Stepwise*

Para os três tipos de solos, o mês de setembro foi o que apresentou as melhores correlações entre a produtividade atingível e as variáveis independentes, com R^2 variando entre 0,83 e 0,88. O menor erro padrão foi obtido para a regressão de janeiro para o solo tipo 1. Para os demais tipos de solo, o menor erro padrão obtido foi para o mês de setembro (Tabela 6).

Por meio das regressões múltiplas apresentadas na Tabela 6, foi possível especializar a produtividade atingível para todo o Estado de Goiás para as épocas de semeadura de setembro a janeiro, e para cada tipo de solo. As Figuras 9 a 13 apresentam os mapas das produtividades atingíveis simuladas para o solo tipo 1, com CAD igual a 45 mm m⁻¹.

Com base nesses mapas, observa-se que as produtividades do arroz de terras altas do Estado de Goiás variaram de 850 a 2000 kg ha⁻¹, com os menores valores

sendo obtidos para a semeadura realizada em janeiro (Figura 13), e os maiores obtidos de setembro a dezembro, com exceção de novembro (Figuras 9, 10 e 12).

Observa-se que para a semeadura no mês de setembro, apesar de resultar nas produtividades mais elevadas, maiores que 2000 kg ha^{-1} , há uma extensa área com níveis de produtividade em torno de 1000 kg ha^{-1} (Figura 9). Já na semeadura realizada no mês seguinte, essa mesma área diminui, aumentando a área com níveis de produtividade entre 1500 e 2000 kg ha^{-1} (Figura 10).

Isso ocorre devido ao fato de que o período das chuvas no Estado de Goiás começa justamente no mês de outubro. Portanto, devido à baixa capacidade de retenção da água no solo e a pouca quantidade de chuva ocorrida em agosto, as semeaduras em setembro ainda sofrem com a falta de água nas fases iniciais da cultura, diferentemente do que ocorre nas semeaduras de outubro, quando a cultura dispõe de água disponível no solo para garantir melhores condições para seu crescimento.

Figura 9 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de setembro (decêndio 26), para o solo tipo 1 (CAD = 45 mm m⁻¹)

Figura 10 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de outubro (decêndio 29), para o solo tipo 1 (CAD = 45 mm m⁻¹)

O arroz semeado a partir de novembro apresentou diminuição dos níveis de produtividade mais elevadas, acima de 2000 kg ha⁻¹, praticamente não havendo áreas com esses níveis, apresentando também um pequeno incremento das áreas com produtividade menores que 1000 kg ha⁻¹, na região Noroeste do estado. A microrregião

de Catalão apresentou diminuição do nível de produtividade, em relação à semeadura realizada em outubro (Figura 11). Essa diminuição pode ser atribuída ao aumento do risco climático dessa área (SILVA; ASSAD, 2001), já que a ocorrência de deficiência hídrica na fase de enchimento de grãos do arroz de terras altas se acentua quanto mais tarde for a semeadura a partir de outubro, independentemente do tipo de solo e do ciclo da cultura.

Figura 11 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de novembro (decêndio 32), para o solo tipo 1 (CAD = 45 mm m⁻¹)

Para a semeadura de dezembro, observa-se um aumento dos níveis de produtividade na Microrregião Sudoeste e também em algumas áreas próximas à Anápolis (Figura 12). Para a semeadura realizada em janeiro, ocorrem os menores níveis de produtividade, com os valores máximos alcançando níveis em torno de 1000 kg ha⁻¹ (Figura 13).

Figura 12 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de dezembro (decêndio 35), para o solo tipo 1 (CAD = 45 mm m⁻¹)

Figura 13 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de janeiro (decêndio 02), para o solo tipo 1 (CAD = 45 mm m⁻¹)

As condições apresentadas nas Figuras 12 e 13 estão de acordo com os resultados obtidos por Silva, Ribeiro e Gomes (2008) e Silva, Stone e Santana (2003),

que observaram um baixo risco climático para a Microrregião Sudoeste, para a semeadura em dezembro, e condições de médio a alto risco climático para o Estado de Goiás como um todo, para a semeadura em Janeiro.

Em relação à simulação realizada para o solo tipo 2 ($CAD = 73 \text{ mm m}^{-1}$), a tendência das regiões em relação aos níveis de produtividade foram praticamente iguais, porém, com o aumento da capacidade de retenção de água no solo, os valores das produtividades foram maiores para todas as datas de semeadura analisadas (Figuras 14 a 18).

Para as semeaduras de setembro a dezembro (Figuras 14 a 17), as regiões do entorno do DF apresentaram os maiores níveis de produtividade. Isso ocorreu devido à elevada produtividade potencial obtida para a mesma região, no mesmo período (Figuras 3 a 6), uma vez que a produtividade atingível é simulada pelo modelo ORYZA-DSSAT por meio da penalização da produtividade potencial pelo déficit hídrico. Assim, para um mesmo déficit hídrico, a região com maior produtividade potencial apresentará também a maior produtividade atingível.

Observam-se também produtividades elevadas na região Central e Sudoeste do estado, principalmente para a semeadura realizada no mês de setembro (Figura 14). Para esse mês, a elevada produtividade foi devida, além da elevada produtividade potencial obtida para a mesma região (Figura 3), ao aumento da precipitação, já que no Estado de Goiás, a chuva aumenta no sentido do leste para o oeste (BALBINO, 2011; SILVA; SANTANA; PELEGRINI, 2006).

Figura 14 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de setembro (decêndio 26), para o solo tipo 2 (CAD = 73 mm m⁻¹)

Para as semeaduras realizadas entre os meses de outubro e dezembro (Figuras 15 a 17), as elevadas produtividades obtidas nessas regiões foram devidas mais à disponibilidade hídrica do que à produtividade potencial, as quais são menores em comparação às da região do entorno do DF (Figuras 4 a 6).

Figura 15 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de outubro (decêndio 29), para o solo tipo 2 (CAD = 73 mm m⁻¹)

Na semeadura de outubro, observa-se um baixo valor de produtividade para a região de Posse e Quirinópolis (Figura 15). Isto está associado, mais uma vez, ao menor valor da produtividade potencial simulada para essa região (Figura 4) e também à disponibilidade hídrica mais limitada na região. Apesar disso, foi nessa mesma época de semeadura que foram obtidas as maiores produtividades, com mais de 4000 kg ha⁻¹.

Figura 16 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de novembro (decêndio 32), para o solo tipo 2 (CAD = 73 mm m⁻¹)

Semeaduras realizadas no mês de dezembro indicaram um aumento das áreas com produtividades mais baixas, menores que 2000 kg ha^{-1} , na região Sul e Sudeste do Estado de Goiás (Figura 17). Apesar desse tipo de solo ter maior capacidade de armazenamento de água que o solo tipo 1, o nível de produtividade para estas regiões foi um pouco maior em relação aos níveis de produtividade obtidos para o solo tipo 1 (Figura 12), uma vez que semeaduras realizadas mais tardiamente acarretam o aumento do risco de deficiência hídrica na fase mais crítica da cultura, independentemente do tipo de solo (SILVA; ASSAD, 2001).

Figura 16 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de dezembro (decêndio 35), para o solo tipo 2 ($\text{CAD} = 73 \text{ mm m}^{-1}$)

A Figura 17 apresenta o mapa da produtividade atingível para a cultura semeada no segundo decêndio de janeiro. De todas as épocas de semeadura analisadas, essa foi a que apresentou os menores níveis de produtividade. Os baixos valores de produtividade obtidos para essa época de semeadura são devidos principalmente à baixa disponibilidade hídrica nos períodos de florescimento e enchimento de grãos, que ocorrem aproximadamente 60 dias a emergência.

Figura 17 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de janeiro (decêndio 02), para o solo tipo 2 (CAD = 73 mm m⁻¹)

Ao espacializar as produtividades atingíveis obtidas em solos argilosos, com alta capacidade de retenção de água ($CAD = 140 \text{ mm m}^{-1}$), observou-se, para a semeadura realizada no mês de setembro, que grande parte do estado apresentou produtividades menores do que 3000 kg ha^{-1} , sendo que as maiores produtividades foram obtidas para as regiões de Anápolis e do entorno do DF, assim como no sudoeste do estado, nas áreas de maiores altitudes, onde as temperaturas são mais amenas e as chuvas mais intensas (Figura 18).

Figura 18 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de setembro (decêndio 26), para o solo tipo 3 ($CAD = 140 \text{ mm m}^{-1}$)

Para esse tipo de solo, e considerando-se as semeaduras de outubro e novembro, observa-se os maiores níveis de produtividade, superando os 4500 kg ha^{-1} em algumas regiões do estado (Figuras 19 e 20).

Figura 19 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de outubro (decêndio 29), para o solo tipo 3 ($\text{CAD} = 140 \text{ mm m}^{-1}$)

Figura 20 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de novembro (decêndio 32), para o solo tipo 3 (CAD = 140 mm m⁻¹)

Em experimentos realizados em Santo Antônio de Goiás, em solo argiloso, com a semeadura realizada em novembro durante a safra 2006/2007, foi obtida uma produtividade de 4173 kg ha^{-1} , dentro da faixa estabelecida para a região em questão (Figura 20). Simulações realizadas para o mesmo local, tipo de solo e período utilizando o modelo ORYZA-APSIM, Lorençoni (2009) obteve resultados semelhantes, atingindo uma produtividade de 4153 kg ha^{-1} . Nesse mesmo trabalho, dados experimentais utilizados pelo autor, com semeaduras realizadas em dezembro durante as safras 2005/2006 e 2008/2009, mostraram produtividades variando de 3500 a 4000 kg ha^{-1} , resultados semelhantes aos obtidos no presente trabalho (Figura 21).

De maneira semelhante para os demais tipos de solo utilizados no presente estudo, para semeaduras realizadas em janeiro, a produtividade da cultura foi comprometida em todo o Estado, devido à ocorrência de deficiências hídricas mais acentuadas na fase crítica da cultura, resultando em produtividades em torno de 3500 kg ha^{-1} (Figura 22).

Figura 21 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de dezembro (decêndio 35), para o solo tipo 3 (CAD = 140 mm m⁻¹)

Figura 22 - Produtividade atingível do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, semeado em 11 de janeiro (decêndio 02), para o solo tipo 3 (CAD = 140 mm m⁻¹)

3.3.3 ISNA ponderado

Para cada tipo de solo foi obtido o ISNA em cada uma das fases da cultura: vegetativa, reprodutiva e de enchimento de grãos. O ISNA foi obtido pela relação entre a ETr e a ETc, que por sua vez foram obtidas por meio do balanço hídrico da cultura, de acordo com o método adotado pelo sistema DSSAT. Com isso, foi realizada uma regressão linear múltipla entre os dados de produtividade relativa (P_a/P_p), oriundos do modelo ORYZA-DSSAT, e o ISNA de cada fase da cultura para cada tipo de solo e considerando-se todas as épocas de semeadura. Os coeficientes dessas regressões são apresentados na Tabela 7 e foram empregados para se definir os pesos para a obtenção do INSA ponderado, que são apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 – Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla da relação entre a produtividade relativa e do ISNA de cada fase da cultura do arroz de terras altas no Estado de Goiás para os diferentes tipos de solo

Tipo de Solo ¹	Coeficientes da equação de regressão				R ²
	Intersec	ISNA_veg ²	ISNA_rep ³	ISNA_eg ⁴	
1	-0,686*	0,034*	0,098*	0,334*	0,82
2	-0,202*	0,135*	0,242*	0,436*	0,76
3	-0,298*	0,069*	0,396*	0,534*	0,78

¹Tipos de solo: 1 - RQ; 2 - LVd; 3 - LV; ²ISNA fase vegetativa; ³ISNA fase reprodutiva; ⁴ISNA fase de enchimento de grãos; *Significativo ao nível de 0,1% de significância

Tabela 8 - Fatores de ponderação do ISNA obtidos por meio dos coeficientes da regressão linear múltipla entre a produtividade relativa e o ISNA de cada fase da cultura do arroz de terras altas para o Estado de Goiás, para cada tipo de solo

Tipo de Solo	Fatores de Ponderação		
	ISNA_veg ¹	ISNA_rep ²	ISNA_eg ³
1	0,07	0,21	0,72
2	0,17	0,30	0,53
3	0,07	0,40	0,53

¹ISNA fase vegetativa; ²ISNA fase reprodutiva; ³ISNA fase de enchimento de grãos

Por meio dos fatores de ponderação apresentados na Tabela 8, observa-se que para todos os tipos de solo, a fase mais crítica da cultura ao estresse hídrico é a de enchimento de grãos, pois apresenta os maiores valores, entre 0,53 e 0,72. No entanto, a intensidade variou entre os tipos de solo. Para o solo de textura mais arenosa, com baixa capacidade de armazenamento de água, mais de 70% do valor do ISNA ponderado foi proveniente dessa fase da cultura, não ocorrendo quase nenhum efeito da fase vegetativa (0,07). A maior dependência da fase vegetativa ocorreu para o solo tipo 2, ou seja, dependendo da intensidade do estresse hídrico na fase vegetativa, neste tipo de solo, a penalização na cultura pode ser maior caso esse mesmo estresse ocorresse no solo tipo 1. Já para o solo tipo 3, com maior capacidade de retenção de água, o fator de ponderação proveniente da fase reprodutiva teve um peso maior no ISNA ponderado em relação à mesma fase nos outros dois solos (Tabela 8), indicando uma dependência maior da água pela cultura nessa fase em relação aos demais tipos de solo.

De posse dos fatores de ponderação, foram calculados os valores do ISNA ponderado, variando de 0 a 1, para cada tipo de solo, localidade, época de semeadura e ano. A Figura 23 apresenta a variação média do ISNA ponderado ($ISNA_{pond}$) e do ISNA de cada fase da cultura em função de cada um dos 36 decêndios do ano, para cada localidade selecionada em cada Mesorregião do Estado de Goiás (Figura 2) para o solo tipo 1 ($CAD = 45 \text{ mm m}^{-1}$).

Observa-se que para todas as localidades, o $ISNA_{pond}$ apresentou a mesma tendência do ISNA da fase reprodutiva ($ISNA_{rep}$) e do ISNA da fase de enchimento de grãos ($ISNA_{eg}$), pois na sua composição, esses representam a maior proporção (Tabela 8). No entanto, percebeu-se que o $ISNA_{pond}$ ficou sempre abaixo do $ISNA_{rep}$ nos decêndios iniciais e finais e, de maneira diferente, ficou acima do $ISNA_{eg}$ nos decêndios iniciais e abaixo nos decêndios finais.

Em relação ao ISNA da fase vegetativa ($ISNA_{veg}$), este apresentou valores sempre abaixo dos demais, seja nos decêndios iniciais ou finais, com uma diferença maior nos decêndios finais. Isso ocorreu, provavelmente, devido à estimativa da evapotranspiração da cultura pelo DSSAT, pois como no início da cultura a área foliar é muito pequena, a maior parte da evapotranspiração da cultura é proveniente da

evaporação do solo. Como o modelo utiliza a resistência aerodinâmica da cultura para estimar a transpiração, o modelo subestima a transpiração da cultura e consequentemente, a evapotranspiração real na fase inicial da cultura (INES et al., 2001).

Figura 23 – Variação sazonal do ISNA médio ponderado e de cada fase da cultura para o solo tipo 1 ($CAD = 45 \text{ mm m}^{-1}$) para as localidades de (a) Anápolis; (b) Aragarças; (c) Caiapônia; (d) Catalão; (e) Formosa; e (f) Porangatu, Estado de Goiás

Figura 24 – Variação sazonal do ISNA médio ponderado e de cada fase da cultura para o solo tipo 2 ($CAD = 73 \text{ mm m}^{-1}$) para as localidades de (a) Anápolis; (b) Aragarças; (c) Caiapônia; (d) Catalão; (e) Formosa; e (f) Porangatu, Estado de Goiás

Em relação às localidades estudadas, observou-se que os menores valores médios do ISNA, durante os decêndios iniciais foram obtidos em Caiapônia (Figura 23c), Catalão (Figura 23d) e Formosa (Figura 23e). Nessas mesmas localidades, foram obtidas as menores produtividades atingíveis do arroz, no tipo de solo 1 (Figura 13). Os maiores valores médios do ISNA foram obtidos em Anápolis (Figura 23a), tanto nos decêndios iniciais, quanto nos decêndios finais.

Para o solo tipo 2, Formosa apresentou o menor valor do $ISNA_{pond}$ nos decêndios iniciais, acompanhando a tendência do $ISNA_{eg}$ (Figura 24e). Ao realizar o zoneamento de risco climático utilizando apenas o ISNA das fases mais críticas da cultura, Silva e Assad (2001), Silva, Stone e Santana (2003), Silva, Ribeiro e Gomes (2008) obtiveram, para a mesma região, um risco climático classificado de médio a alto.

No entanto, o $ISNA_{rep}$ apresentou valores elevados no mesmo período, tornando o $ISNA_{pond}$ maior que o $ISNA_{eg}$, diminuindo, assim, a probabilidade do risco climático, ao utilizar o ISNA ponderado. Os maiores valores nos decêndios iniciais foram obtidos em Anápolis (Figura 24a) e Porangatu (Figura 24f). Já para os decêndios finais, os maiores valores foram obtidos em Aragarças (Figura 24b).

Para o solo com alta capacidade de armazenamento de água (solo tipo 3), o valor médio do $ISNA_{pond}$ manteve-se sempre próximo ou superior a 0,80 durante os decêndios iniciais e finais (Figura 25). Nos primeiros decêndios do ano, Anápolis e Porangatu apresentaram os maiores valores do $ISNA_{pond}$ (Figuras 25a e 25f). Em relação aos decêndios finais, em todas as localidades observaram-se valores do ISNA no mesmo patamar.

Figura 25 – Variação sazonal do ISNA médio ponderado e de cada fase da cultura para o solo tipo 3 ($\text{CAD} = 140 \text{ mm m}^{-1}$) para as localidades de (a) Anápolis; (b) Aragarças; (c) Caiapônia; (d) Catalão; (e) Formosa; e (f) Porangatu, Estado de Goiás

Em relação aos três tipos de solo analisados, os valores do ISNA ponderado e de cada fase foram aumentando à medida que a disponibilidade hídrica no solo aumentou. Em geral, observou-se uma maior variação entre o $ISNA_{pond}$ e o $ISNA_{eg}$, este último tratado como o da fase mais crítica da cultura (HEINEMANN; STONE, 2009), nos decêndios iniciais e finais, para os solos tipo 1 e 2 (Figuras 23 e 24). Para o solo tipo 3, essa variação praticamente não existiu, principalmente nos decêndios finais (Figura 25).

3.3.4 Determinação das épocas preferencias de semeadura do arroz de terras altas no Estado de Goiás

As épocas preferenciais de semeadura foram determinadas em função do risco climático baseado no ISNA ponderado e também em função da probabilidade da produtividade atingível ultrapassar o custo de produção, este último dividido em dois: um referente ao custo de produção baseado na agricultura familiar e o outro baseado na agricultura que utiliza um maior nível tecnológico.

Cabe ressaltar que tais custos representam condições médias locais e com base na metodologia proposta pelo órgão que realizou o levantamento, por isso custos locais de produção devem ser considerados na seleção de data preferencial de semeadura em outras regiões (BATTISTI, 2013).

A classificação dos decêndios de acordo com o risco climático está indicada nos ANEXOS de A a F, para cada uma das localidades selecionadas de acordo com a Figura 2. As classificações dos decêndios de acordo com o custo de produção (agricultura familiar e agricultura de alta tecnologia) para cada uma das localidades selecionadas são apresentadas nos ANEXOS de G a L.

Com base na classificação dos decêndios em função do risco climático e do custo de produção, são indicados, a seguir, os decêndios preferenciais para a semeadura do arroz de terras altas no Estado de Goiás, comparando-os com os decêndios apresentados pelo zoneamento do MAPA, para cada uma das seis localidades que representam as mesorregiões do Estado de Goiás.

Para o solo tipo 1, a maioria do período recomendado para a semeadura foi classificado como marginal, com apenas três decêndios classificados como aptos, destacando-se o decêndio 27, pois este foi indicado como inapto pelo MAPA. Isso ocorreu mais em função da probabilidade da produtividade atingível ultrapassar o custo de produção (Tabela 1 do ANEXO G) do que pelo risco climático (ANEXO A). Para os demais tipos de solo, a maioria dos decêndios foi classificada como apta, destacando o decêndio 23 para o solo tipo 3, pois, mesmo possuindo um risco climático médio, a produtividade atingível simulada foi maior que 1000 kg ha^{-1} , em 80% ou mais dos anos, uma vez que esse decêndio apresentou a maior produtividade potencial simulada em relação aos outros decêndios (Apêndice A).

Ao analisar as épocas de semeadura para a agricultura com maior nível tecnológico, observa-se que a principal diferença em relação ao zoneamento do MAPA ocorreu para o solo tipo 1, para o qual todos os decêndios foram classificados como inaptos à semeadura do arroz de terras altas, por meio da metodologia proposta (Tabela 10). Apesar do risco climático em alguns decêndios ter sido classificado como baixo, menos de 60% dos anos alcançaram a produtividade requerida para cobrir os custos (2000 kg ha^{-1}). Essas baixas produtividades ocorreram devido à baixa capacidade de retenção de água nesse tipo de solo.

Para os solos tipos 2 e 3, que representam a maioria dos solos presentes no Estado de Goiás (BALBINO, 2011), foi possível adiantar a semeadura em dois decêndios, iniciando-a no mês de setembro. Para o final do período, além da diferença dos decêndios favoráveis propostos por este estudo e pelo MAPA, observou-se que os mesmos foram classificados como marginais e inaptos conforme o MAPA (Tabela 10). Isso ocorreu apenas pelo fato da produtividade atingível simulada ter sido maior ou igual a 2000 kg ha^{-1} entre 60 e 80% dos anos, já que o risco climático foi classificado como baixo (ANEXO A).

Tabela 10 – Decêndios aptos (A), marginais (M) e inaptos (I) para a semeadura do arroz de terras altas com maior nível tecnológico, para os diferentes tipos de solo e sua comparação com o zoneamento de risco climático do MAPA, em Anápolis, GO

Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	2	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	3	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	2	I	I	I	I	I	I	I	M	A	A	M	A	M	M	M	M	M	M
Simulado MAPA	3	I	I	I	I	I	I	I	A	A	M	A	A	M	M	M	M	M	M
Simulado MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A

3.3.4.2 Aragarças

Aragarças está localizada na divisa com o Estado do Mato Grosso e pertence à região Noroeste do Estado. A produtividade média da microrregião na qual está localizada, referente ao período de 1981 a 2006, está um pouco abaixo da média do Estado (Tabela 5 e Figura 8).

Para os três tipos de solo, recomenda-se iniciar a semeadura antes do período proposto pelo MAPA, sendo que para os solos tipo 2 e 3 o início da semeadura poderá se dar um mês antes para a agricultura familiar (Tabela 11). Para o solo tipo 1, com menor capacidade de armazenamento de água, o decêndio 26 foi classificado como marginal, pois tanto o risco climático (ANEXO B) quanto a probabilidade da produtividade atingível ultrapassar o custo de produção (Tabela 1 do ANEXO H) foram classificados como médio e marginal. Além disso, observou-se que para o mesmo solo, o período de semeadura foi encurtado em um mês. Isso ocorreu porque a produtividade simulada média não cobriu o custo de produção, o que ocorreu devido à quebra

associada ao déficit hídrico nos estádios de florescimento e enchimento de grãos, indicado pelo baixo valor da relação ET_r/ET_c para esses períodos (Figura 23b).

Tabela 11 – Decêndios aptos (A), marginais (M) e inaptos (I) para a semeadura do arroz de terras altas para a agricultura familiar, para os diferentes tipos de solo e sua comparação com o zoneamento de risco climático do MAPA, em Aragarças, GO

Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	2	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	3	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	3	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	3	A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	I	M	I	M	A	A	A	M	A	M	I	I
Simulado MAPA	2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Simulado MAPA	3	I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Simulado MAPA	3	I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Para os agricultores de arroz que empregam um maior nível tecnológico, os resultados apontam que a produção do arroz de terras altas em solos com baixa capacidade de retenção de água ($CAD = 45 \text{ mm m}^{-1}$) é inviável, já que todos os decêndios foram classificados como inaptos (Tabela 12), sendo que a produtividade atingível nunca cobriu o custo de produção em mais de 60% dos anos (Tabela 2 do ANEXO H).

Para os demais tipos de solo, as épocas de semeadura foram praticamente iguais aos períodos recomendados pelo MAPA. A diferença foi para o solo tipo 2, onde todos os decêndios foram classificados com marginais, apesar de os mesmos períodos terem sido classificados como de baixo risco climático (ANEXO B). Observou-se para esses períodos que a produtividade potencial simulada foi uma das menores do Estado (Figuras 3 a 7), contribuindo, assim, para a obtenção de baixas produtividades atingíveis. De acordo com Fukai e Cooper (2001) e Pantuwan et al. (2002), mesmo em

condições de deficiência hídrica moderada, a produtividade potencial é o determinante mais importante na produtividade de uma determinada variedade.

Tabela 12 – Decêndios aptos (A), marginais (M), e inaptos (I) para a semeadura do arroz de terras altas com maior nível tecnológico, para os diferentes tipos de solo e sua comparação com o zoneamento de risco climático do MAPA, em Aragarças, GO

Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Simulado	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado	2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado	3	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Simulado	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Simulado	2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	M	M	M	M	M	M	M	I
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Simulado	3	I	I	I	I	I	I	I	I	M	M	M	A	A	A	A	M	A	M
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A

3.3.4.3 Caiapônia

Caiapônia pertencente à região Sul do Estado, sendo um dos municípios com maior área cultivada com arroz de terras altas, com 2500 hectares na safra 2009/2010 (CONAB, 2010). Considerando-se a agricultura familiar observou-se que para todos os tipos de solo estudados ocorreu um adiantamento das épocas preferenciais de semeadura quando comparado ao zoneamento de risco climático do MAPA (Tabela 13). Esse adiantamento ocorreu de forma gradual, sendo de dois decêndios para o solo tipo 1, três decêndios para o solo tipo 2, e quatro para o solo tipo 3, inclusive atingindo produtividades acima do necessário para cobrir os custos de produção.

Tabela 13 – Decêndios aptos (A), marginais (M), e inaptos (I) para a semeadura do arroz de terras altas para a agricultura familiar, para os diferentes tipos de solo e sua comparação com o zoneamento de risco climático do MAPA, em Caiapônia, GO

Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Simulado	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado	2	A	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado	3	A	A	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Simulado	1	I	I	I	I	I	I	I	M	A	M	M	M	M	M	M	M	M	M
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Simulado	2	I	I	I	I	I	I	M	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Simulado	3	I	I	I	I	I	M	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Para o arroz cultivado em um solo tipo 1, apenas um decêndio foi classificado como apto, mesmo apresentando um risco climático médio (ANEXO C), porém a produtividade atingível ultrapassou o necessário para cobrir os custos de produção em 80% ou mais dos anos simulados (Tabela 1 do ANEXO I). Diferentemente do zoneamento do MAPA, o último período favorável para a semeadura foi o decêndio 36, uma vez que para esta localidade os decêndios 1, 2 e 3 foram classificados como de alto risco climático (Figura 23c).

A Tabela 14 apresenta os decêndios favoráveis ao cultivo do arroz de terras altas produzido com um maior nível tecnológico. Acompanhando a tendência das localidades anteriores, o solo tipo 1 não ofereceu condições suficientes para que a produtividade atingível cobrisse os custos da produção em pelo menos 60% dos anos simulados (Tabela 2 do ANEXO I). Para o solo tipo 2, o início do período de semeadura foi igual ao recomendado pelo MAPA, porém, todos os decêndios favoráveis foram classificados como marginais, mesmo apresentando baixo risco climático (ANEXO C).

Em relação às baixas produtividades atingíveis para o solo tipo 2, foi verificado que para alguns anos simulados, a duração do ciclo da cultura foi menor do que ocorre

normalmente, em geral 110-120 dias (HEINEMANN; STONE, 2009). Consequentemente, a duração de cada fase fenológica também diminuiu, principalmente para atingir o florescimento, prejudicando a produção de biomassa, devido à diminuição do índice de área foliar (IAF), acarretando uma menor absorção de radiação solar e, consequentemente, queda da produtividade final. De acordo com Yoshida (1981), o rendimento da cultura do arroz é determinado ainda na fase reprodutiva, quando se define o número de espiguetas a partir da biomassa total acumulada nas panículas.

Tabela 14 – Decêndios aptos (A), marginais (M), e inaptos (I) para a semeadura do arroz de terras altas com maior nível tecnológico, para os diferentes tipos de solo e sua comparação com o zoneamento de risco climático do MAPA, em Caiapônia, GO

Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	2	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	3	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	M	I	M	M	M	M	M	M	M
Simulado MAPA	3	I	I	I	I	I	I	I	M	M	A	A	A	A	A	A	M	A	M
		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Para o solo tipo 3, a semeadura ocorreu dois decêndios antes do proposto pelo MAPA, porém o período terminou um decêndio antes. Para este solo, a maioria dos decêndios foi considerada apta, semelhante ao preconizado pelo MAPA.

3.3.4.4 Catalão

Catalão está localizado na região Sul, na porção oriental do Estado de Goiás. A produtividade média para a microrregião que essa localidade representa é ligeiramente superior à média do estado, de acordo com os dados apresentados na Tabela 5 e na Figura 8.

As Tabelas 15 e 16 apresentam os decêndios preferenciais para a semeadura do arroz de terras altas para Catalão, com a primeira apresentando os dados para o arroz cultivado com baixa tecnologia e a segunda apresentando o cultivo do arroz com um maior nível tecnológico.

Tabela 15 – Decêndios aptos (A), marginais (M), e inaptos (I) para a semeadura do arroz de terras altas da agricultura familiar, para os diferentes tipos de solo e sua comparação com o zoneamento de risco climático do MAPA, em Catalão, GO

Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	2	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	3	A	A	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	I	M	A	A	A	M	M	M	I	M	I	I
Simulado MAPA	2	I	I	I	I	I	I	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	M
Simulado MAPA	3	I	I	I	I	I	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A

O resultado obtido indicou que a semeadura do arroz para o solo tipo 1 pode ser realizada em um período maior do que o indicado pelo MAPA, com seu início no mês de setembro (Tabela 15). Outra observação importante é que à medida que se atrasa a semeadura no solo tipo 1, o risco para a cultura do arroz de terras altas aumenta, principalmente em relação à possibilidade da produtividade atingível superar o custo de

Tabela 16 – Decêndios aptos (A), marginais (M), e inaptos (I) para a semeadura do arroz de terras altas com maior nível tecnológico, para os diferentes tipos de solo e sua comparação com o zoneamento de risco climático do MAPA, em Catalão, GO

(conclusão)

Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Simulado	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	I	I	I	I
Simulado	2	I	I	I	I	I	I	I	I	M	A	A	A	M	M	I	I	I	I
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Simulado	3	I	I	I	I	I	I	M	M	M	A	A	A	A	M	M	M	M	M
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A

3.3.4.5 Formosa

Formosa está localizada na região Leste do Estado de Goiás, na microrregião do Entorno do DF. De acordo com a Tabela 5, esta microrregião apresentou a maior diferença entre as produtividades atingíveis simuladas e observadas, indicando uma superestimativa do modelo, o que pode ter influenciado os resultados relativos às épocas preferenciais de semeadura do arroz de terras altas, já que o método empregado considera o balanço entre a produtividade atingível e o custo de produção.

A Tabela 17 apresenta os decêndios favoráveis à semeadura do arroz de terras altas quando seu cultivo é realizado com baixo nível tecnológico. Os resultados indicam um adiantamento na semeadura, principalmente para o solo tipo 3, com início em agosto. Nesse período, o risco climático foi classificado de médio a baixo (ANEXO E).

Além disso, vale lembrar que as simulações foram realizadas com o balanço de nitrogênio no solo desligado, ou seja, sem estresse nutricional. A adubação nitrogenada foi incluída no cálculo do custo de produção para a agricultura familiar, porém reduzidamente, podendo também ser uma possível fonte de erro.

Tabela 17 – Decêndios aptos (A), marginais (M), e inaptos (I) para a semeadura do arroz de terras altas para a agricultura familiar, para os diferentes tipos de solo e sua comparação com o zoneamento de risco climático do MAPA, em Formosa, GO

Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	2	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	3	A	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	M	M	M	M	M	I	I
Simulado MAPA	2	I	I	I	I	I	M	A	A	A	A	A	A	A	A	M	A	M	M
Simulado MAPA	3	I	I	I	I	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Com base nos resultados obtidos, observou-se novamente que é inviável a produção do arroz de terras altas em solos com baixa capacidade de retenção de água, devido ao baixo rendimento, quando se considera um nível tecnológico mais elevado, quando não se é capaz de cobrir os custos de produção (Tabela 2 do ANEXO K), conforme indicado na Tabela 18, onde todos os decêndios foram classificados como inaptos.

Para cultivos em solo tipo 2, foi apresentado uma redução na janela de semeadura, comparado ao zoneamento proposto pelo MAPA. Apesar da janela de semeadura se iniciar dois decêndios antes (decêndio 26), houve uma antecipação substancial do término deste, ocorrendo no decêndio 33. Foi observado, para este tipo de solo, uma redução na relação ETr/ETc nos decêndios finais (Figura 24e), além de uma ligeira diminuição da produtividade potencial e atingível simuladas a partir de novembro (Figuras 5, 6 e 7).

O cultivo no solo tipo 3 resultou no início da janela de semeadura um mês antes do que sugerido pelo MAPA. O aumento das chuvas nesse mês e a alta capacidade de retenção de água do solo favoreceram a implantação da cultura, porém os dois

primeiros decêndios foram classificados como marginais, apresentando uma maior variabilidade de produção entre os anos simulados. Outra diferença observada foi que os decêndios iniciais do ano foram classificados como inaptos, impossibilitando a semeadura nesse período, resultado diferente do obtido pelo MAPA. Para esse período, a variabilidade na produção foi maior ainda, sendo classificados como inaptos em relação à cobertura do custo de produção (Tabela 2 do ANEXO K) e também foi observado um aumento no risco climático nos decêndios dois e três do ano (ANEXO E).

Tabela 18 – Decêndios aptos (A), marginais (M), e inaptos (I) para a semeadura do arroz de terras altas para a agricultura com maior nível tecnológico, para os diferentes tipos de solo e sua comparação com o zoneamento de risco climático do MAPA, em Formosa, GO

Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Simulado	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado	2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado	3	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Simulado	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Simulado	2	I	I	I	I	I	I	I	M	A	A	A	M	M	M	M	I	I	I
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Simulado	3	I	I	I	I	I	I	M	M	A	A	A	A	A	M	M	M	M	M
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A

3.3.4.6 Porangatu

Porangatu está localizada no extremo Norte de Goiás, apresentando temperaturas elevadas e índice pluviométrico ligeiramente abaixo da média do Estado. Para esta localidade, o modelo ORYZA-DSSAT apresentou os menores ciclos da cultura entre todas as simuladas, justamente devido ao fato da maior temperatura, reduzindo o tempo necessário para a finalização de cada fase fenológica da cultura. Isso pode ter favorecido o resultado obtido para as épocas de semeadura,

principalmente para os solos tipo 2 e 3, tendo seu início sido antecipado para setembro, além de se poder realizar a semeadura no decêndio 04, para o solo tipo 3, porém com um risco maior de perdas (Tabela 19).

Tabela 19 – Decêndios aptos (A), marginais (M), e inaptos (I) para a semeadura do arroz de terras altas para a agricultura familiar, para os diferentes tipos de solo e sua comparação com o zoneamento de risco climático do MAPA, em Porangatu, GO

Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Simulado	1	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado	2	M	A	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado	3	A	A	A	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
MAPA		A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Simulado	1	I	I	I	I	I	I	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Simulado	2	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Simulado	3	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
MAPA		I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A

A maior diferença no período de cultivo foi observada para o solo tipo 1, onde todos os decêndios favoráveis foram classificados como marginais, tanto em função da cobertura do custo de produção (Tabela 1 do ANEXO L), quanto ao risco climático (ANEXO F), sendo que este último apresentou grande variabilidade entre os decêndios, sendo classificado ora como de baixo risco, ora como de risco médio.

Pode-se observar que a produtividade potencial simulada apresentou valores intermediários nos meses de setembro e outubro (Figuras 3 e 4, respectivamente) e a partir de novembro apresentou os menores valores de todo o Estado (Figuras 5 a 7) devido ao encurtamento do ciclo da cultura (CASANOVA et al., 2000; KROPFF et al., 1994; YOSHIDA, 1981) e em decorrência dos déficits hídricos mais frequentes e acentuados. Assim, esses fatores contribuíram para as baixas produtividades obtidas nesta localidade, com algumas exceções (Figuras 9 a 22). Esse efeito fica mais claro ao

se observar a Tabela 20, pois com o aumento do custo de produção e as baixas produtividades atingíveis a maioria dos decêndios favoráveis foi classificada como marginal, sendo que ocorreu somente dois decêndios classificados como aptos, em outubro, para o solo tipo 3. As demais épocas de semeadura foram todas classificadas como inaptas, diferindo substancialmente das recomendações do MAPA.

Tabela 20 – Decêndios aptos (A), marginais (M), e inaptos (I) para a semeadura do arroz de terras altas para a agricultura com maior nível tecnológico, para os diferentes tipos de solo e sua comparação com o zoneamento de risco climático do MAPA, em Porangatu, GO

Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	2	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	3	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	3	A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Tipo de Dado	Tipo Solo	Decêndio do ano																	
		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Simulado MAPA	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Simulado MAPA	2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	M	M	I	I	M	I	I	I	I
Simulado MAPA	3	I	I	I	I	I	I	I	M	M	M	A	M	A	M	M	M	M	M
Simulado MAPA	3	I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A

3.4 Conclusões

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

1) O modelo ORYZA-DSSAT simulou adequadamente a produtividade para as diversas regiões do Estado de Goiás, sendo eficiente em demonstrar a variação das produtividades potencial e atingível em função das variabilidade temporal e espacial das condições climáticas;

- 2) O uso do ISNA ponderado demonstrou ser fortemente influenciado pelo ISNA da fase de enchimento de grãos para todos os tipos de solo analisados, seguido pelo ISNA do período reprodutivo e pelo ISNA do período vegetativo;
- 3) Por meio da produtividade atingível simulada, foi possível determinar as épocas preferenciais de semeadura para o arroz de terras altas nas diversas regiões de Goiás, utilizando-se a probabilidade da mesma ultrapassar o custo de produção;
- 4) O cultivo de arroz de terras altas que utiliza elevado nível tecnológico fica inviável para o Estado de Goiás em solos com baixa capacidade de retenção de água ($CAD = 45 \text{ mm m}^{-1}$), devido à baixa produtividade obtida e ao fato desta não superar o custo de produção em nenhuma data de semeadura simulada;
- 5) Em todas as regiões do Estado, foram observadas diferenças no zoneamento agrícola de risco climático, quando comparadas as datas de semeadura recomendadas neste estudo com aquelas propostas pelo MAPA, principalmente nos decêndios iniciais e finais da janela de cultivo;
- 6) A integração do risco climático, definido pelo ISNA ponderado, com a probabilidade da renda oriunda da produtividade atingível da cultura superar o custo de produção possibilitou se definir as épocas preferenciais de semeadura da cultura do arroz de terras altas de forma a garantir uma maior segurança aos produtores, minimizando as perdas não só de produtividade, mas também de sua renda;
- 7) De acordo com os resultados apresentados neste estudo, sugere-se que o uso dos procedimentos propostos para a definição das épocas preferenciais de semeadura do arroz de terras altas passem a ser adotados como um critério mais seguro não só para os produtores rurais, mas também para os órgãos de financiamento e seguro agrícola.

Referências

- 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.
- ARTACHO, P.; MEZA, F.; ALCALDE, J.A. Evaluation of the ORYZA2000 rice growth model under nitrogen-limited conditions in an irrigated Mediterranean environment. **Chilean Journal of Agricultural Research**, Chillán, v. 71, n. 1, p. 23-33, 2011.
- BALBINO, E.A. **Projeção de cenários atuais e futuros de produtividade de cana-de-açúcar em ambiente de cerrado**. 2011. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- BATTISTI, R. **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. 2013. 261 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- BOUMAN, B.A.M.; KROPFF, M.J.; TUONG, T.P.; WOPEREIS, M.C.S.; TEN BERGE, H.F.M.; VAN LAAR, H.H. **ORYZA2000: modeling lowland rice**. Los Baños: International Rice Research Institute; Wageningen: Wageningen University and Research Centre, Philippines, 2001. 235 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento agrícola**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola/portarias-segmentadas-por-uff>>. Acesso em: 15 ago. 2012.
- _____. Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL: folha SD.22 – Goiás**. Rio de Janeiro, 1981. 1v. (Levantamento de Recursos Naturais, 25).
- CASANOVA, D.; GOUDRIAAN, J.; BOSCH, A.D. Testing the performance of ORYZA1, an explanatory model for rice growth simulation, for Mediterranean conditions. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 12, p. 175-189, 2000.
- CHAIB FILHO, H.; GARAGORRY, F.L.; MACHADO JÚNIOR, J.R.R. **Utilization of AGROTEC/Cerrados data base to evaluate the agriculture evolution at Cerrados**. Planaltina: Embrapa Cerrados. 15 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 54). Disponível em: <<http://www.cpac.embrapa.br/publicacoes/bolpd/1>>. Acesso em 10 abr. 2013.
- CLEVELAND, W.S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. **Journal of the American Statistical Association**, Alexandria, n. 74, p. 829-836, 1979.

CORDANO, E.; ECCEL, E. **RMAWGEN**: RMAWGEN (R Multi-site Auto-regressive Weather GENerator): a package to generate daily time series from monthly mean values. Disponível em: <<http://cran.r-project.org/web/packages/RMAWGEN/index.html>>. Acesso em 20 jan. 2013.

D'AFONSECA, D.S.; HEINEMANN, A.B.; SILVA, S.C. da; MORAES, A.C. **Preenchimento de dados climáticos diários faltantes para os municípios do Estado de Mato Grosso na base de dados de clima da Embrapa Arroz e Feijão**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão. 2013. 51 p. (Documentos, 282).

EMBRAPA. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar no Brasil para a produção de etanol e açúcar**: seleção de terras potenciais para a expansão do seu cultivo; relatório técnico. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008. 7 p.

FAGERIA, N.K. Optimal nitrogen fertilization timing for upland rice. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, SOIL SOLUTIONS FOR A CHANGING WORLD, 2010, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: International Union of Soil Science, 2010. 1 CD-ROM.

FARIA, R.T.; FOLEGATTI, M.V. Efeito de épocas de semeadura e regimes hídricos em duas cultivares de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 43-48, 2001.

FEDERAÇÃO DE AGRICULTURA DO ESTADO DE GOIÁS. Disponível em: <<http://sistemafaeg.com.br/mercados-e-cotacoes/outros/custo-de-Produção/category/4-arroz-sequeiro>>. Acesso em: 22 abr. 2013.

FERNANDES, D.S.; HEINEMANN, A.B.; PAZ, R.F.L.; AMORIN, A.O. Desempenho de índices quantitativos de seca na estimativa da produtividade de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 8, p. 771-779, 2010.

FUKAI, S.; COOPER, M. Development of drought resistant cultivars for rainfed lowland rice experience from Northeast Thailand and surrounding areas: In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE IMPACT OF AGRICULTURAL RESEARCH FOR DEVELOPMENT IN SOUTHEAST ASIA, 2000, Phnom Penh. **Proceedings...** Cambodia: Cambodian Agricultural Research and Development Institute, 2001. p. 185-194.

GARAGORRY, F.L.; REGO, A.M. **AGROTEC**: statistic database; data framework: Version 1.0. Brasília: Embrapa, 1997.

GLOVER, J.; MCCULLOCH, J.S.G. The empirical relation between solar radiation and hours of Sunshine. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 84, p. 172-175, 1958.

GROSSI, M.C. **Calibração do modelo CSM-Ceres-Sorghum para avaliação dos impactos das mudanças climáticas**. 2012. 83 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

GUNGULA, D.T.; KLING, J.G.; TOGUN, A.O. CERES-MAIZE predictions of maize phenology under nitrogen-stressed conditions in Nigeria. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 892-899, 2003.

GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; BRESEGHELLO, F.; PEREIRA, J.A.; CASTRO, E.M. de. **Arroz de terras altas: espaçamento e densidade de semeadura**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 6 p. (Circular Técnica, 61).

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, p. 29-36, 2010.

HEINEMANN, A.B.; SENTELHAS, P.C. Environmental group identification for upland rice production in central Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 5, p. 540-547, 2011.

HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F. Efeito da deficiência hídrica no desenvolvimento e rendimento de quatro cultivares de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 2, p. 134-139, 2009.

HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F.; FAGERIA, N.K.; CASTRO, L.M. Evaluation of physiological traits in upland rice for adaptation to no-tillage system. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos dos Goytacazes, v. 21, p. 113-122, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2006/agrop/ecuario.pdf>>. Acesso em 03 fev. 2013.

INES, A.V.M.; DROOGERS, P.; MAKIN, I.W.; GUPTA, A.D. **Crop growth and soil water balance modeling to explore water management options**. Colombo: International Water Management Institute, 2001. 35 p. (IWMI. Working Paper, 22).

KROPFF, M.J.; VAN LAAR, H.H.; MATTHEWS, R.B. ORYZA-1: An ecophysiological model for irrigated rice production. In: SARP RESEARCH, 1994, Manila. **Proceedings...** Manila: International Rice Research Institute, 1994. 110p.

LOPES-ASSAD, M.L.; BOSCHI, R.S.; NOMURA, E.; EVANGELISTA, B.A.; SILVA, J.S.V. Uso de informações de solos no zoneamento agrícola de risco climático. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007. 1 CD-ROM.

LORENÇONI, R. **Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil**. 2009. 81 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MALABUYOC, J.A.; REAL, J.G.; De DATTA, S.K. Grain yield as a function of rainfall, soil moisture and solar radiation in upland rice (*Oryza sativa* L.). **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 34, p. 37–45, 1993.

MEINKE, H.; BASTIAANS, L.; BOUMAN, B.; DINGKUHN, M.; GAYDON, D.; HASEGAWA, T.; HEINEMANN, A.B.; KIEPE, P.; LAFARGE, T.; LUQUET, D.; MASOOD, A.; VAN OORT, P.; RODENBURG, J.; YAN, J.; YIN, X. **An international collaborative research network helps to design climate robust rice systems**, 2009. Tsukuba: National Institute for AGr-Evironmental Sciences, 2009. 11 p.

MENDES, F.L. **Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pelas culturas de cana-de-açúcar e de arroz**. 2010. 116 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MONTEIRO, L.A. **Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo** 2012. 116 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MONTEIRO, J.E.B.A.; AZEVEDO, L.C.; ASSAD, E.D.; SENTELHAS, P.C. Rice yield estimation based on weather conditions and on technological level of production systems in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 2, p. 123-131, 2013.

MORAIS, O.P.; CORNÉLIO, V.M.O.; REIS, M.S.; SOARES, P.C.; SANTOS, P.G.; SOUSA, M.A. **BRS-MG Curinga**: cultivar de arroz de terras altas de ampla adaptação para o Brasil. Brasília: EMBRAPA, CNPAF, 2005. 8 p. (CNPAF. Comunicado Técnico, 114).

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421 p.

PANTUWAN, G.; FUKAI, L.; COOPER, M.; RAJATASEREEKULC, S.; O'TOOLE, J.C. Yield response of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to drought under rainfed lowlands 2. Selection of drought resistant genotypes. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 73, p. 169-180, 2002.

PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: PUDOC, 1982. 308 p. (Pudoc Bulletin, 12).

PIGGIN, C.; COURTOIS, B.; GEORGE, T.; PANDEY, S.; LAFITTE, R.; KIRK, G.; KONDO, M.; LEUNG, H.; NELSON, R.; OLOFSDOTTER, M.; PROT, J.C.; REVERSAT, G. **The IRRI upland rice research program**. Los Baños: International Rice Research Institute, 1998. 32p. (Discussion Paper Series, 25).

PINHEIRO, B.S. **Cultivo do arroz de terras altas**: características da cultura. 2003. Embrapa Arroz e Feijão. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/index.htm>>. Acesso em: 04 fev. 2013.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat and evaporation using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, p. 81-92, 1972.

RICHARDSON, C.W.; WRIGHT, D.A. **WGEN**: a model for generating daily weather variables. Washington: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1984. 83 p. (Agricultural Research Service Technical Bulletin, 8).

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

_____. A user-oriented model of the soil water balance in wheat. In: FRY, E.; ATKIN, T.K. (Ed.). **Wheat growth and modeling**. New York: Plenum Press, 1985. p. 293-305.

RITCHIE, J.T.; SINGH, U.; GODWIN, D.C.; BOWEN, W.T. Cereal growth, development and yield. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. **Understanding options of agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic; International Consortium for Agricultural Systems Applications, 1998. chap. 5, p. 79-98.

RODRIGUES, R.A. **Modelagem dos efeitos da ferrugem asiática no rendimento da cultura da soja em cenário de mudanças climáticas globais no Estado de Minas Gerais**. 2011. 98 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

SAU, F.; KENNETH, J.B.; BOSTICK, W.M.; JONES, J.W.; MÍNGUEZ, M.I. Testing and improving evapotranspiration and soil water balance of the DSSAT crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 1243-1257, 2004.

SENTELHAS, P.C.; FARIA, R.T.; CHAVES, M.O.; HOOGENBOOM, G. Evaluation of the WGEN and SIMMETEO weather generators for the Brazilian tropics and subtropics, using crop simulation models. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, p. 357-376, 2001.

SILVA, S.C.; ASSAD, E.D. Zoneamento de riscos climáticos para o arroz de sequeiro nos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Tocantins e Bahia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 536-543, 2001.

SILVA, S.C. da; BRITES, R.S.; ASSAD, E.D. Identificação de risco climático para a cultura de arroz de sequeiro no Estado de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 7, p. 1005-1011, 1998.

SILVA, S.C. da; RIBEIRO, J.R.; GOMES, M.P. **Zoneamento agroclimático da cultura do arroz de terras altas para o Estado de Goiás**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2008. 4 p. (Comunicado Técnico, 162).

SILVA, S.C. da; SANTANA, N.M.P. de; PELEGRINI, J.C. **Caracterização climática do Estado de Goiás**. Goiânia: SIC; SGM; FUNMINERAL, 2006. 133 p. (Série Geologia e Mineração, 3).

SILVA, S.C. da; STONE, L.F.; SANTANA, N.M.P. de. **Arroz de terras altas: período limite de semeadura para a região Centro-Oeste**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 2 p. (Comunicado Técnico, 57).

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, n. 2, p. 165-177, 2007.

SPOHR, R.B. **Sequência de cultivos irrigados de verão com arroz de terras altas e milho ou sorgo silagem**. 2003. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

STEINMETZ, S.; MEIRELES, E.J.L.M. Clima. In VIEIRA, N.R.S.; SANTOS, A.B.; SANT'ANA, E.P. (Ed.). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA Arroz e Feijão, 1999. p. 58-87.

YOSHIDA, S.; SATAKE, T.; MACKILL, D.S. **High-temperature stress in rice**. Los Baños: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE, 1981. 20 p. (IRRI RESEARCH PAPER SERIES, 67).

APÊNDICES

APÊNDICE A – Produtividade média potencial e atingível (kg ha^{-1}) simulada pelo modelo ORYZA-DSSAT para os solos tipo 1, 2 e 3 das 26 localidades selecionadas no Estado de Goiás

(continua)

APÊNDICE A – Produtividade média potencial e atingível (kg ha^{-1}) simulada pelo modelo ORYZA-DSSAT para os solos tipo 1, 2 e 3 das 26 localidades selecionadas no Estado de Goiás

(continuação)

APÊNDICE A – Produtividade média potencial e atingível (kg ha^{-1}) simulada pelo modelo ORYZA-DSSAT para os solos tipo 1, 2 e 3 das 26 localidades selecionadas no Estado de Goiás

(continuação)

APÊNDICE A – Produtividade média potencial e atingível (kg ha^{-1}) simulada pelo modelo ORYZA-DSSAT para os solos tipo 1, 2 e 3 das 26 localidades selecionadas no Estado de Goiás

(continuação)

APÊNDICE A – Produtividade média potencial e atingível (kg ha^{-1}) simulada pelo modelo ORYZA-DSSAT para os solos tipo 1, 2 e 3 das 26 localidades selecionadas no Estado de Goiás

(continuação)

APÊNDICE A – Produtividade média potencial e atingível (kg ha^{-1}) simulada pelo modelo ORYZA-DSSAT para os solos tipo 1, 2 e 3 das 26 localidades selecionadas no Estado de Goiás

(continuação)

APÊNDICE A – Produtividade média potencial e atingível (kg ha^{-1}) simulada pelo modelo ORYZA-DSSAT para os solos tipo 1, 2 e 3 das 26 localidades selecionadas no Estado de Goiás

(continuação)

Decêndios do ano

APÊNDICE A – Produtividade média potencial e atingível (kg ha^{-1}) simulada pelo modelo ORYZA-DSSAT para os solos tipo 1, 2 e 3 das 26 localidades selecionadas no Estado de Goiás

(continuação)

APÊNDICE A – Produtividade média potencial e atingível (kg ha^{-1}) simulada pelo modelo ORYZA-DSSAT para os solos tipo 1, 2 e 3 das 26 localidades selecionadas no Estado de Goiás

(conclusão)

Legenda: Aragarças (a); Catalão (b); Formosa (c); Goiás (d); Ipameri (e); Itumbiara (f); Jataí (g); Pirenópolis (h); Posse (i); Rio Verde (j); Santo Antônio de Goiás (k); Anápolis (l); Aruanã (m); Bom Jesus de Goiás (n); Caiapônia (o); Caldas Novas (p); Cristalina (q); Goiânia (r); Luziânia (s); Monte Alegre de Goiás (t); Morrinhos (u); Paraúna (v); Quirinópolis (w); Varjão (x); Faina (y); Porangatu (z)

ANEXOS

ANEXO A – Classificação do risco climático em baixo (B), médio (M) e alto (A) para cada decêndio do ano baseado na probabilidade de ocorrência do ISNA ponderado da cultura do arroz de terras altas em Anápolis, GO

[illegible]

ANEXO B – Classificação do risco climático em baixo (B), médio (M) e alto (A) para cada decêndio do ano baseado na probabilidade de ocorrência do ISNA ponderado da cultura do arroz de terras altas em Aragarças, GO

[illegible]

ANEXO D – Classificação do risco climático em baixo (B), médio (M) e alto (A) para cada decêndio do ano baseado na probabilidade de ocorrência do ISNA ponderado da cultura do arroz de terras altas em Catalão, GO

[illegible]

[illegible]

[illegible]

ANEXO G

Tabela 1 – Classificação dos decêndios do ano em apto (A), marginal (M) e inapto (I) de acordo com a probabilidade de a produtividade simulada ser maior do que o custo de produção em kg por hectares para a agricultura familiar em Anápolis, GO

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	A	A	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	I	I	I	I	I	M	M	M	A	A	M	M	M	M	M	M	A	M
2	I	I	I	I	M	M	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	I	I	M	M	A	M	M	A	A	A	A	A	A	A	A	M	A	A

Tabela 2 – Classificação dos decêndios do ano em apto (A), marginal (M) e inapto (I) de acordo com a probabilidade de a produtividade simulada ser maior do que o custo de produção em kg por hectares para a agricultura com maior nível tecnológico em Anápolis, GO

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I	I	I	M	A	A	M	A	M	M	M	M	M	M
3	I	I	I	I	I	I	I	M	A	M	A	A	M	M	M	M	M	M

ANEXO H

Tabela 1 – Classificação dos decêndios do ano em apto (A), marginal (M) e inapto (I) de acordo com a probabilidade de a produtividade simulada ser maior do que o custo de produção em kg por hectares para a agricultura familiar em Aragarças, GO

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	I	I	I	I	I	I	I	M	I	M	A	A	A	M	A	M	I	I
2	I	I	I	I	I	I	A	M	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	I	I	I	I	I	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Tabela 2 – Classificação dos decêndios do ano em apto (A), marginal (M) e inapto (I) de acordo com a probabilidade de a produtividade simulada ser maior do que o custo de produção em kg por hectares para a agricultura com maior nível tecnológico em Aragarças, GO

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	M	M	M	M	M	M	M	I
3	I	I	I	I	I	I	I	I	M	M	M	A	A	A	A	M	A	M

ANEXO J

Tabela 1 – Classificação dos decêndios do ano em apto (A), marginal (M) e inapto (I) de acordo com a probabilidade de a produtividade simulada ser maior do que o custo de produção em kg por hectares para a agricultura familiar em Catalão, GO

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	A	A	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	I	I	I	I	I	I	I	M	A	A	A	M	M	M	I	M	I	I
2	I	I	I	I	I	I	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	M
3	I	I	I	I	M	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Tabela 2 – Classificação dos decêndios do ano em apto (A), marginal (M) e inapto (I) de acordo com a probabilidade de a produtividade simulada ser maior do que o custo de produção em kg por hectares para a agricultura com maior nível tecnológico em Catalão, GO

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I	I	I	I	M	A	A	A	M	M	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I	I	M	M	M	A	A	A	A	M	M	M	M	M

ANEXO K

Tabela 1 – Classificação dos decêndios do ano em apto (A), marginal (M) e inapto (I) de acordo com a probabilidade de a produtividade simulada ser maior do que o custo de produção em kg por hectares para a agricultura familiar em Formosa, GO

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	A	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	I	I	I	I	I	M	A	A	A	A	A	M	M	M	M	M	I	I
2	I	I	I	I	I	M	A	A	A	A	A	A	A	A	M	A	M	M
3	I	I	I	M	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Tabela 2 – Classificação dos decêndios do ano em apto (A), marginal (M) e inapto (I) de acordo com a probabilidade de a produtividade simulada ser maior do que o custo de produção em kg por hectares para a agricultura com maior nível tecnológico em Formosa, GO

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I	I	I	M	A	A	A	M	M	M	M	I	I	I
3	I	I	I	I	I	I	M	M	A	A	A	A	A	M	M	M	M	M

ANEXO L

Tabela 1 – Classificação dos decêndios do ano em apto (A), marginal (M) e inapto (I) de acordo com a probabilidade de a produtividade simulada ser maior do que o custo de produção em kg por hectares para a agricultura familiar em Porangatu, GO

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	M	A	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	A	A	A	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	I	I	I	I	I	I	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
2	I	I	I	I	I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	I	I	I	I	M	M	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Tabela 2 – Classificação dos decêndios do ano em apto (A), marginal (M) e inapto (I) de acordo com a probabilidade de a produtividade simulada ser maior do que o custo de produção em kg por hectares para a agricultura com maior nível tecnológico em Porangatu, GO

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Tipo Solo	Decêndio do ano																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I	I	I	I	I	M	M	I	I	M	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I	I	I	M	M	M	A	M	A	M	M	M	M	M