

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**DESENVOLVIMENTO DO ARROZ E DO ARROZ  
VERMELHO: MODELAGEM E RESPOSTA À  
MUDANÇA CLIMÁTICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Isabel Lago**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2008**

**DESENVOLVIMENTO DO ARROZ E DO ARROZ  
VERMELHO: MODELAGEM E RESPOSTA À MUDANÇA  
CLIMÁTICA**

**por**

**Isabel Lago**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de  
Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em  
Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),  
como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Agronomia**

**Orientador: Prof. Nereu Augusto Streck**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2008**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**DESENVOLVIMENTO DO ARROZ E DO ARROZ VERMELHO:  
MODELAGEM E RESPOSTA À MUDANÇA CLIMÁTICA**

Elaborada por  
**Isabel Lago**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Agronomia**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Nereu Augusto Streck, PhD.**  
(Presidente/Orientador)

---

**Luciano Streck, Dr. (UERGS)**

---

**Nelson Diehl Kruse, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 28 de fevereiro de 2008.

**Dedico com muito carinho e gratidão aos meus  
pais Geraldo Lago e Idalina Sari Lago.**

## AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade da realização do mestrado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao meu orientador, professor Nereu Augusto Streck, um agradecimento especial pelos conhecimentos transmitidos, pela amizade e dedicação.

Aos professores Arno Bernardo Heldwein, Nelson Diehl Kruse e Sandro Luis Petter Medeiros pela co-orientação e amizade.

Ao pesquisador Elio Marcolin do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) pela grande colaboração e atenção durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e amigos Leosane, Gizelli, Hamilton, Lidiane, Simone, Flávia, Cátia, Felipe, Edenir, Luana e Ana Paula que trabalharam muito durante a condução dos experimentos e coleta dos dados.

Ao colega e amigo Cleber pelo grande auxílio na geração dos cenários de mudança climática e nas simulações.

Aos funcionários do Departamento de Fitotecnia pelo auxílio na instalação e condução dos experimentos.

Aos meus pais Geraldo e Idalina por todo o apoio e pelo exemplo de vida.

Aos meus irmãos Aderaldo e Adriano pelo grande incentivo e amizade.

Ao meu noivo Julinho por todo o carinho e compreensão durante os dias de trabalho na condução dos experimentos e na elaboração da dissertação.

A amiga Gláucia pelo companheirismo, amizade e descontração durante os dias de trabalho.

A todos os amigos do Departamento de Fitotecnia pela amizade e descontração.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação o meu sincero agradecimento.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado

**Programa de Pós-Graduação em Agronomia**

Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **DESENVOLVIMENTO DO ARROZ E DO ARROZ VERMELHO: MODELAGEM E RESPOSTA À MUDANÇA CLIMÁTICA**

AUTORA: Isabel Lago

ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

Local e data da defesa: Santa Maria, 28 de fevereiro de 2008.

Projeções indicam aumentos de 1,1 a 6,4°C na temperatura do ar até o final do século XXI em vários locais do planeta, incluindo o Brasil. Dentre os processos que poderão ser afetados pelo aumento da temperatura está a duração do ciclo de desenvolvimento das culturas. Nesse sentido, modelos de simulação são ferramentas que nos permitem descrever as possíveis interações que acontecem nos agroecossistemas e suas respostas a cenários de mudança climática. Os objetivos desta dissertação foram (i) simular o desenvolvimento do arroz irrigado e do arroz vermelho comparando um modelo linear (modelo soma térmica) com um modelo não linear (modelo WE) e (ii) avaliar a resposta do desenvolvimento do arroz e do arroz vermelho a cenários de mudança climática em Santa Maria, RS, Brasil, considerando aumentos simétricos e assimétricos nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar. Foram usados dados de um experimento de quatro anos, conduzido durante os anos agrícolas 2003-2004 (5 datas de semeadura), 2004-2005 (5 datas de semeadura), 2005-2006 (3 datas de semeadura) e 2006-2007 (2 datas de semeadura) em Santa Maria, RS, Brasil. As plantas foram cultivadas em baldes de 12 litros durante os quatro anos e em uma área de várzea durante o ano agrícola 2006-2007. Foram usados nove genótipos de arroz cultivado (IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, IRGA 420, BRS 7 TAIM, BR-IRGA 409, EPAGRI 109, um Híbrido e EEA 406) e dois biótipos de arroz vermelho (casca preta aristado - ABHRR e casca amarela aristado - AYHRR). Os dados de desenvolvimento disponíveis e usados neste estudo foram datas de emergência (EM), diferenciação da panícula (R1), antese (R4) e todos os grãos com casca marrom (R9) coletados em cinco plantas por repetição em cada data de semeadura. Os dados coletados nos anos agrícolas 2004-2005 e 2005-2006 foram usados para estimar os coeficientes dos dois modelos e os dados coletados nos anos agrícolas 2003-2004 e 2006-2007 foram usados como dados independentes para a avaliação dos modelos. Os cenários climáticos de 100 anos de 0°C, +1°C, +2°C, +3°C, +4°C e +5°C, com aumentos simétricos e assimétricos nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar, foram gerados com Weather Generator LARS-WG usando uma base de dados observados de 1969-2003. As datas dos estágios de desenvolvimento, nos cenários de mudança climática, foram estimadas com o modelo não linear (modelo WE). A raiz do quadrado médio do erro (RMSE), para todos os estágios de desenvolvimento, variou de 4,9 a 10,5 dias com o modelo da soma térmica e de 4,3 a 10,9 dias com o modelo WE. O modelo WE teve melhores previsões em seis dos onze genótipos, com melhores previsões para o estágio mais precoce (R1) do que para os mais tardios (R4 e R9). A duração da fase EM-R1 em geral diminuiu, enquanto que a duração das fases R1-R4 e R4-R9 geralmente aumentaram, com o aumento da temperatura nos cenários de mudança climática. A resposta simulada do desenvolvimento do arroz a elevação da temperatura não foi a mesma quando o aumento na temperatura mínima e máxima foi simétrico ou assimétrico. Os atuais genótipos de arroz podem ser menos competitivos com o arroz vermelho em climas futuros.

**Palavras-chaves:** *Oryza sativa*; fenologia; modelagem; aquecimento global; simulação.

## ABSTRACT

Master of Science Dissertation  
Graduate Program in Agronomy  
Universidade Federal de Santa Maria – RS, Brazil

### RICE AND RED RICE DEVELOPMENT: MODELING AND RESPONSE TO CLIMATE CHANGE

AUTHOR: Isabel Lago

ADVISOR: Nereu Augusto Streck

Location and date of presentation: Santa Maria, February 28<sup>th</sup>, 2008

Increases of 1.1 to 6.4°C in temperature are projected by the end of the XXI century in several locations, including Brazil. Among processes that may be affected by increasing temperatures is the duration of the developmental cycle of crops. Simulation models are tools that allow to describe the possible interactions that take place in agroecosystems and their response to climate change scenarios. The objectives of this dissertation were (i) to simulate the development of irrigated rice and red rice comparing a linear (thermal time model) with a non-linear (WE model) model, and (ii) to investigate the response of the development of rice and red rice to climate change scenarios in Santa Maria, RS, Brazil, considering symmetric and asymmetric increases in minimum and maximum daily air temperatures. Data from a four-year experiment conducted during the 2003-2004 (five sowing dates), 2004-2005 (five sowing dates), 2005-2006 (three sowing dates), and 2006-2007 (two sowing dates) growing seasons in Santa Maria, RS, Brazil were used. Plants were grown in 12 liter pots during the four years, and in a paddy rice field during the 2006-2007 growing season. Nine cultivated rice genotypes (IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, IRGA 420, BRS 7 TAIM, BR-IRGA 409, EPAGRI 109, an Hybrid, and EEA 406), and two red rice biotypes (awned blackhull-ABHRR, and awned yellowhull-AYHRR) were used. Developmental data available and used in this study were dates of emergence (EM), panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) recorded in five plants per replication in each sowing date. Data collected in the 2004-2005 and 2005-2006 growing season were used to estimate the coefficients of the two models and data collected in the 2003-2004 and 2006-2007 growing season were used as an independent data set for models evaluation. A one hundred years climate scenarios of 0°C, +1°C, +2°C, +3°C, +4°C, and +5°C, with symmetric and asymmetric increases in minimum and maximum daily air temperatures were created with the LARS-WG Weather Generator using a 1969-2003 database. Date of developmental stages in each climate scenario was calculated with the non-linear model (WE model). The root mean square error (RMSE) for all developmental stages varied from 4.9 to 10.5 days with the thermal time model and from 4.3 to 10.9 days with the WE model. The WE model gave better predictions in six out of eleven genotypes, with better predictions for early (R1) than for later (R4 and R9) developmental stages. The duration of the EM-R1 phase in general decreased whereas the duration of the R1-R4 and R4-R9 phases most often increased as temperature increased in the climate change scenarios. The simulated rice development response to elevated temperature was not the same when the increase in minimum and maximum temperature was symmetric or asymmetric. Current rice genotypes may be less competitive with red rice in future climates.

**Key words:** *Oryza sativa*; phenology; modeling; global warming; simulation.

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

- TABELA 1 - Growing seasons and sowing dates of irrigated rice and red rice used in this study. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.....47
- TABELA 2 - Irrigated rice genotypes and red rice biotypes used in this study. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.....48
- TABELA 3 - Monthly average of minimum and maximum air temperature, and mean sunshine duration ( $\text{h day}^{-1}$ ) during the experimental period in the four growing seasons at Santa Maria, RS, Brazil.....49
- TABELA 4 - Coefficients of the thermal time model ( $\text{ATT}$ ,  $^{\circ}\text{C day}$ ) and the Wang & Engel model ( $r_{\text{max,v}}$ ,  $r_{\text{max,r}}$ ,  $r_{\text{max,gf}}$ ,  $\text{day}^{-1}$ ) for the developmental phases emergence to panicle differentiation (EM-R1), panicle differentiation to anthesis (R1-R4) and anthesis to all grains with brown hulls (R4-R9) in nine irrigated rice genotypes and two red rice biotypes. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.....50
- TABELA 5 - Root mean square error (RMSE, days), systematic mean square error ( $\text{MSE}_s$ ), and unsystematic mean square error ( $\text{MSE}_u$ ) using the thermal time model (TT) and the WE model to predict panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hull (R9) of irrigated rice genotypes and red rice biotypes grown in pots. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.....51
- TABELA 6 - Predicted minus observed day of the year of panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) with the WE model for two irrigated rice genotypes grown in pots and in a paddy rice field sown on 13/12/2006. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.....52



## CAPÍTULO II

TABELA 1 - One hundred years scenarios of increased temperature used in the study. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.....74

TABELA 2 - Coefficients of the Wang & Engel model ( $r_{\max,v}$ ,  $r_{\max,r}$ ,  $r_{\max,gf}$ ) for the developmental phases emergence to panicle differentiation (EM-R1), panicle differentiation to anthesis (R1-R4) and anthesis to all grains with brown hulls (R4-R9) in nine irrigated rice genotypes and red rice biotypes. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil. After Lago (2008, chapter 1).....75

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

FIGURA 1 - Schematic representation of the rice and red rice developmental cycle and the WE model used in this study. EM = emergence, R1 = panicle differentiation, R4 = anthesis, R9 = All grains with brown hulls,  $r$  = daily developmental rate,  $r_{\max,v}$  = daily maximum developmental rate during vegetative phase,  $r_{\max,r}$  = daily maximum developmental rate during reproductive phase,  $r_{\max,gf}$  = daily maximum developmental rate during the grain filling phase,  $f(T)$  = temperature response function.....53

FIGURA 2 - Thermal time method and temperature response function [ $f(T)$ ] of the WE model for developmental phases of irrigated rice and red rice. For the *indica* rice genotypes (IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, IRGA 420, BRS 7 TAIM, BR-IRGA 409, EPAGRI 109 and Hybrid) the cardinal temperatures were:  $T_{\min} = 11^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{opt}}=30^{\circ}\text{C}$ , and  $T_{\max}= 40^{\circ}\text{C}$  for the vegetative phase (EM-R1) (a);  $T_{\min} = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{opt}}=25^{\circ}\text{C}$ , and  $T_{\max}= 35^{\circ}\text{C}$  for the reproductive phase (R1-R4) (b);  $T_{\min} = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{opt}}=23^{\circ}\text{C}$ , and  $T_{\max}= 35^{\circ}\text{C}$  for the grain filling phase (R4-R9) (c). For the *japonica* genotype (EEA 406) and the two red rice biotypes the cardinal temperatures were:  $T_{\min} = 6^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{opt}}=30^{\circ}\text{C}$ , and  $T_{\max}= 35^{\circ}\text{C}$  for the vegetative phase (EM-R1) (d);  $T_{\min} = 13^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{opt}}=25^{\circ}\text{C}$  and  $T_{\max}= 30^{\circ}\text{C}$  for the reproductive phase (R1-R4) (e);  $T_{\min} = 13^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{opt}}=23^{\circ}\text{C}$ , and  $T_{\max}= 30^{\circ}\text{C}$  for the grain filling phase (R4-R9) (f).....54

FIGURA 3 - The predicted versus observed day of the year (DOY) of panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) of very early and early irrigated rice genotypes grown in pots with the thermal time model (a), (b), (c) and (d), and with the WE model (e), (f), (g) and (h). The solid line is the 1:1 line. RMSE = root mean square error. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil, 2003-2004 and 2006-2007 growing season.....55

FIGURA 4 - The predicted versus observed day of the year (DOY) of panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) of mid late and late irrigated rice genotypes grown in pots with the thermal time model (a), (b) and (c), and with the WE model (d), (e), and (f). The solid line is the 1:1 line. RMSE = root mean square error. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil, 2003-2004 and 2006-2007 growing season.....56

FIGURA 5 - The predicted versus observed day of the year (DOY) of panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) of two irrigated rice genotypes (Hybrid and EEA 406) and two red rice biotypes (Awned blackhull red rice – ABHRR, and Awned yellowhull red rice – AYHRR) grown in pots with the thermal time model (a), (b), (c) and (d), and with the WE model (e), (f), (g) and (h). The solid line is the 1:1 line. RMSE = root mean square error. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil, 2003-2004 and 2006-2007 growing season.....57

FIGURA 6 - The predicted versus observed day of the year (DOY) of panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) of two irrigated rice genotypes grown in a paddy rice field with the thermal time model (a), and (b), and with the WE model (c) and (d). The solid line is the 1:1 line. RMSE = root mean square error. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil, 2003-2004 and 2006-2007 growing season.....58

## CAPÍTULO II

FIGURA 1 – Deviations (in days) of the duration of EM-R1, R1-R4, R4-R9, and EM-R9 developmental phases of the very early and early irrigated rice genotypes IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, and IRGA 420 simulated for climate change scenarios of +1°C, +2°C, +3°C, +4°C, and +5°C related to the scenario with no change in temperature. Scenarios are numbered according to the increase of temperature (e.g. 1 = +1°C) and the letter associated with each scenario relate to symmetric (a) and asymmetric (b) changes in minimum and maximum daily temperature according to Table 1. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil. EM=emergence, R1=panicle differentiation, R4=anthesis, R9=all grains with brown hulls. Error bars represent one standard deviation of the mean of 100 years of simulations.....76

FIGURA 2 – Deviations (in days) of the duration of EM-R1, R1-R4, R4-R9, and EM-R9 developmental phases of the mid late and late irrigated rice genotypes BRS 7 TAIM, BR-IRGA 409, and EPAGRI 109 simulated for climate change scenarios of +1°C, +2°C, +3°C, +4°C, and +5°C related to the scenario with no change in temperature. Scenarios are numbered according to the increase of temperature (e.g. 1 = +1°C) and the letter associated with each scenario relate to symmetric (a) and asymmetric (b) changes in minimum and maximum daily temperature according to Table 1. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil. EM=emergence, R1=panicle differentiation, R4=anthesis, R9=all grains with brown hulls. Error bars represent one standard deviation of the mean of 100 years of simulations.....77

FIGURA 3 – Deviations (in days) of the duration of EM-R1, R1-R4, R4-R9, and EM-R9 developmental phases of the irrigated rice genotypes Hybrid and EEA 406, and red rice biotypes ABHRR and AYHRR simulated for climate change scenarios of +1°C, +2°C, +3°C, +4°C, and +5°C related to the scenario with no change in temperature. Scenarios are numbered according to the increase of temperature (e.g. 1 = +1°C) and the letter associated with each scenario relate to symmetric (a) and asymmetric (b) changes in minimum and maximum daily temperature according to Table 1. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil. EM=emergence, R1=panicle differentiation, R4=anthesis, R9=all grains with brown hulls. Error bars represent one standard deviation of the mean of 100 years of simulations.....78

FIGURA 4 - Duration (in days) of the EM-R1 (A), R1-R4 (B), R4-R9 (C), and EM-R9 (D) developmental phases of nine rice genotypes and two red rice biotypes simulated for the no change climate scenario and the +1°C (1) and +5°C (5) climate change scenarios with symmetric (a) and asymmetric (b) change in minimum and maximum daily temperatures. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil. EM=emergence, R1=panicle differentiation, R4=anthesis, R9= all grains with brown hulls. Error bars represent one standard deviation of the mean of 100 years of simulations.....79

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
<b>2.1 Arroz irrigado e arroz vermelho</b> .....	16
<b>2.2 Desenvolvimento vegetal</b> .....	18
<b>2.3 Simulação do desenvolvimento vegetal: modelos lineares e não lineares</b> .....	20
<b>2.4 Mudança climática, aquecimento global e os agroecossistemas</b> .....	22
<b>2.5 Mudança climática e a fenologia das culturas agrícolas</b> .....	23
<b>2.6 Simulação do desenvolvimento vegetal em cenários de mudança climática</b> .....	24
<b>3 CAPÍTULO I - Simulating the development of flood irrigated rice and red rice: comparing a linear with a non-linear model</b> .....	26
<b>1. Introduction</b> .....	28
<b>2. Materials and Methods</b> .....	30
<b>3. Results</b> .....	36
<b>4. Discussion</b> .....	38
<b>5. Conclusions</b> .....	40
<b>References</b> .....	40
<b>4 CAPÍTULO II - Assessing climate change impacts on the development of rice and red rice</b> .....	59
<b>Introduction</b> .....	62
<b>Material and Methods</b> .....	63
<b>Results and discussion</b> .....	66
<b>Conclusions</b> .....	70
<b>References</b> .....	70
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	80
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	83
<b>7 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b> .....	84
<b>8 REFERÊNCIAS</b> .....	85

# 1 INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma cultura de elevada importância social e econômica, sendo um dos três principais cereais produzidos no mundo e considerado o alimento básico para mais da metade da população mundial (FAO, 2007). O Brasil está classificado como o primeiro país não asiático tanto em termos de volume produzido (11,2 milhões de t ano<sup>-1</sup>), quanto em consumo (13 milhões de t ano<sup>-1</sup>) de arroz (CORRÊA et al., 2007). O Rio Grande do Sul (RS) é o estado que mais produz arroz irrigado no Brasil, tendo cultivado em torno de 1 milhão de hectares na safra 2006-2007, com uma produtividade média de 6,7 t ha<sup>-1</sup> (IRGA, 2007).

O rendimento do arroz irrigado no RS está abaixo do potencial obtido em áreas experimentais, o que se deve, principalmente, ao controle ineficiente das plantas daninhas, entre as quais, destaca-se o arroz vermelho (*Oryza sativa* L.) como a que mais limita o potencial produtivo do arroz no Estado (AGOSTINETTO et al., 2001; MARCHEZAN et al., 2004). O arroz vermelho pertence à mesma espécie do arroz cultivado, o que dificulta seu controle. A presença desta planta daninha em áreas cultivadas resulta em competição intra-específica com o arroz cultivado pelos recursos do meio, causa acamamento e aumenta o custo de produção devido à necessidade de aumentar o número de aplicações de herbicidas (MENEZES et al., 2002), sendo importante melhorar as técnicas de manejo para obter melhor eficiência no controle da mesma.

A caracterização do desenvolvimento das culturas é importante, pois as práticas de manejo serão mais eficientes se realizadas em determinados estágios do desenvolvimento. Um exemplo é a adubação nitrogenada em cobertura no arroz que deve ser realizada no início do perfilhamento e na diferenciação da panícula (SOSBAI, 2007). O principal elemento meteorológico que afeta o desenvolvimento da planta de arroz é a temperatura (HODGES, 1991; GAO et al., 1992; INFELD et al., 1998). Nesse sentido, modelos matemáticos são importantes ferramentas para a estimativa da data dos principais estágios de desenvolvimento das culturas. A influência da temperatura sobre o desenvolvimento vegetal pode ser representada por modelos lineares, como os que usam o conceito da soma térmica (INFELD et al., 1998; STEINMETZ et al., 2004), e por modelos não lineares, como o modelo de Wang; Engel (1998).

O possível aumento da temperatura do planeta Terra, também referido como aquecimento global, tem sido tema de freqüentes debates especialmente após a liberação do relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) em 2007. Embora não haja unanimidade no valor do aumento na temperatura global devido ao aumento da concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico e do ceticismo de um grupo de cientistas acerca da real existência do aquecimento global, estudos indicam um provável aumento de 1,1 a 6,4°C na temperatura global até o final do século XXI dependendo da região do Planeta (IPCC, 2007). Também importante no contexto do aquecimento global são as evidências apontadas por alguns autores (PENG et al., 2004; STEINMETZ et al., 2005; MARQUES et al., 2005) e pelo relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC, 2007) de que a temperatura mínima diária do ar está aumentando mais que a temperatura máxima diária, o que nos encaminha para um futuro com noites mais quentes.

Em resposta ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico, num primeiro momento, espera-se aumento da taxa de crescimento das plantas. No entanto, se o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> vier acompanhado de aumento da temperatura do ar, especialmente das temperaturas noturnas, poderá não haver aumento no crescimento e produtividade das culturas devido ao encurtamento do ciclo e aumento da respiração do tecido vegetal (SIQUEIRA et al., 2001; TAIZ; ZEIGER, 2004). Portanto, em estudos do impacto da mudança climática sobre os agroecossistemas, é importante quantificar o efeito do aumento de temperatura do ar (aquecimento global) sobre o desenvolvimento vegetal e assim caracterizar as possíveis mudanças no ciclo das culturas em diferentes cenários climáticos.

Estes estudos podem ser realizados com o uso de modelos matemáticos que são ferramentas que permitem descrever as possíveis interações que acontecem nos agroecossistemas e suas respostas a cenários de mudança climática. Esta dissertação está dividida em dois capítulos, tendo como objetivos:

1. Simular o desenvolvimento do arroz irrigado e do arroz vermelho comparando um modelo linear com um modelo não linear.
2. Avaliar a resposta do desenvolvimento do arroz irrigado e do arroz vermelho a cenários de mudança climática em Santa Maria, RS, considerando aumentos simétricos e assimétricos nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Arroz irrigado e arroz vermelho

O arroz (*Oryza sativa* L.) constitui, juntamente com o trigo e o milho, o grupo dos três principais cereais produzidos no mundo (FAO, 2007). É considerado o principal alimento para mais da metade da população mundial, correspondendo a 18% das calorias e 12% das proteínas da dieta básica. O consumo médio individual de arroz, em nível mundial, é de 60 kg pessoa<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Os países asiáticos apresentam médias de consumo elevadas, entre 100 e 150 kg pessoa<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, enquanto na América Latina o consumo é em média 30 kg pessoa<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, destacando-se o Brasil com um consumo de 45 kg pessoa<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (MAGALHÃES Jr. et al., 2004). O consumo observado nos vários países pode estar vinculado a área cultivada com arroz no mundo, que anualmente chega à cerca de 150 milhões de hectares (USDA, 2005), ou mesmo a sua ampla distribuição geográfica, comparável a poucas culturas, estendendo-se desde o nordeste da China (53°N) até o Sul da Austrália (35°S) (CARMONA; BERLATO, 2002).

O Brasil está classificado como o primeiro país não asiático em produção (11,2 milhões de t ano<sup>-1</sup>) e no consumo (13 milhões de t ano<sup>-1</sup>) de arroz no mundo (CORRÊA et al., 2007). O Estado do Rio Grande do Sul (RS) é o maior produtor de arroz da Federação, representando 77% do arroz irrigado colhido no país (AZAMBUJA et al., 2004), com uma área cultivada de aproximadamente 1 milhão de hectares e uma produtividade média de 6,7 t ha<sup>-1</sup> na safra 2006-2007 (IRGA, 2007).

A produtividade média de arroz no RS está abaixo da produtividade alcançada em lavouras que adotam alto nível tecnológico e do potencial produtivo alcançado em áreas experimentais que é de 11 a 12 t ha<sup>-1</sup> (LOPES et al., 2005). Dentre os fatores que limitam o potencial produtivo da cultura do arroz no Estado, destaca-se a alta infestação com arroz vermelho (*Oryza sativa* L.), a principal planta daninha de áreas cultivadas com arroz irrigado por inundação (MARCHEZAN, 1994; AGOSTINETTO et al., 2001; MARCHEZAN et al., 2004).

O degrane natural e o elevado grau de dormência das sementes de arroz-vermelho dificultam o seu controle (NOLDIN et al., 1999). As sementes de arroz vermelho apresentam dormência, sendo a intensidade e duração desta, variáveis com o biótipo e com as condições



ambientais (temperatura, umidade, etc.). A dormência permite que ocorra a germinação em determinados períodos do ano, em resposta a sensibilidade da semente aos fatores ambientais, o que é uma característica evolutiva favorável especialmente às plantas daninhas. A dormência de sementes, aliada à capacidade de persistir viável no solo, dificultam o controle, além de facilitar a reinfestação e a contínua realimentação do banco de sementes do solo (DELATORRE, 1999).

O arroz vermelho é considerado a planta daninha mais limitante ao aumento da produtividade, pois as plantas apresentam mesma demanda, em momentos próximos ou iguais pelos mesmos recursos (KWON et al., 1991). Dessa forma, o arroz vermelho compete com o cultivado especialmente por luz, e, dependendo das circunstâncias, também por água e nutrientes. Essa competição ocorre por pertencerem a mesma espécie botânica, e assim as condições edafoclimáticas que favorecem o arroz cultivado geralmente favorecem o arroz vermelho (AGOSTINETTO et al., 2001). Além da competição por recursos do meio, podem ocorrer prejuízos variáveis e de difícil quantificação devido ao acamamento que, geralmente, ocorre em lavouras com alta infestação de arroz vermelho (MARCHEZAN, 1994).

As perdas de rendimento causadas pela presença de arroz vermelho variam em função da densidade de plantas da planta daninha e da habilidade competitiva do genótipo de arroz cultivado. Estimativas indicam que as perdas diretas decorrentes da competição com arroz vermelho possam atingir 20% da produção de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (MARCHEZAN et al., 2004). Segundo Diarra et al. (1985), a presença de cinco plantas de arroz vermelho  $m^{-2}$  reduz o rendimento de grãos do arroz em aproximadamente 22%. Mesmo após a colheita, a presença do arroz vermelho pode ser prejudicial, pois interfere no processo de beneficiamento, aumentando o período de secagem e de polimento dos grãos, devido a cor avermelhada do pericarpo, podendo aumentar a percentagem de grãos quebrados (MARCHEZAN, 1994; MENEZES et al., 1997).

Botanicamente, o arroz vermelho pertence à mesma espécie do arroz cultivado (*Oryza sativa* L.). No entanto, possui características morfológicas que o distingue do arroz cultivado. Dentre essas características destaca-se uma maior estatura de planta, alta capacidade de perfilhamento, colmos mais finos, folhas de cor verde mais claro e decumbentes e ciclo mais longo. Além disso, apresentam degrane mais precoce das espiguetas, maior dormência das sementes, a cariopse tem pericarpo de cor vermelha, com forte aderência da pálea e lema ao pericarpo, podendo estas ter variação de coloração ou pilosidade, presença ou não de arista (DIARRA et al., 1985).

Devido à possibilidade de cruzamento natural entre o arroz vermelho e o arroz cultivado, que pode variar de 1% até 52% (LANGEVIN et al., 1990), surgem plantas com características morfológicas semelhantes ao arroz cultivado, mas com pericarpo vermelho, tornando difícil a sua diferenciação pelos laboratórios de análise de sementes e pelos técnicos de campo, dificultando ainda mais o seu controle (MARCHEZAN, 1994). Além disso, um fator importante a ser considerado é que os descendentes desses cruzamentos naturais além de adquirirem características morfológicas similares aos genótipos modernos de arroz cultivado, também poderão adquirir duração do ciclo de desenvolvimento similar ao dos genótipos modernos utilizados na área. Outro fator importante a ser considerado são as mudanças climáticas projetadas para o futuro, principalmente na temperatura do ar, já que alguns estudos têm mostrado que a duração de algumas fases e do ciclo total de desenvolvimento do arroz irrigado poderá ser reduzida com o aumento da temperatura (STEINMETZ et al., 2006; TAO et al., 2006, 2008). Nesse sentido, é importante estudar o comportamento do ciclo de desenvolvimento de biótipos de arroz vermelho frente ao aumento da temperatura, pois a capacidade competitiva do arroz vermelho poderá ser alterada.

## **2.2 Desenvolvimento vegetal**

Algumas vezes desenvolvimento é confundido com crescimento. Crescimento e desenvolvimento vegetal são processos independentes que podem ocorrer simultaneamente ou não. A definição de crescimento envolve o aumento irreversível de dimensões físicas do vegetal como área, comprimento, largura, altura, volume ou diâmetro de órgãos, e não deve ser confundido com desenvolvimento vegetal. O desenvolvimento vegetal refere-se a processos que envolvem diferenciação celular, iniciação (morfogênese) e aparecimento de órgãos estendendo-se até a senescência da cultura (HODGES, 1991; STRECK et al., 2003). Um estágio de desenvolvimento é, geralmente, caracterizado pela data de aparecimento de um órgão na planta, enquanto o intervalo de tempo entre dois estágios de desenvolvimento pode ser chamado de fase de desenvolvimento (STRECK et al., 2003). O ciclo de desenvolvimento do arroz irrigado tem sido dividido em três fases: a fase vegetativa que vai da emergência até a diferenciação da panícula ou “ponto de algodão”; a fase reprodutiva que vai da diferenciação da panícula até a antese; e a fase de enchimento de grãos que vai da antese até a maturação fisiológica (GAO et al., 1992; INFELD et al., 1998).

As fases do ciclo de desenvolvimento do arroz irrigado podem ser influenciadas pela temperatura do ar, sendo esse elemento meteorológico considerado o principal e mais relevante na obtenção de boas respostas na produtividade (HODGES, 1991; GAO et al., 1992; INFELD et al., 1998). Exceção pode ocorrer em alguns locais de cultivo de arroz no mundo, onde a temperatura do ar varia muito pouco (ex.: 26°C a 29°C) durante o período de cultivo e geralmente está próxima a temperatura ótima para o desenvolvimento, nesse caso o fotoperíodo passa a ser o principal fator a afetar o desenvolvimento (FUKAI, 1999).

O arroz é sensível tanto a baixas (menores que 15°C) como a altas (maiores que 35°C) temperaturas do ar, sendo que a sensibilidade varia de acordo com a fase fenológica (STEINMETZ, 2004). De maneira geral, a cultura do arroz irrigado exige temperaturas crescentes até a antese e decrescentes, mas sem reduções bruscas, após a antese. Na fase de pré-floração, quando ocorre a microsporogênese, as plantas são mais sensíveis a baixas temperaturas. Segundo Yoshida (1981), o período de aproximadamente 14 a 7 dias antes da emissão das panículas, período também chamado de emborrachamento, é considerado o mais sensível as baixas temperaturas do ar, seguido pelo período da floração. Buriol et al. (1991) e Steinmetz (2004) citam que o arroz é sensível a temperaturas iguais ou inferiores a 15°C durante a microsporogênese e embriogênese, que segundo Counce et al. (2000) ocorrem no emborrachamento e durante o aparecimento do colar da folha bandeira.

Na fase de pré-floração-floração, poderá ocorrer problemas também devido a temperaturas elevadas. A fase mais sensível a altas temperaturas é a floração, seguida pela fase de pré-floração, aproximadamente nove dias antes da emissão das panículas (STEINMETZ, 2004). Temperaturas máximas iguais a 35°C durante a antese podem causar de 20 a 30% de esterilidade de espiguetas em arroz irrigado (HORIE, 1993; MATSUI et al., 1997). No Rio Grande do Sul, regiões como a Fronteira Oeste, a Depressão Central e a Campanha têm as maiores probabilidades de ocorrência de dias com temperaturas iguais ou superiores a 35°C, sendo janeiro o mês com maior probabilidade de ocorrência, seguido por fevereiro e dezembro (MOTA et al., 1999). Na fase de maturação, as temperaturas ótimas situam-se na faixa de 20°C a 25°C, já que o enchimento de grãos é mais eficiente quando as temperaturas do ar não são tão elevadas (STEINMETZ, 2004).

Assim, cada fase do desenvolvimento do arroz irrigado tem as suas temperaturas cardinais, mínima ( $T_{\min}$ ), ótima ( $T_{ot}$ ) e máxima ( $T_{\max}$ ), sendo que para os genótipos da subespécie *indica* as temperaturas cardinais que tem sido citadas na literatura são:  $T_{\min}=11^{\circ}\text{C}$  (INFELD et al., 1998),  $T_{ot}=30^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\max}=40^{\circ}\text{C}$  (GAO et al., 1992) para a fase vegetativa;  $T_{\min}=15^{\circ}\text{C}$  (BURIOL et al., 1991; STEINMETZ, 2004),  $T_{ot}=25^{\circ}\text{C}$  (PEDRO Jr. et al., 1995) e

$T_{\max}=35^{\circ}\text{C}$  (STEINMETZ, 2004; VENKATARAMAN et al., 2007) para a fase reprodutiva;  $T_{\min}=15^{\circ}\text{C}$  (BURIOL et al., 1991; STEINMETZ, 2004),  $T_{\text{ot}}=23^{\circ}\text{C}$  (VENKATARAMAN et al., 2007) e  $T_{\max}=35^{\circ}\text{C}$  (STEINMETZ, 2004; VENKATARAMAN et al., 2007) para a fase de enchimento de grãos. Os genótipos da subespécie *japonica* podem tolerar temperaturas mínimas e máximas  $5^{\circ}\text{C}$  menor que os genótipos da subespécie *indica*, com a temperatura ótima sendo considerada a mesma (VENKATARAMAN et al., 2007).

### 2.3 Simulação do desenvolvimento vegetal: modelos lineares e não lineares

A simulação do desenvolvimento das culturas agrícolas é importante em modelos de crescimento e rendimento, uma vez que a partição dos fotoassimilados para diferentes órgãos da planta é dependente do estágio de desenvolvimento (GOUDRIAN; VAN LAR, 1994; STRECK et al., 2003). Modelos de simulação do desenvolvimento de plantas também podem ajudar na seleção de cultivares e em práticas do manejo de diferentes culturas agrícolas, como por exemplo, na organização da época de operações no campo como a fertilização, o controle fitossanitário e a colheita (CONNEL et al., 1999; STRECK et al., 2003). Com relação às plantas daninhas, os modelos de desenvolvimento ajudam em estudos para quantificar a interferência da invasora com a cultura e, assim, podem ser uma ferramenta importante no manejo das plantas daninhas na lavoura. Nesse sentido, os modelos também têm sido usados na estimativa de perdas de produtividade em arroz irrigado por interferência da planta daninha arroz vermelho (AGOSTINETTO et al., 2004).

Os modelos de simulação do desenvolvimento do arroz, de maneira geral, podem ser divididos em dois grupos: os lineares, que usam o conceito de soma térmica (ALOCILJA; RITCHIE, 1991; INFELD et al., 1998; STEINMETZ et al., 2004) e os não lineares (GAO et al., 1992; YIN et al., 1995, 1997). Comparar as estimativas obtidas pelos modelos lineares e não lineares de resposta à temperatura pode fornecer subsídios importantes para auxiliar na seleção daquele mais adequado para diferentes aplicações das simulações a que se propõem (XUE, 2000; XUE et al., 2004).

A utilização da soma térmica nos modelos lineares é uma forma de representar a influência da temperatura sobre o desenvolvimento vegetal. A soma térmica, com unidade  $^{\circ}\text{C}$  dia, calculada acumulando-se os graus-dia acima de um valor crítico inferior (temperatura-base), tem como principais vantagens, a simplicidade de cálculo e o fato de ser um melhor descritor do tempo biológico do que dias do calendário civil (GILMORE; ROGERS, 1958;

RUSSELE et al., 1984; MCMASTER; SMIKA, 1988). Apesar de ser bastante utilizada, deve-se mencionar que o conceito da soma térmica está aberto a críticas (XUE et al., 2004). A principal fonte de críticas é o fato de que no cálculo da soma térmica é assumida uma resposta linear entre desenvolvimento e temperatura, o que não é completamente realístico do ponto de vista biológico. A resposta de processos biológicos à temperatura é melhor descrita de forma não linear, considerando-se as temperaturas cardinais (mínima, ótima e máxima) de desenvolvimento, sendo linear apenas em uma faixa pequena entre a temperatura mínima e a temperatura ótima (SHAYKEWICH, 1995; STRECK, 2002, 2003, 2004; STRECK; SCHUH, 2005). Outra crítica encontrada refere-se as diferentes maneiras de calcular os graus-dia na soma térmica, especialmente no que se refere à incorporação da condição da temperatura base (antes ou depois de calcular a temperatura média) o que causa resultados diferentes de soma térmica para o mesmo conjunto de dados (McMASTER; WILHELM, 1997).

A soma térmica tem sido criticada também, pelo fato de que existem vários métodos de cálculo (STRECK et al., 2005), o que pode ser uma limitação para comparar os graus-dia de fases de desenvolvimento das cultivares em diferentes trabalhos. Além disso, a forma mais simples de cálculo da soma térmica, onde se subtrai da temperatura média diária o valor da temperatura base da cultura, também tem sido alvo de discussões, pois essa maneira de cálculo não é completamente realística do ponto de vista biológico, visto que a resposta dos processos biológicos à temperatura, pode ser melhor expressa em termos das três temperaturas cardinais, (temperatura mínima, ótima e máxima) (YIN et al., 1995; STRECK, 2002). Outra fonte de crítica é o fato das temperaturas cardinais geralmente serem consideradas constantes ao longo do ciclo da cultura. Por vezes, essa pressuposição não é adequada, pois tem se verificado que essas temperaturas não são constantes durante o ciclo de desenvolvimento para várias espécies (STRECK et al., 2003; STEINMETZ, 2004; PAULA et al, 2005).

Como alternativa ao modelo da soma térmica, existem os modelos multiplicativos e que empregam funções de resposta não lineares para representar o efeito dos fatores ecológicos (ex.: temperatura do ar) sobre o desenvolvimento vegetal. Um exemplo destes modelos é o modelo de Wang; Engel (1998). Esses modelos multiplicativos são biologicamente mais adequados para representar as interações entre o desenvolvimento das plantas e os fatores ambientais, se comparados a outros modelos, como o aditivo ou o do fator limitante (STRECK et al., 2003). Tem sido demonstrado que modelos não-lineares simularam melhor os eventos de desenvolvimento do que modelos lineares em diferentes culturas, como trigo (XUE et al., 2004), batata (STRECK et al., 2007), melão (STRECK et al., 2006b) e mudas de eucalipto (MARTINS; STRECK, 2007).

## 2.4 Mudança climática, aquecimento global e os agroecossistemas

A polêmica em torno da provável mudança climática e do seu associado aquecimento global foi um tema dominante durante o ano de 2007 em todos os setores da humanidade, principalmente, em função da liberação do quarto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC, 2007). Hoje, o mundo científico se encontra dividido em dois grandes grupos: o grupo que entende que o clima do Planeta já mostra os efeitos antropogênicos e a mudança climática é inevitável, e o grupo dos “céticos do aquecimento global” que não concorda que o aumento do CO<sub>2</sub> atmosférico possa ser o principal responsável pelo incremento anormal de temperatura verificado no Planeta durante a segunda metade do século XX. Esse último grupo baseia seus argumentos no fato de que o incremento de temperatura pode ser o resultado do ciclo natural de aquecimento terrestre e, assim, o aumento do CO<sub>2</sub> seria muito mais a consequência, e não a causa do aquecimento global (TABEAUD, 2007). Esta principal argumentação dos céticos baseia-se na premissa de que o fato da elevação de CO<sub>2</sub> ter correlação positiva com o aumento de temperatura durante o século XX, não considera que existe um atraso no aumento de CO<sub>2</sub> em relação ao aumento de temperatura (McINTYRE; McKITRICK, 2003, 2005; TABEAUD, 2007).

Apesar das duas correntes distintas no meio científico, os dois grupos concordam que o Planeta experimenta um aquecimento, o que aumenta o consenso geral na comunidade científica de que o clima terrestre está em mudança. Durante o século XX a temperatura média da superfície global teve um aumento de  $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  e o maior aumento ocorreu entre 1976 e 2000, sendo que a década de 90 foi considerada a mais quente do último milênio (KERR, 2005; IPCC, 2007).

O aumento na temperatura média global tem sido atribuído ao aumento da concentração dos gases do efeito estufa, dentre eles o dióxido de carbono, o metano e o óxido nítrico. O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é considerado o mais importante gás do efeito estufa de origem antropogênica. A concentração de CO<sub>2</sub> aumentou de 280 ppm no período pré-industrial para 379 ppm em 2005 (IPCC, 2007). Simulações com Modelos de Circulação Geral da Atmosfera-oceano (AOGCMs) projetam aumentos de 1,1 a 6,4°C na temperatura média do ar em vários locais do planeta, incluindo o Brasil (IPCC, 2007). Outros elementos meteorológicos como precipitação, nebulosidade, radiação solar incidente e evaporação apresentam tendências variáveis em função da escala (global ou regional) em que as séries meteorológicas são analisadas e os modelos são aplicados (HULME et al., 1994; THOMAS, 2000).

Estudos em diferentes locais do planeta têm demonstrado que as temperaturas mínimas estão tendo aumentos maiores do que as máximas. Nas Filipinas, Peng et al. (2004) analisando os dados de temperatura do ar do período de 1979 a 2003, observaram que o aumento da temperatura máxima média anual foi de 0,35°C, enquanto que o aumento da mínima média anual foi de 1,13°C, sendo que o incremento na temperatura mínima do ar foi de 1,33°C na estação seca e de 0,80°C na estação chuvosa. Tao et al. (2006) observaram que no período de 1981 a 2000 as temperaturas mínimas aumentaram mais que as máximas em vários locais da China, sendo que a temperatura mínima teve aumentos maiores no norte e menores no sul. Na região de Pelotas no estado do Rio Grande do Sul, Steinmetz et al. (2005) encontraram um aumento da temperatura mínima média anual de 1,01°C, no período de 1893 a 2004, e de 1,66°C no período de 1955 a 2004. Ainda, no Rio Grande do Sul, no período de 1948 a 2004, a tendência de aumento da temperatura mínima média anual, no período de outubro a dezembro, mostrou valores crescentes no sentido leste-oeste do Estado, variando de 0,8°C a 1,8°C (MARQUES et al., 2005).

O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera exerce um efeito positivo sobre as culturas, pois tende a aumentar a taxa de crescimento das plantas, devido ao CO<sub>2</sub> ser o substrato primário para fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2004). Plantas com metabolismo C<sub>3</sub>, como o arroz, são mais beneficiadas pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico do que plantas com metabolismo C<sub>4</sub> (SIQUEIRA et al., 2001; STRECK, 2005). No entanto, se o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver aumento no crescimento e produtividade das culturas devido ao encurtamento do ciclo (BUTTERFIELD; MORISON, 1992; SIQUEIRA et al., 2001) e aumento da respiração de manutenção (TAIZ; ZEIGER, 2004). Portanto, em estudos de impactos da mudança climática sobre os agroecossistemas, deve-se dar especial atenção ao efeito do aumento de temperatura (aquecimento global) no desenvolvimento vegetal e assim caracterizar mudanças no desenvolvimento e conseqüentemente no rendimento das culturas em diferentes cenários meteorológicos.

## **2.5 Mudança climática e a fenologia das culturas agrícolas**

Dentre os processos que poderão ser afetados pelo aquecimento global está a duração da estação de crescimento dos vegetais. Assim, a alteração no calendário fenológico das culturas é um indicador de mudança climática e têm diversas aplicações climatológicas

importantes. Uma diminuição na duração da estação de crescimento poderia resultar, por exemplo, na alteração das datas de semeadura, determinando menores rendimentos de culturas tradicionais que não poderão maturar completamente ou apropriadamente. Entretanto, um aumento na duração da estação de crescimento pode oportunizar a antecipação da data de semeadura, assegurando a completa maturação e, dependendo da disponibilidade de água, pode até possibilitar mais de um cultivo na mesma estação de crescimento (LINDERHOLM, 2006).

As tendências de aumento na temperatura do ar constatadas pela análise de longas séries de dados meteorológicos em alguns locais nas Filipinas e na China já podem ter causado impactos na fenologia e no rendimento do arroz naquela região. Peng et al. (2004), nas Filipinas, constatou um declínio de 10% no rendimento de grãos para cada aumento de 1°C na temperatura mínima da estação de crescimento na estação seca (janeiro – abril) de 1992 a 2003. Tao et al. (2006), analisando dados de fenologia e rendimento do período de 1981 a 2000 no sudeste da China, constataram que as datas de semeadura, antese e maturação do arroz precoce foram antecipadas em 5,2, 6,2 e 3,6 dias/década, respectivamente, sem mudanças significativas no rendimento. Porém, estudos como os citados acima são pouco comuns pela baixa disponibilidade de registro de séries tão longas de dados. Além disso, quando se tem disponíveis séries longas de dados, torna-se difícil explicar os efeitos da tecnologia, manejo, variabilidade meteorológica, insetos, doenças, etc., interferindo na fenologia e no rendimento da cultura durante um longo período de observações (TAO et al., 2006).

## **2.6 Simulação do desenvolvimento vegetal em cenários de mudança climática**

Uma alternativa para estudar os efeitos das mudanças climáticas sobre as culturas agrícolas, seria a realização de experimentos em ambientes controlados com diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> e/ou temperatura do ar. No entanto, esses estudos são difíceis de serem realizados experimentalmente, principalmente, devido à limitação de recursos financeiros e mão-de-obra (ANDRESEN et al., 2001). Dessa forma, os modelos matemáticos são ferramentas que permitem descrever as interações entre a planta/cultura e o ambiente, e podem ser usados em estudos dos impactos da mudança climática sobre os agroecossistemas.

Simulações dos impactos da mudança climática no desenvolvimento e no rendimento do arroz irrigado têm sido realizadas por alguns autores. Matthews et al. (1997), simulando o



rendimento do arroz para as principais regiões produtoras da Ásia, mostrou que em geral, aumentos nos níveis de CO<sub>2</sub> aumentam o rendimento e aumentos na temperatura reduzem o rendimento. O aumento de 4°C na temperatura anulou o efeito do dobro da concentração de CO<sub>2</sub>, causando uma redução estimada de 7,0 e 8,5% no rendimento. Yao et al. (2007) observou que para alguns locais da China, no período de 2071-2090, haveria redução no rendimento de 0,25 a 7,0% sem considerar o efeito do CO<sub>2</sub> nas simulações e aumentos de 5,0 a 20,0% quando o efeito do CO<sub>2</sub> foi considerado. Tao et al. (2008), na China, em simulações sem considerar o aumento de CO<sub>2</sub> obtiveram resultados mostrando que a fase de crescimento do arroz teria 100% de probabilidade de encurtar e o rendimento diminuiria de 6,1 a 18,6%, 13,5 a 31,9% e 23,6 a 40,2% para aumentos de 1, 2 e 3°C na temperatura, respectivamente. Ao considerar o aumento de CO<sub>2</sub>, a fase de crescimento do arroz irrigado teria também 100% de probabilidade de encurtar e as mudanças no rendimento variariam de -10,1 a 3,3%, -16,1 a 2,5% e -19,3 a 0,18% para aumentos de 1, 2 e 3°C na temperatura, respectivamente.

No Brasil, os estudos dos impactos da mudança climática na agricultura têm aumentado nos últimos anos, com estimativas de rendimento diante de cenários de mudança climática obtidos em diversas regiões para as culturas de trigo, milho, soja (SIQUEIRA et al., 1994, 2000 e 2001) e café (ASSAD et al., 2004). Em Santa Maria, Streck; Alberto (2006a) encontraram que um aumento de 2, 3 e 6 °C na temperatura do ar pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO<sub>2</sub> no rendimento de milho, trigo e soja, respectivamente. Ainda em Santa Maria, Streck et al. (2006a) simulando o desenvolvimento da batata, cv. Asterix, em vários cenários de mudança climática verificaram que o aumento da temperatura do ar de 2°C é suficiente para modificar a duração das fases de desenvolvimento da batata. Em simulações para o cultivo de outono foram projetados grandes aumentos na duração da fase emergência-início da tuberização e no ciclo total, se considerado o aumento de temperatura do ar. Contudo, no cultivo de primavera o efeito do aquecimento global foi menor, com projeções de acréscimo na duração da fase emergência-início da tuberização e diminuição no ciclo total.

Para arroz irrigado, no Brasil, foi encontrado apenas um estudo, o qual relaciona o efeito de cenários de aumento da temperatura média do ar sobre a duração da fase emergência-diferenciação da panícula. Os resultados observados indicaram a ocorrência de reduções desta fase com o aumento da temperatura (STEINMETZ et al., 2006). No entanto, o estudo de Steinmetz et al. (2006) utiliza cenários de aumento na temperatura média diária do ar, não considerando, portanto, os efeitos de aumentos maiores na temperatura mínima do que na temperatura máxima diária do ar para o estado do Rio Grande do Sul (MARQUES et al., 2004), além de ter sido estudada apenas a fase vegetativa da cultura.

### **3 CAPÍTULO I**

TRABALHO A SER ENVIADO PARA PUBLICAÇÃO:

**Simulating the development of flood irrigated rice and red  
rice: comparing a linear with a non-linear model**

**Agricultural and Forest Meteorology, 2008**

## **Simulating the development of flood irrigated rice and red rice: comparing a linear with a non-linear model**

### **Abstract**

Development models are important part of crop simulation models and are useful tools for field operations. The objective of this study was to simulate the development of flood irrigated rice and red rice comparing a linear (thermal time model) with a non-linear (WE model) model. Data from a four-year experiment conducted during the 2003-2004, 2004-2005, 2005-2006, and 2006-2007 growing seasons in Santa Maria, RS, Brazil were used. There were five sowing dates in the 2003-2004 and 2004-2005 seasons, three sowing dates in 2005-2006 and two sowing dates in 2006-2007. Plants were grown in 12 liter pots during the four years, and in a paddy rice field during the 2006-2007 growing season. The genotypes used were IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, IRGA 420, BRS 7 TAIM, BR-IRGA 409, EPAGRI 109, an Hybrid, EEA 406, and two red rice biotypes (awned blackhull-ABHRR, and awned yellowhull-AYHRR). Developmental data available and used in this study were dates of emergence (EM), panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) recorded in five plants per replication in each sowing date. Data collected in the 2004-2005 and 2005-2006 growing season were used to estimate the coefficients of the two models and data collected in the 2003-2004 and 2006-2007 growing season were used as an independent data set for models evaluation. The root mean square error (RMSE) for all developmental stages varied from 4.9 to 10.5 days with the thermal time model and from 4.3 to 10.9 days with the WE model. The WE model gave better predictions in six out of eleven genotypes, with better predictions for early (R1) than for later (R4 and R9) developmental stages.

**Keywords:** *Oryza sativa* L.; Phenology; Temperature; Modeling

## 1. Introduction

Rice (*Oryza sativa* L.) is one of three major cereals produced worldwide and the staple food of more than half of the world population (FAO, 2007). Therefore, research with this crop has the potential of affecting the well being of a considerable number of people. Brazil is the largest rice producer outside Asia, with an annual production of about 11 million t year<sup>-1</sup> and average yield of 3.9 t ha<sup>-1</sup> (Corrêa, 2007; CONAB, 2007). About 63% of Brazilian rice is produced in the southern Region (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, and Paraná States). Rio Grande do Sul State is the largest Brazilian rice producer, with 77% of the flood irrigated rice harvested in Brazil (Azambuja et al., 2004) and an average yield of 6.7 t ha<sup>-1</sup> grown in one million hectares (IRGA, 2007). However, this grain yield is below the potential yield of rice obtained in experimental areas in this region, which has approached 11 to 12 t ha<sup>-1</sup> (Lopes et al., 2005).

Rice yield below potential yield in Rio Grande do Sul State is largely due to crop competition with weeds, mainly red rice (*Oryza sativa* L.) (Agostinetto et al., 2001; Marchezan et al., 2004). Because red rice is of the same species as cultivated rice, controlling red rice is more difficult than controlling other weeds in rice fields. Intra-specific competition of red rice with cultivated rice results in plant lodging and an increase in costs with herbicides (Menezes et al., 2002). In addition, red rice biotypes are good competitors with cultivated rice because they have broader leaves, are taller and have greater phyllocron and main stem final leaf number than modern cultivated rice genotypes (Streck et al., 2008). Even after harvest, the presence of red rice seeds has disadvantages because they affect milling, increase the time for grain drying and milling due to the red pericarp and may increase broken grains (Menezes et al., 1997).

Plant growth and development are independent processes that may occur simultaneously or not. While growth involves irreversible increase in physical dimensions such as organ area, length, width, height, volume, density and diameter, development refers to processes from cell differentiation, organ initiation (morphogenesis) and appearance, and extends to crop senescence (Hodges, 1991; Streck et al., 2003). The simulation of crop development is an important part of crop simulation models because photoassimilate partitioning to different plant organs is dependent upon developmental stages and because many plant processes are switched on or switched off and speed up or speed down depending on developmental stage (Penning de Vries et al., 1989; Goudrian and Van Lar, 1994). Developmental simulation models may also help in selection of adapted cultivars and in

timing of field operations such as fertilization, irrigation scheduling, pests control and harvest (Johnson et al., 1986, 1987; Connel et al., 1999). With regard to weeds, development models may help to quantify inter-specific competition of the weed with the crop, and help as a tool for managing weeds in the field. Development models are also important for assessing the response of crops under climate change scenarios (Weiss et al., 2003; Streck et al., 2006a)

Temperature is a major environmental factor that drives rice development (Hodges, 1991; Gao et al., 1992; Infeld et al., 1998). Thermal time approach, with unit of °C day, is often used to describe the effect of temperature on crop development (Russele et al., 1984). René A. F. of Réamur in about 1730 firstly reported on the relationship between temperature and plant development (Réamur, 1735). Since then, the thermal time approach as a measure of biological time has been applied to plant and insects (Arnold, 1960; Wang, 1960; Pruess, 1983; Streck, 2002). Advantages of the thermal time approach include the simplicity in the calculation of degree-days (usually daily mean air temperature is subtracted from a lower threshold or base temperature) and is a better time descriptor than calendar days to tell time in plants (Gilmore and Rogers, 1958; Russele et al., 1984; McMaster and Smika, 1988). However, the thermal time approach may be subject to criticism, mainly because most of the calculation methods assume a linear response of development to temperature, which is not completely realistic from a biological stand point.

Response of biological processes to temperature is better described in a non-linear fashion with three cardinal temperatures (minimum, optimum, and maximum) for development. The response is linear only in a small range of the response between the minimum and the optimum temperature (Shaykewich, 1995; Streck, 2002, 2003, 2004; Streck and Schuh, 2005). Also, the way the calculation of degree-days is implemented is not consistent among reports: sometimes base temperature is subtracted from the mean daily temperature, sometimes the base temperature is subtracted from the minimum and maximum air temperatures and then averaged, and not rarely there is no indication which of the above methods is used in the calculation (McMaster and Wilhelm, 1997). An alternative approach to the thermal time approach is multiplicative models with non-linear response functions that describe the effects of environmental factors (i.e. temperature) on plant development. One of such models is the Wang and Engel (WE) model (Wang and Engel, 1998; Streck et al., 2003).

In general, rice development simulation models can be divided into two groups: linear models that use the thermal time approach (Alocilja and Ritchie, 1991; Infeld et al., 1998; Steinmetz et al., 2004) and non-linear models (Gao et al., 1992; Yin et al., 1995, 1997). The WE model was first developed for simulating wheat development (Wang and Engel, 1998;

Streck et al., 2003), it was further extended to simulate potato development (Streck et al., 2007), but has not been evaluated in rice, which constituted a rationale for this effort. Furthermore, to the best of our knowledge, rice development models have been used to simulate the development of cultivated rice, not red rice, which constituted another rationale for this effort.

Linear models usually perform well in most of the simulations, but may fail in some simulations where temperature fall outside the linear range of the response of plant development to temperature (Xue et al., 2004), which often occur during heat waves and under climate change scenarios. Therefore, comparing linear with non-linear models is an important effort to help in the selection of the appropriate model in simulation studies with different crops in distinct locations (Xue, 2000; Xue et al., 2004).

The objective of this study was to simulate the development of flood irrigated rice and red rice comparing a linear with a non-linear model.

## **2. Materials and Methods**

### **2.1. Experimental protocol**

Data used in this study are from a four-year field experiment conducted in the field research area, Plant Science Department, Federal University of Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil (latitude: 29° 43'S, longitude: 53° 43'W and altitude: 95m) during the 2003-2004, 2004-2005, 2005-2006 and 2006-2007 growing seasons. This site has a subtropical humid climate and is representative of the rice growing area in southern Brazil. Soil type at the experimental site was a Rhodic Paleudalf (USDA Taxonomy). There were five sowing dates in the 2003-2004 and 2004-2005 seasons, three sowing dates in 2005-2006 and two sowing dates in 2006-2007 (Table 1). The wide range of sowing dates each year was selected to have plants growing and developing under different temperatures, which is important for model parameterization and testing, and correspond to sowing dates before, during, and after the recommended sowing time for this location which is from 01 October to 10 December.

In the four years, irrigated rice and red rice were grown in 12 liter (0.30m diameter and 0.26m height) pots filled with local soil. Pots were buried in the soil to maintain soil temperature similar to the soil temperature of the surrounding area. Pots spacing was 1.5 x

0.8m, so that shading was not a major factor affecting plants growth (Peterson et al., 1984). Soil used to fill pots had 2.2% organic matter, 3.2ppm P, and 46.0ppm K. The experimental design was a completely randomized with 11 genotypes and four replication (replication = pot), totalizing 44 pots per sowing date. Thirty seeds were sown per pot. Plants were grown in pots because previous studies with wheat, a species similar to rice in growth habit and plant morphology, showed that development was not affected by restricting rooting volume and pot size (Peterson et al., 1984).

Rice genotypes and red rice biotypes used in this study are listed in Table 2. The rice genotypes are of subspecies *indica* semi-dwarf, except genotype EEA 406 an old tall, broad-leaf genotype used in the 60's and representative of subspecies *japonica*, used as a red rice simulator in crop-weed competition studies (Agostinetto et al., 2004). These genotypes were selected because they are widely grown in southern Brazil, they have a broad range of rate of development, varying from very early (IRGA 421) to late (EPAGRI 109) and they represent both subspecies of *Oryza sativa*. The two red rice biotypes are representative of red rice types (blackhull and strawhull) usually found in rice fields in this location. The red rice biotypes came from seeds of a single plant grown in an experimental area of the Instituto Riograndense do Arroz (IRGA), in Cachoeirinha, Rio Grande do Sul State, Brazil, collected in March 2004. The two red rice biotypes have the morphological characteristics that usually differentiate red rice from cultivated rice, i.e., tall plants, light-green leaves, long and more slender panicles and heavy shattering of grains (Diarra et al., 1985; Noldin et al., 1999). The Hybrid, EEA 406 and two red rice biotypes were not used in the 2003-2004 growing season.

We also used data from another experiment conducted during the 2006-2007 growing season, where rice plants of two cultivars (IRGA 421 and EPAGRI 109) were grown in a 10-ha paddy rice field located about 600m from the pots in two sowing dates (13/12/2006 and 16/01/2007). In this paddy rice field, there were four plots with four rows of 1m and 0.17m spacing among rows.

Emergence day was assumed when 50% of the plants were visible at soil surface. At V3 stage of the Counce et al. (2000) scale, plants in the pots were thinned to 15 plants per pot, which resulted in a plant density of about 200 plants m<sup>-2</sup>. This plant density was also used in the paddy rice field, and is a plant density commonly found in commercial rice fields in southern Brazil.

Agronomic practices followed local recommendations for rice. In the pots, 20g per pot of a 7-11-9 N-P-K fertilizer was used at sowing, and additional nitrogen was added as a side-dress application at beginning of tillering (V4 stage of the Counce et al., 2000 scale) and at R1

stage of the Counce et al. (2000) scale with urea at a rate of 8.5g per pot. The same fertilizer rates and side-dressings were used in the field plots, corresponding to 300 kg ha<sup>-1</sup> of 7-11-9 N-P-K fertilizer and 222 kg ha<sup>-1</sup> of urea. Irrigation in both pots and field plots was performed starting at V3 to keep a continuous 5-7 cm water layer above soil surface (flooded soil) until R9.

Five plants per pot in the pot experiment and five plants in the central rows of the field plots were tagged with colored wires one week after emergence. In the pots, plants located in the central part of the pot were tagged. In doing so, we tried to achieve a red-far red balance similar to a rice field, which is known to affect development of small grains (Wilhelm and McMaster, 1995). On the main stem of tagged plants, the date of R4 (anthesis, one or more florets are open) and R9 (all grains with brown hulls) developmental stages of the Counce scale (Counce et al., 2000) were recorded. The R1 (panicle differentiation) stage was determined by sampling four plants (one plant per replication) on a daily basis from the outside plants in the pots and from the border rows in the field plots. The day when 50% of the sampled plants were at R1 (Counce et al., 2000) was considered the date of R1. Daily minimum (TN) and maximum (TX) air temperature were measured with a standard meteorological station (Brazilian National Weather Service) located about 100m from the pots and about 500m from the paddy rice field.

## 2.2. Rice developmental cycle and cardinal temperatures

The developmental cycle of irrigated rice and red rice was divided into three phases (Gao et al., 1992; Infeld et al., 1998): the vegetative phase from emergence (EM) to panicle differentiation (R1), the reproductive phase from R1 to anthesis (R4), and the grain filling phase from R4 to all grains with brown hulls (R9) (Figure 1).

For the *indica* rice genotypes (IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, IRGA 420, BRS 7 TAIM, BR-IRGA 409, EPAGRI 109 and Hybrid) the cardinal temperatures were:  $T_{\min}=11^{\circ}\text{C}$  (Infeld et al., 1998),  $T_{\text{opt}}=30^{\circ}\text{C}$ , and  $T_{\max}=40^{\circ}\text{C}$  (Gao et al., 1992) for the vegetative phase (EM-R1);  $T_{\min}=15^{\circ}\text{C}$  (Buriol et al., 1991; Steinmetz, 2004),  $T_{\text{opt}}=25^{\circ}\text{C}$  (Pedro Jr. et al., 1995), and  $T_{\max}=35^{\circ}\text{C}$  (Steinmetz, 2004; Venkataraman et al., 2007) for the reproductive phase (R1-R4);  $T_{\min}=15^{\circ}\text{C}$  (Buriol et al., 1991; Steinmetz, 2004),  $T_{\text{opt}}=23^{\circ}\text{C}$  (Venkataraman et al., 2007), and  $T_{\max}=35^{\circ}\text{C}$  (Steinmetz, 2004; Venkataraman et al., 2007) for the grain filling phase (R4-R9). For the *japonica* rice genotype (EEA 406) and the two red rice biotypes the cardinal



temperatures were:  $T_{\min}=6^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{opt}}=30^{\circ}\text{C}$ , and  $T_{\max}=35^{\circ}\text{C}$  for the vegetative phase (EM-R1);  $T_{\min}=13^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{opt}}=25^{\circ}\text{C}$  and  $T_{\max}=30^{\circ}\text{C}$  for the reproductive phase (R1-R4);  $T_{\min}=13^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{opt}}=23^{\circ}\text{C}$ , and  $T_{\max}=30^{\circ}\text{C}$  for the grain filling phase (R4-R9). Minimum and maximum cardinal temperatures for EEA 406 were lower than for *indica* cultivars because *japonica* cultivars can tolerate lower temperature (Venkataraman et al., 2007). We assumed the same set of cardinal temperatures for EEA 406 and the red rice biotypes because of similarities in morphology and growth habit, because, at least to the best of our knowledge, no reports on difference in cardinal temperatures between red rice and cultivated rice, and because EEA 406 has been used as a red rice simulator in experiments in this location (Agostinetto et al., 2004).

### 2.3. Rice development simulation models

#### 2.3.1. The thermal time approach

The linear model used to predict irrigated rice and red rice developmental stages was the thermal time (TT) approach. Daily values of TT, with units of  $^{\circ}\text{C day}$  was calculated as (Gilmore and Rogers, 1958; Arnold, 1960; Streck, 2002):

$$TT = \begin{cases} 0, & T < T_b & (1) \\ (T - T_b) \cdot 1\text{day} & T_b \leq T \leq T_{\text{opt}} & (2) \\ (T_{\max} - T) \cdot (T_{\text{opt}} - T_b) / (T_{\max} - T_{\text{opt}}) \cdot 1\text{day}, & T_{\text{opt}} \leq T \leq T_{\max} & (3) \\ 0, & T > T_{\max} & (4) \end{cases}$$

where  $T_b$ ,  $T_{\text{opt}}$ , and  $T_{\max}$  are cardinal temperatures for each developmental phases and  $T$  is the air temperature.

The graphical representation of the TT calculation for different genotypes and developmental phases is in Figure 2. The TT was calculated using daily TN and TX, and then averaged. The accumulated thermal time (ATT,  $^{\circ}\text{C day}$ ) for each developmental phase (EM-R1, R1-R4 and R4-R9) was calculated by accumulating TT, i.e.  $ATT = \sum TT$ .

#### 2.3.2. The Wang and Engel model

The non-linear development simulation model for irrigated rice and red rice used in this study is the Wang and Engel (WE) model (Wang and Engel, 1998). This model was chosen because it is simple, the coefficients have biological meaning and operational

definition, and the effect of environmental factors on crop development are represented by non-linear response functions combined in a multiplicative fashion.

The first step in the WE model is to calculate the daily plant developmental rate ( $r$ ). The developmental stage (DS) is calculated by accumulating daily developmental rates ( $DS = \Sigma r$ ). DS is zero at EM, 0.4 at R1, 1 at R4, and 2 at R9 (Figure 1). We numbered the stages 0, 0.4, 1 and 2 based on Penning de Vries et al. (1989), Goudriaan and Van Laar (1994), Yin et al. (1997), and Streck et al. (2003). The general form of the WE model is:

$$r = r_{\max,v} f(T) \quad (5)$$

for the vegetative phase (EM – R1),

$$r = r_{\max,r} f(T) \quad (6)$$

for the reproductive phase (R1 – R4) and

$$r = r_{\max,gf} f(T) \quad (7)$$

for the grain filling phase (R4 – R9),

where  $r$  is the daily developmental rate ( $\text{day}^{-1}$ ),  $r_{\max,v}$ ,  $r_{\max,r}$  and  $r_{\max,gf}$  are daily maximum developmental rates ( $\text{day}^{-1}$ ) during vegetative, reproductive, and grain filling phases, respectively, and  $f(T)$  is a temperature response function varying from zero to 1.

The temperature response function [ $f(T)$ ] is a beta function defined as (Wang and Engel, 1998; Streck, 2002; Streck et al., 2003):

$$f(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{\min} & (8) \\ \left[ 2(T - T_{\min})^\alpha (T_{\text{opt}} - T_{\min})^\alpha - (T - T_{\min})^{2\alpha} \right] / (T_{\text{opt}} - T_{\min})^{2\alpha}, & T_{\min} \leq T \leq T_{\max} & (9) \\ 0, & T > T_{\max} & (10) \end{cases}$$

$$\alpha = \ln(2) / \ln \left[ (T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\text{opt}} - T_{\min}) \right] \quad (11)$$

where  $T_{\min}$ ,  $T_{\text{opt}}$ , and  $T_{\max}$  are cardinal temperatures for each developmental phases and  $T$  is the air temperature. The  $f(T)$  was calculated using daily TN and TX air temperatures and then the resulting daily values of  $f(T)$  were averaged. This approach was used because in a non-linear function, averaging TN and TX first and then calculate  $f(T)$  with the average daily temperature is not correct (Xue et al., 2004). With the cardinal temperatures, the  $f(T)$  for different genotypes and developmental phases has the shape shown in Figure 2.

## 2.4. Estimation of the coefficients of the models

Coefficients  $r_{\max,v}$ ,  $r_{\max,r}$ ,  $r_{\max,gf}$  (WE model) and ATT for each developmental phase (EM-R1, R1-R4 and R4-R9) are genotype dependent. These coefficients for the irrigated rice genotypes and red rice biotypes were estimated using dates of EM, R1, R4 and R9, and daily TN and TX data of the five sowing dates during the 2004-2005 growing season and the three sowing dates during the 2005-2006 growing season. The coefficients of the WE model were estimated with the SAS-NLIN (SAS Institute Inc., 2001) with the Marquardt method and the ATT for the developmental phases was the average of the ATT values from each sowing date (Streck et al., 2007).

## 2.5. Evaluation of the models

Models evaluation was performed using R1, R4, and R9 data predicted and observed for the five sowing dates in 2003-2004 and the three sowing dates in 2006-2007, which were independent data sets. The statistics used to evaluate models performance was the root mean square error (RMSE). The RMSE was calculated as (Janssen and Heuberger, 1995):

$$\text{RMSE} = \left[ \sum (P_i - O_i)^2 / N \right]^{0.5} \quad (12)$$

where  $P_i$  = predicted day of the year (DOY),  $O_i$  = observed DOY, and  $N$  = number of observations. The unit of RMSE was the same as  $P$  and  $O$ , i.e., days. The smaller the RMSE, the better the model. Systematic and unsystematic errors of models predictions were calculated for each model by taking the mean square error (MSE), i.e.  $(\text{RMSE})^2$ , and decomposing the MSE into systematic (MSEs) and unsystematic or random (MSEu) components ( $\text{MSEs} + \text{MSEu} = 100\%$ ) according to Willmott (1981):

$$\text{MSEs} = \left[ \sum \left( \hat{P}_i - O_i \right)^2 \right] / N \quad (13)$$

$$\text{MSEu} = \left[ \sum \left( P_i - \hat{P}_i \right)^2 \right] / N \quad (14)$$

where  $\hat{P}_i$  is equal to  $a + bO_i$ . The lower the MSEs the better the model. A “good” model has the lowest MSEs.

### 3. Results

There was variation in meteorological conditions during the four growing seasons (Table 3). The 2004-2005 growing season was the warmest season with the highest average monthly maximum temperature (33.4°C) in January 2005. The coolest growing season was 2005-2006 but the lowest average monthly minimum temperature was in May 2007 (9.3°C). Sunshine duration was greater in the 2003-2004 and 2005-2006 growing seasons, with the highest average monthly values in February 2004 (9.5 h day<sup>-1</sup>) and December 2005 (9.4 h day<sup>-1</sup>). These different meteorological conditions among years and sowing dates provide a rich data set to calibrate and evaluate the rice development models.

The estimates of ATT for the developmental phases EM-R1, R1-R4 and R4-R9, and the estimates of  $r_{\max,v}$ ,  $r_{\max,r}$  and  $r_{\max,gf}$  for the irrigated rice genotypes and red rice biotypes are in Table 4. The variation of these coefficients among the *indica* rice genotypes during the EM-R1 and R1-R4 phases is consistent with the maturation group (Table 2), i. e. early genotypes have lower ATT and higher  $r_{\max,v}$  and  $r_{\max,r}$ . There was small variation in the coefficients during the R4-R9 (ATT and  $r_{\max,gf}$ ) phase with no relationship with the maturation group, indicating that the duration of developmental cycle in these genotypes is a function of the developmental rate during the EM-R1 and R1-R4 phases. The *japonica* cultivar EEA 406 had estimates of ATT and  $r_{\max,v}$  similar to the estimates of the red rice biotypes, confirming that this cultivar is similar not only in growth but also in development to red rice (Agostinetto et al., 2004).

When estimating  $r_{\max}$  in the WE model using statistical approach, it is important that the estimates are biologically sound. The biological meaning of these coefficients can be evaluated by taking the increase of the coefficients, i.e.  $0.4/r_{\max,v}$ ,  $0.6/r_{\max,r}$ , and  $1/r_{\max,gf}$ , which represent the lowest duration of the EM-R1, R1-R4, and R4-R9 developmental stages, respectively, which takes place when temperature is equal to the optimum temperature. Using this approach with the estimates in Table 4, the lowest duration of the EM-R1 phase of modern rice genotypes varied from 25 days (IRGA 421) to 44 days (EPAGRI 109), the R1-R4 phase varied from 16 days (IRGA 421) to 39 days (BR-IRGA 409), and the R4-R9 phase

varied from 17 days (IRGA 416) to 21 days (IRGA 421). For the old cultivar (EEA 406), lowest duration of the EM-R1, R1-R4, and R4-R9 phases were 25 days, 17 days, and 14 days, respectively, and for the red rice biotypes lowest duration of these phases were 24 days (both biotypes), 16 days (both biotypes), and 14 days (ABHRR) or 17 days (AYHRR), respectively. These developmental phase durations are realistic in field conditions.

In the pot experiment during the 2003-2004 growing season, in the 29/01/04 sowing date only cultivar IRGA 421 (a very early genotype) reached R9, and EPAGRI-109 and BR-IRGA 409 did not reach R4. Plants of cultivar IRGA 421 and EPAGRI 109 in the 05/01/04 sowing date did not reach R9. These plants that did not completed R4 or R9 died in June 2004 due to freezing temperatures. There were no data for the 16/01/07 sowing date in the pot experiment because of problems with the plants that died before R1. In the paddy rice field experiment, plants of cultivar EPAGRI 109 sown on 16/01/07 did not reach R4 due to low temperatures and also died in June 2007 due to freezing temperatures.

Observed versus predicted day of the year (DOY) of R1, R4 and R9 developmental stages of the nine rice genotypes and two red rice biotypes with the thermal time model and with the WE model are in Figures 3 to 6. Data from all sowing dates of the 2003-2004 and 2006-2007 growing seasons were pooled for the pot experiment (Figures 3, 4 and 5) and for the paddy rice field (Figure 6). In the pot experiment, the overall RMSE (pooling data of R1, R4 and R9) varied from 4.9 days (Hybrid) to 10.5 days (EPAGRI 109) with the thermal time model and from 4.3 days (Hybrid) to 10.9 days (BR-IRGA 409) with the WE model. The RMSE was greater with the thermal time model in six out of eleven genotypes (IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, Hybrid, ABHRR, and AYHRR), and in one genotype (BRS 7 TAIM) the RMSE was the same (6.8 days) with the thermal time model and with the WE model. In the paddy rice field experiment, the RMSE varied from 3.6 days (EPAGRI 109) to 7.1 days (IRGA 421) with the thermal time model and from 5.3 days (IRGA 421) to 6.7 days (EPAGRI 109) with the WE model (Figure 6). Both in the pot and in the paddy field experiments, the WE model had better performance among very early and early rice genotypes (Figure 3e, 3f, 3g, 6c), including the Hybrid (Figure 5e), and red rice biotypes (Figure 5g and 5h) whereas the thermal time model performed better among mid late and late genotypes (Figure 4a, 4c, 5b, 6b).

Comparing observed with predicted developmental stages throughout the season, the RMSE for R1 varied from 1.9 days (IRGA 417) to 8.6 (BR-IRGA 409) with the thermal time model and from 2.2 days (EEA 406) to 8.8 days (BR-IRGA 409) with the WE model, the RMSE for R4 varied from 0.7 days (Hybrid) to 12.5 days (EPAGRI 109 and ABHRR) with

the thermal time model and from 2.0 days (Hybrid) to 12.7 days (EPAGRI 109) with the WE model, and the RMSE for R9 varied from 4.5 days (EEA 406) to 14.9 (IRGA 421) with the thermal time model and from 3.5 days (Hybrid) to 14.5 days (BR-IRGA 409) with the WE model in the pot experiment (Table 5). In the field experiment, the RMSE with the WE model for R1 was 2.0 days and 4.2 days, for R4 the RMSE was 3.0 days and 9.0 days, and for R9 the RMSE was 7.6 days and 8.0 days for IRGA 421 and EPAGRI 109, respectively. Decomposing the mean square error into systematic (MSEs) and unsystematic (MSEu) components, for the majority of developmental stages and genotypes, the MSEs was lower with the WE model (Table 5). The percent MSEs for R1 varied from 1.1% (IRGA 421) to 62.6% (BR-IRGA 409) with the thermal time model and from 3.1% (IRGA 421) to 50.8% (BR-IRGA 409) with the WE model, for R4 the MSEs varied from 13.1% (IRGA 420) to 79.6% (IRGA 417) with the thermal time model and from 6.7% (IRGA 420) to 75.6% (EPAGRI 109) with the WE model, and for R9 the MSEs varied from 29.7% (BRS 7 TAIM) to 94.8% (EPAGRI 109) with the thermal time model and from 9.3% (IRGA 416) to 87.5% (EPAGRI 109) with the WE model. Lower MSEs with the WE model compared to the thermal time model was also obtained by Xue et al. (2004) for predicting main stem Haun Stage in winter wheat.

#### 4. Discussion

The WE model has been reported to be superior to the thermal time model for predicting developmental events in other crops like winter wheat (Xue et al., 2004), muskmelon (Streck et al., 2006b), eucalyptus seedlings (Martins and Streck, 2007) and potato (Streck et al., 2007). In this study, the superiority of the WE model was observed in six out of eleven rice genotypes (Figures 3 to 6). Better predictions of developmental stages with the WE model are associated with several reasons. Firstly, the WE model uses a non-linear temperature response function, which is more realistic to describe the response of plant development to temperature than the linear approach (Shaykewich, 1995; Streck, 2002). Secondly, the interaction of temperature effects on plant development in the WE model is combined in a multiplicative fashion, which is also biologically sound (Streck et al., 2003). Thirdly, the coefficients of the WE model ( $r_{\max,v}$ ,  $r_{\max,r}$  and  $r_{\max,gf}$  and the cardinal temperatures) have biological meaning and operational definition. These features combined

with the lower MSEs (Table 5) provide a biological background for recommending the WE model as an alternative model to the thermal time model in rice.

Errors in the prediction of rice developmental stages with both models generally increased for later developmental stages (Table 5). Better predictions of earlier developmental stages compared with later developmental stages with the WE model were also reported in wheat (Streck et al., 2003) and potato (Streck et al., 2007). Errors in the predictions of R1 with the WE model were usually less than 7 days (Table 5), which are similar to the error predictions reported by Streck et al. (2003) for terminal spikelet in wheat (5 – 8 days) and by Streck et al. (2007) for tuber initiation in potato (4 days). Errors in the predictions of R4 and R9 with the WE model were above 7 days for some genotypes (Table 5). Streck et al. (2007) also reported errors of 13 and 14 days in the predictions of the onset of plant senescence and harvest in potato. In an attempt to reduce the error of predictions of R4 and R9, we tested several combinations of cardinal temperatures, from using a constant set of cardinal temperatures throughout the entire developmental cycle to assuming that the *japonica* cultivar (EEA 406) and the red rice biotypes had the same cardinal temperatures as the *indica* genotypes. None of these combinations improved the predictions. These results indicate that the cardinal temperatures assumed in the WE model for rice are appropriate.

There has been reported that some rice genotypes are responsive to photoperiod (Vergara et al., 1969; Gao et al., 1992; Steinmetz, 2004). We also tested including a photoperiod response function (negative exponential function for short-day plants, Gao et al., 1992) during the EM-R1 phase, but there was no improvement in the predictions with this version of the WE model.

From the set of cardinal temperatures used in this study during the reproductive (R1-R4) and grain filling (R4-R9) phases, a rice crop is less tolerant to both low and high temperature (i.e. the range from  $T_{\min}$  to  $T_{\max}$  is narrower) and the optimum temperature is lower, mainly for grain filling. Similar results were reported for wheat (Streck et al., 2003). In subtropical climates, this has been and will continue to be a key information in the future for defining the sowing time of rice genotypes with different developmental rates (different maturation groups) in order to fit their reproductive and grain filling phases when air temperatures are within the range of cardinal temperatures for these phases, so crop yield can be closer to the potential yield.

Most of the data used in this study are from a pot experiment, which may raise concerns if the results can be extended to a rice field. Comparing the predictions of R1, R4 and R9 of the two rice genotypes (very early – IRGA 421 and late – EPAGRI 109) grown in pots and in

the paddy field, predictions were better in the paddy field with errors less than 9 days compared to errors of up to 12 days in the pot grown plants (Table 6). These results indicate that the WE model is in fact appropriate to simulate rice development in the field.

In this study, we were able to calibrate the WE model for two red rice biotypes. This is an important step to improve our understanding of crop-weed interference with cultivated and red rice. One application of such models is in numerical studies on the performance of cultivated rice and red rice under climate change scenarios. Because temperature is expected to increase as climate change is projected by the end of this century, and cardinal temperatures of current modern rice genotypes and red rice biotypes seem to be different, the difference of development rate of cultivated and red rice biotypes under global warming scenarios remain to be studied and is a good rationale for further studies.

## **5. Conclusions**

The predictions of major developmental stages in rice genotypes and red rice biotypes can be improved with the non-linear WE model compared with the thermal time model. The RMSE, which is a measure of predictions error, with the WE model was usually less than 7 days for panicle differentiation and increased for anthesis and all grains with brown hull stages. The WE model described properly the development of rice plants grown in pots and in a paddy rice field.

## **References**

- Agostinetto, D., Fleck, N.G., Rizzardi, M.A., Junior A.M., Vidal, R.A., 2001. Arroz vermelho: ecofisiologia e estratégias de controle. *Ciência Rural* 31, 341-349.
- Agostinetto, D., Fleck, N.G., Rizzardi, M.A., Bianchi, M.A., Silva, P.R.F., 2004. Comparação de modelos matemáticos na estimativa das perdas de produtividade de grãos em arroz irrigado. *Pesq. Agrop. Bras.* 39, 847-856.
- Alocilja, E.C., Ritchie, J.T., 1991. A model for the phenology of rice. In: Hodges, T. *Predicting crop phenology*. CRC, Boston. 181-189.



- Arnold, C.Y., 1960. Maximum-minimum temperatures as a basis for computing heat units. *Journal of the American Society for Horticultural Sciences* 76, 682–692.
- Azambuja, I.H.V., Verneti Jr., F.J., Magalhães Jr., A.M., 2004. Aspectos socioeconômicos da produção do arroz. In: Gomes, A.S., Magalhães Jr., A.M. *Arroz irrigado no Sul do Brasil*. 1.ed. Brasília: Embrapa, 23-44.
- Buriol, G.A., Schneider, F.M., Estefanel, V., Hoffmann, A. 1991. Ocorrência e duração das temperaturas mínimas diárias do ar prejudiciais à fecundação das flores do arroz em Santa Maria, RS. 1- Probabilidades de ocorrência. *Ciência Rural* 21, 23-34.
- CONAB. 2007. Evolução da produção de grãos no Brasil. Available at: <<http://www.conab.gov.br>>. Accessed 05 Feb. 2007.
- Connel, T.R., Binning, L.K., Schmitt, W.G., 1999. A canopy development model for potatoes. *Am. J. Potato Res.* 76, 153-159.
- Corrêa, S., 2007. Anuário brasileiro do arroz 2007. Santa Cruz: Gazeta. 128.
- Counce, P.A., Keisling, T.C., Mitchell, A.J., 2000. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. *Crop Sci.* 40, 436-443.
- Diarra, A., Smith Jr., R. J., Talbert, R. E., 1985. Growth and morphological characteristics of red rice (*Oryza sativa*) biotypes. *Weed Science* 33, 310-314.
- FAO. 2007. International year of rice. Available at: < <http://www.fao.org/rice2004/en/speeches.htm>>. Accessed 05 Feb. 2007.
- Gao, L., Jin, Z., Huang, Y., Zhang, L., 1992. Rice clock model – a computer model to simulate rice development. *Agric. Forest Meteorol.* 60, 1-16.
- Gilmore, E.C.Jr., Rogers, J.S., 1958. Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agron. J.* 50, 611-615.

- Goudriaan, J., Van Laar, H.H., 1994. Modeling potential crop growth processes. Kluwer, Dordrecht.
- Hodges, T., 1991. Predicting crop phenology. CRC, Boca Raton.
- Infeld, J.A., Silva, J.B., Assis, F.N., 1998. Temperatura base e graus-dia durante o período vegetativo de três grupos de cultivares de arroz irrigado. Rev. Bras. Agromet. 6, 187-191.
- IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. 2007. Dados de safra. Série histórica da área plantada, produção e rendimento. Available at: <<http://www.irga.rs.gov.br/dados.htm>>. Accessed 20 Oct. 2007.
- Janssen, P.H.M., Heuberger, P.S.C., 1995. Calibration of process – oriented models. Ecol. Model. 83, 55-56.
- Johnson, K.B., Johnson, S.B., Teng, P.S., 1986. Development of a simple potato growth model for use in crop-pest management. Agric. Syst. 19, 189-209.
- Johnson, K.B., Teng, P.S., Radcliffe, E.B., 1987. Coupling feeding effects of potato leafhopper, *Empoasca fabae* (Homoptera: Cicadellidae), nymphs to a model of potato growth. Environ. Entomol. 16, 250-258.
- Lopes, S.I.G., Lopes, M.C.B., Lima, A.L., Santos, A.S., Freitas, P.R., Cremonesi, J., Costa, M.S., Leal, C.E.B., 2005. Avaliação do ganho genético do programa de melhoramento do IRGA no período de 1961 a 2004. In: IV Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado e XXVI Reunião da cultura do Arroz Irrigado, 2005, Santa Maria, RS. Anais... Santa Maria: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 1, 67-69.
- Marchezan, E., Ávila, L.A., Andres, A., Magalhães Jr., A.M., Machado, S.L.O., Petrini, J.A., 2004. Controle do arroz vermelho. In: Gomes, A.S., Magalhães Jr., A. M. Arroz irrigado no Sul do Brasil. 1.ed. Brasília: Embrapa, 547-573.

- Martins, F.B., Streck, N.A., 2007. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. *Pesq. Agrop. Bras.* 42, 1091-1100.
- McMaster, G.S., Smika, D.E., 1988. Estimation and evaluation of winter wheat phenology in the central Great Plains. *Agric. Forest Meteorol.* 43, 1-18.
- McMaster, G.S., Wilhelm, W.W., 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agric. Forest Meteorol.* 87, 291-300.
- Menezes, V.G., Silva, P.R.F., Carmona, R., Rezera, F., Mariot, C.H., 1997. Interferência do arroz vermelho no rendimento de engenho de cultivares de arroz irrigado. *Ciência Rural* 27, 27-30.
- Menezes, V.G., Agostinetto, D., Fleck, N.G., Silveira, C.A., 2002. Caracterização de biótipos de arroz vermelho em lavouras de arroz no Estado do Rio Grande do Sul. *Planta Daninha* 20, 221-227.
- Noldin, J.A., Chandler, J.M., McCauley, G.N., 1999. Red rice (*Oryza sativa*) biology. I. Characterization of red rice ecotypes. *Weed Technol.* 13, 12-18.
- Pedro Jr., M.J., Sentelhas, P.C., Moraes, A.V.C., Villele, O.V., 1995. Estimativa da produtividade de arroz irrigado por inundação em função da temperatura do ar e da radiação solar. *Scientia Agric.* 52, 96-100.
- Penning de Vries, F.W.T., Jansen, D.M., Ten Berge, H.F.M., Bakema, A., 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Pudoc, Wageningen.
- Peterson, C.M., Klepper, B., Pumphrey, F.V., Rickman, R.W., 1984. Restricted rooting decreases tillering and growth of winter wheat. *Agron. J.* 76, 861-863.
- Pruess, K.P., 1983. Day-degree methods for pest managements. *Environmt. Entomol.* 12, 613-619.

- Réaumur, R.A.F., 1735. Observation du thermometer, faites à Paris pendant l'année 1735, compares avec celles qui ont été faites sous la ligne, à l'Isle de France, à Alger et en quelques-unes de nos isles de l'Amérique. Paris : Mém. Acad. Des Sci., 545 p.
- Russele, M.P., Wilhelm, W.W., Olson, R.A., Power, J.F., 1984. Growth analysis based on degree days. *Crop Sci.* 24, 28–32.
- SAS Institute Inc., 2001. SAS-STAT: Users Guide Version 8.0 (8<sup>th</sup> ed.). Cary, NC.
- Shaykewich, C.F., 1995. An appraisal of cereal crop phenology modeling. *Canad. J. Plant Sci.* 75, 329-341.
- Steinmetz, S., 2004. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: Gomes, A.S., Magalhães Jr., A. M. Arroz irrigado no Sul do Brasil. 1.ed. Brasília: Embrapa, 45-74.
- Steinmetz, S., Infeld, J.A., Assis, F.N., Wrege, M.S., Ferreira, J.S., 2004. Uso do método de graus-dia para estimar a data de diferenciação da panícula de grupos de cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 34p. (Documentos 126).
- Streck, N.A.A, 2002. Generalized nonlinear air temperature response function for node appearance rate in muskmelon (*Cucumis melo* L.). *Rev. Bras. Agromet.* 10, 105-111.
- Streck, N.A., 2003. A generalized nonlinear temperature response function for some growth and developmental parameters in kiwifruit (*Actinidia deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson). *Ciência Rural* 33, 255-262.
- Streck, N.A., Weiss, A., Xue, Q., Baenziger, P.S., 2003. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: A modified Wang and Engel model. *Agric. Forest Meteorol.* 115, 139-150.

- Streck, N.A., 2004. A temperature response function for modeling leaf growth and development of the African violet (*Saintpaulia ionantha* Wendl.). *Ciência Rural* 34, 55-62.
- Streck, N.A., Schuh, M., 2005. Simulating the vernalization response of the “Snow Queen” lily (*Lilium longiflorum* Thunb.). *Scientia Agric.* 62, 117-121.
- Streck, N.A., Lago, I., Alberto, C.M., Bisognin, D.A., 2006a. Simulação do desenvolvimento da batata cultivar Asterix em cinco cenários de mudanças climáticas em Santa Maria, RS. *Bragantia* 65, 693-702.
- Streck, N.A., Lago, I., Buriol, G.A., Heldwein, A.B., Tibola, T., 2006b. A non-linear model to simulate node appearance in muskmelon (*Cucumis melo* L.) grown inside plastic greenhouse as a function of air temperature. *Rev. Bras. Agromet.* 14, 210-216.
- Streck, N.A., Paula, F.L.M., Bisognin, D.A., Heldwein, A.B., Dellai, J., 2007. Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). *Agric. Forest Meteorol.* 142, 1-11.
- Streck, N.A., Michelon, S., Kruse, N.D., Bosco, L.C., Lago, I., Marcolin, E., Paula, G.M., Samboranza, F.K., 2008. Comparação de parâmetros de crescimento e de desenvolvimento de dois biótipos de arroz vermelho com genótipos de arroz irrigado. *Bragantia*, in press.
- Venkataraman, S.; Steinmetz, S.; Cruz, R.T., 2007. Agrometeorology and Rice Production. In: INSAM – International Society for Agricultural Meteorology, 2007. Draft 3<sup>rd</sup> Ed., 2007. cap. 13F, 42p. Available at: <[http://www.agrometeorology.org/fileadmin/insam/repository/gamp\\_chapt13F.pdf](http://www.agrometeorology.org/fileadmin/insam/repository/gamp_chapt13F.pdf)>. Accessed 20 Oct. 2007.
- Vergara, B.S., Chang, T.T., Lilis, R., 1969. The flowering response of the rice plant to photoperiod: A review of the literature. International Rice Research Institute, 28p. (Technical Bulletin, N°8).

- Wang, J.Y., 1960. A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology*. 41, 785-790.
- Wang, E., Engel, T., 1998. Simulation of phenological development of wheat crops. *Agric. Syst.* 58, 1-24.
- Weiss, A., Hays, C.J., Won, J., 2003. Assessing winter wheat response to climate change scenarios: a simulation study in the U.S. Great Plains. *Climatic Change* 58, 119-147.
- Wilhelm, W.W., McMaster, G.S., 1995. Importance of phyllochron in studying development and growth in grasses. *Crop. Sci.* 35, 1-3.
- Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Physical Geogr.* 2, 184-194.
- Xue, Q., 2000. Phenology and gas exchange in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). 2000. 101p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, University of Nebraska – Lincoln, USA.
- Xue, Q., Weiss, A., Baenziger, P.S., 2004. Predicting leaf appearance in field grown winter wheat: evaluation linear and non-linear models. *Ecolog Model.* 175, 261-270.
- Yin, X., Kropff, M.J., McLaren, G., Visperas, R.M., 1995. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agric. Forest Meteorol.* 77, 1-16.
- Yin, X., Kropff, M. J., Horie, T., Nakagawa, H, Centeno, H.G.S., Zhu, D., Goudriaan, J., 1997. A model for photothermal responses of flowering in rice. I. Model description and parameterization. *Field Crop Res.* 51, 189-200.

Table 1. Growing seasons and sowing dates of irrigated rice and red rice used in this study. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.

Season	Sowing dates (day/month/year)
2003-2004	01/09/03, 20/10/03, 21/11/03, 05/01/04, 29/01/04
2004-2005	02/09/04, 07/10/04, 04/11/04, 03/12/04, 02/03/05
2005-2006	26/09/05, 25/11/05, 02/02/06
2006-2007	08/11/06, 13/12/06, 16/01/07

Table 2. Irrigated rice genotypes and red rice biotypes used in this study. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.

Genotype	Subspecies	Maturation group	Year of release
IRGA 421	<i>indica</i>	Very early	2000
IRGA 416	<i>indica</i>	Early	1991
IRGA 417	<i>indica</i>	Early	1995
IRGA 420	<i>indica</i>	Early	1999
BR-IRGA 409	<i>indica</i>	Mid late	1979
BRS 7 TAIM	<i>indica</i>	Mid late	1991
EPAGRI 109	<i>indica</i>	Late	1990
Hybrid	<i>indica</i>	Early	Not released yet
EEA 406	<i>japonica</i>	Mid late	1966
Awned blackhull red rice (ABHRR)	-	Unknown	-
Awned yellowhull red rice (AYHRR)	-	Unknown	-

Source: Lopes et al. (2005).



Table 3. Monthly average of minimum and maximum air temperature, and mean sunshine duration (h day<sup>-1</sup>) during the experimental period in the four growing seasons at Santa Maria, RS, Brazil.

Season	Month	Temperature (°C)		Sunshine
		Minimum	Maximum	
2003-2004	September	10.9	22.6	5.2
	October	14.9	26.9	6.9
	November	16.6	28.0	7.3
	December	17.3	27.6	9.0
	January	19.8	31.7	8.8
	February	17.9	30.0	9.5
	March	17.3	30.1	7.2
	April	16.4	28.1	6.0
	May	10.9	19.8	5.9
	<b>Average</b>	<b>15.7</b>	<b>27.2</b>	<b>7.3</b>
2004-2005	September	13.8	24.5	4.4
	October	12.2	25.6	8.7
	November	15.7	27.4	7.0
	December	17.8	30.4	9.0
	January	19.8	33.4	9.0
	February	19.1	31.0	7.1
	March	18.0	31.0	6.5
	April	15.1	25.1	4.4
	May	13.8	23.2	4.2
	<b>Average</b>	<b>16.1</b>	<b>28.0</b>	<b>6.7</b>
2005-2006	September	10.9	19.7	4.6
	October	14.5	23.1	4.4
	November	15.7	29.4	8.4
	December	17.3	30.3	9.4
	January	20.7	31.9	7.7
	February	19.0	31.2	8.5
	March	18.1	30.3	7.4
	April	14.2	26.0	6.8
	May	9.4	20.5	5.2
	<b>Average</b>	<b>15.5</b>	<b>26.9</b>	<b>6.9</b>
2006-2007	September	10.8	22.2	6.4
	October	15.6	26.9	7.0
	November	16.5	27.1	7.3
	December	19.6	32.2	8.5
	January	20.5	30.8	7.5
	February	19.5	30.8	8.2
	March	20.4	30.1	5.2
	April	16.7	27.7	6.1
	May	9.3	20.1	5.6
	<b>Average</b>	<b>16.5</b>	<b>27.5</b>	<b>6.9</b>

Table 4. Coefficients of the thermal time model (ATT, °C day) and the Wang & Engel model ( $r_{\max,v}$ ,  $r_{\max,r}$ ,  $r_{\max,gf}$ , day<sup>-1</sup>) for the developmental phases emergence to panicle differentiation (EM-R1), panicle differentiation to anthesis (R1-R4) and anthesis to all grains with brown hulls (R4-R9) in nine irrigated rice genotypes and two red rice biotypes. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.

Genotype	R1		R4		R9	
	ATT	$r_{\max,v}$	ATT	$r_{\max,r}$	ATT	$r_{\max,gf}$
IRGA 421	437.9	0.0158	108.2	0.0386	113.1	0.0479
IRGA 416	515.9	0.0132	178.2	0.0229	96.3	0.0571
IRGA 417	560.0	0.0122	146.3	0.0282	109.7	0.0497
IRGA 420	538.3	0.0126	187.2	0.0221	102.6	0.0520
BR-IRGA 409	576.2	0.0118	267.3	0.0153	107.5	0.0515
BRS 7 TAIM	596.9	0.0114	210.0	0.0197	107.0	0.0506
EPAGRI 109	753.4	0.0091	241.8	0.0172	98.9	0.0557
Hybrid	495.6	0.0138	164.3	0.0258	104.9	0.0517
EEA 406	778.5	0.0161	182.4	0.0366	152.4	0.0719
ABHRR <sup>†</sup>	750.1	0.0170	175.6	0.0376	151.4	0.0709
AYHRR <sup>†</sup>	776.6	0.0165	188.1	0.0364	177.8	0.0601

<sup>†</sup>ABHRR = Awne blackhull red rice, AYHRR = Awne yellowhull red rice.

Table 5. Root mean square error (RMSE, days), systematic mean square error (MSE<sub>S</sub>), and unsystematic mean square error (MSE<sub>u</sub>) using the thermal time model (TT) and the WE model to predict panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hull (R9) of irrigated rice genotypes and red rice biotypes grown in pots. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.

Genotype	Statistic	R1		R4		R9	
		TT	WE	TT	WE	TT	WE
IRGA 421	RMSE	4.0	3.5	8.1	6.7	14.9	12.5
	MSEs (%)	1.1	3.1	58.6	39.0	77.9	73.8
	MSEu (%)	98.9	96.9	41.4	61.0	22.1	26.2
IRGA 416	RMSE	4.1	3.6	11.0	8.7	9.9	8.3
	MSEs (%)	58.7	50.8	34.0	25.8	41.5	9.3
	MSEu (%)	41.3	49.2	66.0	74.2	58.5	90.7
IRGA 417	RMSE	1.9	2.7	7.2	5.1	7.7	5.0
	MSEs (%)	20.7	21.3	79.6	63.1	61.9	33.7
	MSEu (%)	79.3	78.7	20.4	36.9	38.1	66.3
IRGA 420	RMSE	4.7	5.2	8.9	8.7	8.5	8.7
	MSEs (%)	48.5	37.0	13.1	6.7	85.7	86.9
	MSEu (%)	51.5	63.0	86.9	93.3	14.3	13.1
BR-IRGA 409	RMSE	8.6	8.8	7.9	8.8	12.2	14.5
	MSEs (%)	62.6	50.8	15.4	41.0	46.5	52.6
	MSEu (%)	37.4	49.2	84.6	59.0	53.5	47.4
BRS 7 TAIM	RMSE	6.4	7.2	5.6	4.9	8.3	8.2
	MSEs (%)	32.6	31.2	20.1	23.2	29.7	25.8
	MSEu (%)	67.4	68.8	79.9	76.8	70.3	74.2
EPAGRI 109	RMSE	7.1	8.0	12.5	12.7	11.9	11.3
	MSEs (%)	13.0	17.1	68.3	75.6	94.8	87.5
	MSEu (%)	87.0	82.9	31.7	24.4	5.2	12.5
Hybrid <sup>+</sup>	RMSE	5.4	6.3	0.7	2.0	6.5	3.5
EEA 406 <sup>+</sup>	RMSE	2.0	2.2	7.6	7.9	4.5	5.7
ABHRR <sup>+</sup>	RMSE	5.0	2.5	12.5	12.0	6.5	7.3
AYHRR <sup>+</sup>	RMSE	6.7	2.2	11.2	10.5	12.4	11.5

<sup>+</sup>For these genotypes, MSEs and MSEu were not calculated because of the reduced number of data.

Table 6. Predicted minus observed day of the year of panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) with the WE model for two irrigated rice genotypes grown in pots and in a paddy rice field sown on 13/12/2006. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.

Genotype	Developmental stage	Pot	Paddy field
IRGA 421	R1	5	2
	R4	7	3
	R9	10	-9
EPAGRI 109	R1	-7	-6
	R4	8	9
	R9	12	8

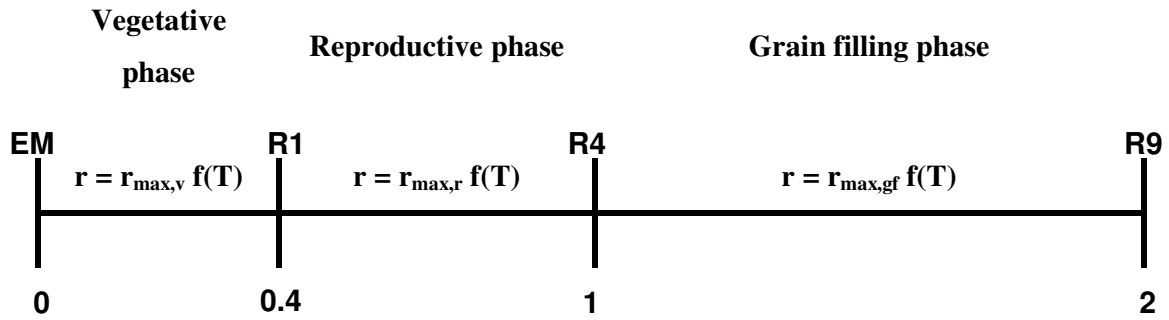


Figure 1. Schematic representation of the rice and red rice developmental cycle and the WE model used in this study. EM = emergence, R1 = panicle differentiation, R4 = anthesis, R9 = All grains with brown hulls,  $r$  = daily developmental rate,  $r_{\max,v}$  = daily maximum developmental rate during vegetative phase,  $r_{\max,r}$  = daily maximum developmental rate during reproductive phase,  $r_{\max,gf}$  = daily maximum developmental rate during the grain filling phase,  $f(T)$  = temperature response function.

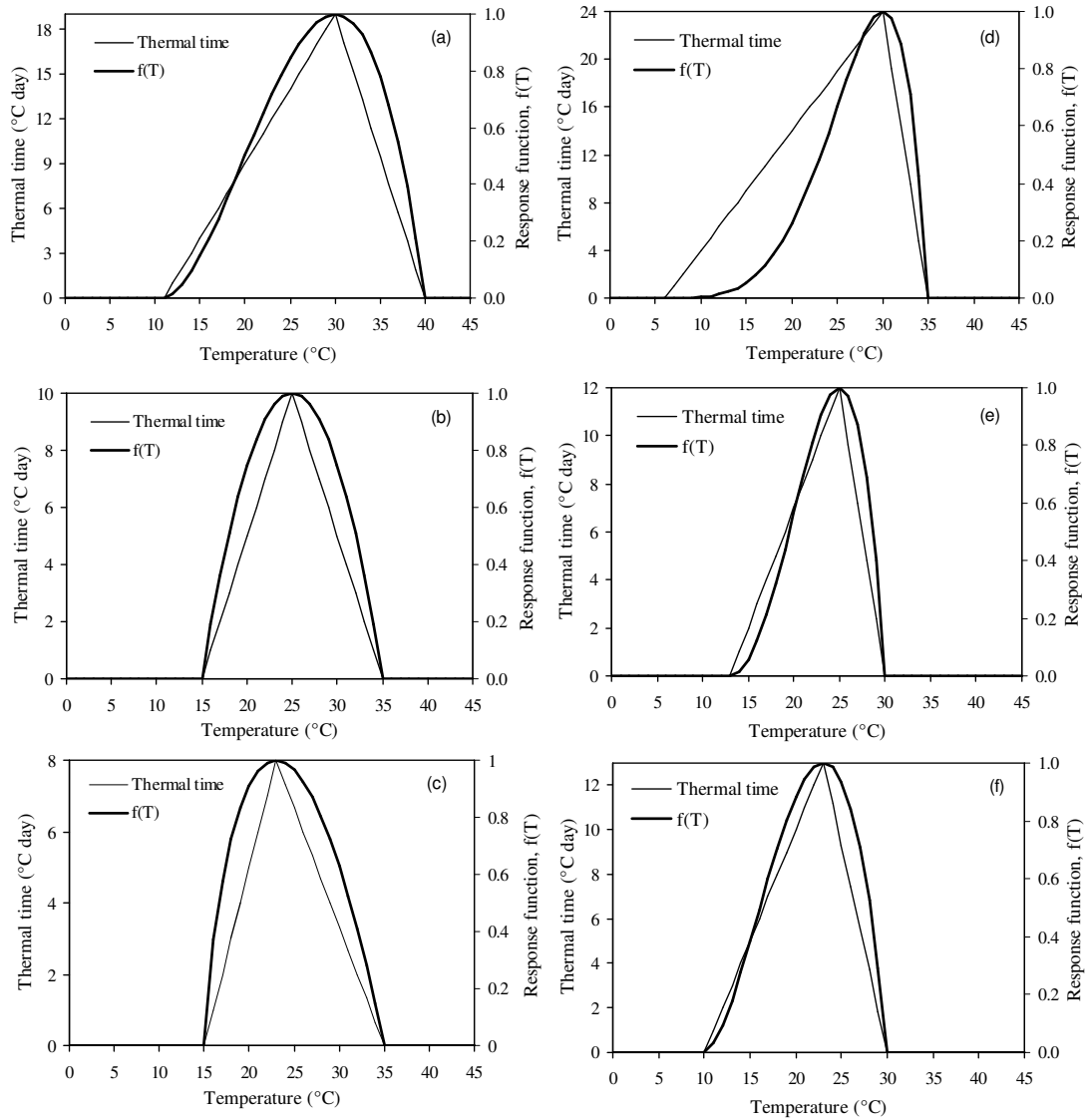


Figure 2. Thermal time method and temperature response function [ $f(T)$ ] of the WE model for developmental phases of irrigated rice and red rice. For the *indica* rice genotypes (IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, IRGA 420, BRS 7 TAIM, BR-IRGA 409, EPAGRI 109 and Hybrid) the cardinal temperatures were:  $T_{min} = 11^\circ\text{C}$ ,  $T_{opt} = 30^\circ\text{C}$ , and  $T_{max} = 40^\circ\text{C}$  for the vegetative phase (EM-R1) (a);  $T_{min} = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_{opt} = 25^\circ\text{C}$ , and  $T_{max} = 35^\circ\text{C}$  for the reproductive phase (R1-R4) (b);  $T_{min} = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_{opt} = 23^\circ\text{C}$ , and  $T_{max} = 35^\circ\text{C}$  for the grain filling phase (R4-R9) (c). For the *japonica* genotype (EEA 406) and the two red rice biotypes the cardinal temperatures were:  $T_{min} = 6^\circ\text{C}$ ,  $T_{opt} = 30^\circ\text{C}$ , and  $T_{max} = 35^\circ\text{C}$  for the vegetative phase (EM-R1) (d);  $T_{min} = 13^\circ\text{C}$ ,  $T_{opt} = 25^\circ\text{C}$  and  $T_{max} = 30^\circ\text{C}$  for the reproductive phase (R1-R4) (e);  $T_{min} = 13^\circ\text{C}$ ,  $T_{opt} = 23^\circ\text{C}$ , and  $T_{max} = 30^\circ\text{C}$  for the grain filling phase (R4-R9) (f).

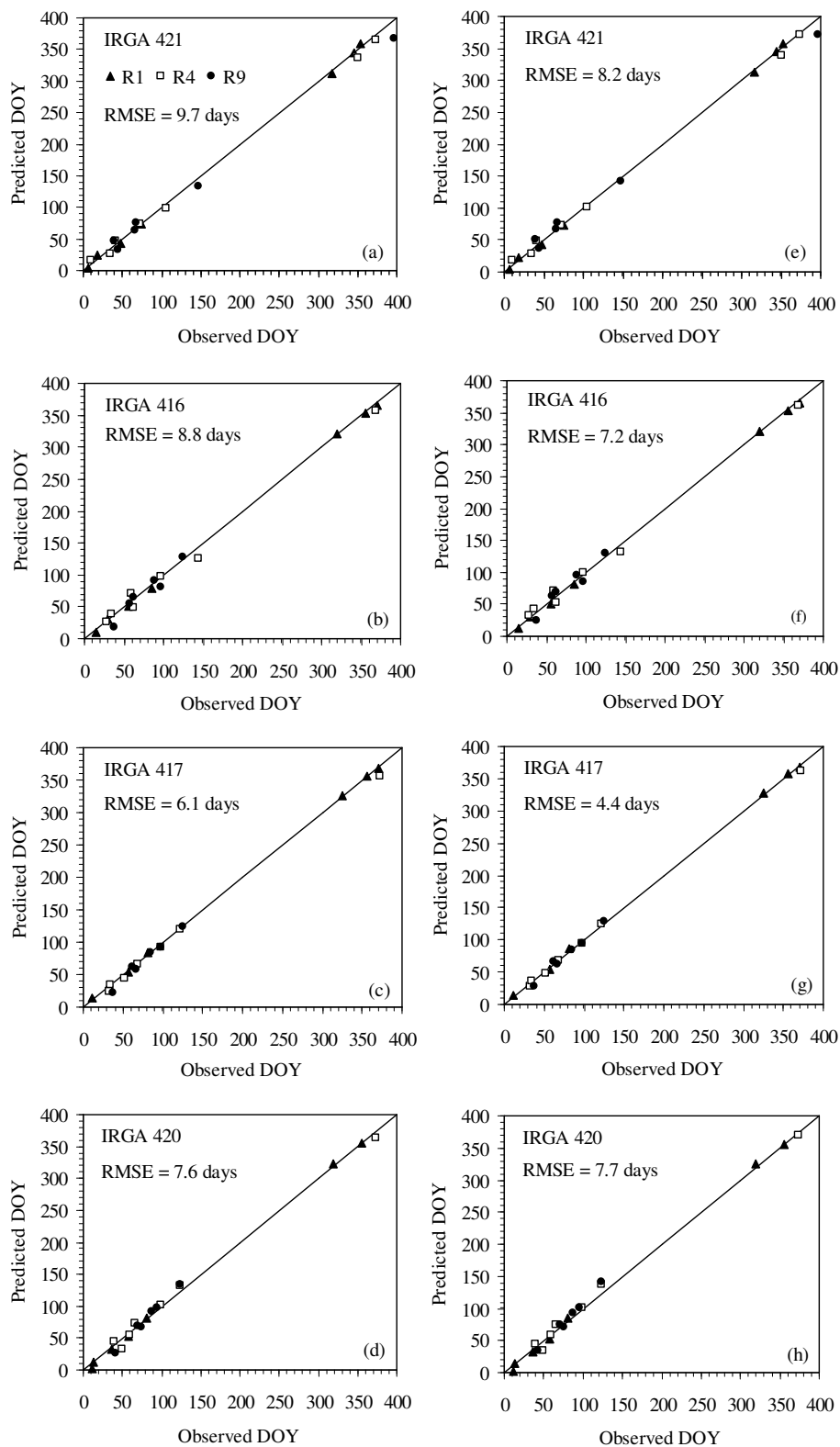


Figure 3. The predicted versus observed day of the year (DOY) of panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) of very early and early irrigated rice genotypes grown in pots with the thermal time model (a), (b), (c) and (d), and with the WE model (e), (f), (g) and (h). The solid line is the 1:1 line. RMSE = root mean square error. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil, 2003-2004 and 2006-2007 growing season.

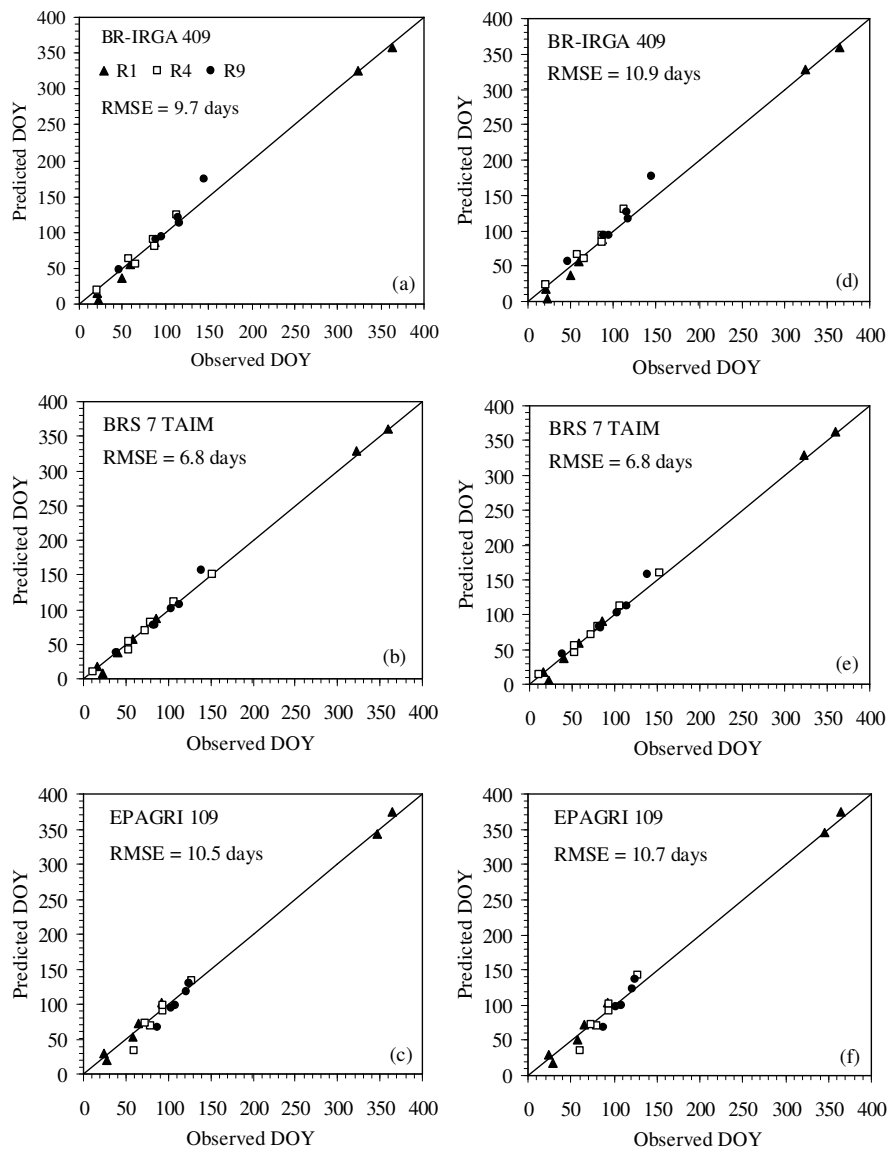


Figure 4. The predicted versus observed day of the year (DOY) of panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) of mid late and late irrigated rice genotypes grown in pots with the thermal time model (a), (b) and (c), and with the WE model (d), (e), and (f). The solid line is the 1:1 line. RMSE = root mean square error. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil, 2003-2004 and 2006-2007 growing season.



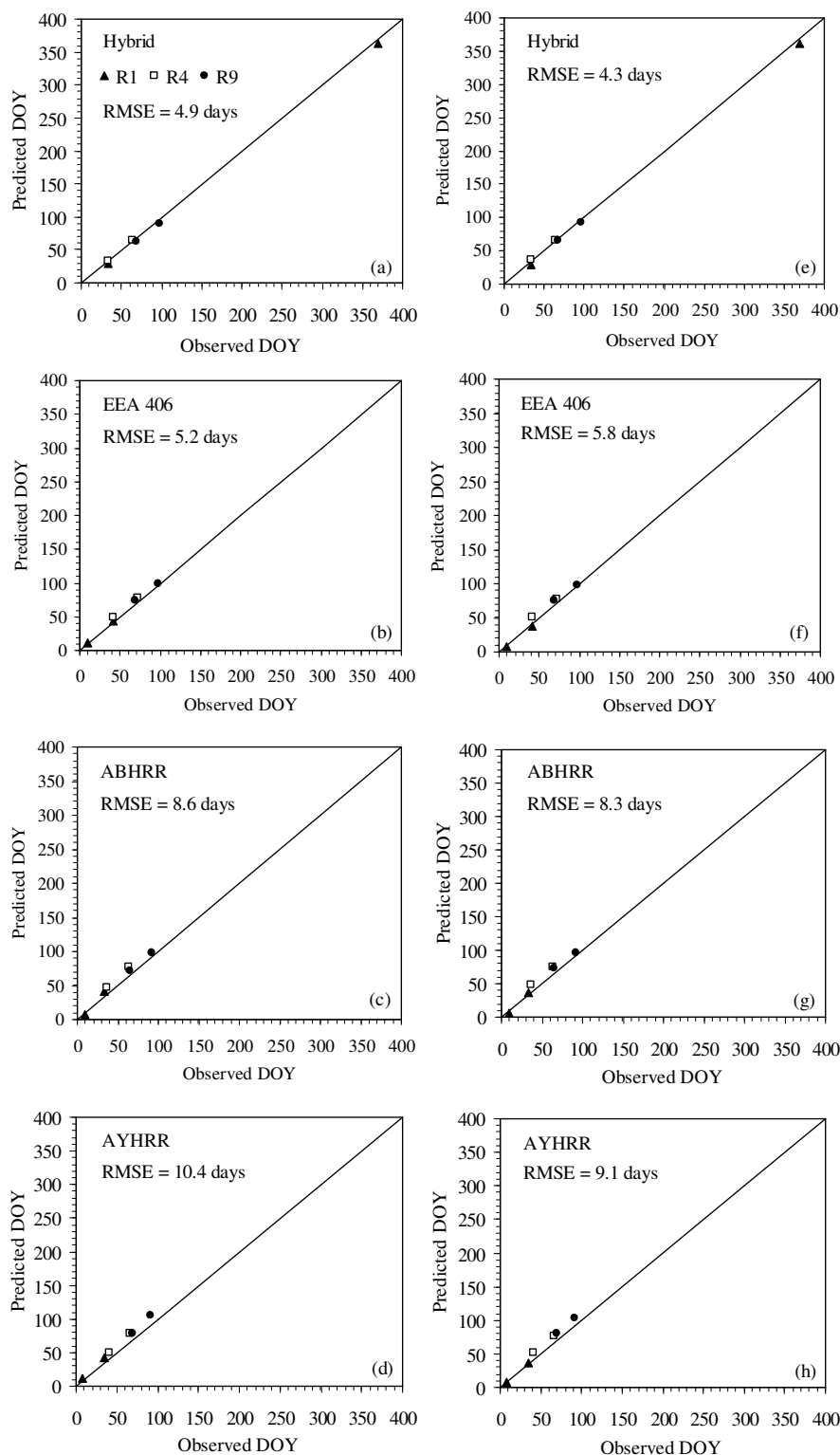


Figure 5. The predicted versus observed day of the year (DOY) of panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) of two irrigated rice genotypes (Hybrid and EEA 406) and two red rice biotypes (Awne blackhull red rice – ABHRR, and Awne yellowhull red rice – AYHRR) grown in pots with the thermal time model (a), (b), (c) and (d), and with the WE model (e), (f), (g) and (h). The solid line is the 1:1 line. RMSE = root mean square error. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil, 2003-2004 and 2006-2007 growing season.

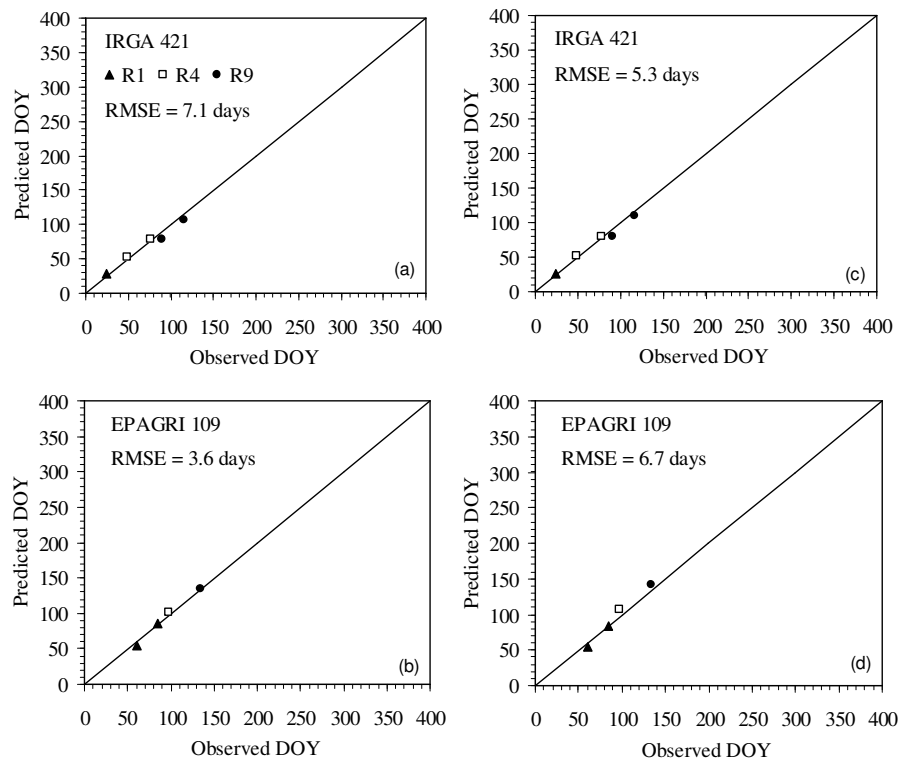


Figure 6. The predicted versus observed day of the year (DOY) of panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains with brown hulls (R9) of two irrigated rice genotypes grown in a paddy rice field with the thermal time model (a), and (b), and with the WE model (c) and (d). The solid line is the 1:1 line. RMSE = root mean square error. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil, 2003-2004 and 2006-2007 growing season.

## **4 CAPÍTULO II**

**TRABALHO A SER ENVIADO PARA PUBLICAÇÃO:**

**Assessing climate change impacts on the development of  
rice and red rice**

**Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2008**

## **Assessing climate change impacts on the development of rice and red rice**

Abstract – The objective of this study was to investigate the response of development of cultivated rice and red rice to climate change scenarios in Santa Maria, RS, Brazil, considering symmetric and asymmetric increases in minimum and maximum daily air temperatures. One hundred years climate scenarios of 0°C, +1°C, +2°C, +3°C, +4°C, and +5°C, with symmetric and asymmetric increases in minimum and maximum daily air temperatures were created with the LARS-WG Weather Generator using a 1969-2003 database. Nine cultivated rice genotypes (IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, IRGA 420, BRS 7 TAIM, BR-IRGA 409, EPAGRI 109, an Hybrid, and EEA 406), and two red rice biotypes (awned blackhull-ABHRR, and awned yellowhull-AYHRR) were used. The date of the following developmental stages of the cultivated rice genotypes and red rice biotypes was estimated with a non-linear simulation model: panicle differentiation (R1), anthesis (R4), and all grains which brown hulls (R9). Overall, the duration of the emergence-R1 phase decreased whereas the duration of the R1-R4 and R4-R9 phases most often increased as temperature increased in the climate change scenarios. The simulated rice development response to elevated temperature was not the same when the increase in minimum and maximum temperature was symmetric or asymmetric. Current rice genotypes may be less competitive with red rice in future climates.

Index terms: *Oryza sativa*, global warming, simulation, phenology, weeds.

## **Avaliação do impacto da mudança climática sobre o desenvolvimento do arroz e do arroz vermelho**

Resumo - O objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta do desenvolvimento do arroz cultivado e do arroz vermelho a cenários de mudança climática em Santa Maria, RS, Brasil, considerando aumentos simétricos e assimétricos nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar. Foram criados cenários climáticos de 100 anos de 0°C, +1°C, + 2°C, +3°C, +4°C e +5°C, com aumentos simétricos e assimétricos nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar com o Weather Generator LARS-WG usando uma base de dados observados de 1969-2003. Foram usados nove genótipos de arroz cultivado (IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, IRGA 420, BRS 7 TAIM, BR-IRGA 409, EPAGRI 109, um Híbrido e EEA 406) e dois biótipos de arroz vermelho (casca preta aristado-ABHRR e casca amarela aristado-AYHRR). A data dos seguintes estágios de desenvolvimento dos genótipos de arroz cultivado e dos biótipos de arroz vermelho foi estimada com um modelo de simulação não linear: diferenciação da panícula (R1), antese (R4) e todos os grãos com casca marrom (R9). Em geral, a duração da fase emergência-R1 diminuiu, enquanto que a duração das fases R1-R4 e R4-R9 aumentaram na maior parte das vezes, com o aumento da temperatura nos cenários de mudança climática. A resposta simulada do desenvolvimento do arroz a elevação da temperatura não foi a mesma quando o aumento na temperatura mínima e máxima foi simétrico ou assimétrico. Os atuais genótipos de arroz podem ser menos competitivos com o arroz vermelho em climas futuros.

Termos para indexação: *Oryza sativa*, aquecimento global, simulação, fenologia, plantas daninhas.

## Introduction

Aside from some minor disagreements, there is a major consensus among scientists that climate is changing and air temperature is rising because of increasing concentrations of CO<sub>2</sub> ([CO<sub>2</sub>]) and other atmosphere greenhouse gases (Weiss et al., 2003; Kerr, 2005; IPCC, 2007). The global atmospheric [CO<sub>2</sub>] has increased from a pre-industrial value of about 280 ppm to 379 ppm in 2005, with a larger annual [CO<sub>2</sub>] growth rate during the last 10 years (1995-2005) that averaged 1.9 ppm per year (IPCC, 2007). There are reports that the 90's was the warmest decade of the last millennium (Kerr, 2005) and numerical studies with Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs) indicate that it is very likely that mean global temperature will increase 1.1 to 6.4°C by the end of this century in several locations, including Brazil (IPCC, 2007). Agroecosystems are likely to be affected by the projected climate change (IPCC, 2007), and these responses will have considerable impacts on public policy at the national and at the international levels.

Rice (*Oryza sativa* L.) is one of three major cereals produced worldwide and constitutes the staple food of more than half of the world population (FAO, 2007). Brazil is the largest rice producer outside Asia, with an annual production of about 11 million t year<sup>-1</sup> (Corrêa, 2007). Rio Grande do Sul State is the largest Brazilian rice producer, with an average yield of 6.7 t ha<sup>-1</sup> in about one million hectares of flood irrigated fields (IRGA, 2007). Red rice (*Oryza sativa* L.) is one of the top weeds causing considerable yield losses in paddy rice fields both worldwide (Noldin et al., 1999) and in Brazil (Marchezan et al., 2004).

Plant development is a key process in defining crop yield. To maximize crop yield, developmental phases ought to be completed when the environmental factors (mainly temperature, water, and solar radiation) are near to their optimum levels. Therefore, when assessing crop response to climate change, an important scientific question is: how will crop development change if climate changes? This question extends to weeds, as crop-weed competition is largely depending upon developmental stage.

Developmental models are major tools in studies of crop development response to climate change (Streck et al., 2006). These models take into account major environmental factors that drive plant development (Streck et al., 2003, 2007). Temperature is a major abiotic factor that drives rice development (Gao et al., 1992; Infeld et al., 1998). There are two broad groups of models to account for temperature effects on plant development; linear models (Infeld et al., 1998; Steinmetz et al., 2006), and non-linear models (Gao et al., 1992; Streck et al., 2003, 2007). Linear models usually work well at "normal" temperature, but not

rarely fail when crops develop at under and above “normal” temperatures (Streck et al., 2003, 2007). Therefore, when assessing crop development response to climate change scenarios, non-linear models should be preferred (Streck et al., 2006).

Some research has been devoted to study the effect of climate change on rice development (Lal et al., 1998; Tao et al., 2006). In Brazil, to the best of our knowledge, only the study by Steinmetz et al. (2006) reports on the effect of climate change on rice development. In this study, rice development response to temperature was simulated using the linear approach (thermal time concept) and for only the emergence to panicle differentiation phase, i.e., the vegetative phase. Furthermore, in the Steinmetz et al. (2006) study, thermal time was calculated using daily mean temperature considering a base temperature of 11°C and an upper threshold of 30°C, and climate change scenarios were created by adding +1°C, +2°C, +3°C and +5.8°C to the mean daily temperature. It is important to extend the study by Steinmetz et al. (2006) to later developmental stages in rice and considering daily minimum and maximum temperatures in the climate scenarios because plant development is affected not only by the daily mean temperature but also (and mainly) by daily minimum and maximum temperatures (Xue et al., 2004) and because asymmetric changes in minimum and maximum daily air temperatures have been reported worldwide, with higher increase in minimum than in maximum daily air temperature (Peng et al., 2004; IPCC, 2007), which constituted the rationale for this scientific effort.

The objective of this study was to investigate the response of development of cultivated rice and red rice to climate change scenarios in Santa Maria, RS, considering symmetric and asymmetric increases in minimum and maximum daily air temperatures.

### **Material and Methods**

This numerical study was performed in Santa Maria, RS (latitude: 29°43'S, longitude: 53°43'W, and altitude: 95m). This location is representative of a major rice region in Rio Grande do Sul State. Meteorological data records from 1969 to 2003 collected at a standard Meteorological Station of the Brazilian National Weather Service (8° Distrito de Meteorologia) located at the Crop Science Department of the Federal University of Santa Maria, RS, were used in the study.

Climate change scenarios were created with the LARS-WG Weather Generator (Semenov et al., 1998), using as database the meteorological data records from 1969 to 2003.

LARS-WG is a stochastic model widely used for downscaling large scale projections of future climates in studies of the impact of climate change scenarios on agroecosystems (Weiss et al., 2003; Richter & Semenov, 2005; Streck & Alberto, 2006a,b). This stochastic model can generate data series using semi-empirical probability distribution functions that keep the statistics of the original data series, which should be compared with the statistics of the observed (Semenov & Barrow, 1997; Semenov et al., 1998). One hundred years of daily weather data with increases of 0°C (current climate) +1°C, +2°C, +3°C, +4°C, and +5°C (future climates) in mean air temperature, considering symmetric and asymmetric increases in minimum and maximum temperatures were generated (Table 1). The asymmetric increase was assumed to be 20% greater for the minimum than for the maximum temperature over the increase in mean temperature. The comparison between these climate change series and the observed series from 1969 to 2003 for Santa Maria was done previously (Streck & Alberto, 2006a,b) and there was no difference between statistics, indicating that the climate series generated with LARS-WG can be used in this study.

Nine rice genotypes (IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, IRGA 420, BRS 7 TAIM, BR-IRGA 409, EPAGRI 109, EEA 406 and Hybrid) and two red rice biotypes (ABHRR, AYHRR) were used. The rice genotypes are of subspecies *indica* semi-dwarf, except genotype EEA 406 which is an old genotype used in the 60's and representative of the *japonica* subspecies (tall, broad-leaf plant) used as a red rice simulator in crop-weed competition studies (Agostinetto et al., 2004). These genotypes were selected because they are widely grown in southern Brazil and have a broad range of rate of development, varying from very early (IRGA 421) to late (EPAGRI 109) and represent both subspecies of *Oryza sativa*. The two red rice biotypes are representative of red rice types usually found in rice fields in this location, i.e., blackhull and strawhull.

The development simulation model for cultivated flood-irrigated rice and red rice used in this study is the Wang and Engel (WE) model (Wang & Engel, 1998). This model is simple, the coefficients have biological meaning and operational definition, the effects of environmental factors on crop development are represented by non-linear response functions combined in a multiplicative fashion and it was calibrated and tested for the nine cultivated rice genotypes and the two red rice biotypes by Lago (2008, chapter 1). In the WE model, the developmental cycle of irrigated and red rice was divided into three phases (Gao et al., 1992; Infeld et al., 1998): the vegetative phase from emergence (EM) to panicle differentiation (R1), the reproductive phase from R1 to anthesis (R4), and the grain filling phase from R4 to all grains which brown hulls (R9).



The first step in the WE model is to calculate the daily plant developmental rate ( $r$ ). The developmental stage (DS) is calculated by accumulating daily developmental rates ( $DS = \sum r$ ). DS is zero at EM, 0.4 at R1, 1 at R4, and 2 at R9. The general form of the WE model is:

$$r = r_{\max,v} f(T) \quad (1)$$

for the vegetative phase (EM – R1),

$$r = r_{\max,r} f(T) \quad (2)$$

for the reproductive phase (R1 – R4) and

$$r = r_{\max,gf} f(T) \quad (3)$$

for the grain filling phase (R4 – R9),

where  $r$  is the daily developmental rate ( $\text{day}^{-1}$ ),  $r_{\max,v}$ ,  $r_{\max,r}$  and  $r_{\max,gf}$  are daily maximum developmental rate ( $\text{day}^{-1}$ ) during vegetative, reproductive, and grain filling phases, respectively, and  $f(T)$  is a temperature response function varying from zero to 1. The temperature response function [ $f(T)$ ] is a beta function defined as (Wang & Engel, 1998; Streck et al., 2003):

$$f(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{\min} & (4) \\ \left[ 2(T - T_{\min})^\alpha (T_{\text{opt}} - T_{\min})^\alpha - (T - T_{\min})^{2\alpha} \right] / (T_{\text{opt}} - T_{\min})^{2\alpha}, & T_{\min} \leq T \leq T_{\max} & (5) \\ 0, & T > T_{\max} & (6) \end{cases}$$

$$\alpha = \ln(2) / \ln \left[ (T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\text{opt}} - T_{\min}) \right] \quad (7)$$

where  $T_{\min}$ ,  $T_{\text{opt}}$ , and  $T_{\max}$  are cardinal temperatures for each developmental phase and  $T$  is the air temperature. For each climate scenario (Table 1), the  $f(T)$  was calculated using daily minimum (TN) and maximum (TX) air temperatures and then the resulting daily values of  $f(T)$  were averaged. This approach was used because in a non-linear function, averaging TN and TX first and then calculate  $f(T)$  with the average daily temperature is not correct (Xue et al., 2004).

The cardinal temperatures ( $T_{\min}$ ,  $T_{\text{opt}}$  e  $T_{\max}$ ) for the *indica* rice genotypes were the same as used in Lago (2008, chapter 1): 11°C, 30°C, and 40°C for the EM-R1 phase; 15°C, 25°C, and 35°C for the R1-R4 phase; 15°C, 23°C, and 35°C for the R4-R9 phase for  $T_{\min}$ ,  $T_{\text{opt}}$  e  $T_{\max}$ , respectively. For the *japonica* rice genotype and the two red rice biotypes the cardinal

temperatures ( $T_{\min}$ ,  $T_{\text{opt}}$  e  $T_{\max}$ ) were (Lago, 2008, chapter 1): 6, 30, and 35°C for the phase EM-R1; 13, 25 and 30°C for the phase R1-R4; 13, 23, and 30°C for the phase R4-R9 for  $T_{\min}$ ,  $T_{\text{opt}}$  e  $T_{\max}$ , respectively. Coefficients  $r_{\max,v}$ ,  $r_{\max,r}$ ,  $r_{\max,gf}$  for each developmental phase (EM-R1, R1-R4 and R4-R9) and for each genotype are in Table 2.

For each of the one hundred years in each scenario (Table 1), simulation started on 15 November, which is within the currently recommended sowing period for this location, which is from 01 October to 10 December (SOSBAI, 2007). The duration, in days, of the EM-R1, R1-R4, and R4-R9 developmental phases was calculated for each of the 100 years of the climate scenarios (Streck et al., 2006).

Data analysis consisted of calculating the deviations (difference between climate change scenarios and the no change climate scenario) of the duration of developmental phases for the 100 years and averaging the deviations for each climate scenario (Weiss et al., 2003). A positive deviation means developmental phase increases in the scenarios of climate change, whereas a negative deviation means developmental phase decreases under climate change scenarios. No other statistical comparison among climate scenarios was performed, because they may not be appropriate in this type of study and trends provide sufficient information to interpret crop response to climate change (Weiss et al., 2003).

## Results and discussion

A trend of increasing negative deviations in the duration of the vegetative (EM-R1) phase, i.e. a shorter phase, for increased temperature scenarios was simulated for the *indica* rice genotypes both when the increase in minimum and maximum temperature was symmetric (scenarios 1a, 2a, 3a, 4a, 5a) and asymmetric (scenarios 1b, 2b, 3b, 4b, 5b) (Figures 1, 2, 3). Greater shortening of this phase was in the asymmetric increase based scenarios, and deviations increased with the length of this phase, which in turn is a function of maturation group. Negative deviations varied from 8 days for the IRGA 421 (very early) genotype to 12 days for the EPAGRI 109 (late) genotype in the 5b scenario. The trend of shortening this developmental phase was similar but smaller for the *japonica* genotype (EEA 406) and the red rice biotypes for the asymmetric increase based scenarios with a negative deviation of 6 days for these three genotypes in scenario 5b. For the EEA 406 and red rice biotypes in the symmetric increase based scenarios there was a slight shortening until a +3°C increase (1 day)

and a slight lengthening of 1 day and 2 days for the +4°C and +5°C scenarios, respectively (Figure 3B, 3C, 3D).

Steinmetz et al. (2006) also reported shortening of the EM-R1 phase in elevated temperature scenarios varying from 8 to 34 days depending upon the location (8 locations) and maturation group (early or medium) for the +5.8°C scenario. During the EM-R1 phase, roots grow, tillering takes place and leaf area expands. A shorter EM-R1 phase if temperature rises, may decrease the number of tillers and reduce leaf area, which in turn may affect rice yield negatively. Field management operations like the date of side-dressing nitrogen application, recommended at the onset of tillering and at R1 (SOSBAI, 2007), would also have to be changed. From a crop-weed competition stand point, a greater shortening of the EM-R1 phase of the modern (*indica*) genotypes compared to the red rice biotypes may result in reduced competitiveness of the cultivated rice with this weed, decreasing rice yield even further under a warmer climate.

There was an increase in the duration of the R1-R4 phase (positive deviations) simulated for the *indica* genotypes as temperature increased when the increase in minimum and maximum was symmetric (Figures 1, 2, 3A). The greatest delay for completing this phase was simulated in scenario 5a, where positive deviations varied from 4 days for IRGA 421 (very early) to 10 days for BR-IRGA 409 (mid late). For the asymmetric increase based scenarios, the deviations in the R1-R4 phase of *indica* genotypes were slightly negative (shorter phase) in +1°C and +2°C and slightly positive (longer phase) for greater temperature increases (+3, +4, +5°C). For the EEA 406 and red rice genotypes, deviations in the duration of the R1-R4 phase were negative in all climate change scenarios, with the greatest reduction of 4 days in the scenario 3b (Figure 3B, 3C, 3D). A longer R1-R4 phase may increase the number of days that plants are exposed to high temperatures which may cause spikelet sterility. An exposure to 35°C during anthesis can cause 20-30% sterility (Horie, 1993; Matsui et al., 1997). In the scenarios used in our study, maximum temperature during the 100 years was equal to or greater than 35°C in 4%, 7%, 11%, 15%, and 21% of the days in scenarios 1a, 2a, 3a, 4a, and 5a, respectively, and 4%, 6%, 8%, 11%, and 15% in scenarios 1b, 2b, 3b, 4b, and 5b, respectively, compared to only 2% in the scenario with no change (current climate). The shortening of the R1-R4 phase of the red rice biotypes simulated for all climate change scenarios in this study means that plants of this weed would be exposed to high temperatures for a shorter time (days), which can decrease spikelet sterility compared to the cultivated rice. One consequence of such difference in the duration of the R1-R4 phase with

the modern rice genotypes would be an increase in red rice seed bank in the soil in a warmer climate.

The simulated duration of the R4-R9 phase increased (positive deviations) in the climate change scenarios for the *indica* genotypes (Figures 1, 2A, 3A) except for BR-IRGA 409 (Figure 2B) and EPAGRI 109 (Figure 2C), with slightly greater deviations in the symmetric increase based scenarios. BR-IRGA 409 and EPAGRI 109 had negative deviations for small increased temperatures (up to +3°C) and small positive deviations in the +4°C and +5°C scenarios. Positive deviations for the R4-R9 phase were also simulated for the *japonica* genotype (EEA 406) and red rice biotypes (Figure 3B, 3C, 3D), which had the greatest positive deviations of all genotypes, with slightly greater values in the asymmetric increase based temperature scenarios, reaching 10 days in scenario 5b.

A longer R4-R9 (grain filling) phase increases the opportunity for grain growth but at the same time higher nighttime temperature (especially in asymmetric scenarios) increases canopy respiration, which may affect negatively grain yield, offsetting the positive effect of elevated CO<sub>2</sub> on crop growth and yield (Lal et al., 1998; Streck, 2005; Streck & Alberto, 2006a).

Deviations in the total (EM-R9) developmental cycle were different for symmetric increase based scenarios and asymmetric increase based scenarios (Figures 1, 2, 3). Overall, in the symmetric temperature increase scenarios, there was a slight decrease (negative deviations lower than 5 days) for scenarios 1a, 2a and 3a, and an increase (positive deviation) in the duration of the EM-R9 phase for scenarios 4a and 5a that reached 3 days in the EPAGRI 109 genotype and 6-7 days in other genotypes, including red rice biotypes. On the other hand, in the asymmetric temperature increase scenarios, a general trend of decreasing the duration of EM-R9 phase as temperature increased was simulated until +3°C (scenario 3b) for all genotypes. For higher temperature increases (+4°C and +5°C) the negative deviations decreased, reaching positive deviations for some genotypes (IRGA 421, the Hybrid, EEA 406), and the red rice biotypes in scenario 5b. The greatest negative deviations of this phase in scenario 3b varied from 5 days for IRGA 421 (very early) to 12 days for EPAGRI 109 (late) in the *indica* genotypes and were about 6 days for EEA 406 and red rice biotypes.

A longer EM-R9 developmental cycle simulated for the +4°C and +5°C symmetric increase based scenarios mean that rice plants will be exposed to supra-optimum temperatures during more days, which has the negative effect of increasing respiration, that offsets the positive effects of increasing [CO<sub>2</sub>] on photosynthesis and growth throughout the crop developmental cycle (Streck, 2005; Streck & Alberto, 2006a). However, a shorter EM-R9

phase simulated for asymmetric increases in temperature up to +3°C could reduce the negative effects of energy losses through respiration throughout the crop developmental cycle in one hand, but on the other hand respiration would be increased because higher nighttime temperature as increase in minimum air temperature is higher than in maximum air temperature.

Most studies with different crops, including rice, project a decrease in the duration of crop developmental phases under climate change scenarios (Lal et al., 1998; Weiss et al., 2003; Steinmetz et al., 2006; Tao et al., 2008). Some studies, however, report increases in the developmental phases in elevated temperature scenarios (Streck et al., 2006). These studies used different approaches to describe the effect of temperature on development; the former used linear models and the latter used non-linear models. While linear models usually describe well the response of plant development to temperature in many practical situations, they may fail under unusual situations such as high temperatures (Xue et al., 2004). Therefore, the choice of a model for different purposes has to be based on appropriateness, and non-linear models are more appropriate for assessing the impact of climate change scenarios on crop development. In our study we used a non-linear model to describe the response of rice development to temperature considering the three cardinal temperatures for development. This model was previously evaluated (Lago, 2008, Chapter 1) and the simulations of the duration of developmental phases in the no change (current climate) scenario were realistic, depicting the difference among developmental phases and among cultivated genotypes and red rice biotypes (Figure 4). A longer developmental phase simulated in elevated temperature scenarios (Figure 4B e 4C) is because of a delay in the developmental rate at supra optimum temperatures (eq. 4 to 7), which were more frequent and higher in the climate change scenarios than in the no change (current climate) scenario.

Among uncertainties about future climates is if minimum and maximum temperature will rise at the same rate or not. Our simulation indicate that rice developmental response to elevated temperatures is not the same if the increase in minimum and maximum temperature is symmetric or asymmetric. Therefore, caution should be taken when conclusions about the impact of climate change scenarios are drawn based only on a constant increase in daily temperature amplitude (symmetric increase). These results add more ingredients to the list of uncertainties that make agroecosystems highly vulnerable to climate change (IPCC, 2007).

There are several limitations in numerical studies on the impact of climate change scenarios on crops performance, among them most of the studies do not consider insects, diseases and weeds (Lal et al., 1998; Streck et al., 2006). In our study we simulated the

development response of two red rice biotypes, a major weed in paddy rice fields worldwide (Noldin et al., 1999). The results showed that current modern rice genotypes may be less competitive with red rice in future climates. These results are important for rice breeders and it is recommended that they consider looking at additional traits to compose the portfolio of morphological and agronomic characteristics for the selection of the next generation of rice genotypes.

### Conclusions

1. A reduction in the duration of the EM-R1 phase is projected if air temperature rises, with *indica* genotypes being more sensitive than the *japonica* genotype and red rice biotypes.
2. The duration of the R1-R4 phase is expected to increase for *indica* genotypes and to decrease for the *japonica* genotype and red rice biotypes in future climates.
3. An increase in the duration of the R4-R9 phase is expected for most of the cultivated rice genotypes (except BR-IRGA 409 and EPAGRI 109) and red rice biotypes in a warmer climate.
4. A symmetric increase in minimum and maximum temperature is expected to lead to an increase in the duration of the total (EM-R9) developmental cycle whereas an asymmetric increase in minimum and maximum temperature is expected to shorten the total cycle of cultivated rice and red rice.
5. Current rice genotypes may be less competitive with red rice in future climates.

### References

AGOSTINETTO, D.; FLECK, N.G.; RIZZARDI, M.A.; BIANCHI, M.A.; SILVA, P.R.F. Comparação de modelos matemáticos na estimativa das perdas de produtividade de grãos em arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.847-856, 2004.

CORRÊA, S. **Anuário Brasileiro do arroz 2007**. Santa Cruz: Gazeta, 2007. 128p.

FAO. **International year of rice**. Available at: <<http://www.fao.org/rice2004/en/speeches.htm>>. Accessed 05 Feb. 2007.

GAO, L.; JIN, Z.; HUANG, Y.; ZHANG, L. Rice clock model – a computer model to simulate rice development. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.60, p.1-16, 1992.

HORIE, T. Predicting the effects of climate variation and effect of CO<sub>2</sub> on rice yield in Japan. **Journal of Agricultural Meteorology**, v.48, p.567-574, 1993.

INFELD, J.A.; SILVA, J.B.; ASSIS, F.N. Temperatura base e graus-dia durante o período vegetativo de três grupos de cultivares de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, p.187-191, 1998.

IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. **Climate change 2007: The physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: University, 2007.

IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. **Dados de safra. Série histórica da área plantada, produção e rendimento**. Available at: <<http://www.irga.rs.gov.br/dados.htm>>. Accessed 20 Oct. 2007.

KERR, R.A. Millennium's hottest decade retains its title, for now. **Science**, v.307, p.828-829, 2005.

LAL, M.; SINGH, K.K.; RATHORE, L.S.; SRINIVASAN, G.; SASEENDRAN, S.A. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.89, p.101-114, 1998.

MARCHEZAN, E.; ÁVILA, L.A.; ANDRES, A.; MAGALHÃES Jr. A.M.; MACHADO, S.L.O.; PETRINI, J.A. Controle do arroz vermelho. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES Jr. A.M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa, 2004. p.547-573.

MATSUI, T.; NAMUCO, O.S.; ZISKA, L.H.; HORIE, T. Effects of high temperature and CO<sub>2</sub> concentration on spikelet sterility in indica rice. **Field Crops Research**, v.51, p.213-219, 1997.

NOLDIN, J.A.; CHANDLER, J.M.; McCAULEY, G.N. Red rice (*Oryza sativa*) biology. I. Characterization of red rice ecotypes. **Weed Technology**, v.13, p.12-18, 1999.

PENG, S.; HUANG, J.; SHEEHY, J.E.; LAZA, R.C.; VISPERAS, R.M.; ZHONG, X.; CENTENO, G.S.; KHUSH, G.S.; CASSMAN, K.G. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. **National Academy of Sciences of the USA**, v.101, p.9971-9975, 2004.

RICHTER, G.M.; SEMENOV, M.A. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. **Agricultural Systems**, v.84, p.77-97, 2005.

SEMENOV, M.A.; BARROW, E.M. Use of stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. **Climate Research**, v.35, p.397-414, 1997.

SEMENOV, M.A., BROOKS, R.J., BARROW, E.M. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. **Climate Research**, v.10, p.95-107, 1998.

SOSBAI (Sociedade Sul Brasileira de Arroz irrigado). **Arroz irrigado: Recomendações técnicas para o sul do Brasil**. Santa Maria: SOSBAI, 2005. 159p.

STEINMETZ, S.; PINHEIRO, M.J.; FERREIRA J.S.A.; DEIBLER, A.N. Impacto do aquecimento global sobre a duração da fase vegetativa do arroz irrigado, estimada pelo método de graus-dia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 2., REUNIÃO NACIONAL DA PESQUISA DE ARROZ, 8., 2006, Brasília. **Anais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1 CD ROM. (Trabalho Completo).

STRECK, N.A.; WEISS, A.; XUE, Q.; BAENZIGER, P. S. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: A modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.115, p.139-150, 2003.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v.35, p.730-740, 2005.



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

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

STRECK, N.A.; LAGO, I.; ALBERTO, C.M.; BISOGNIN, D.A. Simulação do desenvolvimento da batata cultivar Asterix em cinco cenários de mudanças climáticas em Santa Maria, RS. **Bragantia**, v.65, p.693-702, 2006.

STRECK, N.A.; PAULA, F.L.M.; BISOGNIN, D.A.; HELDWEIN, A.B.; DELLAI, J. Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum L.*). **Agricultural and Forest Meteorology**, v.142, p.1-11, 2007.

TAO, F.; YOKOZAWA, M.; XU, Y.; HAYASHI, Y.; ZHANG, Z. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.138, p.82–92, 2006.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, v.58, p.1-24, 1998.

WEISS, A.; HAYS, C.J.; WON, J. Assessing winter wheat response to climate change scenarios: a simulation study in the U.S. Great Plains. **Climatic Change**, v.58, p.119-147, 2003.

XUE, Q.; WEISS, A.; BAENZIGER, P.S. Predicting leaf appearance in field grown winter wheat: evaluation linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, v.175, p.261-270, 2004.

Table 1. One hundred years scenarios of increased temperature used in the study. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil.

Scenarios	Minimum temperature (°C)	Maximum temperature (°C)	Mean temperature (°C)
No change	0	0	0
1a	+1.0	+1.0	+1.0
2a	+2.0	+2.0	+2.0
3a	+3.0	+3.0	+3.0
4a	+4.0	+4.0	+4.0
5a	+5.0	+5.0	+5.0
1b	+1.2	+0.8	+1.0
2b	+2.4	+1.6	+2.0
3b	+3.6	+2.4	+3.0
4b	+4.8	+3.2	+4.0
5b	+6.0	+4.0	+5.0

Table 2. Coefficients of the Wang & Engel model ( $r_{\max,v}$ ,  $r_{\max,r}$ ,  $r_{\max,gf}$ ) for the developmental phases emergence to panicle differentiation (EM-R1), panicle differentiation to anthesis (R1-R4) and anthesis to all grains with brown hulls (R4-R9) in nine irrigated rice genotypes and red rice biotypes. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil. After Lago (2008, chapter 1).

Genotype	R1	R4	R9
	$r_{\max,v}$	$r_{\max,r}$	$r_{\max,gf}$
IRGA 421	0.0158	0.0386	0.0479
IRGA 416	0.0132	0.0229	0.0571
IRGA 417	0.0122	0.0282	0.0497
IRGA 420	0.0126	0.0221	0.0520
BR-IRGA 409	0.0118	0.0153	0.0515
BRS 7 TAIM	0.0114	0.0197	0.0506
EPAGRI 109	0.0091	0.0172	0.0557
Hybrid	0.0138	0.0258	0.0517
EEA 406	0.0161	0.0366	0.0719
ABHRR <sup>+</sup>	0.0170	0.0376	0.0709
AYHRR <sup>+</sup>	0.0165	0.0364	0.0601

<sup>+</sup>ABHRR = Awned blackhull red rice, AYHRR = Awned yellowhull red rice.

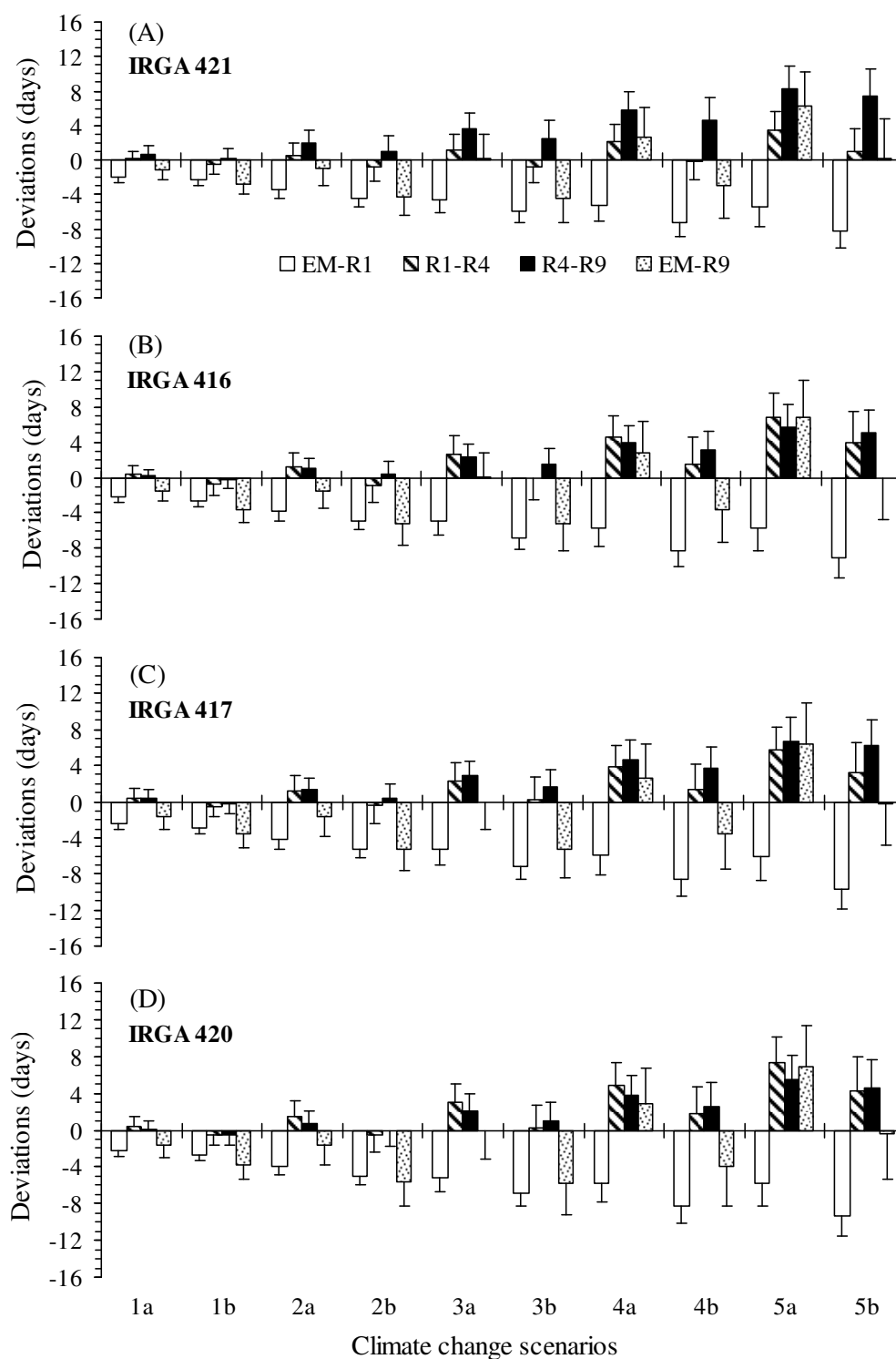


Figure 1. Deviations (in days) of the duration of EM-R1, R1-R4, R4-R9, and EM-R9 developmental phases of the very early and early irrigated rice genotypes IRGA 421, IRGA 416, IRGA 417, and IRGA 420 simulated for climate change scenarios of +1°C, +2°C, +3°C, +4°C, and +5°C related to the scenario with no change in temperature. Scenarios are numbered according to the increase of temperature (e.g. 1 = +1°C) and the letter associated with each scenario relate to symmetric (a) and asymmetric (b) changes in minimum and maximum daily temperature according to Table 1. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil. EM=emergence, R1=panicle differentiation, R4=anthesis, R9=all grains with brown hulls. Error bars represent one standard deviation of the mean of 100 years of simulations.

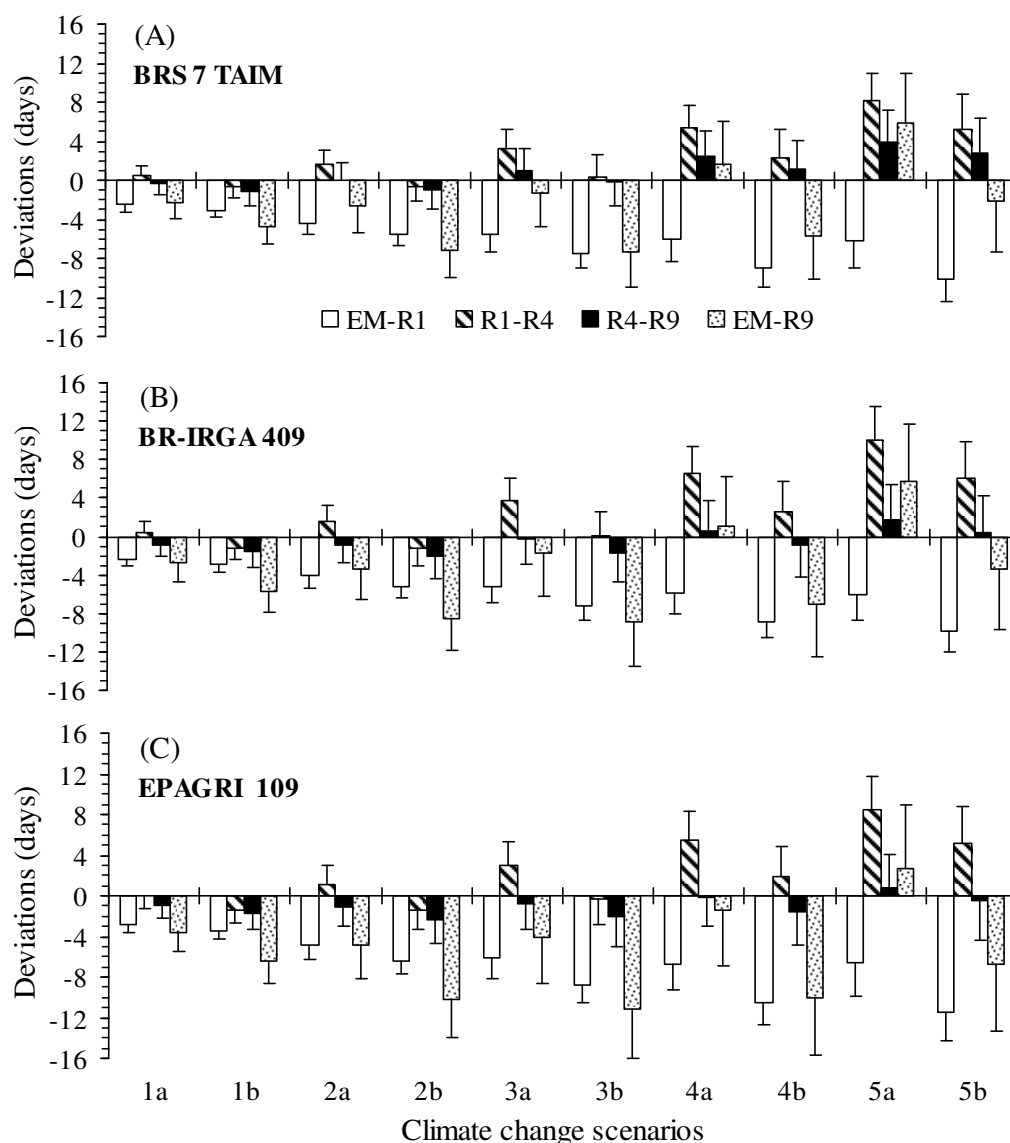


Figure 2. Deviations (in days) of the duration of EM-R1, R1-R4, R4-R9, and EM-R9 developmental phases of the mid late and late irrigated rice genotypes BRS 7 TAIM, BR-IRGA 409, and EPAGRI 109 simulated for climate change scenarios of +1°C, +2°C, +3°C, +4°C, and +5°C related to the scenario with no change in temperature. Scenarios are numbered according to the increase of temperature (e.g. 1 = +1°C) and the letter associated with each scenario relate to symmetric (a) and asymmetric (b) changes in minimum and maximum daily temperature according to Table 1. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil. EM=emergence, R1=panicle differentiation, R4=anthesis, R9=all grains with brown hulls. Error bars represent one standard deviation of the mean of 100 years of simulations.

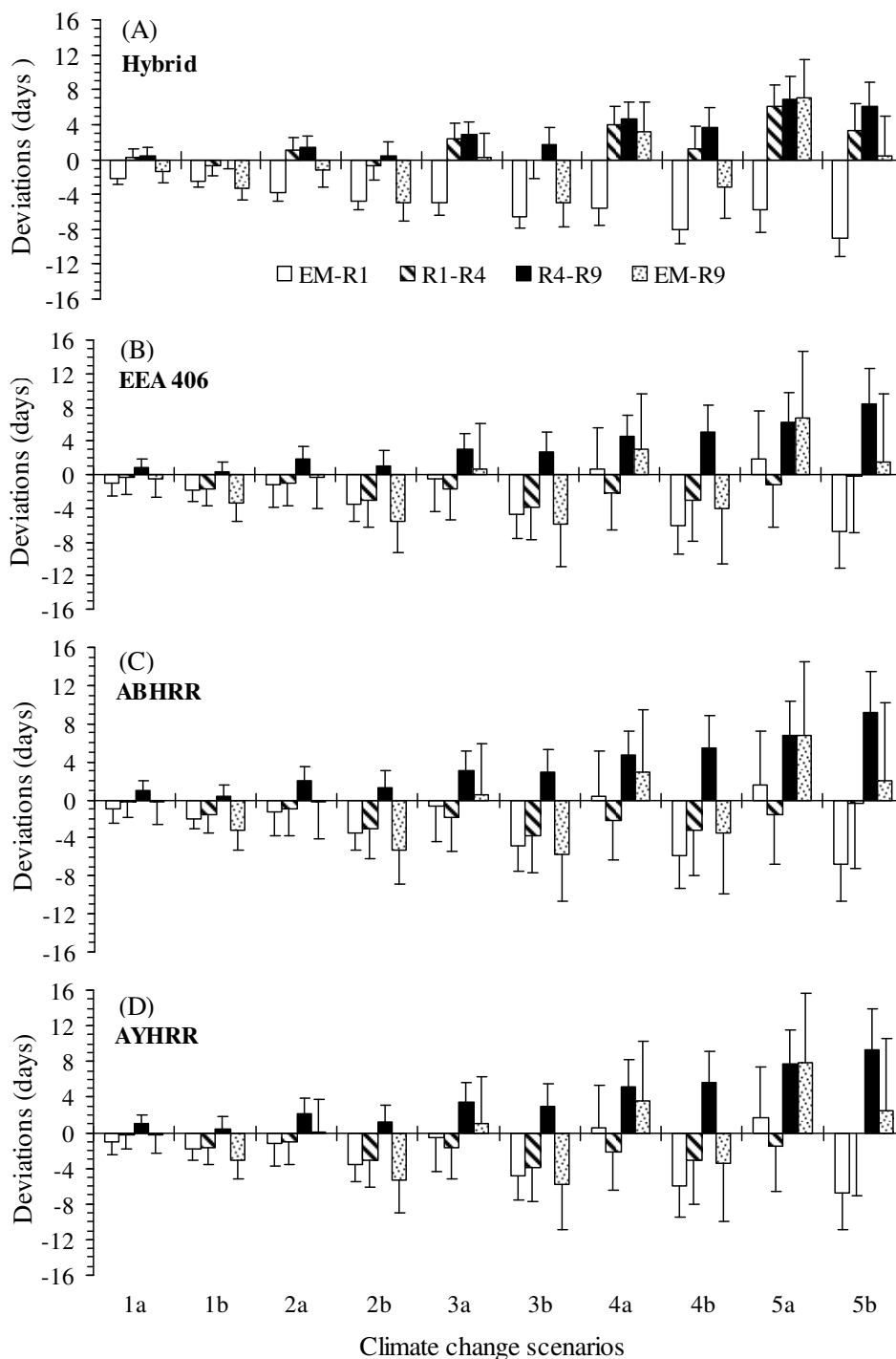


Figure 3. Deviations (in days) of the duration of EM-R1, R1-R4, R4-R9, and EM-R9 developmental phases of the irrigated rice genotypes Hybrid and EEA 406, and red rice biotypes ABHRR and AYHRR simulated for climate change scenarios of +1°C, +2°C, +3°C, +4°C, and +5°C related to the scenario with no change in temperature. Scenarios are numbered according to the increase of temperature (e.g. 1 = +1°C) and the letter associated with each scenario relate to symmetric (a) and asymmetric (b) changes in minimum and maximum daily temperature according to Table 1. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil. EM=emergence, R1=panicle differentiation, R4=anthesis, R9=all grains with brown hulls. Error bars represent one standard deviation of the mean of 100 years of simulations.

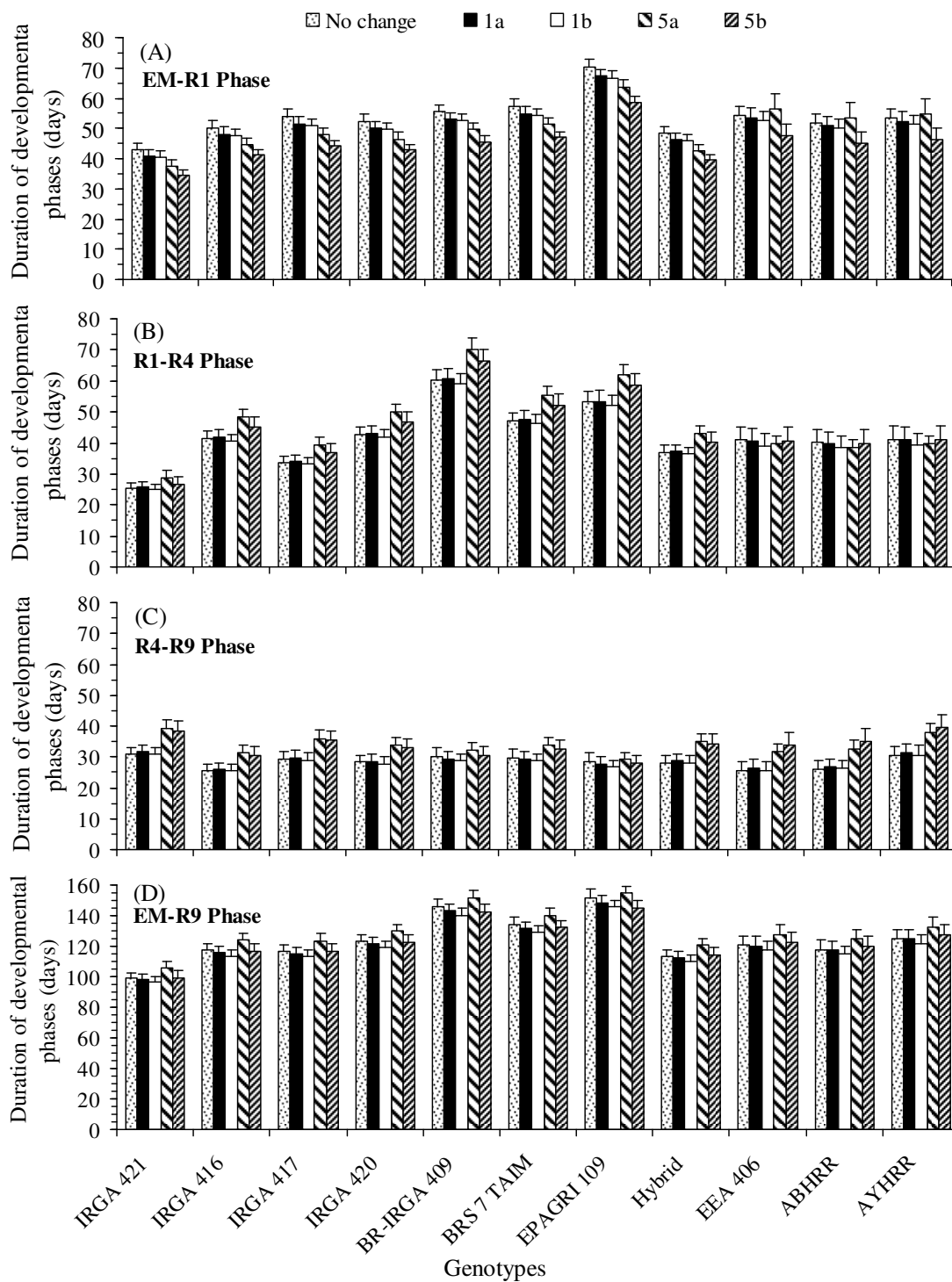


Figure 4. Duration (in days) of the EM-R1 (A), R1-R4 (B), R4-R9 (C), and EM-R9 (D) developmental phases of nine rice genotypes and two red rice biotypes simulated for the no change climate scenario and the +1°C (1) and +5°C (5) climate change scenarios with symmetric (a) and asymmetric (b) change in minimum and maximum daily temperatures. Santa Maria, Rio Grande do Sul State, Brazil. EM=emergence, R1=panicle differentiation, R4=anthesis, R9= all grains with brown hulls. Error bars represent one standard deviation of the mean of 100 years of simulations.

## 5 DISCUSSÃO

Os modelos de simulação do desenvolvimento são ferramentas que tem várias aplicações, desde auxiliar em práticas de manejo das culturas até em estudos do impacto da mudança climática sobre a fenologia das culturas. Para isso tais modelos necessitam ser calibrados e testados para o local onde serão usados e terem um baixo erro na predição dos estágios de desenvolvimento da cultura. Nesse sentido, a comparação do desempenho de modelos lineares (soma térmica) e não lineares (WE) de simulação do desenvolvimento do arroz, como a realizada no Capítulo 1 é importante, pois permite a seleção do modelo mais adequado para o estudo da simulação da duração das fases de desenvolvimento e do ciclo total do arroz irrigado e do arroz vermelho em cenários de mudança climática.

Na comparação dos modelos linear e não linear obteve-se melhor desempenho do modelo não linear (WE) em relação ao modelo linear (soma térmica), em seis dos onze genótipos (9 genótipos de arroz cultivado e 2 biótipos de arroz vermelho) avaliados (Capítulo 1; Figuras 3, 4, 5 e 6). Esses resultados se somam a resultados anteriores que relatam desempenho superior do modelo WE em relação à soma térmica em culturas como trigo (XUE et al., 2004), melão (STRECK et al., 2006b), mudas de eucalipto (MARTINS; STRECK, 2007) e batata (STRECK et al., 2007). O desempenho superior do modelo WE em relação ao modelo da soma térmica tem sido atribuído a algumas características desse modelo como (SHAYKEWICH, 1995; STRECK, 2002; STRECK et al., 2003): uso de uma função não linear para descrever a resposta do desenvolvimento da cultura à temperatura; o efeito da temperatura sobre o desenvolvimento da planta é incorporado de forma multiplicativa no modelo; os coeficientes do modelo terem significado biológico e definição operacional. Essas características tornam o modelo WE mais realístico do ponto de vista biológico e, sendo mais realístico aumentam a sua robustez e generalidade, características que aumentam as chances do modelo funcionar bem em locais com condições ambientais diferentes daquelas em que o modelo foi calibrado.

Tanto para o modelo da soma térmica como para o modelo WE, os menores valores da raiz do quadrado médio do erro (RMSE) foram obtidos para o estágio R1, aumentando para os estágios R4 e R9. Predições com menores valores de RMSE para o estágio de desenvolvimento mais precoce, com o modelo WE, também foi relatado para trigo (STRECK et al., 2003) e batata (STRECK et al., 2007). No Capítulo 1, também foi calibrado o modelo



WE para simular o desenvolvimento de dois biótipos de arroz vermelho, o que é importante para estudos relacionados à competição do arroz vermelho com o arroz cultivado, inclusive em estudos envolvendo climas futuros.

Os resultados do Capítulo 2 indicam alterações na duração das fases de desenvolvimento do arroz irrigado e do arroz vermelho com o aumento da temperatura (Capítulo 2, Figuras 1, 2, 3 e 4). Houve redução da fase EM-R1, sendo maior nos genótipos *indica* do que no *japonica* e nos biótipos de arroz vermelho. Para a fase R1-R4 foi simulado um aumento nos genótipos *indica* e uma redução no genótipo *japonica* e nos biótipos de arroz vermelho. Foi simulado um aumento na duração da fase R4-R9 nos genótipos cultivados (exceto BR-IRGA 409 e EPAGRI 109) e nos biótipos de arroz vermelho.

Resultados de simulação de uma redução da fase EM-R1 em arroz também foram obtidos por Steinmetz et al. (2006) e Tao et al. (2008). Nessa fase de desenvolvimento ocorrem alguns eventos do ciclo da cultura que influenciam diretamente na eficiência de uso dos recursos do meio (radiação solar, água, nutrientes, etc.) e, conseqüentemente, para o máximo rendimento de grãos de arroz. Dentre esses eventos estão crescimento radicular, perfilhamento e expansão da área folhar. Portanto, um aspecto a ser refletido e pesquisado é de até que ponto um encurtamento dessa fase poderia vir a afetar o rendimento dos atuais genótipos de arroz irrigado, especialmente com relação a diferenças de sensibilidade entre os grupos de maturação precoce, médio e tardio.

Um aumento da fase R1-R4, poderá levar a uma maior exposição das plantas à temperaturas máximas iguais ou maiores do que 35°C que poderão aumentar o problema com esterilidade de espiguetas. Uma alternativa para atenuar esse problema em cenários futuros de aumento de temperatura seria o desenvolvimento de genótipos tolerantes a altas temperaturas no período da floração. No Estado do RS, uma alternativa aliada ao desenvolvimento de genótipos tolerantes as altas temperaturas, seria a antecipação das datas de semeadura buscando evitar que a floração do arroz ocorra no período com maior probabilidade de ocorrência de temperaturas máximas iguais ou maiores do que 35°C, que segundo Mota et al. (1999) atualmente ocorre no mês de janeiro.

Um aumento da fase R4-R9 num primeiro momento seria positivo já que aumentaria o período destinado ao enchimento de grãos. No entanto, com o aumento da temperatura, principalmente nos cenários com aumentos maiores na temperatura mínima do que na máxima diária, poderá haver um aumento da respiração de manutenção das plantas o que reduzirá a quantidade de assimilados disponíveis para o enchimento de grãos, podendo resultar em menor rendimento (PENG et al., 2004).

Ainda existem incertezas se no clima futuro as temperaturas mínimas aumentarão mais que as máximas. As simulações indicaram que as respostas do desenvolvimento do arroz não serão as mesmas se o aumento nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar for simétrico ou assimétrico. Por exemplo, a duração simulada do ciclo total (EM-R9) aumentou nos cenários de aumentos simétricos e diminuiu nos cenários com aumentos assimétricos nas temperaturas mínima e máxima. Estes resultados revelam a grande fragilidade da cultura do arroz irrigado em Santa Maria, RS, frente às possíveis mudanças no clima futuro. Assim, as conclusões obtidas de simulações que consideram apenas cenários com aumentos simétricos nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar devem ser vistas com cautela.

Por se tratar de um estudo numérico, este trabalho tem algumas limitações. Assim, os desvios simulados na duração das fases de desenvolvimento (EM-R1, R1-R4 e R4-R9) e do ciclo total (EM-R9) do arroz irrigado e do arroz vermelho, não devem ser encarados como valores absolutos, mas sim como tendências para um cenário futuro de aumento de temperatura. Nesse sentido, a principal aplicação desse estudo seria no planejamento da produção de arroz no futuro, especialmente no que se refere às estratégias de adaptação às mudanças no clima. Uma opção de adaptação a um cenário futuro de aumento de temperatura seria uma antecipação da data de semeadura, não demasiadamente para evitar problemas com baixa disponibilidade de radiação solar. Outra opção seria o desenvolvimento de genótipos tolerantes a altas temperaturas principalmente na floração. Também, a seleção de genótipos de arroz mais competitivos com o arroz vermelho deverá ser um foco do melhoramento, visto que as simulações indicaram que os atuais genótipos de arroz irrigado poderão ser menos competitivos com o arroz vermelho em um futuro aumento de temperatura.

## 6 CONCLUSÕES

1. As predições dos principais estágios de desenvolvimento de genótipos de arroz irrigado e de biótipos de arroz vermelho podem ser melhoradas com o uso do modelo não linear de WE, se comparado com o modelo da soma térmica, com um erro de predição geralmente menor que 7 dias para o estágio da diferenciação da panícula e aumentando para os estágios da antese e todos os grãos da panícula com casca marrom.

2. A duração da fase EM-R1 em geral diminui, enquanto que a duração das fases R1-R4 e R4-R9 geralmente aumentam, com o aumento da temperatura nos cenários de mudança climática. A duração simulada do ciclo total (EM-R9), aumenta nos cenários com aumentos simétricos e diminui nos cenários com aumentos assimétricos nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar. Os atuais genótipos de arroz podem ser menos competitivos com o arroz vermelho em climas futuros.

## **7 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

1. Estudar os reflexos da redução da fase vegetativa (EM-R1) com o aumento da temperatura, sobre o rendimento de grãos do arroz, levando em consideração cenários com aumentos simétricos e assimétricos nas temperaturas mínima e máxima diárias do ar.
2. Pesquisar a possibilidade de antecipar as datas de semeadura em algumas regiões para evitar danos por altas temperaturas na floração, em um cenário futuro de aumento de temperatura.
3. Efeito do aumento da temperatura na fase de enchimento de grãos e as conseqüências no rendimento de grãos do arroz.
4. Desenvolver pesquisas envolvendo a seleção de genótipos mais tolerantes a altas temperaturas na floração.

## 8 REFERÊNCIAS

AGOSTINETTO, D. et al. Arroz vermelho: ecofisiologia e estratégias de controle. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 2, p. 341-349, 2001.

AGOSTINETTO, D. et al. Comparação de modelos matemáticos na estimativa das perdas de produtividade de grãos em arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 847-856, 2004.

ALOCILJA, E. C.; RITCHIE, J. T. A model for the phenology of rice. In: HODGES, T. **Predicting crop phenology**. Boston: CRC, 1991. p. 181-189.

ANDRESEN, J. A. et al. Weather impacts on maize, soybean, and alfalfa production in the Great Lakes Region, 1895-1996. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 1059-1070, 2001.

ARNOLD, C. Y. Maximum-minimum temperatures as a basis for computing heat units. **Journal of the American Society for Horticultural Sciences**, Boston, v.76, p.682-692, 1960.

ASSAD, E. D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.

AZAMBUJA, I. H. V.; VERNETTI Jr., F. J.; MAGALHÃES Jr., A. M. Aspectos socioeconômicos da produção do arroz. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr., A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. 1.ed. Brasília: Embrapa, 2004. p. 23-44.

BURIOL, G. A. et al. Ocorrência e duração das temperaturas mínimas diárias do ar prejudiciais à fecundação das flores do arroz em Santa Maria, RS. 1- Probabilidades de ocorrência. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 23-34, 1991.

BUTTERFIELD, R. E.; MORISON, J. I. L. Modeling the impact of climate warming on winter cereal development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 62, n. 3, p. 241-261, 1992.

CARMONA, L. C.; BERLATO, M. A. El Niño e La Niña e o rendimento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 147-152, 2002.

CONAB. **Evolução da produção de grãos no Brasil**. 2007. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 05 fev. 2007.

CONNEL, T. R.; BINNING, L. K.; SCHMITT, W. G. A canopy development model for potatoes. **American Journal of Potato Research**, v. 76, n. 3, p. 153-159, 1999.

CORRÊA, S. **Anuário Brasileiro do arroz 2007**. Santa Cruz: Gazeta, 2007. 128 p.

COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000.

DELATORRE, C. A. Dormência em sementes de arroz vermelho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 565-571, 1999.

DIARRA, A.; SMITH Jr., R. J.; TALBERT, R. E. Growth and morphological characteristics of red rice (*Oryza sativa*) biotypes. **Weed Science**, v. 33, n. 3, p. 310-314, 1985.

FAO. **International year of rice**. 2007. Disponível em: <<http://www.fao.org/rice2004/en/speeches.htm>>. Acesso em: 05 fev. 2007.

FUKAI, S. Phenology in rainfed lowland rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 51-60, 1999.

GAO, L. et al. Rice clock model – a computer model to simulate rice development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 60, n. 1, p. 1-16, 1992.

GILMORE, E. C. Jr.; ROGERS, J. S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 50, n. 10, p. 611-615, 1958.

GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR, H. H. **Modeling potential crop growth processes**. Dordrecht: Kluwer, 1994. 238 p.

HODGES, T. **Predicting crop phenology**. CRC, 1991. 233 p.

HORIE, T. Predicting the effects of climate variation and effect of CO<sub>2</sub> on rice yield in Japan. **Journal of Agricultural Meteorology**, v. 48, p. 567-574, 1993.

HULME, M., ZHAO, Z. C., JIANG, T. Recent and future climate change in East Asia. **International Journal of Climatology**, v. 14, n. 4, p. 637-658, 1994.

INFELD, J. A.; SILVA, J. B.; ASSIS, F. N. Temperatura base e graus-dia durante o período vegetativo de três grupos de cultivares de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 187-191, 1998.

IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. **Climate change 2007: The physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: University, 2007.

IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. **Dados de safra. Série histórica da área plantada, produção e rendimento**. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/dados.htm>>. Acesso em: 20 out. 2007.

JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process – oriented models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 83, n. 1-2, p. 55-56, 1995.

JOHNSON, K. B.; JOHNSON, S. B.; TENG, P. S. Development of a simple potato growth model for use in crop-pest management. **Agricultural Systems**, London, v. 19, n. 3, p. 189-209, 1986.

JOHNSON, K. B.; TENG, P. S.; RADCLIFFE, E. B. Coupling feeding effects of potato leafhopper, *Empoasca fabae* (Homoptera: Cicadellidae), nymphs to a model of potato growth. **Environmental Entomology**, v. 16, n. 1, p. 250-258, 1987.

KERR, R. A. Millennium's hottest decade retains its title, for now. **Science**, Washington, v. 307, p. 828-829, 2005.

KWON, S. L.; SMITH, R. J. Jr.; TALBERT, R. E. Competitive growth and development of red rice (*Oryza sativa*) and rice (*Oryza sativa*). **Weed science**, v. 40, n. 1, p. 57-62, 1992.

LAL, M. et al. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, n. 2, p. 101-114, 1998.

LANGEVIN, A. S., CLAY, K., GRACE, J. B. The incidence and effects of hybridization between cultivated rice and its related weed rice (*Oryza sativa* L.). **Evolution**, v. 44, n. 4, p. 1000-1008, 1990.

LINDERHOLM, H. W. Growing season changes in the last century. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 137, n. 1-2, p. 1-14, 2006.

LOPES, S. I. G. et al. Avaliação do ganho genético do programa de melhoramento do IRGA no período de 1961 a 2004. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4., REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26., 2005, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2005. p. 67-69.

MAGALHÃES Jr. A. M. et al. Aspectos genéticos, morfológicos e de desenvolvimento de plantas de arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr., A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. 1.ed. Brasília: Embrapa, 2004. p. 143-215.

MARCHEZAN, E. Arroz vermelho: Caracterização, prejuízos e controle. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 415-421, 1994.

MARCHEZAN, E. et al. Controle do arroz vermelho. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES Jr., A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. 1.ed. Brasília: Embrapa, 2004. p. 547-573.

MARQUES, J. R. Q. et al. Aumento da temperatura mínima do ar no Rio Grande do Sul, sua relação com o aquecimento global e possíveis impactos no arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4., REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26., 2005, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2005. p. 224-226.

MARTINS, F. B.; STRECK, N. A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1091-1100, 2007.

MATSUI, T. et al. Effects of high temperature and CO<sub>2</sub> concentration on spikelet sterility in indica rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 51, n.3, p. 213-219, 1997.

MATTHEWS, R. B. et al. Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation. **Agricultural Systems**, London, v. 54, n. 3, p. 399-425, 1997.

McINTYRE, S.; MCKITRICK, R. Corrections to the MAAN et al. (1998) proxy data base and Northern Hemispheric average temperature series. **Energy and Environment**, v. 14, n. 6, p. 751-771, 2003.



McINTYRE, S.; McKITRICK, R. The M&M critique of the MBH98 Northern Hemisphere climate index: update and implications. **Energy and Environment**, v.16, n.1, p.69-100, 2005.

McMASTER, G. S., SMIKA, D. E. Estimation and evaluation of winter wheat phenology in the central Great Plains. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 43, n. 1, p. 1-18, 1988.

McMASTER, G. S., WILHELM, W. W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 87, n. 4, p. 291-300, 1997.

MENEZES, V. G. et al. Interferência do arroz vermelho no rendimento de engenho de cultivares de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 27-30, 1997.

MENEZES, V. G. et al. Caracterização de biótipos de arroz vermelho em lavouras de arroz no Estado do Rio Grande do Sul. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 221-227, 2002.

MOTA, F. S.; ROSSKOFF, J. L. C.; SILVA, J. B. Probabilidade de ocorrência de dias com temperaturas iguais ou superiores a 35°C no florescimento do arroz no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 147-149, 1999.

NOLDIN, J. A.; CHANDLER, J. M.; McCAULEY, G. N. Red rice (*Oryza sativa*) biology. I. Characterization of red rice ecotypes. **Weed Technology**, v. 13, p. 12-18, 1999.

PAULA, F. L. M. et al. Soma térmica de algumas fases do ciclo de desenvolvimento da batata (*Solanum tuberosum* L.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 1034-1042, 2005.

PEDRO Jr. M. J. et al. Estimativa da produtividade de arroz irrigado por inundação em função da temperatura do ar e da radiação solar. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 52, n. 1, p. 96-100, 1995.

PENG, S. et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. **National Academy of Sciences of the USA**, Washington, v. 101, n. 27, p. 9971-9975, 2004.

PENNING DE VRIES, F. W. T. et al. **Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops**. Wageningen: Pudoc, 1989. 271 p.

PETERSON, C. M. et al. Restricted rooting decreases tillering and growth of winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, p. 861-863, 1984.

PRUESS, K. P. Day-degree methods for pest managements. **Environmental Entomology**, v. 12, n. 3, p. 613-619, 1983.

RÉAUMUR, R. A. F. **Observation du thermometer, faites à Paris pendant l'année 1735, compares avec celles qui ont été faites sous la ligne, à l'Isle de France, à Alger et en quelques-unes de nos isles de l'Amérique**. Paris : Mém. Acad. Des Sci., 1735. 545 p.

RICHTER, G. M.; SEMENOV, M. A. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. **Agricultural Systems**, London, v. 84, n. 1, p. 77-97, 2005.

RUSSELE, M. P. et al. Growth analysis based on degree days. **Crop Science**, Madison, v. 24, n. 1, p. 28-32, 1984.

SAS Institute Inc. SAS-STAT, **Users Gui210de**, Version 8.0 (8. ed.). SAS Institute, Cary, NC. 2001.

SEMENOV, M. A.; BARROW, E. M. Use of stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. **Climate Research**, London, v. 35, n. 4, p. 397-414, 1997.

SEMENOV, M. A., BROOKS, R. J., BARROW, E. M. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. **Climate Research**, London, v. 10, n. 1, p. 95-107, 1998.

SHAYKEWICH, C. F. An appraisal of cereal crop phenology modeling. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 75, n. 2, p. 329-341, 1995.

SIQUEIRA, O. J. F.; FARIAS, J. R. B.; SANS, L. M. A. Potential effects of global climate changes for Brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 115-129, 1994.

SIQUEIRA, O. J. W. et al. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 311-320, 2000.

SIQUEIRA, O. J. W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L. A. B. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa, 2001. p. 33-63.

SOSBAI (Sociedade Sul Brasileira de Arroz irrigado). **Arroz irrigado: Recomendações técnicas para o sul do Brasil**. Santa Maria: SOSBAI, 2005. 159 p.

STEINMETZ, S. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr., A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. 1.ed. Brasília: Embrapa, 2004. p. 45-74.

STEINMETZ, S. et al. **Uso do método de graus-dia para estimar a data de diferenciação da panícula de grupos de cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. 34 p. (Documento 126).

STEINMETZ, S. et al. Aumento da temperatura mínima do ar na região de Pelotas, sua relação com o aquecimento global e possíveis conseqüências para o arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2005. 1 CD-ROM.

STEINMETZ, S. et al. Impacto do aquecimento global sobre a duração da fase vegetativa do arroz irrigado, estimada pelo método de graus-dia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 2. REUNIÃO NACIONAL DA PESQUISA DE ARROZ, 8., 2006, Brasília. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1 CD ROM. (Trabalho Completo).

STRECK, N. A. A generalized nonlinear air temperature response function for node appearance rate in muskmelon (*Cucumis melo* L.). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 105-111, 2002.

STRECK, N. A. A generalized nonlinear temperature response function for some growth and developmental parameters in kiwifruit (*Actinidia deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 255-262, 2003.

STRECK, N. A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: A modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 115, n. 3-4, p. 139-150, 2003.

STRECK, N. A. A temperature response function for modeling leaf growth and development of the African violet (*Saintpaulia ionantha* Wendl.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 1, p. 55-62, 2004.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 730-740, 2005.

STRECK, N. A.; SCHUH, M. Simulating the vernalization response of the “Snow Queen” lily (*Lilium longiflorum* Thunb.). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 2, p. 117-121, 2005.

STRECK, N. A. et al. Estimativa do plastocrono em meloeiro (*Cucumis melo* L.) cultivado em estufa plástica em diferentes épocas do ano. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 6, p. 1275-1280, 2005.

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

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

STRECK, N. A. et al. Simulação do desenvolvimento da batata cultivar Asterix em cinco cenários de mudanças climáticas em Santa Maria, RS. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 4, p. 693-702, 2006a.

STRECK, N. A. et al. A non-linear model to simulate node appearance in muskmelon (*Cucumis melo* L.) grown inside plastic greenhouse as a function of air temperature. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v. 14, n. 2, p. 210-216, 2006b.

STRECK, N. A. et al. Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 142, n. 1, p. 1-11, 2007.

STRECK, N. A. et al. Comparação de parâmetros de crescimento e de desenvolvimento de dois biótipos de arroz vermelho com genótipos de arroz irrigado. **Bragantia**, Campinas, 2008. (Aceito para publicação).

TABEAUD, M. O aquecimento contemporâneo: entre certeza, controvérsia e dúvida. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 34, n. 1, p. 35-48, 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artemed, 3. ed. 2004. 719 p.

TAO, F. et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 138, n. 1-4, p. 82–92, 2006.

TAO, F. et al. Global warming, rice production, and water use in China: Developing a probabilistic assessment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, n. 1, p. 94-110, 2008.

THOMAS, A. Climatic changes in yield index and soil water deficit trends in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 102, n. 2-3, p. 71-81, 2000.

USDA. **Rice Area, Yield and Production**. 2005. Disponível em: <<http://www.faz.usda.gov/psd>>. Acesso em: 02 set. 2006.

VENKATARAMAN, S.; STEINMETZ, S.; CRUZ, R. T. **Agrometeorology and Rice Production**. In: INSAM – International Society for Agricultural Meteorology, 2007. Draft 3<sup>rd</sup> Ed., 2007. cap. 13F, 42 p. Disponível em: <[http://www.agrometeorology.org/fileadmin/insam/repository/gamp\\_chapt13F.pdf](http://www.agrometeorology.org/fileadmin/insam/repository/gamp_chapt13F.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2007.

VERGARA, B.S.; CHANG, T.T.; LILIS, R. **The flowering response of the rice plant to photoperiod: A review of the literature**. International Rice Research Institute, 1969. 28p. (Technical Bulletin, N°8).

WANG, J. Y. A critique of the heat unit approach to plant response studies. **Ecology**, v. 41, n. 4, p. 785-790, 1960.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, London, v. 58, n. 1, p. 1-24, 1998.

WEISS, A.; HAYS, C. J.; WON, J. Assessing winter wheat response to climate change scenarios: a simulation study in the U.S. Great Plains. **Climatic Change**, Wageningen, v. 58, n. 1-2, p. 119-147, 2003.

WILHELM, W. W.; McMASTER, G. S. Importance of phyllochron in studying development and growth in grasses. **Crop Science**, Madison, v. 35, n. 1, p. 1-3, 1995.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

XUE, Q. **Phenology and gas exchange in winter wheat (*Triticum aestivum* L.)**. 2000. 101f. Tese (Doutorado em Agronomia) – University of Nebraska – Lincoln, USA, 2000.

XUE, Q.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. Predicting leaf appearance in field grown winter wheat: evaluation linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 175, n. 3, p. 261-270, 2004.

YAO, F. et al. Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China. **Climate Change**, Wageningen, v. 80, n. 3-4, p. 395-409, 2007.

YIN, X. et al. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 77, n. 1-2, p. 1-16, 1995.

YIN, X. et al. A model for photothermal responses of flowering in rice. I. Model description and parameterization. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 51, n. 3, p. 189-200, 1997.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Banos: IRRI, 1981. 269 p.