

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

**SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E  
PRODUTIVIDADE DE ARROZ NO RIO GRANDE DO SUL  
COM O MODELO SIMULARROZ**

**TESE DE DOUTORADO**

**Hamilton Telles Rosa**

**Santa Maria, RS, Brasil.**

**2013**

**SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E  
PRODUTIVIDADE DE ARROZ NO RIO GRANDE DO SUL  
COM O MODELO SIMULARROZ**

**Hamilton Telles Rosa**

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

**Orientador: Prof. Nereu Augusto Streck**

**Santa Maria, RS, Brasil.**

**2013**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Telles Rosa, Hamilton  
Simulação do crescimento, desenvolvimento e  
produtividade de arroz no Rio Grande do Sul com o modelo  
SimulArroz / Hamilton Telles Rosa.-2014.  
87 p.; 30cm

Orientador: Nereu Augusto Streck  
Coorientador: Arno Bernardo Heldwein  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Agronomia, RS, 2014

1. Oryza sativa 2. modelo agrícola 3. modelagem 4.  
fitomassa 5. aplicativo I. Augusto Streck, Nereu II.  
Bernardo Heldwein, Arno III. Título.

---

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Hamilton Telles Rosa. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: a1000tontr@gmail.com

---

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

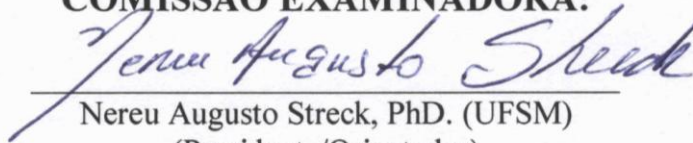
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado


**SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E  
PRODUTIVIDADE DE ARROZ NO RIO GRANDE DO SUL COM O  
MODELO SIMULARROZ**

elaborada por  
**Hamilton Telles Rosa**

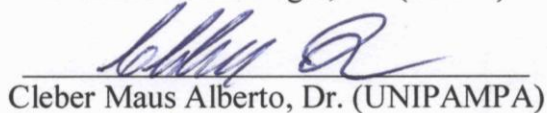
como requisito para obtenção do grau de  
**Doutor em Agronomia**

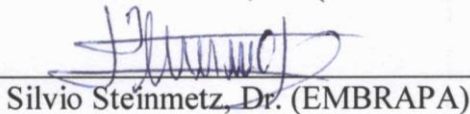
**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
Nereu Augusto Streck, PhD. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Arno Bernardo Heldwein, Dr. (UFSM)

  
\_\_\_\_\_  
Evandro Zanini Righi, Dr. (UFSM)

  
\_\_\_\_\_  
Cleber Maus Alberto, Dr. (UNIPAMPA)

  
\_\_\_\_\_  
Silvio Steinmetz, Dr. (EMBRAPA)

Santa Maria, 19 de dezembro de 2013.

A todos aqueles que sempre estiveram  
ao meu lado e a toda minha família,  
especialmente meus pais Airton Alves Rosa  
e Ione Telles Rosa, minha namorada, noiva e  
futura esposa Lidiane Cristine Walter e ao meu  
filho Lucas que deu um novo sentido à minha vida  
**Dedico...**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado fé e saúde e forças para chegar até aqui.

A meus pais Airton e Ione Rosa por terem me apoiado sempre que precisei e por terem me mostrado o caminho certo.

A minha namorada, noiva, esposa e companheira Lidiane, a quem devo muito amor por ser minha companheira de todas as horas e que nunca me deixou desistir.

Ao meu filho Lucas que me mostrou o verdadeiro sentido da vida.

Aos meus sogros Roque e Sandra e às minhas cunhadas Gabrieli e Raquel por terem me recebido como um membro de sua família e por terem me apoiado sempre.

A toda minha família e a toda família de minha noiva Lidiane pelo amor, compreensão e apoio durante o longo período do doutorado.

Ao professor Nereu Augusto Streck, por ter participado durante todo o processo de elaboração e execução desse trabalho sempre com muita dedicação, incentivo e amizade.

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia pela oportunidade de realização do trabalho de doutorado.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos durante dois anos de doutorado.

Ao Instituto Federal Farroupilha pelo constante apoio para concretização desta importante etapa profissional.

A todos os professores do Departamento de Fitotecnia e do Programa de Pós-Graduação em Agronomia pela colaboração e atenção sempre dispensada.

Aos colegas Michel, Cristiano, Lilian, Josana, Jossana, Gizelli, Romulo, Bruno (in memoriam), Mariana (in memoriam) e especialmente minha noiva Lidiane meu sincero agradecimento pela contribuição na execução deste trabalho de Tese.

Aos que se foram, deixo aqui o registro da minha eterna lembrança.

A TODOS amigos pelo apoio e companheirismo.

Aos funcionários do Departamento de Fitotecnia pela ajuda na condução dos experimentos e pela amizade.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho Tese meu sincero agradecimento.

**Hoje, neste tempo que é seu, o futuro está sendo plantado. As escolhas que você procura, os amigos que você cultiva, as leituras que você faz, os valores que você abraça, os amores que você ama, tudo será determinante para a colheita futura.**

*(Padre Fábio de Melo)*

# RESUMO

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia  
Universidade Federal de Santa Maria

## **SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DE ARROZ NO RIO GRANDE DO SUL COM O MODELO SIMULARROZ**

AUTOR: HAMILTON TELLES ROSA

ORIENTADOR: NEREU AUGUSTO STRECK

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 19 de dezembro de 2013.

O SimulArroz é um modelo ecofisiológico, dinâmico, baseado em processos para simular o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura do arroz. Um modelo matemático para ter credibilidade científica, precisa ser testado e exposto à diferentes situações de cultivo. Apesar de este modelo estar em uso, necessita constante estudo e aperfeiçoamento para que novas versões sejam lançadas e consigam descrever com precisão as complexas interações dos fatores que influenciam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de grãos da cultura do arroz. Os objetivos desta tese foram (i) desenvolver uma função matemática de resposta generalizada à concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico [ $f(\text{CO}_2)$ ] pela eficiência de uso de radiação (EUR) em arroz e (ii) avaliar o desempenho do modelo SimulArroz em simular a produção de biomassa da cultura do arroz na região central do Rio Grande do Sul e a produtividade grãos em diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul com a EUR original do modelo e com a incorporação de uma função de EUR dependente do ciclo de desenvolvimento da cultura. Dados independentes de EUR e produtividade de grãos na literatura foram usados para construir a  $f(\text{CO}_2)$  e testar a predição de produtividade de grãos do modelo SimulArroz. Para testar a produção de biomassa do modelo, foi conduzido um experimento de campo em Santa Maria, RS, nos anos agrícolas 2011/2012 e 2012/2013, com quatro cultivares, IRGA 421 (ciclo muito precoce), BRS Querência (ciclo precoce), IRGA 424 (ciclo médio) e SCSBSS Tio Taka (ciclo tardio) e três datas de semeadura no ano agrícola 2011/12 (17 de outubro, 18 de novembro e 19 de dezembro de 2011) e uma data de semeadura no ano agrícola 2012/2013 (19 de outubro de 2012). O modelo SimulArroz é eficiente em simular o crescimento, desenvolvimento, produtividade da cultura do arroz no Estado do Rio Grande do Sul, sendo capaz de fazê-lo em cenários de mudança climática

**Palavras-chave:** *Oryza sativa*. Modelo agrícola. Modelagem. Fitomassa. Grãos. Aplicativo.



## ABSTRACT

Doctor of Science Thesis  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia  
Universidade Federal de Santa Maria

### **SIMULATING RICE GROWTH, DEVELOPMENT AND YIELD IN THE RIO GRANDE DO SUL STATE WITH THE SIMULARROZ MODEL**

AUTHOR: HAMILTON TELLES ROSA

ADVISOR: NEREU AUGUSTO STRECK

Location and date of presentation: Santa Maria, December, 19<sup>th</sup>, 2013.

The SimulArroz is an ecophysiological dynamic processes-based model for simulating the growth, development and grain yield of rice. In order to have scientific credibility, a simulation model has to be tested and exposed to different cropping conditions. Although this model is in use, constant studies and improvements have to be pursued so that new versions are released and able to accurately describe the complex interactions of factors that influence the growth, development and grain yield of rice. The objectives of this thesis were (i) to develop a generalized response function to atmospheric CO<sub>2</sub> concentration [f(CO<sub>2</sub>)] for radiation use efficiency (EUR) in rice and (ii) to evaluate the performance of the SimulArroz model for simulating biomass of rice crop in the central region of Rio Grande do Sul State and grain yield in different rice production regions of the Rio Grande do Sul State with the original model and if the incorporation of a Radiation Use Efficiency (RUE) response function that varies with crop development. Independent data on RUE and grain yield from the literature were used to develop a RUE response function to CO<sub>2</sub> and to test the ability of the model to predict grain yield. To test the biomass production with model, a field experiment was conducted in Santa Maria, RS, during the 2011/2012 and 2012/2013 growing seasons, with four cultivars IRGA 421 (very early cycle), BRS Querencia (early cycle), IRGA 424 (mid cycle) and SCSBRS Tio Taka (long cycle) and three sowing dates in the first year (October, 17<sup>th</sup>, November, 18<sup>th</sup>, and December, 19<sup>th</sup> of 2011) and one sowing date in the second year (October 19<sup>th</sup>, 2012). The SimulArroz model is efficient in simulating the growth, development, and grain yield of rice in the state of Rio Grande do Sul, being able to do it in climate change scenarios.

**Keywords:** *Oryza sativa*. Crop model. Modeling. Biomass. Grains. Application.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Série histórica de produtividade de produção de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul (RS) e produtividade de grãos, nas safras de 1921/22 a 2012/13, registrados pelo Instituto Riograndense do Arroz (IRGA, 2013). ..... 15
- Figura 2 – Regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul: Fronteira Oeste (1); Campanha (2); Depressão Central (3); Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos (4); Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos (5) e Zona Sul (6). Os valores no mapa se referem a área semeada (ha) e produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) na safra 2012/13. (Fonte. IRGA 2013) ..... 20
- Figura 3 – Rendimentos médios em  $kg\ ha^{-1}$  das seis regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul da safra 1996/1997 até a safra 2009/2010. (Fonte: IRGA, 2010)..... 24
- Figura 4 – Ajuste das funções normalizadas quadrática e linear baseadas aos dados de eficiência do uso da radiação (EUR) normalizados de Hasegawa & Horie (1996). DVS é o estágio de desenvolvimento da cultura e  $f(EUR)$  é a função que faz variar a EUR ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do arroz..... 64
- Figura 5 – Produtividade da cultura de arroz observada e simulada pelas duas versões do modelo SimulArroz nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul durante vários anos agrícolas (safras de 1984/85 a 2009/10). As barras de erro são um desvio padrão da média. .... 68
- Figura 6 – Desenvolvimento observado (pontos) e simulado (linha) pelo SimulArroz para três cultivares de arroz em duas datas de semeadura: 17/10/2011 e 18/11/2011..... 71
- Figura 7 – Desenvolvimento simulado pelo SimulArroz para quatro cultivares de arroz em três datas de semeadura em Santa Maria, RS, durante o ano agrícola 2011/2012..... 71
- Figura 8 – Evolução das variáveis do crescimento da cultura do arroz, cultivar IRGA 421, observada (pontos) e simulada (linha) pelo modelo SimulArroz em Santa Maria, RS, durante o ano agrícola 2011/2012. Semeadura em 17/10/2011..... 73
- Figura 9 – Evolução das variáveis do crescimento da cultura do arroz, cultivar IRGA 424, observada (pontos) e simulada (linha) pelo SimulArroz em Santa Maria, RS, durante o ano agrícola 2011/2012. Semeadura em 17/10/2011. .... 74
- Figura 10 – Evolução das variáveis do crescimento da cultura do arroz, cultivar BRS Querência, observada (pontos) e simulada (linha) pelo SimulArroz em Santa Maria, RS, durante o ano agrícola 2011/2012. Semeadura em 22/11/2011..... 75
- Figura 11 – Matéria seca nos diferentes compartimentos de plantas de arroz simulada pelo modelo SimulArroz durante o ano agrícola 2011/2012 em Santa Maria, RS, com duas versões que diferem quanto a forma de considerar a EUR (versão original com EUR fixa e Versão modificada, com EUR variável ao longo do ciclo). Os pontos são dados de quatro cultivares (IRGA 421, IRGA

417, BRS Querência e SCSBRS Tio Taka) em três datas de semeadura (17/11/2011, 18/11/2011, 19/12/2011). A linha diagonal é a linha 1:1 e a outra contínua é a regressão linear entre dados simulados (y) e dados observados. .... 77

Figura 12 – Matéria seca nos diferentes compartimentos de plantas de arroz simulado pelo modelo SimulArroz durante o ano agrícola 2012/2013 em Santa Maria, RS. Os pontos são dados de quatro cultivares (IRGA 421, IRGA 417, BRS Querência e SCSBRS Tio Taka) em três datas de semeadura (17/11/2011, 18/11/2011, 19/12/2011). A linha diagonal é a linha 1:1 e a outra contínua é a regressão linear entre dados simulados (y) e dados observados. A equação é resultado da regressão linear e seu coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Santa Maria, RS. .... 78

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1 A cultura do arroz .....	14
2.2 Principais elementos meteorológicos que afetam a produtividade de arroz.....	16
2.2.1 Temperatura.....	16
2.2.2 Radiação solar.....	17
2.3 Zoneamento agroclimático do arroz .....	18
2.4 Regiões orizícolas do Rio Grande do Sul.....	19
2.4.1 Fronteira Oeste .....	20
2.4.2 Campanha .....	21
2.4.3 Depressão Central.....	22
2.4.4 Zona Sul.....	22
2.4.5 Planícies Costeiras Interna e Externa à Lagoa dos Patos .....	23
2.5 Modelagem matemática e o modelo SimulArroz .....	24
2.6 Mudança climática.....	26
<b>3 OBJETIVOS .....</b>	<b>28</b>
3.1 Objetivo geral .....	28
3.2 Objetivos específicos.....	28
<b>4 ARTIGO 1 - CO<sub>2</sub> RESPONSE FUNCTION OF RADIATION USE EFFICIENCY IN RICE FOR CLIMATE CHANGE SCENARIOS .....</b>	<b>29</b>
Abstract.....	29
Index terms: .....	29
Resumo .....	29
Introduction .....	30
Material and Methods.....	32
Results and Discussion .....	34
Conclusion.....	39
References .....	39
<b>5 ARTIGO 2 – SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE ARROZ NO RIO GRANDE DO SUL COM O MODELO SIMULARROZ.....</b>	<b>46</b>
RESUMO .....	46
Palavras chave .....	47
ABSTRACT .....	48
MATERIAL E MÉTODOS.....	50
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	55
CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS .....	60
<b>7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA TESE.....</b>	<b>69</b>
<b>8 CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é o segundo cereal mais produzido e consumido no mundo, ficando atrás apenas do trigo (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 2013). Faz parte da dieta básica de aproximadamente 50% da população mundial (FAGERIA et al., 2003; LUZZARDI et al., 2005), podendo ser considerado o cereal mais importante para a alimentação humana, pois ao contrário do trigo é consumido diretamente por grande parte da população mundial, enquanto o trigo é processado pela indústria ou utilizado na alimentação animal (SHEEHY et al., 2007).

No Brasil são cultivados anualmente cerca de 2,4 milhões de hectares com arroz (USDA, 2013), dos quais, aproximadamente, 1,3 milhão de hectares são de várzeas, onde é cultivado arroz irrigado por inundação (FAGERIA et al., 2003). A região Sul do Brasil (Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná) é a principal região produtora Nacional, representando 60% do arroz colhido no País (INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ - IRGA, 2010). Atualmente, a produção de grãos de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul (RS) é de aproximadamente 8 milhões de toneladas por ano em uma área superior a 1 milhão de hectares, com produtividade média no Estado de 7,5 t ha<sup>-1</sup> no ano agrícola 2012/13 (IRGA, 2012), bem acima da média Brasileira (4,34 t ha<sup>-1</sup>) e da média mundial de 4,45 t ha<sup>-1</sup> (USDA, 2013).

Modelos matemáticos são uma simplificação da realidade que nos permitem descrever as complexas interações que existem em agroecossistemas e, assim, tornam possível o estudo do impacto de mudanças nos elementos meteorológicos e no clima sobre agroecossistemas. Existem vários modelos de simulação de produtividade das culturas agrícolas disponíveis na bibliografia, desde os mecanísticos, de elevada complexidade e número de coeficientes (STAPPER; HARRIS, 1989), até modelos empíricos simples (MONTEIRO et al., 2013; MONTEITH; SCOTT, 1982). Modelos matemáticos devidamente adaptados e testados em diferentes ambientes são ferramentas que permitem descrever as interações entre a planta ou cultura e o ambiente.

O SimulArroz é um modelo ecofisiológico dinâmico, baseado em processos (*process-based model*), para simular a produtividade de arroz irrigado no sistema por inundação (*flooded rice*) no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Parte do código fonte do SimulArroz é resultado de dois modelos anteriores de arroz, o ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2004) e o

InfoCrop (AGGARWAL et al., 2006), ambos simuladores de arroz desenvolvidos e testados em ecossistemas de arroz na Ásia. O restante do código fonte foi desenvolvido para adaptar o modelo às cultivares de arroz do Rio Grande do Sul (WALTER et al., 2012). O modelo utiliza como dados de entrada a temperatura mínima e máxima diária do ar e a radiação solar global diária. É permitido ao usuário selecionar a cultivar de arroz em uma lista ou, se a cultivar desejada não consta na mesma, o usuário pode selecionar o grupo de maturação a que a cultivar pertence.

Modelos matemáticos como o SimulArroz, podem ser uma ferramenta muito útil para determinar tendências de produtividade em cenários climáticos futuros. Para que o modelo possa ser usado com esta finalidade é necessária a implementação de uma função matemática no modelo que considere todas pressuposições bioquímicas que envolvem o impacto do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> nas plantas.

Uma vez calibrado, o SimulArroz será capaz de simular a interação entre a cultura e o ambiente, tornando-se uma ferramenta para o planejamento da condução da lavoura e acompanhamento da safra, no caso do produtor, de previsão de safra para o Estado e de monitoramento de sistemas agrícolas em cenários climáticos para a pesquisa. Esta calibração demanda esforço científico e tem grande importância no desenvolvimento de modelos, mas somente quando submetemos o modelo matemático à várias situações adversas, ele adquire credibilidade perante seus possíveis usuários.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 A cultura do arroz**

O Brasil é o maior produtor de arroz fora do continente asiático e o volume da produção brasileira representa cerca de 2% da produção mundial e 56% da produção da América do Sul (USDA, 2013). O País produziu na safra 2012/2013 em torno de 11,8 milhões de toneladas de arroz, mantendo-se entre os dez maiores produtores mundiais do grão (USDA, 2013).

O Estado do Rio Grande do Sul possui elevada produtividade de grãos e a média de produtividade do Estado está em franca ascensão. Estes elevados rendimentos obtidos pela cultura do arroz no Rio Grande do Sul se devem ao ambiente favorável de cultivo associado a um manejo eficiente, com o cultivo no sistema de irrigação por inundação, que favorece o crescimento e o desenvolvimento da cultura e inibe o de muitas plantas daninhas. Normalmente, elevadas produtividades estão associados a um bom aporte fotossintético da planta, o que significa que a cultura precisa produzir uma quantidade de biomassa considerável, dando condições para que a formação e o enchimento de grãos sejam elevados. Uma adequada adubação nitrogenada estimula o crescimento vegetativo, e como consequência, a maior biomassa produzida dá o aporte necessário para alcançar elevadas produtividades de grãos. Neste sentido, as recomendações de adubação nitrogenada para a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul são relacionadas ao incremento de produtividade pretendido, a partir do potencial de produção das diferentes regiões orizícolas (SOSBAI, 2012).

Na série histórica de registros do IRGA (IRGA, 2013) para o Estado do RS, pode-se observar que a produtividade de grãos de arroz irrigado teve um aumento considerável desde o início dos registros em 1921, que se refletiu no aumento do volume de produção (Figura 1). Esse aumento do volume de produção de arroz ocorreu em função do aumento da área cultivada e do rendimento de grãos de arroz no Estado. O aumento do rendimento de grãos se deve, principalmente, à introdução de cultivares do tipo moderno no final da década de 1970, cujas plantas possuem como características morfológicas de baixa estatura e folhas eretas, entre outras, que lhes conferem um alto potencial produtivo. Além da adoção das novas

cultivares, mais produtivas, o aumento na produtividade de grãos ao longo da série histórica também pode ser atribuído ao aprimoramento das práticas de manejo realizadas nas lavouras, como data de semeadura dentro do período mais recomendado, aumento no uso de defensivos agrícolas e adubação, e maior controle de plantas daninhas, principalmente o arroz vermelho. Apesar dos níveis crescentes de produtividade da cultura do arroz no RS, causados pelo aprimoramento das técnicas agrônômicas, há uma considerável variabilidade interanual na produtividade de grãos devido, principalmente, às condições meteorológicas ao longo dos anos nas diferentes regiões produtoras.

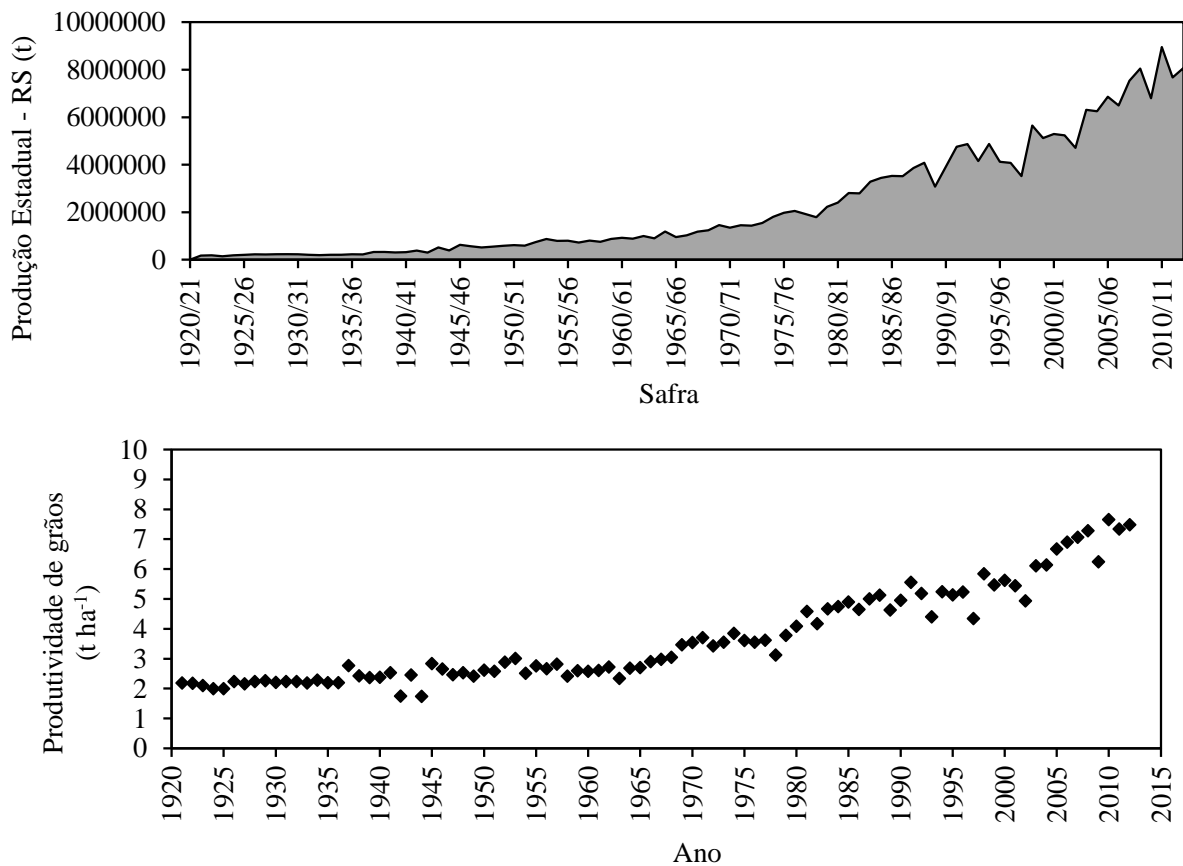


Figura 1 – Série histórica de produtividade de produção de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul (RS) e produtividade de grãos, nas safras de 1921/22 a 2012/13, registrados pelo Instituto Riograndense do Arroz (IRGA, 2013).



## 2.2 Principais elementos meteorológicos que afetam a produtividade de arroz

As variações da temperatura do ar e da radiação solar, durante as fases críticas da planta, são os principais elementos climáticos relacionados com a variabilidade de produtividade de grãos de arroz (SOSBAI, 2012; STEINMETZ, 2004). Oldeman et al. (1986) observaram que, em arroz cultivado em áreas inundadas, sem qualquer fator de estresse, a produtividade potencial está relacionada, principalmente, à temperatura do ar e à radiação solar global.

### 2.2.1 Temperatura

A temperatura do ar mais favorável ao desenvolvimento do arroz irrigado situa-se entre 20 e 35°C (YOSHIDA, 1981). De maneira geral, a cultura exige temperaturas elevadas e crescentes até a floração e decrescentes após a floração (porém sem abaixamentos bruscos) (STEINMETZ, 2004). Segundo Yoshida (1981) as faixas de temperatura ótima variam de 20 a 35°C para germinação, de 30 a 33°C para a fase de antese e de 20 a 25°C para a maturação. Essas faixas de temperatura podem ter pequenas variações entre as cultivares de arroz.

Nos sistemas de semeadura convencional em solo com umidade adequada, o número de dias da semeadura à emergência depende principalmente da temperatura do solo (SOSBAI, 2012). Essa dependência da temperatura se deve às características de alongamento do mesocótilo do embrião da semente, que é uma região de intensa divisão celular e altamente dependente da atividade enzimática e hormonal (TAIZ & ZEIGER, 2009). Amaral & Santos (1983) avaliaram os efeitos de quatro temperaturas do solo em quatro níveis de umidade e verificaram que, em termos médios, para todas as cultivares testadas, a emergência de plântulas foi retardada em média 25 dias quando variou-se a temperatura do solo de 37°C para 16°C.

A temperatura do ar, tanto baixa quanto alta, é um fator crítico principalmente durante a fase reprodutiva. Segundo Yoshida (1981), o período de aproximadamente 7 a 14 dias antes da emissão das panículas, também chamado período de emborrachamento, é considerado o mais sensível as baixas temperaturas do ar, seguido pelo período de floração.

Bouman (2004) infere que, a partir da diferenciação do primórdio floral, é possível calcular a soma térmica para baixas temperaturas através da equação  $SQ_t = \Sigma (22 - T_d)$ , sendo  $T_d$  a temperatura média diária. Segundo ele, quando a soma térmica diária calculada através desta equação for superior a  $100^\circ\text{C}$ , pode haver até 100% de esterilidade de espiguetas de arroz. Por outro lado, temperaturas acima dos  $34^\circ\text{C}$  durante o período de emborrachamento começam a reduzir a fertilidade das espiguetas.

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  $35^\circ\text{C}$  durante a antese podem causar de 20 a 30% de esterilidade de espiguetas em arroz irrigado (MATSUI et al., 1997).

Em resposta à aumentos de temperatura, MATTHEWS et al. (1997) encontraram diferenças de produtividade entre regiões da Ásia, utilizando dois modelos de simulação de produtividade de arroz, o que foi explicado pela diferença na quantidade de dias com temperaturas acima da ótima, dependendo do clima de cada local, resultando em maior ou menor efeito sobre a esterilidade de espiguetas e sobre a duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares.

Estudando o efeito da mudança climática na esterilidade de espiguetas em arroz, citam-se os resultados de pesquisas realizadas por MATSUI et al. (1997) em câmaras de crescimento, onde foram considerados dois níveis de  $\text{CO}_2$  (ambiente e  $+300$  ppm) e temperatura (ambiente e  $+4^\circ\text{C}$ ). Os resultados mostram que, considerando o incremento de  $\text{CO}_2$ , a temperatura do ar que prejudica a fertilidade das espiguetas de arroz diminui de  $34$  para  $33^\circ\text{C}$ , porém o decréscimo da fertilidade é mais acentuado com acréscimos de temperatura. Em relação à temperatura, a antese é a fase mais sensível às temperaturas elevadas, e a temperatura crítica para o florescimento ficou entre  $33$  e  $34^\circ\text{C}$  e, quando a temperatura crítica é ultrapassada, mesmo por poucas horas, ocorre uma grande esterilidade de espiguetas, devido à menor deposição de grãos de pólen e em temperaturas extremas ( $>35^\circ\text{C}$ ) ocorre esterilidade dos órgãos femininos da flor (MATSUI et al., 1997).

### 2.2.2 Radiação solar

Em regiões onde a temperatura não é um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento das plantas de arroz, a radiação solar é um dos principais elementos

meteorológicos que influenciam na produção da cultura (CARMONA, et al., 2002). A necessidade de radiação solar difere de um estágio de desenvolvimento do arroz para outro. No estágio inicial a planta de arroz necessita de pouca radiação solar. A fase vegetativa apresenta uma baixa resposta à radiação solar. Com o avanço no desenvolvimento, a necessidade de radiação solar aumenta progressivamente. Segundo Yoshida & Parao (1976), maior radiação solar proporciona maior incremento na produtividade durante as fases reprodutiva e de maturação. No Rio Grande do Sul, a disponibilidade média de radiação solar é variável nas distintas regiões produtoras, sendo que os níveis mais altos são observados na Zona Sul e Fronteira Oeste (MOTA, 1995). No Estado do RS os meses de dezembro e janeiro apresentam maiores índices de radiação solar global incidente.

Mota (1995) avaliou o efeito conjunto da radiação solar e do total de horas com temperatura inferior à 15°C nos meses de janeiro, fevereiro e março nos municípios de Pelotas e Capão do Leão e ajustou um modelo de regressão cujos coeficientes de correlação parcial indicaram que a variação anual da produtividade dependeu 93% da radiação solar, 83% das horas de frio em março e 42% das horas de frio em fevereiro. Este resultado é relevante uma vez que há diferenças de radiação solar incidente e temperatura entre as regiões do Estado, o que explica em parte, as diferenças de produtividade entre as regiões.

Em um estudo recente, Steinmetz et al. (2013), estimando a produtividade de grãos de arroz em função da radiação solar global e da temperatura mínima do ar através de procedimentos estatísticos, observou que a radiação solar radiação solar global foi a variável mais importante na explicação da variação da produtividade de grãos.

### **2.3 Zoneamento agroclimático do arroz**

A PORTARIA Nº 22, de 11 de Junho de 2013, estabeleceu os critérios para o zoneamento agrícola do arroz irrigado no Rio Grande do Sul (MAPA, 2013). As cultivares foram classificadas em quatro grupos de características homogêneas: Grupo I ( $n \leq 105$  dias); Grupo II ( $105 \text{ dias} < n < 120$  dias); Grupo III ( $120 \text{ dias} \leq n < 135$  dias) e Grupo IV ( $n \geq 135$  dias), onde  $n$  expressa o número de dias da emergência à maturidade fisiológica.

Para a identificação das áreas de baixo risco e determinação dos períodos de semeadura por grupo de cultivares, foram considerados os seguintes critérios:

- temperatura do solo  $\geq 17$  °C na fase de germinação/emergência;

- temperatura mínima do ar  $\geq 15^{\circ}\text{C}$  na fase de pré-floração/floração (de 15 dias antes a 5 dias após o início da floração);
- Radiação solar: maior disponibilidade na fase de reprodução/maturação (de 21 dias antes até 21 dias após o início da floração).

Levando em consideração as características climáticas das regiões orizícolas, o Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento (MAPA) determinou os períodos recomendados para cada grupo de cultivares, para cada município produtor do RS. Os links com as portarias que regulamentam as datas recomendadas para cada município podem ser acessados na página do Ministério da Agricultura (<http://www.agricultura.gov.br>).

Estes critérios são os mesmos considerados por Steinmetz et al. (2007) exceto para a temperatura mínima do solo para germinação/emergência que foi considerada como  $20^{\circ}\text{C}$  por estes autores. Steinmetz et al. (2007) fazem referência à importância da época de semeadura como prática indispensável para obtenção de altos e estáveis níveis de produtividade de grãos, pelo fato de aumentar as chances de que as fases críticas escapem de elementos meteorológicos desfavoráveis e coincidam com os favoráveis.

## **2.4 Regiões orizícolas do Rio Grande do Sul**

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) possui seis regiões orizícolas (IRGA, 2013; SOSBAI, 2012), onde se cultiva o arroz irrigado por inundação. Segundo levantamento estatístico realizado pelo IRGA (2005), as regiões orizícolas do Estado podem ser assim caracterizadas: Fronteira Oeste, a principal região produtora, com a maior área cultivada do Estado; região da Campanha, destacando-se pela elevada produtividade de grãos, dividindo na safra 2012/2 013 a liderança de produtividade com a região da Zona Sul; Depressão Central e Zona Sul do Estado apresentam área cultivada e volume de produção expressivo, sendo que a Depressão Central possui o maior número de lavouras (pequenas propriedades), e a Zona Sul possui o menor número de lavouras (grandes propriedades) entre as regiões produtoras; Planície Costeira Interna e Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos representam a menor contribuição em volume de produção do Estado, e embora detenham as menores produtividades de grãos do Estado, estas ainda são elevadas e acima da média nacional (Figura 2). A produção de arroz irrigado no RS tem grande importância, e alterações na produção de grãos deste Estado causam impactos significativos na produção nacional.

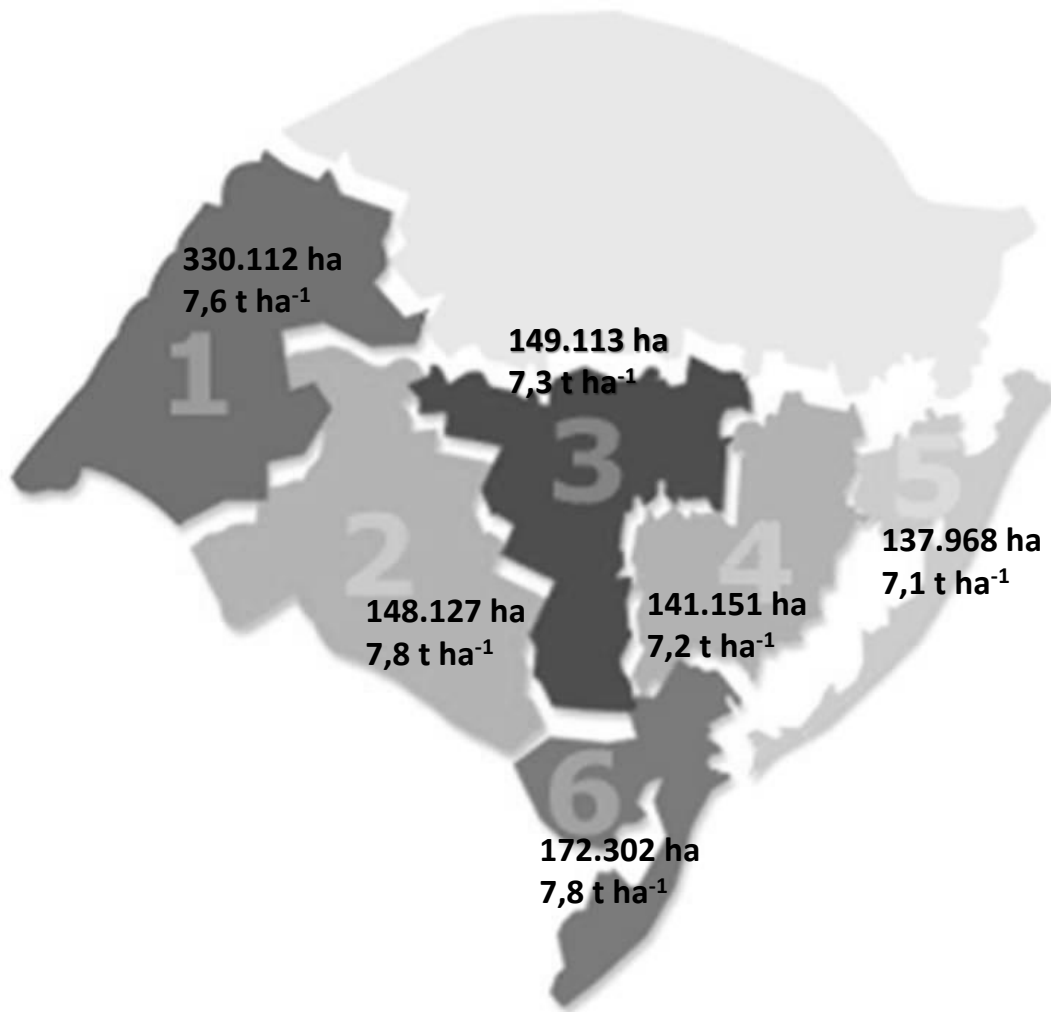


Figura 2 – Regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul: Fronteira Oeste (1); Campanha (2); Depressão Central (3); Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos (4); Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos (5) e Zona Sul (6). Os valores no mapa se referem a área semeada (ha) e produtividade (t ha<sup>-1</sup>) na safra 2012/13. (Fonte. IRGA 2013)

A seguir serão descritas as características das seis principais regiões produtoras de arroz do Rio Grande do Sul:

#### 2.4.1 Fronteira Oeste

A Fronteira Oeste é a região mais importante do Rio Grande do Sul em área cultivada, com aproximadamente 330 mil hectares e também é a mais importante em volume de

produção (IRGA, 2013). Os municípios de Uruguaiana, Itaqui, Alegrete e São Borja são responsáveis por quase 80% da produção de grãos da Fronteira Oeste.

Os solos da região cultivados com arroz, segundo Anghinoni et al. (2004) se caracterizam por terem um pH baixo (abaixo de 5,0), por uma saturação de bases baixa, matéria orgânica variando de média a baixa (inferiores a 3%) e predominância de solos com teor de argila baixo (entre 11 e 25%).

A região da Fronteira Oeste, juntamente com as regiões da 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). É uma das regiões de maior disponibilidade de radiação solar e de menor precipitação, sendo as doenças mais comuns causadas por patógenos de solo, como a queima das bainhas (SOSBAI, 2010). Das regiões produtoras de arroz é a que apresenta as temperaturas mínimas mais elevadas e, portanto, os menores riscos de esterilidade de espiguetas causadas pelo frio (STEINMETZ et al. 2003, STEINMETZ; ALMEIDA, 2012).

A região também apresenta as maiores temperaturas máximas entre as regiões produtoras de arroz do Rio Grande do Sul. Por esta característica de temperatura mais elevada, o período de semeadura pode ser antecipado. Segundo Mota (1995), a região da Fronteira Oeste apresenta as melhores condições climáticas para a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul, principalmente pelas características de temperatura do ar e de altos índices de radiação solar incidente. Essas condições climáticas favoráveis contribuem diretamente para os elevados rendimentos de grãos observados historicamente nesta região quando comparado as demais regiões produtoras do Estado (Figura 3).

#### 2.4.2 Campanha

A região da Campanha destaca-se pelos elevados rendimentos de grãos, dividindo com a região da Zona Sul do Estado a liderança de produtividade de grãos de arroz na safra 2012/13 (IRGA, 2013). Os municípios de Dom Pedrito, São Gabriel e Rosário do Sul são responsáveis por mais de 50% da produção de grãos da região. Possui áreas de cultivo de arroz em solos situados em patamares mais elevados ou em terras adjacentes às várzeas, de relevo suave-ondulado a plano. No RS, esses solos também são encontrados na região da

Fronteira Oeste. De maneira geral, os solos desta região têm pH entre 4,5 e 5,4 e saturação de bases baixa.

É uma região caracterizada pelas menores temperaturas mínimas do Estado nos meses de setembro a dezembro, o que se reflete em uma menor temperatura do solo e num atraso do período recomendado de semeadura e por consequência menor tempo para semeadura dentro das condições ideais. Depois da Zona Sul é a região que apresenta maiores riscos ocorrência de dias com temperaturas mínimas inferiores à 15°C (STEINMETZ; ALMEIDA, 2012).

#### 2.4.3 Depressão Central

A região fisiográfica da Depressão Central possui o maior número de lavouras (pequenas propriedades). A Depressão Central do RS, onde o município de Cachoeira do Sul se destaca com aproximadamente 25% da produção da região é uma das principais regiões produtoras de arroz irrigado no Estado (IRGA, 2010).

Os solos cultivados com arroz nesta região, segundo Anghinoni et al. (2004) se caracterizam por ter um pH baixo (abaixo de 5,0), por uma saturação de bases baixa, matéria orgânica variando de média a baixa e predominância de solos com teor de argila baixo (entre 11 e 25%).

Esta região apresenta, juntamente com a Fronteira Oeste, as maiores temperaturas máximas nos meses de janeiro e fevereiro, o que pode propiciar maiores riscos de perdas de produção por esterilidade de espiguetas causada por temperaturas elevadas (MOTA et al., 1999).

#### 2.4.4 Zona Sul

A região fisiográfica do Estado denominada de Zona Sul apresenta área cultivada e volume de produção expressivo, além de ser caracterizada por um baixo número de lavouras com grandes extensões territoriais. A ampla faixa territorial aliada à elevada disponibilidade de radiação solar (MOTA, 1995) fizeram com que esta região passasse a figurar como uma das mais produtivas dentre as regiões orizícolas do Rio Grande do Sul nas últimas safras

(IRGA, 2013), dividindo, na última safra, o maior valor de produtividade do Estado com a região da Campanha. Os principais municípios produtores de grãos da região são Santa Vitória do Palmar, Arroio Grande, Jaguarão e Rio Grande responsáveis quase 80% do total produzido na região. Segundo Steinmetz et al. (2003) e STEINMETZ & ALMEIDA (2012) a região Sul apresenta alto risco de frio, principalmente no extremo sul do Estado. Esta característica pode ser a responsável pela variação de produtividade entre as safras observada nesta região (Figura 3).

#### 2.4.5 Planícies Costeiras Interna e Externa à Lagoa dos Patos

Estas duas regiões fisiográficas representam a menor contribuição em volume de produção do Estado, e embora detenham os menores rendimentos de grãos do Estado, estes ainda são elevados e acima da média nacional. São regiões, de modo geral, com menores probabilidades de ocorrência de temperaturas iguais ou superiores a 35°C nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (MOTA et al., 1999).

Na Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos destacam-se os municípios de Camaquã, Arambaré, Barra do Ribeiro e Tapes que juntos são responsáveis por mais de 50% da produção de grãos de arroz da região. Na Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos destacam-se os municípios de Mostardas, Viamão, Palmares do Sul, Santo Antônio da Patrulha e Capivari do Sul que juntos correspondem a mais de 80% da produção de grãos de arroz da região.



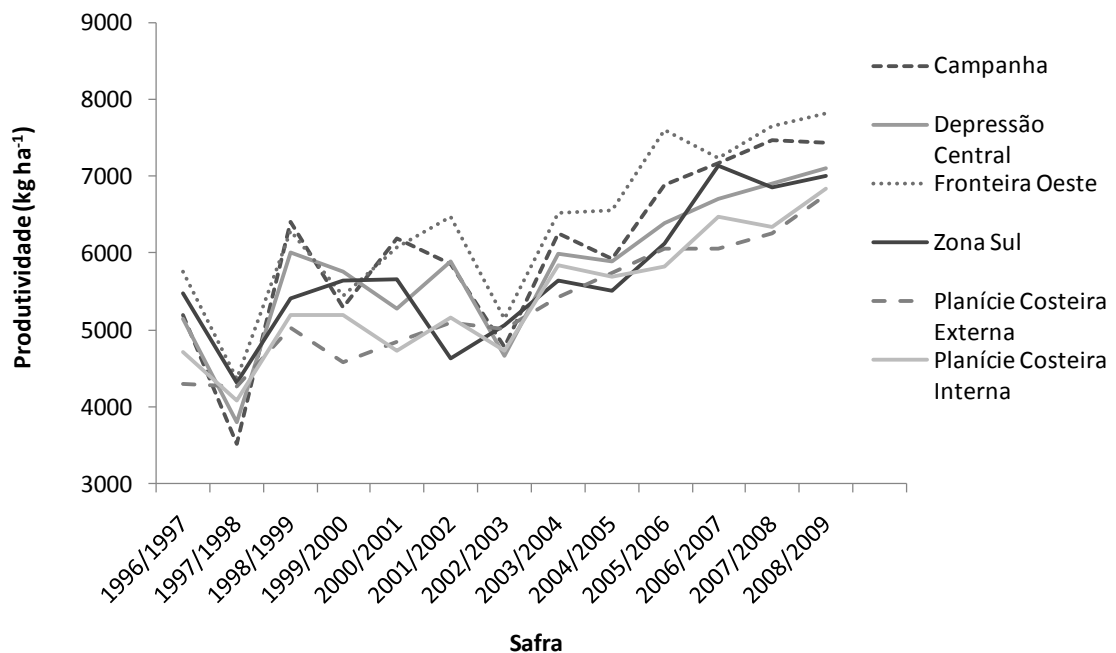


Figura 3 – Rendimentos médios em  $\text{kg ha}^{-1}$  das seis regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul da safra 1996/1997 até a safra 2009/2010. (Fonte: IRGA, 2010)

## 2.5 Modelagem matemática e o modelo SimulArroz

Existem vários modelos de simulação do rendimento de grãos de arroz, alguns mais complexos como o CERES-rice (SINGH et al., 1993) e o ORYZA1 (KROPFF et al., 1994), e outros com algumas simplificações, principalmente na maneira de calcular a produção de matéria seca na planta, que facilitam sua utilização, como o InfoCrop (AGGARWAL et al., 2006) e o WARM (CONFALONIERI et al., 2009). O modelo InfoCrop é um modelo mecanístico, genérico, que requer dados de entrada facilmente disponíveis e foi desenvolvido para simular efeitos do clima, do solo, de manejo da cultura, de danos das principais pragas e doenças, além de quantificar o impacto ambiental de agroecossistemas, através do cálculo da emissão de gases de efeito estufa. Os modelos InfoCrop e ORYZA1 foram utilizados em Krishnan et al. (2007) na simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudança climática na Índia, e a comparação da performance destes dois modelos indicou que o modelo InfoCrop apresenta melhor desempenho, com menor erro na simulação.

Uma das diferenças fundamentais dos modelos agrícolas em relação a modelos físicos e mesmo modelos biológicos de ecossistemas naturais é que, devido a mudanças constantes nas tecnologias, os modelos agrícolas precisam ser calibrados e testados frequentemente. Uma

das calibrações mais comuns nos modelos agrícolas é a introdução de novas cultivares lançadas no mercado ao escopo do modelo. Para adaptar o modelo às mudanças tecnológicas, é necessário entender em que parte do modelo estas mudanças afetam o agroecossistema. Assim, as novas cultivares podem se distinguir das atuais por terem ciclos de desenvolvimento distinto (mais curto ou mais longo), maior capacidade de perfilhamento, maior eficiência de conversão da radiação solar em biomassa, arquitetura de folhas diferente, entre outras características.

O modelo SimulArroz, lançado oficialmente no VIII Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado (CBAI 2013), realizado de 12 a 15 de agosto de 2013, em Santa Maria, RS, é um modelo matemático dinâmico baseado em processos (*process-based model*) que simula diversos processos ecofisiológicos da cultura do arroz irrigado por inundação no intervalo de tempo de um dia. O SimulArroz resulta de dois modelos anteriores de arroz, o ORYZA 2000 e o InfoCrop. Ambos os modelos são simuladores de arroz que foram desenvolvidos e testados em ecossistemas da Ásia. O que diferencia o SimulArroz dos demais simuladores, especialmente o ORYZA 2000 e o InfoCrop, é que está calibrado para cultivares de arroz do Rio Grande do Sul. Sob o ponto de vista de processos incluídos no SimulArroz que não estão contemplados no InfoCrop e no ORYZA, destacam-se:

a) O ciclo de desenvolvimento da cultura é dividido em quatro fases e a duração destas fases é calculada com base na soma térmica baseada em três temperaturas cardinais (LAGO, 2008, STRECK et al., 2011);

b) O modelo calcula a emissão de folhas no colmo principal, através do modelo de aparecimento de folhas de Streck et al. (2008), e dá como saída diária o número de folhas acumulado no colmo principal através da Escala de Haun (HAUN, 1973);

c) O modelo considera o efeito da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico sobre o crescimento da cultura através de uma função de resposta da Eficiência de Uso da Radiação solar (EUR) ao CO<sub>2</sub>;

d) O índice de área foliar máximo no modelo SimulArroz está programado em 7,5 (WALTER et al., 2012);

e) O efeito da temperatura na EUR é calculado por uma função de resposta com quatro temperaturas cardinais. Com esta função, a EUR é máxima quando a temperatura média diária do ar está na faixa ótima (entre 22 e 32 °C) e é multiplicada por um fator de correção em temperaturas sub e supraótimas, que reduz linearmente a EUR até zero, quando a temperatura é igual ou menor que 9 °C ou igual ou maior que 45 °C.

A produção de matéria seca (MS) na planta de arroz é calculada no SimulArroz a partir da Eficiência do Uso da Radiação (EUR) e do Índice de Área Foliar (IAF), uma relação clássica e robusta em estudos ecofisiológicos. A EUR pode ser definida como a quantidade de matéria seca da cultura produzida por unidade de radiação solar interceptada ou absorvida pelo dossel da cultura (SINCLAIR; MUCHOW, 1999). A abordagem da fotossíntese baseada em EUR é amplamente utilizada em modelos de simulação de culturas (incluindo o modelo SimulArroz) como um substituto para simplificar as complexas abordagens bioquímicas da fotossíntese. Os valores comuns da RUE em arroz podem variar de 1,32 a 2,95 g MJ<sup>-1</sup> de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) interceptada (WEERAKOON et al, 2000; MALL; AGGARWAL, 2002). Estes valores discrepantes encontrados na bibliografia são resultados de experimentos conduzidos com diferentes cultivares, sob diferentes condições de manejo, principalmente diferenças na adubação nitrogenada. No entanto, nestes estudos de EUR fica evidente que a maior fonte de variação da EUR é a fase do ciclo de desenvolvimento em que esta é determinada, portanto, um modelo matemático que use esta simplificação para acúmulo de biomassa, deve prever em sua programação, a variação da EUR ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.

Um modelo matemático para ter credibilidade científica, precisa ser testado e exposto à diferentes situações. Apesar de o modelo SimulArroz estar em uso, necessita constante estudo e aperfeiçoamento para que novas versões sejam lançadas e consigam descrever com precisão, as complexas interações dos fatores que influenciam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de grãos da cultura do arroz. Esta premissa fundamenta os esforços da realização deste trabalho.

## **2.6 Mudança climática**

A concentração de CO<sub>2</sub> da atmosfera terrestre está aumentando a uma taxa de 0,4 – 0,5% ano<sup>-1</sup> (IPCC, 2007; SOMBROEK; GOMES, 1996), o que corresponde a um aumento de 1,0 – 1,8 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (IPCC, 2007; UNSWORTH; HOGSETT, 1996). Como resultado do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico, presume-se que está aumentando o efeito estufa da atmosfera terrestre, podendo levar ao aquecimento global (ROSENBERG et al., 1983; IPCC, 2007). Esse aquecimento poderá ter efeito direto no crescimento e no desenvolvimento do arroz que é influenciado pela temperatura do ar (OLDEMAN et al., 1986; ELLIS et al., 1993; SIÉ et al., 1998).

Há relatos que a década de 1990 foi a mais quente do último milênio (KERR, 2005). Estudos numéricos com modelos de circulação geral da atmosfera (GCM - General Circulation Models) indicam que é bastante provável que se verifique um aumento de 1 a 6°C na temperatura média do ar até o final do século XXI em vários locais do Planeta (IPCC, 2007; MAHLMAN, 1997), incluindo o Brasil (SIQUEIRA et al., 1994, 2000, 2001; ASSAD et al., 2004).

A taxa de crescimento das plantas tende a aumentar com a elevação da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico pois o CO<sub>2</sub> é o substrato primário para fotossíntese (ROSENBERG et al., 1983; TAIZ; ZEIGER, 2009). 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> (TUBIELLO et al., 2000; SIQUEIRA et al., 2001; STRECK, 2005), pois as últimas utilizam com muita eficiência o CO<sub>2</sub> presente no ar atmosférico nas concentrações atuais devido às suas adaptações morfológicas e bioquímicas. 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 (WIEGAND; CUELLAR, 1981; SIONIT et al., 1987; HUNT et al., 1991; SHAYKEWICH, 1995, SIQUEIRA et al., 2001) e aumento da respiração (fotorrespiração e fase escura da respiração) (ROSENBERG et al., 1983; LONG, 1991; VU et al., 1997). Assim, as plantas consumiriam mais energia na respiração, reduzindo a quantidade de fotoassimilados disponíveis para os órgãos de reserva da planta durante o enchimento de grãos.

Para Santa Maria, foi realizada uma simulação com a versão precursora do modelo SimulArroz para avaliar o impacto de cenários climáticos de aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e aumento da temperatura do ar sobre o rendimento de grãos de arroz irrigado (WALTER, 2010). No entanto, nesta versão precursora do modelo SimulArroz considerou-se um valor fixo e predefinido para o efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico na EUR, adotando-se um incremento de 25% na EUR em cenários com o dobro da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico. Com esta predefinição, Walter (2010) pôde avaliar apenas cenários futuros com concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico não variável, impossibilitando o estudo do incremento gradativo de CO<sub>2</sub> na atmosfera ao longo dos anos, pois o efeito do CO<sub>2</sub> na EUR é variável em função da concentração de CO<sub>2</sub> considerada (WEERAKOON et al., 2000). Uma maneira de aperfeiçoar esta parte do modelo é implementando uma função matemática que considere o efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na EUR desde valores atuais (cerca de 390 ppm) até níveis de saturação (entre 900 e 1000 ppm).

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo geral**

Desenvolver e calibrar um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade de grãos para a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul

### **3.2 Objetivos específicos**

- Desenvolver uma função matemática de resposta generalizada à concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico [f (CO<sub>2</sub>)] pela eficiência de uso de radiação (EUR) em arroz.
- Avaliar o desempenho da simulação de produção de biomassa pelo modelo SimulArroz na região central do Rio Grande do Sul com a EUR original do modelo e com a incorporação de uma função de EUR dependente do ciclo de desenvolvimento da cultura.
- Avaliar o desempenho da simulação da produtividade de grãos pelo modelo SimulArroz em diferentes regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul com a EUR original do modelo e com a incorporação de uma função de EUR dependente do ciclo de desenvolvimento da cultura.

Os objetivos específicos são abordados nos dois capítulos que seguem nesta tese.

## **4 ARTIGO 1 - CO<sub>2</sub> RESPONSE FUNCTION OF RADIATION USE EFFICIENCY IN RICE FOR CLIMATE CHANGE SCENARIOS**

(Artigo publicado na revista *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, n.7, p.879-885, 2012)

**Abstract** – The objective of this work was to evaluate a generalized response function to the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration [ $f(\text{CO}_2)$ ] by the radiation use efficiency (RUE) in rice. Experimental data on RUE at different CO<sub>2</sub> concentrations were collected from rice trials performed in several locations around the world. RUE data were then normalized, so that all RUE at current CO<sub>2</sub> concentration were equal to 1. The response function was obtained by fitting normalized RUE versus CO<sub>2</sub> concentration to a Morgan-Mercer-Flodin (MMF) function, and by using Marquardt's method to estimate the model coefficients. Goodness of fit was measured by the standard deviation of the estimated coefficients, the coefficient of determination (R<sup>2</sup>), and the root mean square error (RMSE). The  $f(\text{CO}_2)$  describes a nonlinear sigmoidal response of RUE in rice, in function of the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, which has an ecophysiological background, and, therefore, renders a robust function that can be easily coupled to rice simulation models, besides covering the range of CO<sub>2</sub> emissions for the next generation of climate scenarios for the 21<sup>st</sup> century.

**Index terms:** *Oryza sativa*, global warming, modeling, photosynthesis.

### **Função de resposta a CO<sub>2</sub> na eficiência de uso da radiação em arroz para cenários de mudanças climáticas**

**Resumo** – O objetivo deste trabalho foi avaliar uma função de resposta generalizada à concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico [ $f(\text{CO}_2)$ ] pela eficiência de uso de radiação solar (RUE) em arroz. Os dados experimentais de RUE, em diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>, foram coletados de ensaios sobre o arroz realizados em diferentes locais do mundo. Os dados de RUE foram

normalizados de modo que todos os valores de RUE, na atual concentração de CO<sub>2</sub>, foram iguais a 1. A função de resposta foi obtida pelos valores de RUE normalizados versus a concentração de CO<sub>2</sub>, ajustados à função de Morgan-Mercer-Flodin (MMF), com uso do método de Marquardt para estimar os coeficientes do modelo. O ajuste da função foi medido pelo desvio padrão dos coeficientes estimados, coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e raiz do quadrado médio do erro (RQME). A f(CO<sub>2</sub>) descreve uma resposta não linear sigmoideal da RUE em arroz, em função da concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico, o que tem significado ecofisiológico e, portanto, é uma função robusta que pode ser facilmente acoplada a modelos de simulação de arroz, além de abranger as emissões de CO<sub>2</sub> para a próxima geração de cenários climáticos para o século 21.

Termos para indexação: *Oryza sativa*, aquecimento global, modelagem, fotossíntese.

## **Introduction**

After the 2009 Copenhagen Summit [which included the 15<sup>th</sup> Conference of the Parties (COP 15) to the United Nations Framework Convention on Climate Change, and the 5<sup>th</sup> Meeting of the Parties (MOP 5) to the Kyoto Protocol], where little or no progress has been made for the reduction of global CO<sub>2</sub> emissions in the coming decades, a new generation of climate scenarios has been proposed to guide the projections of temperature increase for the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) scheduled to be released in 2014 (Moss et al., 2010; O'Neill & Schweizer, 2011). The new climate projections will be based on four CO<sub>2</sub> emission scenarios, named “representative concentration pathways” – RCP, selected by a new Integrated Assessment Modeling Consortium, with radiative forcing pathways based on possible trajectories of CO<sub>2</sub> concentration over the 21<sup>st</sup> century, as follows: RCP 2.6, increase up to 490 ppmv CO<sub>2</sub> until 2020-2030 and, then, declines, so that the radiative forcing of 4.5 Wm<sup>-2</sup> until 2100 and

stabilizing afterwards; RCP 6.0 = increase up to 850 ppmv CO<sub>2</sub> and radiative forcing of 6.0 Wm<sup>-2</sup> until 2100 and stabilizing afterwards; RCP 8.5 = increase up to >1,370 ppmv CO<sub>2</sub> and radiative forcing > 8.5 Wm<sup>-2</sup> up to 2100 and continuing to rise after 2100 (Moss et al., 2010).

Plants respond to atmospheric CO<sub>2</sub> mostly by increasing photosynthesis rate, which has the potential to increase agricultural crops growth and yield (Streck, 2005). Rice (*Oryza sativa* L.) is the staple food of about half of the world population and Brazil is the largest rice producer outside Asia, with about 2.8 million ha grown annually (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2011). Traditionally, the effect of CO<sub>2</sub> on agricultural crops, including rice, has been simulated in climate change studies using the “current/elevated CO<sub>2</sub>” approach, i.e., crop models are run at current CO<sub>2</sub> (usually 350-360 ppmv) and, then, run against an elevated CO<sub>2</sub> concentration scenario (usually doubled CO<sub>2</sub> – 700 ppmv) (Matthews et al., 1997; Streck & Alberto, 2006; Walter et al., 2010). The four new RCP-based groups of climate scenarios demand a redesign of this traditional approach, for simulating the CO<sub>2</sub> effects on crops by using a CO<sub>2</sub>-response function in simulation models.

Crop simulation models vary in complexity from simple empirical statistic-based models (Pedro Júnior et al., 1995; Klering et al., 2008) to very complex process-based models (Hasegawa & Horie, 1996; Mall & Aggarwal, 2002; Bouman & Laar, 2006; Confalonieri et al., 2009). Models with intermediate levels of complexity combine advantages from the former (simplicity) and from the latter (mechanisms) by using general and robust response functions for describing plant processes on a canopy level, which requires less and more easily-measured coefficients and inputs. For rice, the InfoCrop is a recent process-based model with intermediate complexity (Aggarwal et al., 2006), which gave similar or better simulations of rice yield in India than ORYZA, a more complex process-based model (Krishnan et al., 2007).



A robust canopy-based approach is the radiation use efficiency (RUE), which is widely used in crop simulation models, including InfoCrop, as a surrogate for biochemical and leaf-based approaches to describe the complex photosynthesis process. RUE is defined as the amount of crop dry matter produced per unit of solar radiation intercepted or absorbed by the crop canopy (Sinclair & Muchow, 1999). Common values of RUE in rice vary from 1.32 to 2.95 g MJ<sup>-1</sup> of intercepted photosynthetically active radiation (PAR) (Weerakoon et al., 2000; Mall & Aggarwal, 2002).

There is a lack of a response function to atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, when RUE is used as the driving variable for increasing crop dry matter production in rice simulation models, which constituted the rational effort of this study. Anticipating the upcoming IPCC 2014 AR5, the objective of this work was to evaluate a generalized response function to the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration [f(CO<sub>2</sub>)] by the RUE in rice, which can easily be coupled to process-based rice simulation models.

## **Material and Methods**

A widely used approach in crop simulation models is to describe the effects of environmental variables, such as solar radiation, temperature and photoperiod, on crop growth and development with adimensional response functions that vary from zero to one (Streck et al., 2003; 2007; Setiyono et al., 2007; 2010). The underlying hypothesis was that a similar approach can be used for developing a f(CO<sub>2</sub>).

Literature data on the response of RUE to CO<sub>2</sub> in rice are usually from Open Top Chambers (OTC) and from Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) experiments, where a “current” and an “elevated” CO<sub>2</sub> levels are set. This approach make difficult to hypothesize upon the general shape of a f(CO<sub>2</sub>). From a biochemical perspective, however, CO<sub>2</sub> is the substrate for photosynthesis, and the rate of photosynthesis is expected to increase steadily in the range

from 350-400 to 800-1000 ppmv CO<sub>2</sub> in C<sub>3</sub> plants, like rice, because the current CO<sub>2</sub> concentration (390 ppmv) in the atmosphere is insufficient to saturate the ribulose 1.5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (Rubisco), the enzyme responsible for primary carboxylation, the metabolic process that drives photosynthesis (Bowes, 1991; Taiz & Zeiger, 2009; Streck, 2005). An increase in the availability of CO<sub>2</sub> suppresses photorespiration in C<sub>3</sub> plants because it increases carboxylation and decreases the oxygenase activity of Rubisco (Streck, 2005). But on a canopy level, the response to CO<sub>2</sub> may not follow the same shape, mainly because part of the leaves located within and/or in the lower portion of the canopy are in shade and/or are senescent. Shaded and senescent leaves have very low photosynthesis efficiency because of high respiration rates (Taiz&Zeiger, 2009). Therefore, we selected a flexible response function, the Morgan-Mercer-Flodin (MMF) function (Morgan et al., 1975) for describing the response of RUE to CO<sub>2</sub>. The general form of the MMF function is:

$$Y = \frac{(ab + cX^n)}{(b + X^n)} \quad (1)$$

where “Y” is the response (dependent) variable, “X” is the explanatory (independent) variable, “a” is the intercept when X=0, “c” is the asymptote as X approaches infinity, “n” is a shape coefficient, and “b” is interpreted as  $b=(X_{0.5})^n$ , with X<sub>0.5</sub> being the value of X when Y is half of the maximum response. The MMF is a very flexible function because users can set the intercept and the asymptote (these two coefficients define the range of the response variable) and because it can take several forms only by changing the shape coefficient varying from a rectangular hyperbole for n=1 to a step-function for n=infinite and sigmoidal curves for  $1 < n < \text{infinite}$  (Streck et al., 2003).

For the f(CO<sub>2</sub>), X is the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and Y is the normalized RUE response. By normalized RUE we mean that the RUE is one at current atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. Therefore, the lower limit of the range of RUE response is 1 at “current”

CO<sub>2</sub> concentrations and thus, the coefficient  $a$  in equation (1) was set to 1. The other three coefficients ( $b$ ,  $c$ ,  $n$ ) of equation (1) were estimated as follows.

Published data on RUE at several atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations from different rice trials conducted in OTC, FACE and numerical experiments conducted with different cultivars under different conditions and in distinct locations were used. These data are from thorough literature search on trials that tested the effect of CO<sub>2</sub> concentration on RUE in rice was done in international main stream journals. The source and some details of these trials are in Table 1. RUE data were normalized by dividing the RUE at “elevated CO<sub>2</sub>” concentration treatment(s) by the RUE at the “current CO<sub>2</sub>” concentration treatment and assuming that all “current CO<sub>2</sub>” treatments are 1. The CO<sub>2</sub> concentration from the whole data sets varied from 330 ppmv to 990 ppmv (Table 1), a range that covers the CO<sub>2</sub> concentrations of the RCP2.6, RCP4.5 and RCP6.0 emission scenarios by the year 2100 and the RCP8.5 emission scenario up to about the year 2070 (Moss et al., 2010). Normalized RUE versus CO<sub>2</sub> concentration were then fitted to equation (1) by setting  $a=1$  and coefficients  $b$ ,  $c$  and  $n$  were estimated with the PROC NLIN procedure in SAS System, with the Marquardt method for minimizing the square error of the fit. Goodness of fit was measured by the coefficient of determination ( $R^2$ ), confidence interval for the estimates of the coefficients  $b$ ,  $c$  and  $n$ , and the root means square error (RMSE).

## Results and Discussion

Normalized RUE varied from 1 at 330-370 ppmv to 1.44 at 990 ppmv, i.e., RUE increased as CO<sub>2</sub> increased, a response that is consistent with the response of increase in photosynthesis with CO<sub>2</sub> fertilization in C<sub>3</sub> plants (Streck, 2005). The estimates of the coefficients of the MMF function (equation 1) with the fitting procedure were:  $a=1$ ,  $b=3.096 \times 10^{23}$  (standard error= $1.188 \times 10^{24}$ ),  $c=1.4382$  (standard error=0.0147) and  $n=8.378$  (standard error=0.6017). The probability (p-value) of all three coefficients were highly

significant, with  $R^2 = 0.999$  and  $RMSE = 0.012$ . These results indicate that the MMF function is appropriate to describe the response of RUE to the atmospheric  $CO_2$  concentration in rice.

Therefore, the  $f(CO_2)$  response function of RUE in rice is:

$$Y = \frac{3.096 \times 10^{23} + 1.4382 \times [CO_2]^{8.378}}{3.096 \times 10^{23} + [CO_2]^{8.378}} \quad (2)$$

From equation (2), the coefficient  $X_{0.5}$ , which represents the  $CO_2$  concentration when the response of RUE is half of the maximum response, is 637 ppmv, the coefficient  $c$  is the maximum increase in RUE attained due to increase in  $CO_2$  concentration and the coefficient  $n=8.378$  gives a sigmoidal shape to the curve. A value of 1.4382 for the asymptote (coefficient  $c$  in equation 2) means that the maximum increase in RUE due to elevated  $CO_2$  is 44% greater than the RUE at current  $CO_2$ .

A plot with the normalized RUE versus  $CO_2$  concentration data and the curve generated with equation (2) is in Figure 1. The sigmoidal response indicates that RUE in rice increases slowly in the range from 350 to 500 ppmv of  $CO_2$ , a quasi-linear (the highest rate) increase from about 500 to 750 ppmv and again a slow increase in RUE from about 750 to 950 ppmv, leveling off at  $CO_2$  concentrations greater than 950 ppmv.

The sigmoidal response of RUE to increase in atmospheric  $CO_2$  concentration obtained in this study (Equation 2, Figure 1) differs from the overall response of photosynthesis to  $CO_2$  in  $C_3$  plants, mainly in the range of about 350 to 700 ppmv (Taiz & Zeiger, 2009). In this range, Rubisco carboxylation activity is promptly increased with the increase in atmospheric  $CO_2$ , resulting in a linear increase in the rate of photosynthesis. This biochemical response has constituted a background for assuming in crop simulation models that plant growth increases linearly from “current” to “elevated”  $CO_2$  concentrations (Matthews et al., 1997; Alberto & Streck, 2006; Walter et al., 2010). While this linear approach in the range from 350 to 700 ppmv gives the right response at around 700 ppmv, it

greatly overestimates the response of RUE on a crop canopy level at 500-600 ppmv (Figure 1), a CO<sub>2</sub> concentration range expected for the coming 20-30 years.

One hypothesis to explain the lower response of RUE compared to photosynthesis rate in the range of 500-600 ppmv of CO<sub>2</sub> is that only sunlit leaves in the top of the canopy can fully take advantage of CO<sub>2</sub> fertilization. Throughout the growing season, there are many leaves that are shaded and senescent in the half lower part of the canopy, and the photosynthetic efficiency of these leaves is lower than the photosynthesis of sunlit leaves (Taiz&Zeiger, 2009). Therefore, because RUE is a more robust ecophysiological parameter than photosynthesis rate of individual leaves, our approach to develop a f(CO<sub>2</sub>) response function is more appropriate for assessing the response of canopies to increased CO<sub>2</sub>.

The saturation of the response of RUE at CO<sub>2</sub> concentrations approaching 1000 ppmv (Figure 1) is consistent with the saturation of photosynthesis in C<sub>3</sub> plants at 800-1000 ppmv (Streck, 2005). In low and intermediate CO<sub>2</sub> concentrations, photosynthesis is limited by carboxylation capacity of Rubisco, while in high CO<sub>2</sub> concentrations photosynthesis is limited by the regeneration capacity of Rubisco in the Calvin cycle (Chen et al., 2005; Taiz & Zeiger, 2009).

A further limitation for plants, including rice, to respond positively to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration is the possible acclimation of leaf photosynthesis to CO<sub>2</sub> fertilization. The acclimation of rice leaf photosynthesis has been attributed to both Rubisco carboxylation limitation and Rubisco regeneration limitation (Chen et al., 2005). The reduction of Rubisco carboxylation and regeneration is related to the increase in soluble sugar content (hexoses or non structural carbohydrates) in leaves of plants grown in elevated CO<sub>2</sub> concentrations (Chen et al., 2005). In addition, in rice plants exposed to high CO<sub>2</sub> concentration for long periods (throughout the growing period), there is a lower concentration of Rubisco inside cells, reducing the photosynthetic rate of plants (Chen et al., 2005).

However, the results from OTC and FACE experiments used for defining the  $f(\text{CO}_2)$  in this study (Table 1) are from long-term experiments (plants were grown under elevated  $\text{CO}_2$  throughout their growing period), which indicates that the acclimation of photosynthesis to elevated  $\text{CO}_2$  at the leaf level did not offset the fertilization effect at a canopy level, indicating an overall positive effect of elevated  $\text{CO}_2$  on crop growth.

The photosynthesis acclimation to elevated  $\text{CO}_2$  is the basis for a second hypothesis to explain the small increase of RUE in the range of 500-600 ppmv of  $\text{CO}_2$  of the  $f(\text{CO}_2)$  (Figure 1). Malse et al. (1993) and Makino et al. (2000) reported decrease in Rubisco content but not significant decrease in biomass of tobacco and rice plants grown at 930 ppmv and 1000 ppmv $\text{CO}_2$ , respectively, i.e. under  $\text{CO}_2$ -saturated conditions. Under  $\text{CO}_2$ -nonsaturation conditions, such as in the study by Chen et al. (2005) in which rice plants were exposed to 580 ppmv $\text{CO}_2$ , the acclimation of leaf photosynthesis has a greater impact on plant biomass, with a lower increase in crop biomass than at higher  $\text{CO}_2$  (above 600 ppmv). These two hypothesis may in fact act together and the contribution of each still needs to be elucidated with further studies.

The non-linear response of RUE in rice to increase in atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration (Figure 1) has important implications for using in the upcoming  $\text{CO}_2$  emission scenarios that will guide the IPCC 2014 AR5 (Moss et al., 2010). For the most optimist scenario (RCP2.6), which assumes a maximum  $\text{CO}_2$  concentration of about 490 ppmv, little benefits from  $\text{CO}_2$  fertilization is expected for rice. For the RCP4.5 scenario, which assumes a maximum  $\text{CO}_2$  concentration of about 650 ppmv, the final  $\text{CO}_2$  concentration in this scenario falls into the linear response of Figure 1, and RUE in rice may increase by 28%. The increase by 850 ppmv suggested in the RCP6.0 is in the third range of response in Figure 1, with a increase of about 41% in RUE. For the RCP8.5 scenario, the response of RUE reaches a maximum of about

43% and levels off, which means that, under this very pessimist scenario, benefits from CO<sub>2</sub> fertilization in rice are not expected after about the year 2070.

The  $f(\text{CO}_2)$  proposed in this paper (equation 2) takes into account the effect of CO<sub>2</sub> on RUE and can be easily coupled to a process-based rice simulation model such as InfoCrop. Because the data used for developing the  $f(\text{CO}_2)$  are from different trials conducted with different cultivars under different locations and experimental setups (Table 1), we understand that equation (2) is a robust and generalized response function that can be used in models to simulate the effect of elevated CO<sub>2</sub> concentrations on RUE, in different rice ecosystems. This is particularly important in face of the new generation of climate change scenarios that will be the basis of the AR5 in 2014. This new redesigned scenario process uses the “parallel” approach for representing the socio-economic, technological, demographic, policy and institutional factors that influence gas emissions to the atmosphere, which differs from the “sequential” approach used by Group I of IPCC 2007 AR4 (Moss et al., 2010). Compared to the sequential approach, the parallel approach shortens the time between the development of emission scenarios and the use of the resulting climate scenarios and begins with the identification of major features for scenarios of radiative forcing, setting the radiative forcing trajectories during the 21<sup>st</sup> century (Moss et al., 2010; O’Neill & Scheweizer, 2011). From an agriculture perspective, there new CO<sub>2</sub> emissions scenarios are also different from the AR4 emission scenarios and introduce new challenges for simulation studies as CO<sub>2</sub> concentrations during the 21<sup>st</sup> century may stabilize before 2100 in some scenarios (RCP2.6), may increase in a non-linear fashion up to reaching the highest concentration by 2100 and stabilizing afterwards in others (RCP4.5 and RCP6.0) or way steadily increase beyond 2100 (RCP8.5). Therefore, developing an  $f(\text{CO}_2)$  response function in rice that covers all CO<sub>2</sub> concentration scenarios in a dynamic fashion will shorten the time between the release of the ARS and the assessment of the response of rice to the new climate change scenarios for the coming

decades. This is specially important for the rice chain in Brazil, the largest rice producer outside Asia.

## **Conclusion**

A generalized response function of RUE to increase in atmospheric CO<sub>2</sub> concentration is proposed for rice. The function describes the response in a non-linear fashion with a physiological background, which renders a robust function that can be easily coupled to rice growth simulation models. Also, the response function covers the whole range of the CO<sub>2</sub> emission scenarios during the 21<sup>st</sup> century which will guide the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change to be released in 2014.

## **References**

- AGGARWAL, P.K.; KALRA, N.; CHANDER, S.; PATHAK, H. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. **Agricultural Systems**, v.89, p.1-25, 2006.
- BOWES, G. Growth at elevated CO<sub>2</sub>: photosynthesis response mediated through Rubisco. **Plant, Cell and Environment**, v.14, p.795-806, 1991.
- CHEN, G.Y.; YONG, Z.H; LIAO, Y.; ZHANG, D.Y.; CHEN, Y.; ZHANG, H.B.; CHEN, J.; ZHU, J.G.; XU, D.Q. Photosynthetic Acclimation in Rice Leaves to Free-air CO<sub>2</sub> Enrichment Related to Both Ribulose-1,5-bisphosphate Carboxylation Limitation and Ribulose-1,5-bisphosphate Regeneration Limitation. **Plant Cell Physiology**, v.45, p.1036-1045, 2005.
- DE COSTA, W.A.J.M.; WEERAKOON, W.M.W.; HERATH, H.M.L.K.; AMARATUNGA, K.S.P.; ABEYWARDENA, R.M.I. Physiology of yield determination of rice under elevated carbon dioxide at high temperatures in a sub humid tropical climate. **Field Crops Research**, v.96, p.336-347, 2006.



- HASEGAWA, T.; HORIE, T. Leaf nitrogen, plant age and crop dry matter production in rice. **Field Crops Research**, v.47, p.107-116, 1996.
- KLERING, E. V.; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; CARGNELUTTI FILHO, A. Modelagem agrometeorológica do rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.549-558, 2008.
- KRISHNAN, P.; SWAIN, D.K.; BHASKAR, B.C.; NAYAK, S.K.; DASH, R.N. Impact of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.122, p.233-242, 2007.
- KROPFF, M.J.; Van LAAR, H.H.; MATTHEWS, R.B. ORYZA1: an ecophysiological model for irrigated rice production. In: **SARP Research Proceedings**. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute - IRRI, 1994. 110 p.
- MAKINO, A.; HARADA, M.; KANEKO, K.; MAE, T.; SHIMADA, T.; YAMAMOTO, N. Whole-plant growth and N allocation in transgenic rice plants with decreased content of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase under different CO<sub>2</sub> partial pressures. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.27, p.1–12, 2000.
- MALL, R.K.; AGGARWAL, P.K. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. I. Evaluation of impact assessment models. **Climatic Change**, v.52, p.315-330, 2002.
- MALSE, J.; HUDSON, G.S.; BADGER, M.R. Effects of ambient CO<sub>2</sub> concentration on growth and nitrogen use in tobacco (*Nicotiana tabacum*) plants transformed with an antisense gene to the small subunit of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase. **Plant Physiology**, n.103, p.1075–1088, 1993.
- MATTHEWS, R.B.; KROPFF, M.J.; HORIE T.; BACHELETD, D. Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation. **Agricultural Systems**, v.54, p.399-425, 1997.

MOSS, R.H.; EDMONDS, J.A.; HIBBARD, K.A.; MANNING, M.R.; ROSE, S.K.; van VUUREN, D.P.; CARTER, T.R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G.A.; MITCHELL, J.F.B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S.J.; STOUFFER, R.J.; THOMSON, A.M.; WEYANT J.P.; WILBANKS T.J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, p.747-756, 2010.

MORGAN, P.H.; MERCER, L.P.; FLODIN, N.W. General model for nutritional responses of higher organisms. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.72, p.4327-4331, 1975.

O'NEILL, B.C.; SCHWEIZER, V. Mapping the road ahead. **Nature climate change**, v.1, p.352-353, 2011.

PEDRO JÚNIOR, M.J.; SENTELHAS, P.C.; MORAES, A.V.C.; VILLELA, O.V. Estimativa da produtividade de arroz irrigado por inundação em função da temperatura do ar e da radiação solar. **Scientia Agrícola**, v. 52, p. 96-100, 1995.

SHIMONO, H.; OKADA, M.; YAMAKAWA, Y.; NAKAMURA, H.; KOBAYASHI, K.; HASEGAWA, T. Genotypic variation in rice yield enhancement by elevated CO<sub>2</sub> relates to growth before heading, and not to maturity group. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, p.523-532, 2009.

SETIYONO, T.D.; WEISS, A.; SPECHT, J.; BASTIDAS, A.M.; CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, v. 100, p. 257-271, 2007.

SETIYONO, T.D.; CASSMAN, K.G.; SPECHT, J.E.; DOBERMANN, A.; WEISS, A.; YANG, H.; CONLEY, S.P.; ROBINSON, A.P.; PEDERSEN, P.; DE BRUIN, J.L. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. **Field Crop Research**, v. 119, p. 161-174, 2010.

- SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Occam's Razor, radiation-use efficiency, and vapor pressure deficit. **Field Crops Research**, v. 62, p. 239-243, 1999.
- SINGH, U.; RITCHIE, J.T.; GODWIN, D.C. **A Users Guide to CERES Rice v2. 10.:** simulation manual. Muscle Shoals, AL, USA: International Fertilizer Development Center, 1993. 131 p.
- SOLTANI, A.; ZEINALI, E.; GALESHI, S.; NIARI, N. Simulating GFDL predicted climate change impacts on rice cropping in Iran. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v.3, p.81-90, 2001.
- 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, 2006.
- STRECK, N.A.; PAULA, F.L.M.; BISOGNIN, D.A.; HELDWEIN, A.B.; DELLAI, J. Simulating the development to field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, p. 1-11, 2007.
- STRECK, N. A.; WEISS, A.; BAENZIGER, P.S. A generalized vernalization response function for winter wheat. **Agronomy Journal**, v.95, p.155-159, 2003.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848p.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Foreign Agricultural Service. **Production, Supply and Distribution Online:** Custom Query. USDA, 2011. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdquery.aspx>>. Acesso em: 17 jun. 2011.
- WALTER, L.C.; ROSA, H.T.; STRECK, N.A. Simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudanças climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p. 1237-1245, 2010.

WEERAKOON, W.M.W.; INGRAM, K.T.; MOSS, D.N. Atmospheric carbon dioxide and fertilizer nitrogen effects on radiation interception by rice. **Plant and Soil**, v. 220, p.99-106, 2000.

Table 1. Source and some details of the rice trials used to develop the CO<sub>2</sub> response function of radiation use efficiency (RUE).

Cultivar	Experimental protocol	Location	Levels of [CO <sub>2</sub> ] (ppmv)	Units of RUE	Reference
IR72	Open Top Chambers experiment – dry/wet season and high nitrogen (200 kg ha <sup>-1</sup> )	Los Baños, Philippines (15°N, 121°E)	350, 600 and 700	g MJ <sup>-1</sup>	Weerakoon et al. (2000)
Not specified	Numerical experiment	Two locations in Iran (Rasht: 37.25°N, 49.6°E, 7 m below sea level; Ahwaz: 31.03°N, 48.07°E, 23 m above sea level)	350 and 700	g MJ <sup>-1</sup>	Soltani et al. (2001)
IR36, IR50, Ratna, Rasi, Akashi, Jaya and Cauvery	Numerical experiment	Several locations in India varying from Kapurthala (31°N) to Aduthurai (11°N) and from Ludhiana (75.8°E) to Cuttack (86°E)	330, 660 and 990	g MJ <sup>-1</sup>	Mall & Aggarwal (2002)
BG300	Open Top Chambers experiment – average of pre-heading, post-heading and total crop duration and two growing seasons	Batalagoda, Sri Lanka (7°50'N, 80°50'E)	370 and 570	g MJ <sup>-1</sup>	De Costa et al. (2006)
Kirara397 Kakehashi Akitakomachi Hitomebore	Free-air CO <sub>2</sub> enrichment experiment – average of four cultivars; pre-head, post-head and two years	Shizukuishi, Iwate, Japan (39°38'N, 140°57'E)	365, 548 and 570	g mol <sup>-1</sup>	Shimono et al. (2009)

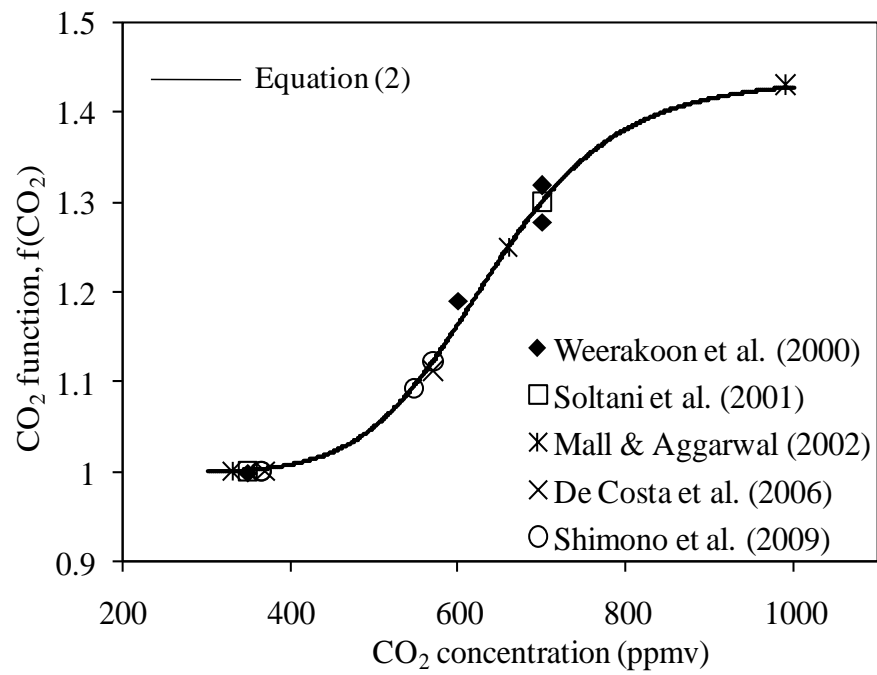


Figure 1. The CO<sub>2</sub> response function for radiation use efficiency in rice. Points are from published data listed in Table 1 and the curve is the fitted MMF function with coefficients given in equation (2).

## **5 ARTIGO 2 – SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE ARROZ NO RIO GRANDE DO SUL COM O MODELO SIMULARROZ**

### **RESUMO**

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo SimulArroz em simular a produção de biomassa da cultura do arroz na região central do Rio Grande do Sul e a produtividade grãos em diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul com a EUR original do modelo e com a incorporação de uma função de EUR dependente do ciclo de desenvolvimento da cultura. Para determinar a função matemática de EUR ao longo do ciclo de desenvolvimento utilizou-se dados de variação de EUR ao longo do ciclo de desenvolvimento na condição de alto nível de nitrogênio na planta de arroz, descritos na literatura. Para testar o desempenho do modelo SimulArroz em simular a biomassa de folhas, colmos e panículas com a versão original e com a versão modificada do modelo, foi conduzido um experimento de campo em Santa Maria, RS, nos anos agrícolas 2011/2012 e 2012/2013, com quatro cultivares, IRGA 421, BRS Querência, IRGA 424 e SCRBSR Tio Taka em três datas de semeadura no ano agrícola 2011/12 (17 de outubro, 18 de novembro e 19 de dezembro de 2011) e uma data de semeadura no ano agrícola 2012/2013 (19 de outubro de 2012). A capacidade de predição da produtividade de grãos foi testada com dados independentes de experimentos relatados na literatura. Os dados meteorológicos necessários para rodar o modelo (temperatura mínima e máxima do ar e radiação solar) foram obtidos de estações meteorológicas do INMET do município ou mais próximas a este. O modelo SimulArroz simula com precisão adequada a produção de biomassa de diferentes cultivares de arroz e datas de semeadura na região central do Rio Grande do Sul. O modelo SimulArroz captura a variação da produtividade de grãos de arroz em experimentos realizados nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. A incorporação de uma função que faz

variar a EUR ao longo do ciclo não melhorou a simulação da produtividade de grãos e a evolução de massa seca dos compartimentos de arroz pelo modelo SimulArroz

**Palavras chave** – *Oryza sativa*, crescimento, rendimento de grãos, modelagem.



## **SIMULATING RICE GROWTH AND GRAIN YIELD IN THE RIO GRANDE DO SUL STATE WITH THE SimulArroz MODEL**

### **ABSTRACT**

The objective of this study was to evaluate the performance of the SimulArroz model for simulating biomass of rice crop in the central region of Rio Grande do Sul State and grain yield in different rice production regions of the Rio Grande do Sul State with the original model and if the incorporation of a Radiation Use Efficiency (RUE) response function that varies with crop development. In order to determine the RUE response function throughout the development cycle, we used data of EUR variation along the development cycle under a high described in the literature. The performance of the SimulArroz model in simulating biomass of leaves, stems and panicles with the original version and the modified version of the model was tested with independent data from an experiment conducted in Santa Maria, RS during the 2011/2012 and 2012/2013 growing season, with four cultivars IRGA 421, BRS Querência, IRGA 424 and SCRBSR Tio Taka in three sowing dates in the first year (October 17<sup>th</sup>, November 18<sup>th</sup> and December 19<sup>th</sup> 2011) and one sowing date in the second year (October 19<sup>th</sup>, 2012). The predictive ability of the model for simulating grain yield was tested with independent experimental data from the literature. Meteorological data required for running the model (minimum and maximum air temperature and solar radiation) were from weather stations of the INMET located in the city or nearby. The SimulArroz model simulates with adequate precision the biomass production of different rice cultivars and sowing dates in the central region of Rio Grande do Sul. The SimulArroz model was able to capture the variation of rice grain yield in different experiments conducted in different regions of the Rio Grande do Sul State. Incorporating a RUE response function that varies with crop development did not improve the ability of the SimulArroz model in simulating biomass and grain by.

Keywords - *Oryza sativa*, growth, yield, modeling.

## INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é o segundo cereal mais produzido no mundo, atrás apenas do trigo (USDA, 2013). O Brasil é o maior produtor de arroz fora do continente asiático, sendo o Estado do Rio Grande do Sul (RS) responsável por aproximadamente 60% do arroz produzido no País (INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ - IRGA, 2013).

Modelos matemáticos estão cada vez mais sendo usados na agricultura. Tais modelos são simplificações da realidade que permitem a descrição das complexas interações que ocorrem em agroecossistemas. Particularmente na área agrícola, para ser representativo e confiável cada modelo precisa ser adaptado e testado em diferentes ambientes. Após ter seu desempenho testado, os modelos agrícolas são ferramentas podem ser usados para prever o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade em função variações das condições meteorológicas que ocorre em cada safra.

O modelo SimulArroz é um modelo de simulação determinístico dinâmico baseado em processos (*process-based-model*) para simular o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade para a cultura do arroz (STRECK et al., 2013). Desenvolvido com base no modelo InfoCrop (AGGARWAL et al., 2006) e no modelo ORYZA (BOUMAN et al., 2004), o SimulArroz é um modelo de simulação mecanístico, que pode ser utilizado para diversos fins, inclusive a simulação dos efeitos de possíveis mudanças climáticas sobre o rendimento de grãos das culturas agrícolas. A capacidade preditiva de produtividade de grãos foi avaliada por Walter et al. (2012) nas condições de cultivo de arroz irrigado por inundação no município de Santa Maria, RS. No entanto, as simulações de crescimento e desenvolvimento com o SimulArroz ainda não foram avaliadas e de produtividade de grãos não foram avaliadas nas demais regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul.

A produção de matéria seca pela planta de arroz no modelo SimulArroz é calculada como uma função da Eficiência do Uso da Radiação (EUR) e do índice de área foliar (IAF)

como é feita no modelo InfoCrop (AGGARWALL et al., 2006). A EUR é um parâmetro ecofisiológico robusto e amplamente usado como indicador quantitativo da capacidade do dossel vegetal em absorver e transformar energia solar em fitomassa (SINCLAIR & MUCHOW, 1999). O valor de EUR utilizado no SimulArroz é de  $2,39 \text{ g MJ}^{-1}$  (KINIRY et al., 2001; WALTER et al., 2012) e este valor é mantido constante durante o ciclo da cultura. Esta preposição, no entanto, pode ser contestada, pois a EUR não é constante ao longo do ciclo da cultura (SINCLAIR & MUCHOW, 1999). Portanto, a hipótese neste trabalho é que, através da introdução de uma função matemática que possibilite a variação da EUR ao longo do ciclo de desenvolvimento, é possível melhorar a capacidade preditiva da produção de biomassa dos compartimentos da planta de arroz pelo SimulArroz .

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo SimulArroz em simular a produção de biomassa da cultura do arroz na região central do Rio Grande do Sul e a produtividade grãos em diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul com a EUR original do modelo e com a incorporação de uma função de EUR dependente do ciclo de desenvolvimento da cultura.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O modelo de simulação do rendimento de grãos de arroz usado neste estudo foi o modelo SimulArroz (Walter et al., 2012; STRECK et al., 2013). O SimulArroz calcula a taxa de crescimento dos diferentes compartimentos da planta (raiz, caule, folhas e panículas) e de desenvolvimento (emissão de folhas e avanço na fenologia da cultura) no passo de tempo de um dia, usando variáveis meteorológicas facilmente disponíveis em estações meteorológicas (temperatura mínima e máxima diária do ar e radiação solar). A versão usada neste estudo é a versão 1.0, cujo aplicativo está disponível em [www.ufsm.br/simularroz](http://www.ufsm.br/simularroz).

O SimulArroz é baseado em funções matemáticas do modelo InfoCrop descritas em Aggarwal et al (2006) e em funções do modelo ORYZA 2000 (BOUMAN et al., 2004), e se

distingue destes por ter em seu código funções de fenologia adaptadas para cultivares brasileiras de arroz (STRECK et al., 2011; WALTER et al., 2012) e por conter um sub-modelo de emissão de folhas que calcula o número de folhas acumuladas na haste principal pela Escala de Haun (STRECK et al., 2008a).

No modelo SimulArroz, o ciclo de desenvolvimento da cultura é dividido em quatro fases (WALTER et al., 2012): fase de emergência (semeadura-emergência), fase vegetativa (emergência-diferenciação da panícula), fase reprodutiva (diferenciação da panícula-antese) e fase de enchimento de grãos (antese-maturidade fisiológica). Cada uma das fases é completada quando atingida a soma térmica, calculada pela metodologia usada por STRECK et al. (2011) e acumulada diariamente, com base na temperatura mínima e máxima diária do ar e considerando as três temperaturas cardinais do desenvolvimento da cultura, temperatura base inferior ( $T_b$  – abaixo da qual a planta não se desenvolve), temperatura ótima ( $T_{ot}$  – em que o desenvolvimento é máximo) e temperatura base superior ( $T_B$  – acima da qual a planta não se desenvolve) variando de acordo com a fase de desenvolvimento, ao longo do ciclo da cultura, sendo  $T_b=11^\circ\text{C}$ ,  $T_{ot}=30^\circ\text{C}$  e  $T_B=40^\circ\text{C}$  para a fase de emergência e para a fase vegetativa;  $T_b=15^\circ\text{C}$ ,  $T_{ot}=25^\circ\text{C}$  e  $T_B=35^\circ\text{C}$  para a fase reprodutiva;  $T_b=15^\circ\text{C}$ ,  $T_{ot}=23^\circ\text{C}$  e  $T_B=35^\circ\text{C}$  para a fase de enchimento de grãos.

O estágio de desenvolvimento (DVS) da cultura é calculado diariamente, de modo que a fase de emergência compreende os estágios de -1 (semeadura) até 0 (emergência), a fase vegetativa inicia no estágio 0 e termina no estágio 0,65 (diferenciação do primórdio floral), a fase reprodutiva inicia no estágio 0,65 e termina no estágio 1 (antese), e a fase de enchimento de grãos corresponde ao período entre os estágios 1 e 2 (maturidade fisiológica). O DVS é calculado por:

$$DVS = \frac{STa}{STT} \quad (1)$$

em que STa é a soma térmica diária acumulada (°C dia) e STT é a soma térmica total (°C dia) para completar a fase.

Para determinar a função matemática de EUR ao longo do ciclo de desenvolvimento utilizaram-se dados de variação de EUR ao longo do ciclo de desenvolvimento na condição de alto nível de nitrogênio na planta de arroz, descritos em Hasegawa & Horie (1996). Optou-se pela condição de alto nitrogênio para ter-se o acoplamento da função de EUR na condição de produtividade potencial do SimulArroz. Primeiramente, os dados de Hasegawa & Horie (1996) foram normalizados, dividindo-se cada valor de EUR pela média dos valores de EUR, obtendo-se assim valores que representam a  $f(\text{EUR})$  ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do arroz. Assim, a  $f(\text{EUR})$  ora penaliza ora incrementa a eficiência de conversão de energia solar em biomassa ao longo do ciclo da cultura. Posteriormente, os dados de normalizados de EUR x DVS foram ajustados ao modelo linear ( $Y = a + bX$ ) e ao modelo quadrático ( $Y = a + bX + cX^2$ ), em que Y é a  $f(\text{EUR})$ , X é o DVS e a, b e c são coeficientes empíricos. A seleção do melhor modelo ajustado foi com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ). A  $f(\text{EUR})$  foi então introduzida no código-fonte da versão 1.0 do modelo SimulArroz, tendo-se duas novas versões, aqui denominadas de versão original (EUR constante ao longo do ciclo) e a versão modificada (EUR variando ao longo do ciclo da cultura).

Para testar o desempenho do modelo SimulArroz em simular a biomassa de folhas, colmos, panículas com a versão original e com a versão modificada do modelo, foi conduzido um experimento de campo no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria, RS, nos anos agrícolas 2011/2012 e 2012/2013, com quatro cultivares, IRGA 421 (muito precoce), BRS Querência (ciclo precoce), IRGA 424 (ciclo médio) e SCSBRS Tio Taka (ciclo tardio) e três datas de semeadura no ano agrícola 2011/12 (17 de outubro, 18 de novembro e 19 de dezembro de 2011) e uma data de semeadura no ano agrícola 2012/2013 (19 de outubro de 2012). O delineamento experimental foi blocos ao caso,

com quatro repetições. Cada parcela tinha 1,53 x 5m, com linhas de plantas distanciadas de 17cm e uma densidade de plantas de 200 plantas m<sup>-2</sup>. A adubação e práticas de manejo, incluindo a irrigação por inundação a partir de V3, seguiram as indicações da cultura para o RS (SOSBAI, 2012).

Foram realizadas amostragens de massa fresca coletando-se plantas em 0,1 m<sup>2</sup> em cada parcela nos dois anos agrícolas. As plantas de arroz foram separadas em folhas, colmos, panículas e material senescente no ano agrícola 2011/12 e em folhas + colmos e panículas no ano agrícola 2012/13. Após a separação, o material foi colocado em sacos de papel identificados e, posteriormente, foram colocadas para secagem em estufa a 60°C até atingirem massa constante.

Para testar a capacidade de predição da produtividade de arroz das duas versões do modelo SimulArroz, foi realizada uma busca bibliográfica de trabalhos científicos nos quais eram relatados valores de produtividade de grãos em experimentos conduzidos em diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. Apenas tratamentos sem deficiência ou estresse por fatores bióticos ou abióticos foram considerados como dados independentes na avaliação do desempenho do modelo. Os detalhes de cada um desses experimentos utilizados como dados independentes estão na Tabela 1. Com exceção da região da Campanha para qual não foram encontrados dados de produtividade compatíveis com as cultivares e/ou os dados meteorológicos disponíveis, obteve-se, para todas as demais regiões orizícolas, dados de produtividade para teste das versões do modelo, totalizando 91 valores de produtividade testados. As datas de semeadura variaram de 1º de outubro até 11 de março em safras desde 1984/85 a 2009/10 e as cultivares testadas tinham ciclos de maturação variando desde o ciclo muito precoce (como por exemplo, a cultivar IRGA 421) até o ciclo tardio (cultivar SCSBRS Tio Taka).

Os dados meteorológicos (temperatura mínima, máxima e radiação solar), necessários para rodar o SimulArroz, foram obtidos de estações meteorológicas do INMET do município ou mais próximas a este.

O desempenho das duas versões do modelo SimulArroz foram avaliados pelas estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RQME) (STRECK, 2002; STRECK et al., 2008a,b), índice “BIAS”(SCHNEIDER, 1998), coeficiente de correlação (r) (SCHNEIDER, 1998), índice de concordância (dw) (STRECK et al, 2008b), índice de confiança (c) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997) e estatística E12 (STRECK et al., 2008b).

O “RQME” expressa o erro médio do modelo (quanto menor o RQME melhor é o modelo) e é calculada pela seguinte equação como citado por Streck et al. (2002, 2008a,b):

$$RQME = [\sum(Si - Oi)^2/n]^{0.5} \quad (2)$$

em que Si são os valores simulados, Oi são os valores observados e n é o número de observações. O RQME normalizado foi calculado pela seguinte equação:

$$RQME_n = 100 * RQME / Oim \quad (3)$$

em que Oim é a média dos valores observados.

O valor de “BIAS”, utilizado por Leite & Andrade (2002) é obtido pela fórmula geral:

$$BIAS = (\sum Si - \sum Oi) / \sum Oi \quad (4)$$

O índice “dw” é calculado como (WILLMOTT, 1981):

$$dw = 1 - \frac{\sum[(Si - Oi)^2]}{[\sum (|Si - \bar{O}|) + (|Oi - \bar{O}|)]^2} \quad (5)$$

O valor de r, segundo Schneider (1998) é dado pela fórmula geral:

$$r = \sum (Oi - \bar{O}) * (Si - Sm) / \sqrt{[\sum (Oi - \bar{O})^2] * [\sum (Si - Sm)^2]} \quad (6)$$

onde  $\bar{O}$  é a média dos valores observados e Sm é a média dos valores simulados.

O índice de confiança (c) indica o desempenho dos modelos e é calculado por (CAMARGO; SENTELHAS, 1997):

$$c = r * dw \quad (7)$$

em que  $r$  é o coeficiente de correlação e  $dw$  é o coeficiente de concordância de Willmott (1981).

A estatística E12 avalia a acurácia de um modelo em relação a outro modelo (STRECK, 2002; STRECK et al., 2008b):

$$E12 = QME1/QME2 \quad (8)$$

em que QME1 e QME2 são o quadrado médio do erro de simulações para o modelo 1 e modelo 2, respectivamente.

$$QME1 = \sum (S_{1i} - O_i)^2/n \quad (9)$$

$$QME2 = \sum (S_{2i} - O_i)^2/n \quad (10)$$

sendo  $S_{1i}$  os valores simulados para o modelo original e  $S_{2i}$  para o modelo modificado.

A estatística E12 é adimensional e varia de 0 a infinito. Um valor de E12 entre 0 e 1 indica que o modelo original é superior ao modelo modificado, e se E12 for acima de 1, o modelo modificado tem melhor desempenho (STRECK, 2002; STRECK et al., 2008b).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O melhor ajuste dos modelos linear e quadrático se deu quando o ciclo de desenvolvimento da cultura foi dividido da emergência até a antese (DVS de 0 a 1, ou fase vegetativa) e da antese até a maturidade fisiológica (DVS de 1 a 2, fase reprodutiva) (Figura 1). Na fase emergência-antese (para DVS menor ou igual a 1) ajustou-se melhor o modelo quadrático:

$$f(RUE) = 2,39 * (-1,2312 * DVS^2 + 1,338 * DVS + 0,845) \quad (R^2 = 0,87) \quad (11)$$

e para a fase antese-maturidade fisiológica (para DVS maior que 1) ajustou-se melhor o modelo linear:

$$f(RUE) = 2,39 * (-0,248 * DVS + 1,2) \quad (R^2 = 0,95) \quad (12)$$



Fisiologicamente o formato da resposta da EUR ao longo do ciclo da cultura, representado na Figura 1, demonstra

A Tabela 1 contém as estatísticas de desempenho das versões dos modelos. De modo geral, o modelo original apresentou melhor predição da massa seca total, folhas e panículas e houve vantagem preditiva de colmos e biomassa senescente para o modelo modificado. O índice de concordância ( $d_w$ ) e o coeficiente de correlação ( $r$ ) permitem identificar, respectivamente, o grau de exatidão e de associação entre duas variáveis. Os resultados indicam que ambas as versões do modelo apresentaram alto grau de exatidão, o que significa que o modelo consegue capturar a variação de biomassa ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do arroz.

O desvio médio dos valores estimados em relação aos valores observados (BIAS) foi muito próximo de zero para ambas versões do modelo, sendo que o original teve menor desvio nas simulações de MS total da parte aérea e de MS de panículas, enquanto o modelo modificado teve um índice mais próximo a zero nas predições de MS de colmos, folhas e de material senescente (Tabela 1).

Os resultados da simulação da massa seca da parte aérea e seus compartimentos (folhas, colmos e panículas) para as cultivares IRGA 421, IRGA 424, BRS Querência e SCSBRS Tio Taka indicaram que, fazendo-se variar a EUR ao longo do ciclo de desenvolvimento, há um aumento no acúmulo de MS nas folhas e nos colmos, que não influencia na produção de MS de panículas. Isso acontece porque a função de EUR proposta (equações 11 e 12) resulta em maior acúmulo de MS durante a fase vegetativa, quando a EUR é maior, e durante a fase reprodutiva a eficiência de conversão de energia solar em biomassa é menor (SINCLAIR & MUCHOW, 1999), principalmente devido ao fato da transformação de fotoassimilados em grãos demandar mais energia do que para transformação de carboidratos estruturais e de armazenamento temporário.

Avaliando a predição de biomassa do modelo ORYZA 2000 nas Filipinas, Bouman e Laar (2006) encontraram erros médios relativos na ordem de 25, 31, 39 e 14% para biomassa total, folhas, colmos e panículas, respectivamente. Comparando estes valores com os encontrados no presente trabalho, os erros médios normalizados para folhas e colmos são semelhantes, porém os erros encontrados pelos autores supra citados são mais baixos para biomassa total e panículas. A versão original do modelo SimulArroz, comparativamente à versão modificada, simulou melhor a massa seca de folhas, colmos e panícula cujos erros médios relativos ficaram entre 29,5 e 35,5%, e para massa seca da parte aérea as duas versões do modelo foram muito semelhantes. Para massa seca de folhas e colmos o modelo SimulArroz teve melhor desempenho de simulação que o modelo ORYZA 2000 (BOUMAN; LAAR, 2006).

Com relação à produtividade de grãos, as estatísticas indicam que a versão modificada do modelo não melhorou substancialmente a predição de biomassa pelo modelo SimulArroz. Isto pode ser explicado por dois aspectos. Primeiramente, a produção de biomassa considera em suas funções matemáticas, o efeito da temperatura na EUR e do Índice de Área Foliar (IAF), conforme descrito por Walter (2012). Isto faz com que vários fatores atuem na produção de biomassa no modelo, além do que, o maior acúmulo de biomassa no modelo modificado não é totalmente alocado em grãos, segundo as pressuposições do modelo. Outro aspecto é que as funções modificadas, na média do ciclo, diminuem o potencial de produção de biomassa, e conseqüentemente, a produtividade de grãos.

Para a variável produtividade de grãos de arroz, a região da Fronteira Oeste apresentou a maior produtividade ( $13.574 \text{ kg ha}^{-1}$ ) com a cultivar IRGA 417 e também a maior diferença entre a mínima e a máxima produtividade ( $7.511 \text{ kg ha}^{-1}$ ), enquanto a menor produtividade de grãos observada foi de  $4.451 \text{ kg ha}^{-1}$  no município de Cachoeirinha, região da Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos, com a cultivar IRGA 421. Mesmo com estas

variabilidades de produtividade, ambas as versões do modelo conseguiram simular a produtividade satisfatoriamente, com erros próximos de  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  para a maior e menor produtividade citadas, respectivamente.

A produtividade média observada para as regiões da Depressão Central, fronteira oeste, planície costeira externa e interna à Lagoa dos Patos e Zona Sul foi de 7.938, 9.774, 8.501, 8.314 e  $9.759 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente e as duas versões do SimulArroz capturaram a variabilidade média de produtividade entre as regiões (Figura 2). Considerando o elevado número de cultivares utilizadas nas simulações (Tabela 1), o modelo demonstrou ser bastante versátil, pois capturou a diferença de potencial produtivo das diferentes cultivares. O desvio padrão observado também foi capturado pelas duas versões do SimulArroz, o que mostra a boa capacidade preditiva do modelo.

Os testes de produtividade indicaram que a inclusão das funções de EUR altera a produtividade simulada de grãos. O desvio médio dos valores estimados em relação aos valores de produtividade de grãos observados (BIAS) foi muito próximo de zero para ambas as versões do modelo (Tabela 3), o que indica que o modelo captura com boa precisão a variação da produtividade de grãos. O índice de concordância das versões do SimulArroz foi superior a 0,98 nas regiões Fronteira Oeste, Depressão Central e Planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos (Tabela 3). Nas regiões Planície Costeira Externa à Lagoa dos Patos e Zona Sul os valores do índice de concordância foram um pouco menores, indicando que nestas regiões a predição do modelo foi inferior. Mesmo assim os valores do índice de concordância podem ser considerados satisfatórios, uma vez que as variações das produtividades de grãos observadas nas diferentes regiões foi capturada pelas versões do modelo, o que indica que o modelo SimulArroz é sensível ao ambiente.

A versão original do SimulArroz resultou em erros menores e estatísticas mais precisas na região da Costeira Externa à Lagoa dos Patos e na Zona Sul, enquanto o modelo

modificado teve melhor precisão de simulação na região da Depressão Central. Na planície Costeira Interna à Lagoa dos Patos e na Fronteira Oeste do Estado os modelos apresentaram resultados semelhantes, como pode ser evidenciado pelos índices E12 (Tabela 3).

A versão modificada do modelo SimulArroz apresentou produtividades menores que a versão original (Figura 2). Isto acontece, pois após a antese, na versão modificada há uma diminuição do acúmulo de biomassa devido à penalização da eficiência de uso de radiação nesta fase do ciclo (Figura 1). Segundo Sinclair e Muchow (1999) é justamente após a antese que a biomassa produzida é destinada para o enchimento de grãos e a penalização da EUR nesta fase afeta diretamente a produtividade.

Walter et al. (2012) testaram a versão do modelo InfoCrop que deu origem ao modelo SimulArroz, utilizando dados de rendimento publicados pelo IRGA (Instituto Rio-Grandense do Arroz) para o município de Santa Maria nas safras de 1996/1997 a 2008/2009 e com resultados de experimentos realizados na Universidade Federal de Santa Maria (região da Depressão Central do Rio Grande do Sul), e encontraram erros de  $850 \text{ kg ha}^{-1}$ , com tendência de superestimativa. Os erros encontrados nas simulações para este conjunto de dados (Tabela 3) para a região da Depressão Central foram um pouco maiores que os encontrados por Walter et al. (2012). Isto pode ser explicado pelo maior número de safras testadas nesta região (safras de 1984/85 a 2006/07), ou seja, inclui safras anteriores às avaliadas por Walter et al. (2012). Quanto mais remotos os dados de safra, maiores os erros de simulação, em função da utilização de novas tecnologias como maior potencial genético das cultivares e manejo produtivo (data de entrada da água, manejo de adubação e fitossanitário).

Há poucos trabalhos científicos que relatam resultados de testes de EUR para as cultivares modernas de arroz nas condições meteorológicas e de cultivo do Rio Grande do Sul. Novos estudos devem ser realizados determinando a EUR das cultivares de arroz irrigado

utilizadas no Rio Grande do Sul para ajudar a entender as diferenças existentes entre as cultivares quanto a resposta à eficiência de uso da radiação solar.

## CONCLUSÕES

O modelo SimulArroz simula com precisão adequada a produção de biomassa de cultivares de diferentes cultivares e datas de semeadura de arroz na região central do Rio Grande do Sul.

O modelo SimulArroz captura a variação da produtividade de grãos de arroz em experimentos realizados nas diferentes regiões orizícolas do Rio Grande do Sul.

A incorporação de uma função que faz variar a EUR ao longo do ciclo não melhorou a simulação da produtividade de grãos e a evolução de massa seca dos compartimentos de arroz pelo modelo SimulArroz .

## REFERÊNCIAS

AGGARWAL, P. K. et al. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. **Agricultural Systems**, Netherlands, v. 89, p. 1-25, 2006.

AMILIBIA, E. et al. Controle químico da grama-boiadeira na cultura do arroz irrigado. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1, 2007. Pelotas **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007. v.2, p.227-229.

BOUMAN, B. A. M. et al. **ORYZA 2000**: modeling lowland rice. Version 2.12, November 2004. In: Cereal Knowledge Bank, International Rice Research Institute. Disponível em: <<http://www.knowledgebank.irri.org/oryza2000/default.htm>>. Acesso em: 20 maio 2013.

BOUMAN, B. A. M.; LAAR, H. H. van. Description and evaluation of rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. **Agricultural Systems**, v.87, p.249-273, 2006.

CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, E.R. et al. Manutenção da área foliar e produtividade de arroz irrigado com a aplicação de fertilizantes foliares no estágio de emborrachamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.5, ago. 2008.

FREITAS, T.F.S.; OLIVEIRA, J.V. Efeito do tratamento de sementes no desenvolvimento inicial e na produtividade de grãos de arroz irrigado. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO 1, 2011. Balneário Camboriú, **Anais...** Itajaí: Epagri/Sosbai, 2011. p.631-634.

HASEGAWA, T.; HORIE, T. Leaf nitrogen, plant age and crop dry matter production in rice. **Field Crops Research**, v.47, p.107-116, 1996.

IRGA – Instituto Rio-Grandense do Arroz. **Dados de safra: série histórica da área plantada, produção e rendimento**. Capturado em março de 2013. Online. Disponível em: [http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131024101611producao\\_rs\\_e\\_brasil.pdf](http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131024101611producao_rs_e_brasil.pdf).

KEMPF, D. et al. Rendimento de linhagens avançadas em semeadura pré-germinada, safra 2009/10. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 2, 2011. Balneário Camboriú, **Anais...** Itajaí: Epagri/Sosbai, 2011. p.224-227.

KINIRY, J. R. et al. Rice Parameters Describing Crop Performance of Four U.S. Cultivars. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 1354-1361, 2001.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. de. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, p. 321-328, 2002.

LOPES, M. C. B. et al. Avaliação de genótipos, no ensaio de rendimento preliminar, do programa de melhoramento genético do instituto Rio-grandense do arroz, na safra 2005/06. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1, 2007. Pelotas **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007. p.195-197.

MARCHESAN, E. et al. Residual da mistura formulada dos herbicidas imazethapyr e imazapic em área com cultivo sucessivo de arroz irrigado. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 2, 2007. Pelotas **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007, p.293-295.

MARCHEZAN, E.; AUDE, M.I.S.; STORCK, L. Comportamento de genótipos de arroz irrigado em Santa Maria. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.26, n.1, jan.1996.

MARCHEZAN, E. et al. Desempenho de genótipos de arroz irrigado cultivados no sistema pré-germinado com inundação contínua. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.5, set. 2004.

MARCHEZAN, E. et al. Manejo da irrigação em cultivares de arroz no sistema pré-germinado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.1, jan.2007.

MARCOLIN, E.; et al. Rendimentos de grãos e eficiência de uso de água em lavouras comerciais de arroz irrigado com manejo adequado. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 2, 2011. Balneário Camboriú, **Anais...**Itajaí: Epagri/Sosbai, 2011.p.362-365.

MARIOT, C.H.P.; et al. Redução na produtividade de grãos em função da época de controle de plantas daninhas na cultura do arroz irrigado. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 2, 2007. Pelotas **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007, p.341-343.

ROSSO, A.F. et al. Avaliação de genótipos de arroz híbrido do programa de melhoramento genético da parceria instituto rio-grandense do arroz/fazenda Ana Paula, na safra 2009/10. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1, 2011. Balneário Camboriú, **Anais...Itajaí: Epagri/Sosbai**, 2011. p.54-57.

SANCHOTENE, D. A. et al.; Seletividade de herbicidas a cultivar IRGA 422 CL. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 2, 2011. Santa Maria, **Anais... Santa Maria, Editora Orium**, 2011. p. 274-275.

SCIVITTARO, W. B. et al. Uso da água pelo arroz: efeito do período de supressão da irrigação. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 2, 2011. Balneário Camboriú, **Anais...Itajaí: Epagri/Sosbai**, 2011. p.315-318.

SCHNEIDER, P. R. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. 2.ed. Santa Maria: Ed. UFSM/CEPEF, 1998. 236p.

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Radiation Use Efficiency. **Advances in Agronomy**, v. 65, 1999, p. 215–265.

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 et al. Simulating leaf appearance in rice. **Agronomy Journal**, Madson, v. 100, n. 3, p. 490-501, 2008a.

STRECK et al. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a nonlinear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 4, p. 449-455, 2008b.

STRECK, et al. Modeling the development of cultivated rice and weedy red rice. **Transactions of the ASAE**, v. 54, p. 371-384, 2011.

STRECK, et al. SimulArroz: Um aplicativo para estimar a produtividade de arroz no Rio Grande do Sul. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 2013, Santa Maria. **Anais... Santa Maria: SOSBAI**, 2013. p. 1618-1627.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**, 29. Itajaí, SC, SOSBAI, 2012. 177p.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Foreign Agricultural Service. **Production, Supply and Distribution Online: Custom Query**. USDA, 2012. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdQuery.aspx>>. Acesso em: 15 mar. 2013.

VILLA, S. C. C.; Doses e épocas de aplicação do herbicida Only em duas cultivares de arroz tolerante a imidazolinonas. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 2, 2011. Santa Maria, **Anais...Santa Maria, Editora Orium**, 2011.p. 190-193.

WALTER, L. C. et al. Adaptação e avaliação do modelo InfoCrop para simulação do rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.3, p.510-521, maio/jun. 2012.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Silver Spring, v. 2, n. 1, p. 184-194, 1981.



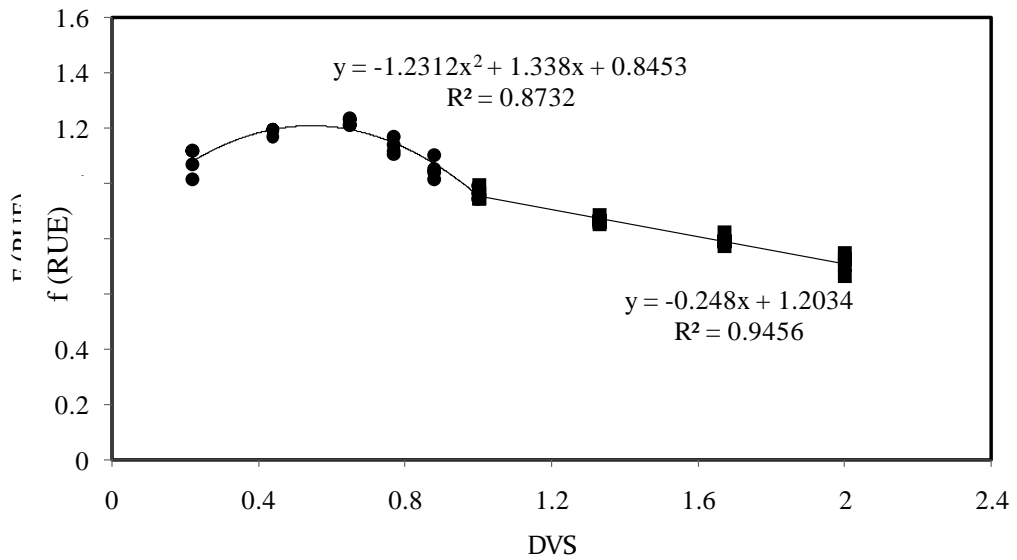


Figura 4 – Ajuste das funções normalizadas quadrática e linear baseadas aos dados de eficiência do uso da radiação (EUR) normalizados de Hasegawa & Horie (1996). DVS é o estágio de desenvolvimento da cultura e  $f(EUR)$  é a função que faz variar a EUR ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do arroz.

● Fase vegetativa    ■ Fase reprodutiva

**Tabela 1** – Caracterização dos dados independentes de produtividade de grãos de arroz usados na avaliação das duas versões do modelo SimulArroz.

Data(s) de semeadura	Cultivar(es)	Município(s)	Condição experimental	Referências
12/10/2009, 23/10/2009, 05/11/2009	IRGA 424, EPAGRI 109	Camaquã	Lavoura Comercial	MARCOLIN et al. (2011)
21/10/2009, 23/10/2009, 29/10/2009 e 12/11/2009	IRGA 409, IRGA 417, IRGA 424, IRGA 409 e IRGA 417	Cachoeira do Sul, Cachoeirinha, Camaquã, Uruguaiana e Santa Vitória Do Palmar	Experimento a campo	ROSSO et al., (2011)
09/11/2009, 21/10/2009	IRGA 424, SCSBRS TioTaka, IRGA 424, IRGA 425, SCS 116 Saturu	Cachoeirinha e Cachoeira do Sul	Experimento a campo	KEMPF et al., (2011)
20/11/1984 a 20/11/1995	IRGA 416, IRGA 409 e BRS TAIM,	Santa Maria	Experimento a campo	MARCHEZAN et al., (1996)
11/10/2000, 24/11/2000 e 19/11/2002	BR IRGA 409, IRGA 417, IRGA 420, BRS TAIM	Santa Maria	Experimento a campo	MARCHEZAN et al., (2004)
30/11/2002, 18/10/2003 e 23/10/2004	IRGA 420 e BRS TAIM	Santa Maria	Experimento a campo	MARCHEZAN et al., (2007)
11/03/2005	IRGA 417	Santa Maria	Experimento a campo	CAMARGO et al., (2008)
20/10/2009 e 13/11/2009	IRGA 424	Cachoeirinha	Experimento a campo	FREITAS et al., (2011)
17/11/2007 e 30/10/2008	BRS Querência	Capão do Leão	Experimento a campo	SCIVITTARO et al., (2011)
29/11/2004	IRGA 422 CL	Santa Maria	Experimento a campo	VILLA et al., (2005)
10/10/2004	IRGA 422 CL	Itaqui	Experimento a campo	SANCHOTENE et al., (2005)
01/10/2004, 29/10/2004, 27/10/2005, 03/11/2005 e 05/11/2005	EPAGRI 108, SCSBRS Tio Taka, IRGA 417, EPAGRI 108, EPAGRI 109, IRGA 409, IRGA 410, IRGA 418, IRGA 419, IRGA 410, IRGA 420 e IRGA 421	Cachoeirinha, Uruguaiana	Experimento a campo	LOPES et al., (2007)
03/10/2006	IRGA 417, IRGA 422 CL	Santa Maria	Experimento a campo	MARCHESAN et al., (2007)
16/11/2005	IRGA 422 CL	Cachoeirinha	Experimento a campo	MARIOT et al., (2007)
11/11/2005 13/12/2006	IRGA 422 CL	Cachoeirinha	Experimento a campo	AMILIBIA et al., (2007)

**Tabela 2** – Estatísticas do desempenho da simulação de fitomassa seca de arroz ( $\text{g m}^{-2}$ ) com as versões Original (O) e Modificada (M) do modelo SimulArroz no ano agrícola 2011/2012 em Santa Maria, RS, em três datas de semeadura (17/11/2011, 18/11/2011, 19/12/2011) e quatro cultivares (IRGA 421, IRGA 417, BRS Querência e SCSBRS Tio Taka) e no ano agrícola 2012/2013.

Compartimento	Versão do Modelo	Estatística						E12
		RQME ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	RQME (%) normatizado	BIAS	Índice de Concor-dância (dw)	Coeficiente de correlação (r)	Índice de confiança (c)	
Ano agrícola 2011/12								
Parte aérea	O	249,6	34,7	-0,068	0,9987	0,9403	0,9390	0,0292
	M	259,3	33,5	0,079	0,9987	0,9371	0,9358	
Folhas	O	62,41	29,5	-0,106	0,9985	0,9381	0,9367	0,7643
	M	71,38	33,8	0,093	0,9983	0,9341	0,9325	
Colmos	O	138,0	35,3	-0,294	0,9968	0,9523	0,9492	1,6752
	M	106,6	43,7	-0,192	0,9971	0,9577	0,9548	
Panículas	O	228,8	29,5	-0,267	0,9990	0,8537	0,8508	0,9535
	M	233,0	53,8	-0,290	0,9990	0,8261	0,8232	
Biomassa senescida	O	50,6	63,6	-0,308	0,9961	0,8253	0,8222	1,0462
	M	49,43	66,1	-0,295	0,9972	0,8330	0,8309	
Ano agrícola 2012/13								
MS de colmos e folhas	O	119,35	16,64	-0,13	0,9946	0,9591	0,9539	1,45
	M	82,19	16,46	0,03	0,9975	0,9659	0,9634	
Panículas	O	163,28	22,77	-0,04	0,9899	0,9031	0,8939	0,999
	M	163,38	22,78	-0,04	0,9895	0,9032	0,8937	

**Tabela 3** – Estatísticas do desempenho da simulação da produtividade de grãos ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) de arroz nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul com as versões Original e Modificada do modelo SimulArroz com dados independentes. RQME é a raiz do quadrado médio do erro, BIAS é um índice o desvio médio dos valores estimados em relação aos valores observados e E12 é uma estatística que avalia a acurácea de um modelo em relação ao outro.

Regiões	Versão do Modelo	Estatísticas					
		RQME	BIAS	Índice de Concor-dancia (dw)	Coefici-ente de correla-ção (r)	Índice de confiança (c)	E12
Depressão Central	Original	1778	0,0273	0,9817	0,3734	0,3666	1,14
	Modificada	1561	-0,009	0,9834	0,4157	0,4088	
Fronteira Oeste	Original	1422	-0,005	0,9874	0,7300	0,7208	0,99
	Modificada	1422	-0,033	0,9843	0,7274	0,7160	
Plan. Cost. Intera à Lagoa dos Patos	Original	1165	0,0443	0,9910	0,6538	0,6479	1,02
	Modificada	1146	0,0106	0,9907	0,6420	0,6358	
Plan. Cost. Externa à Lagoa dos Patos	Original	1022	-0,051	0,9336	0,6791	0,6340	0,79
	Modificada	1287	-0,104	0,9208	0,7442	0,6853	
Zona Sul	Original	2134	-0,158	0,8411	0,5066	0,4252	0,89
	Modificada	2389	-0,203	0,8412	0,5114	0,4301	
Todas Regiões	Original	1541	0,021	0,9960	0,5513	0,5491	1,04
	Modificada	1481	-0,014	0,9960	0,5498	0,5496	

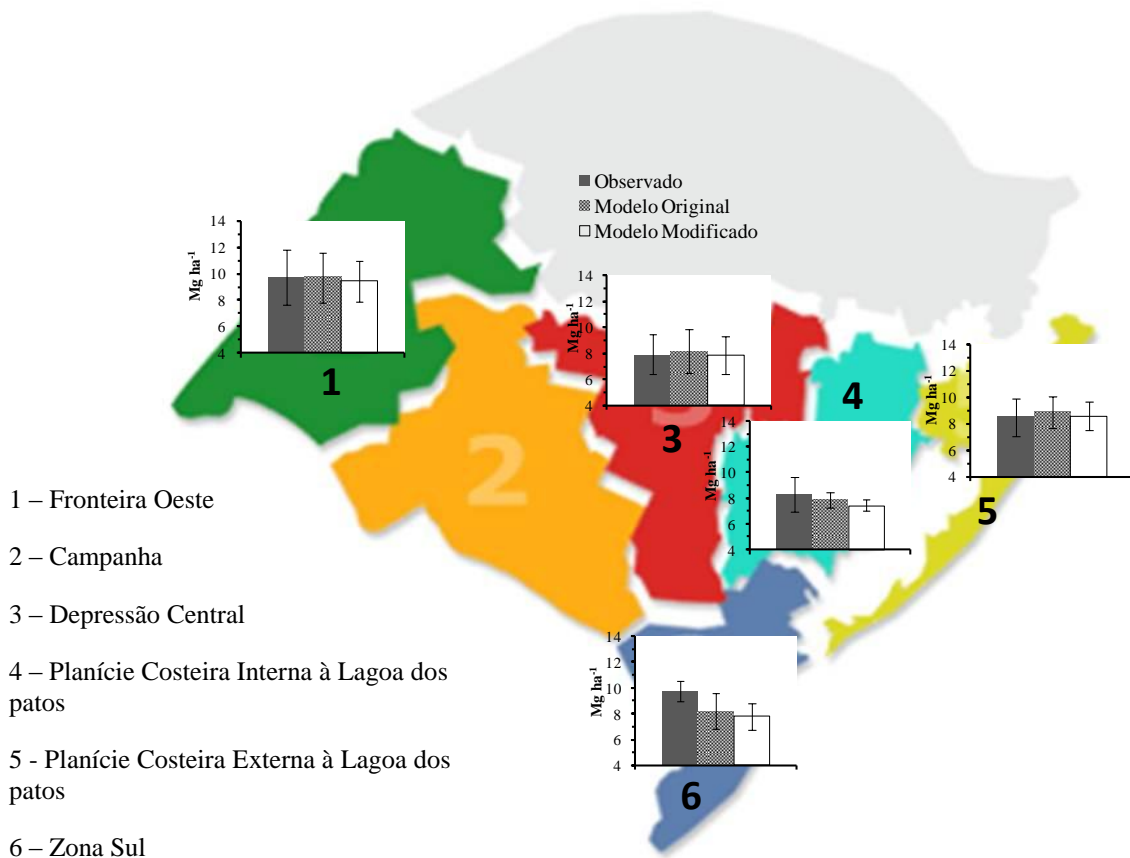


Figura 5 – Produtividade da cultura de arroz observada e simulada pelas duas versões do modelo SimulArroz nas regiões orizícolas do Rio Grande do Sul durante vários anos agrícolas (safras de 1984/85 a 2009/10). As barras de erro são um desvio padrão da média.

## 7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA TESE

O SimulArroz é um modelo ecofisiológico dinâmico baseado em processos (*process-based model*), desenvolvido pelo Grupo de Agrometeorologia de Universidade Federal de Santa Maria, para simular a produtividade de arroz irrigado no sistema por inundação (*flooded rice*) no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O SimulArroz é resultado de dois modelos anteriores de arroz, o ORYZA2000 (BOUMAN et al., 2004), que é o modelo de simulação da cultura do arroz do Instituto Internacional de Pesquisa em Arroz (IRRI - *The International Rice Research Institute*), nas Filipinas, e o InfoCrop (AGGARWAL et al., 2006), ambos simuladores de arroz desenvolvidos e testados em ecossistemas de arroz na Ásia. Parte do código fonte do ORYZA2000 e do InfoCrop foi utilizado no software do SimulArroz, e o restante do código fonte foi desenvolvido para adaptar o modelo para as cultivares de arroz do Rio Grande do Sul (WALTER et al., 2012), o que diferencia o SimulArroz dos outros simuladores. É, portanto, um produto para atender as demandas de simulação numérica regional para os ecossistemas gaúchos de arroz, ou seja, arroz em sistema de inundação (alagamento) do solo e com cultivares de arroz adaptadas para condições de cultivo no Estado do Rio Grande do Sul.

O SimulArroz calcula os principais processos ecofisiológicos de um ecossistema de arroz, como a acumulação de biomassa de raízes, folhas, caule e panículas, o desenvolvimento da cultura (fenologia pela escala de COUNCE et al., 2000) e a emissão de folhas (escala de HAUN, 1973) no intervalo de tempo de um dia. Na versão 1.0 o SimulArroz simula a produtividade potencial da cultura, e a produtividade em três níveis tecnológicos da lavoura (alto, médio e baixo). Os potenciais usuários do SimulArroz são tomadores de decisão, estudantes de graduação e pós-graduação, extensionistas, pesquisadores e professores.

O software SimulArroz foi desenvolvido em duas partes: (a) o código em Fortran do modelo matemático que contém as equações e sub-rotinas que descrevem os processos de crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do arroz e (b) a interface em Java que permite ao usuário rodar o modelo de crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do arroz a partir de uma tela de fácil entendimento e interatividade. Este software é resultado de um esforço científico interdisciplinar, que demandou investimento público e muito trabalho por parte de seus desenvolvedores. Hoje o software gratuito é uma realidade para diversos tipos de usuários da cadeia produtiva de arroz. No sitio oficial do SimulArroz

([www.ufsm.br/simularroz](http://www.ufsm.br/simularroz)), é possível fazer download gratuito do arquivo "SimulArroz\_instal.exe" e no endereço [www.facebook.com/simularroz](http://www.facebook.com/simularroz) o usuário pode se manter atualizado sobre o que a equipe está fazendo na manutenção e atualização do modelo.

O efeito da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico sobre o crescimento da planta de arroz é descrito no modelo SimulArroz através de uma função de resposta da Eficiência do Uso de Radiação à concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico, descrita no ARTIGO 1 deste trabalho de tese. Recomenda-se evitar fazer simulações com concentrações de CO<sub>2</sub> fora da faixa de 330 a 1000 ppm, já que níveis de CO<sub>2</sub> fora desta faixa não foram testados com dados experimentais. Com isso, o SimulArroz está preparado para ser usado em cenários climáticos futuros para o Rio Grande do Sul, o que está em andamento no Grupo de Agrometeorologia da UFSM, com previsão de término em fevereiro de 2014.

O SimulArroz também leva em conta os danos causados pelo frio sobre a cultura do arroz. Em regiões extratropicais, como é o caso do Estado do Rio Grande do Sul, as temperaturas inverniais são limitantes para a planta de arroz. No SimulArroz, a cultura do arroz morre devido a danos causados pelo frio quando a temperatura média diária do ar (média entre a temperatura mínima e a máxima diária) é menor do que 12°C durante quatro dias consecutivos (BOUMAN, 2004). Esta condição foi utilizada com intuito de garantir que os usuários do programa obtenham dados condizentes com datas de semeadura fora da época recomendada para a cultura do arroz que eventualmente possam ser simuladas.

Na Figura 3 é apresentado o desempenho do SimulArroz em simular o desenvolvimento de três cultivares de arroz (IRGA 421, IRGA 424 e BRS QUERÊNCIA) em duas datas de semeadura em um experimento realizado no Campus da Universidade Federal de Santa Maria, no ano agrícola 2011/2012. Nota-se que o modelo descreve de forma apropriada a fenologia das três cultivares nas duas datas de semeadura. Na Figura 4 é apresentada a evolução do desenvolvimento (fenologia) de quatro cultivares de arroz (IRGA 421, IRGA 424, BRS QUERÊNCIA e SCBRS TIO TAKA) em três datas de semeadura pelo SimulArroz no mesmo experimento. O modelo captura a diferença de duração de ciclo das cultivares (muito precoce, precoce, média e tardia, respectivamente) nas três datas de semeadura.

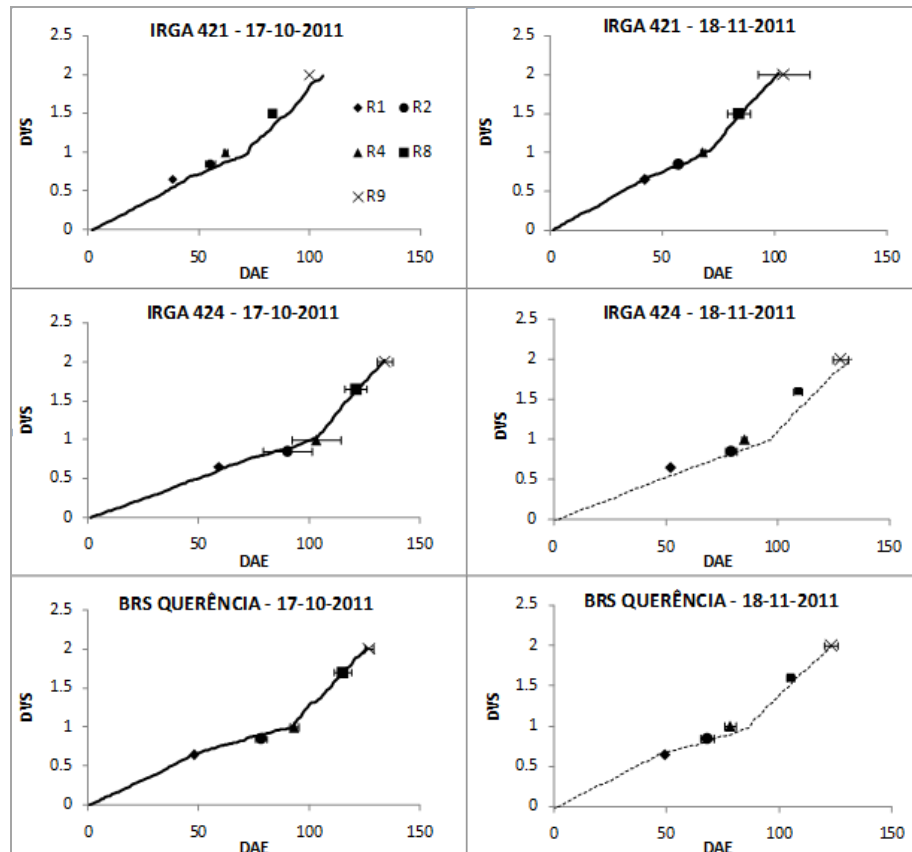


Figura 6 – Desenvolvimento observado (pontos) e simulado (linha) pelo SimulArroz para três cultivares de arroz em duas datas de semeadura: 17/10/2011 e 18/11/2011.

DVS= -1 é a semeadura, DVS=0 é a emergência, DVS=0,65 é a diferenciação da panícula (R1), DVS=1 é a antese (R4) e DVS=2 é a maturidade fisiológica (R9).

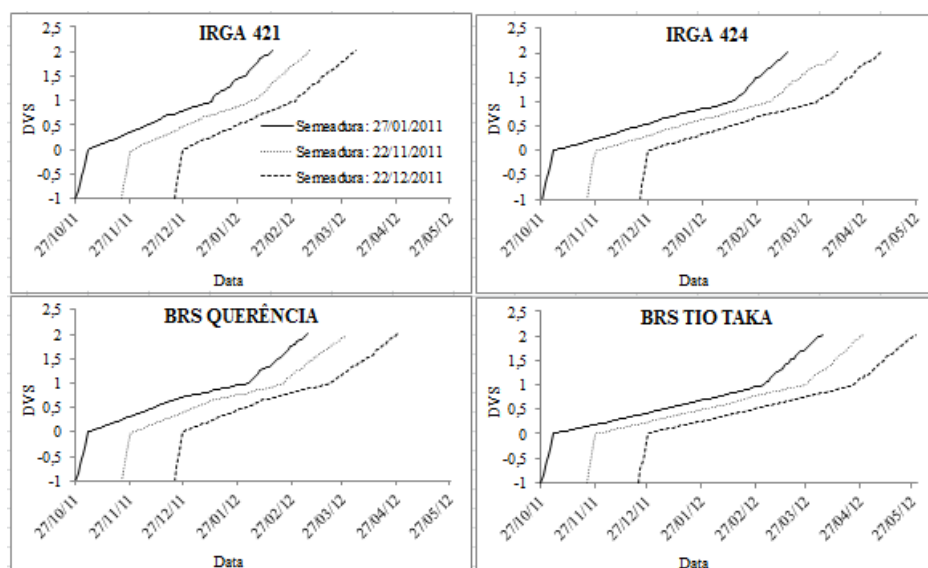


Figura 7 – Desenvolvimento simulado pelo SimulArroz para quatro cultivares de arroz em três datas de semeadura em Santa Maria, RS, durante o ano agrícola 2011/2012.

DVS= -1 é a semeadura, DVS=0 é a emergência, DVS=0,65 é a diferenciação da panícula (R1), DVS=1 é a antese (R4) e DVS=2 é a maturidade fisiológica (R9).



O desempenho do SimulArroz em simular o crescimento de três cultivares de arroz (IRGA 421, IRGA 424 e BRS QUERÊNCIA) em um experimento realizado no Campus da Universidade Federal de Santa Maria, no ano agrícola 2011/2012, está nas figuras 6, 7 e 8. Nota-se que o modelo descreve de forma apropriada o crescimento em massa seca de diferentes compartimentos (parte aérea, folhas, colmos e panículas) das três cultivares. O índice de área foliar (IAF) não foi medido neste experimento, as figuras a seguir exibem, portanto, apenas o IAF simulado, sem comparação com valores observados. Apesar disso, pode se observar que o modelo simula a evolução do IAF da cultura da forma esperada, ou seja, um crescimento inicial lento, uma fase exponencial de crescimento até o IAF máximo (7,5) e depois um declínio.

Nas figuras 6, 7 e 8 o painel 'B' traz a comparação entre simulado e observado de soma da massa seca de colmos e panículas ao longo do ciclo das cultivares IRGA 421, IRGA 424 e BRS Querência, respectivamente. Esta comparação foi realizada pois durante a separação manual dos compartimentos das plantas (folhas, colmos e panículas) as plantas estavam no estágio de emborrachamento e as panículas não foram retiradas do interior dos colmos. Isto explica também os maiores erros encontrados nas predições de massa seca de colmos em algumas amostragens.

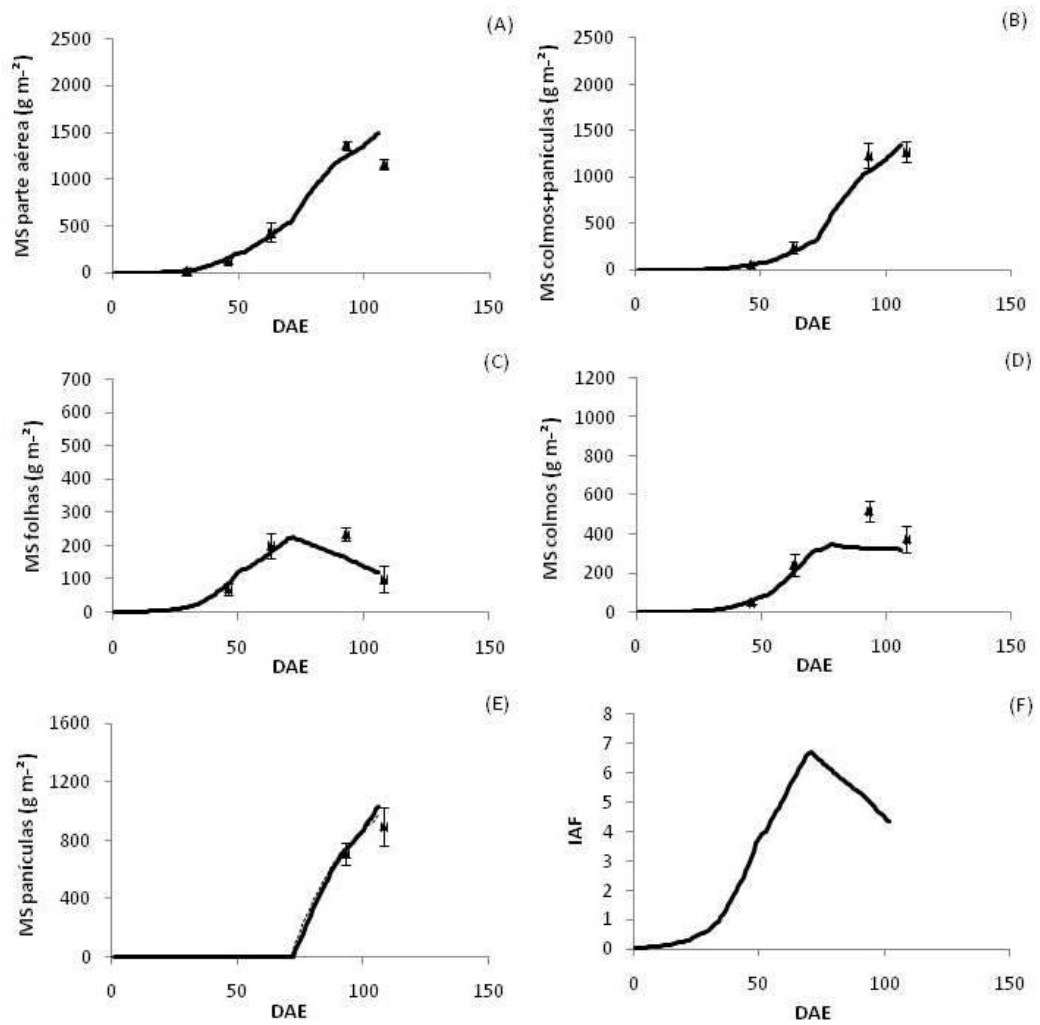


Figura 8 – Evolução das variáveis do crescimento da cultura do arroz, cultivar IRGA 421, observada (pontos) e simulada (linha) pelo modelo SimulArroz em Santa Maria, RS, durante o ano agrícola 2011/2012. Semeadura em 17/10/2011.

MS=massa seca, IAF=índice de área foliar, DAE=dias após a emergência.

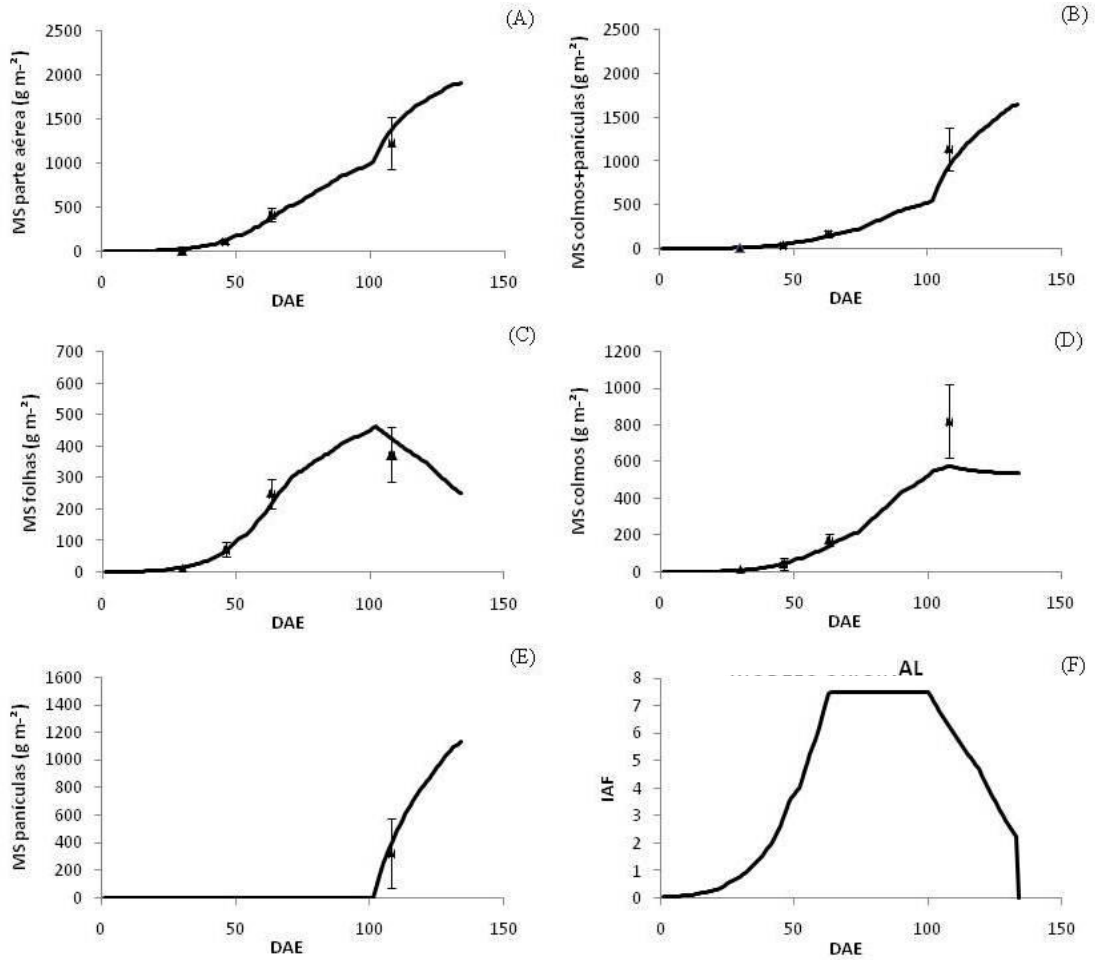


Figura 9 – Evolução das variáveis do crescimento da cultura do arroz, cultivar IRGA 424, observada (pontos) e simulada (linha) pelo SimulArroz em Santa Maria, RS, durante o ano agrícola 2011/2012. Semeadura em 17/10/2011.

MS=massa seca, IAF=índice de área foliar, DAE=dias após a emergência.

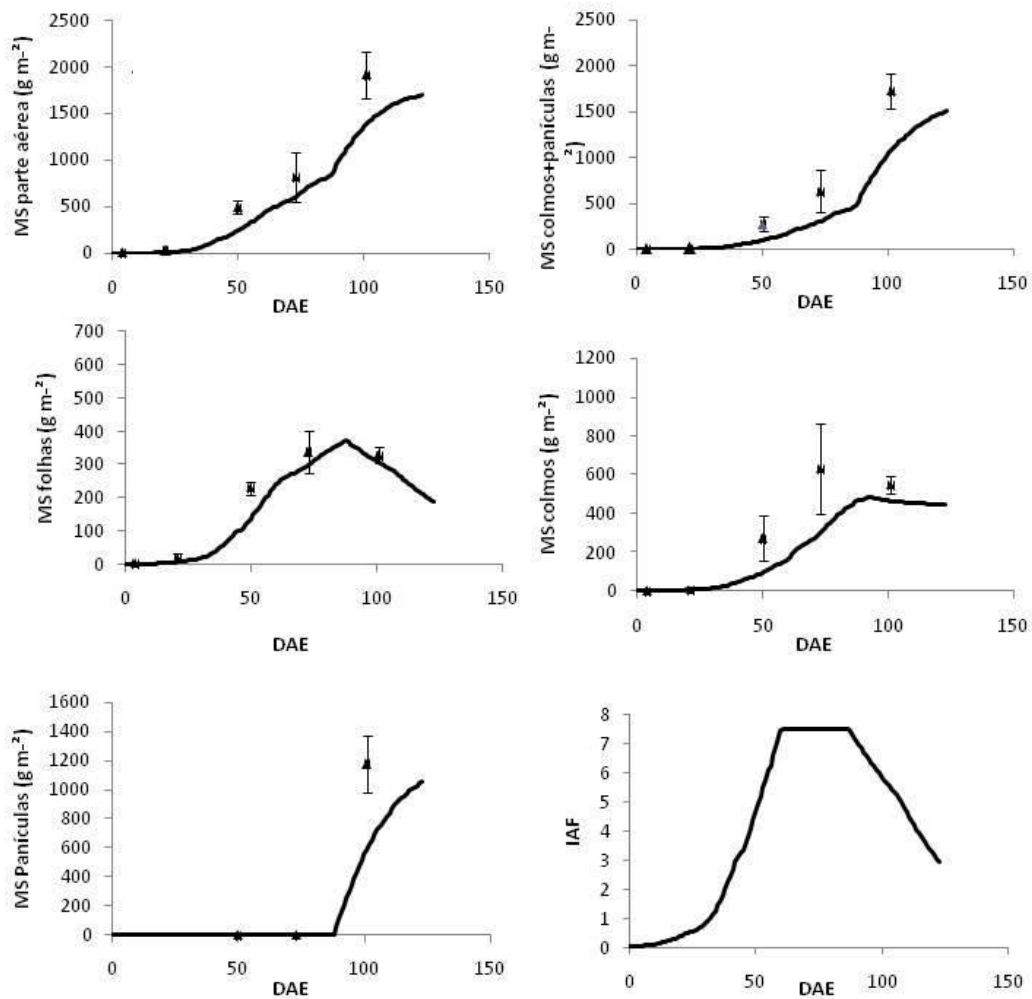


Figura 10 – Evolução das variáveis do crescimento da cultura do arroz, cultivar BRS Querência, observada (pontos) e simulada (linha) pelo SimulArroz em Santa Maria, RS, durante o ano agrícola 2011/2012. Semeadura em 22/11/2011.

MS=massa seca, IAF=índice de área foliar, DAE=dias após a emergência.

O SimulArroz foi testado utilizando dados experimentais e de lavoura em Santa Maria e em vários outros locais do Rio Grande do Sul. Apesar de já ter sido avaliado, os testes contra dados independentes continuarão sendo realizados pelo Grupo de Agrometeorologia da UFSM à medida que novas cultivares de arroz serão lançadas no Rio Grande do Sul. Nenhuma validação foi realizada fora do Rio Grande do Sul, o que inclui a comparação com cultivares de arroz não indicadas para cultivo neste Estado da Federação e com uso de dados meteorológicos de outros estados do Brasil ou fora do Brasil. Atualmente, a equipe mantenedora do SimulArroz está trabalhando para incluir o efeito da época de entrada de água

na lavoura sobre a produtividade de grãos e a opção de arroz híbrido no modelo, já que a versão 1.0 não tem esta opção.

Nas Figuras 9 e 10 estão plotados os dados observados e simulados pelas duas versões do modelo SimulArroz para massa seca da parte aérea e seus compartimentos (folhas verdes, colmos, panículas e folhas senescidas) das quatro cultivares em quatro datas de semeadura em dois anos agrícolas. Nota-se que, para todos compartimentos, exceto panículas (Figura 9G e 9H), os dados com o modelo modificado estão melhor distribuídos ao redor da linha 1:1 (coeficiente angular da regressão mais próximo de 1) com a versão modificada (EUR varia com o ciclo), indicando que a introdução das equações (2) e (3) no modelo melhoram a simulação. Para panículas, as duas versões foram similares. Na segunda safra testada o modelo teve predição com baixos erros, o que pode indicar que o modelo tem melhores predições em semeaduras realizadas dentro da época recomendada.

Apesar dos bons resultados de simulação de biomassa e produtividade, o modelo SimulArroz, assim como demais modelos matemáticos, tem em sua programação matemática, muitas pressuposições e simplificações. Isso nos incentiva a manter o modelo sempre em atualização, para que esta ferramenta, que construímos ao longo de anos de trabalho mental e braçal, continue servindo a comunidade em geral que se interessa, de alguma forma, pela cultura do arroz.

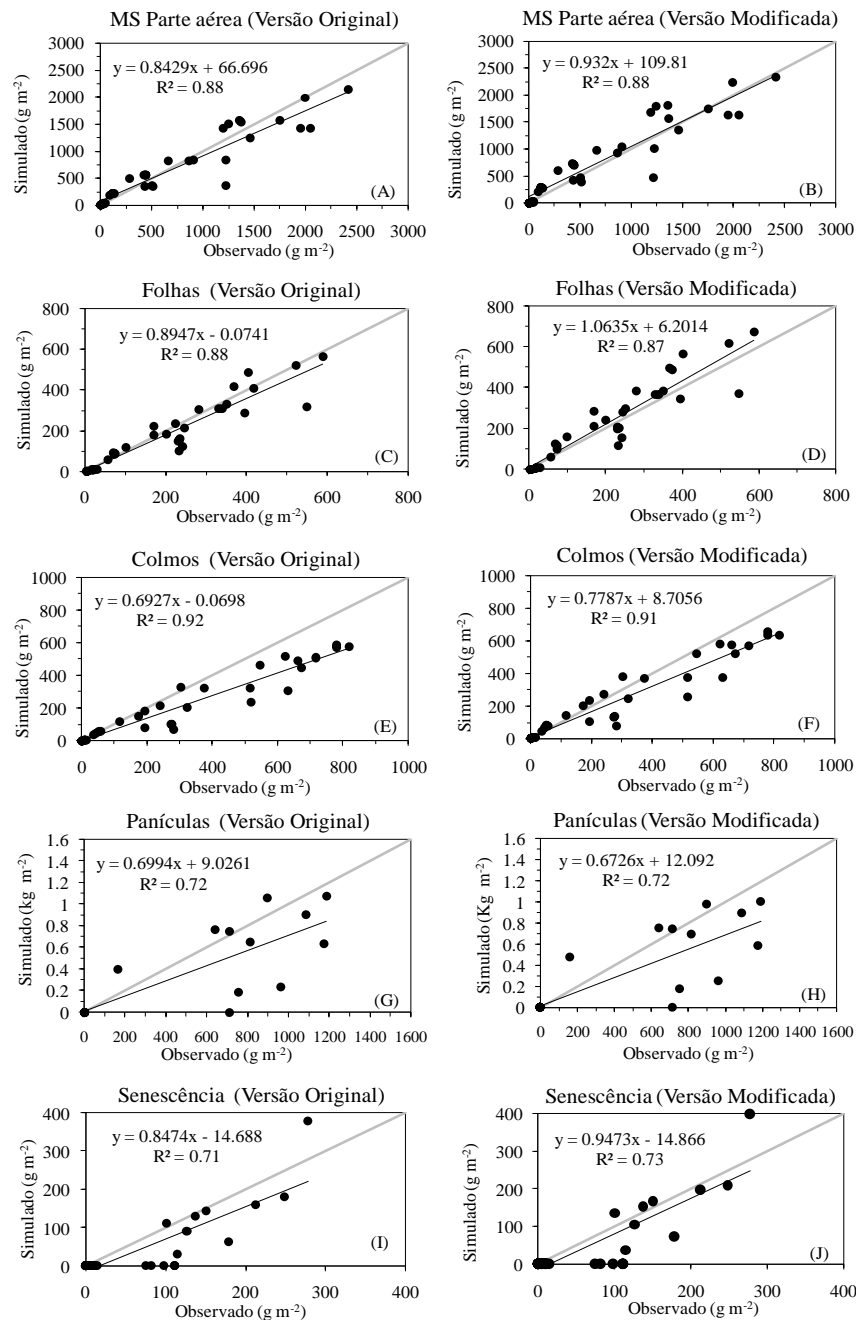


Figura 11 – Matéria seca nos diferentes compartimentos de plantas de arroz simulada pelo modelo SimulArroz durante o ano agrícola 2011/2012 em Santa Maria, RS, com duas versões que diferem quanto a forma de considerar a EUR (versão original com EUR fixa e Versão modificada, com EUR variável ao longo do ciclo). Os pontos são dados de quatro cultivares (IRGA 421, IRGA 417, BRS Querência e SCSBRS Tio Taka) em três datas de semeadura (17/11/2011, 18/11/2011, 19/12/2011). A linha diagonal é a linha 1:1 e a outra contínua é a regressão linear entre dados simulados (y) e dados observados.

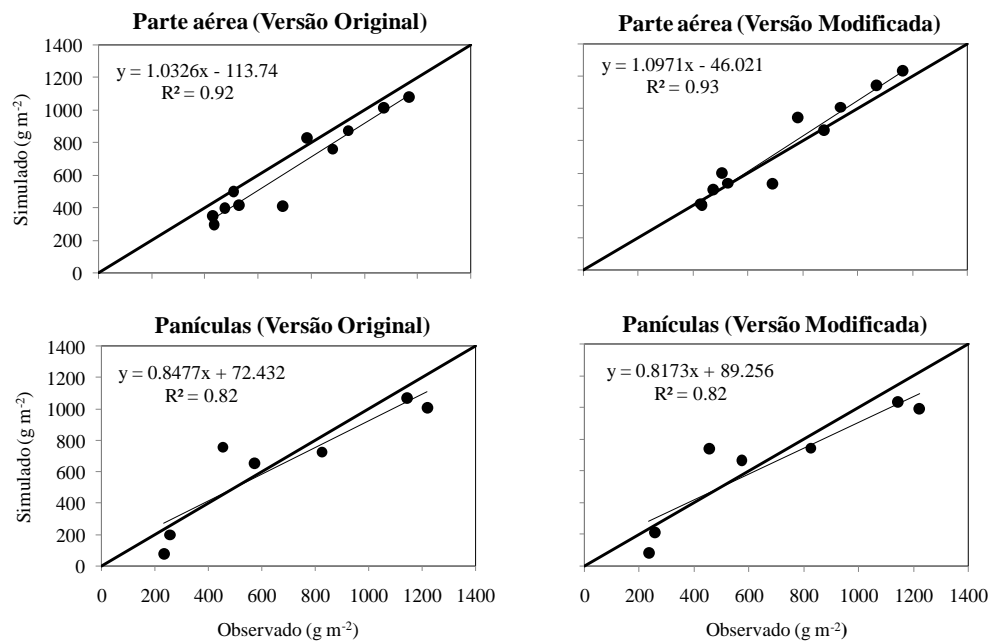


Figura 12 – Matéria seca nos diferentes compartimentos de plantas de arroz simulado pelo modelo SimulArroz durante o ano agrícola 2012/2013 em Santa Maria, RS. Os pontos são dados de quatro cultivares (IRGA 421, IRGA 417, BRS Querência e SCSBRS Tio Taka) em três datas de semeadura (17/11/2011, 18/11/2011, 19/12/2011). A linha diagonal é a linha 1:1 e a outra contínua é a regressão linear entre dados simulados (y) e dados observados. A equação é resultado da regressão linear e seu coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Santa Maria, RS.

## 8 CONCLUSÕES

A função de resposta não linear sigmoidal da EUR em arroz, em função da concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico é uma função robusta que pode ser facilmente acoplada a modelos de simulação de arroz, além de abranger as emissões de CO<sub>2</sub> para a próxima geração de cenários climáticos para o século 21.

O modelo SimulArroz é simulado satisfatoriamente a produção de biomassa de cultivares de arroz em diferentes cultivares e datas de semeadura na região da Depressão Central do Rio Grande do Sul.

A simulação com o modelo SimulArroz consegue quantificar a variação da produtividade de grãos de arroz irrigado em diferentes experimentos realizados em diferentes regiões orizícolas do Estado do Rio Grande do Sul.

A incorporação de uma função que faz variar a EUR ao longo do ciclo da cultura no modelo SimulArroz melhora a simulação da evolução de massa seca dos compartimentos da planta de arroz, mas não altera a precisão do modelo na simulação do rendimento de grãos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, P. K. et al. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. **Agricultural Systems**, Netherlands, v. 89, p. 1-25, 2006.

AMARAL, A.S.; SANTOS, E.C. Efeito da umidade e da temperatura do solo na emergência de plântulas de arroz. **Revista Brasileira de Sementes**, vol.5, n.1, p. 43-54, 1983.

ANGHINONI, I. et al. **Fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. IRGA/Estação Experimental de solos e águas. Cachoeirinha, 2005. 52p.

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, nov. 2004.

BOUMAN, B. A. M. et al. **ORYZA 2000**: modeling lowland rice. Version 2.12, November, 2004. In: Cereal Knowledge Bank, International Rice Research Institute. Disponível em: <<http://www.knowledgebank.irri.org/oryza2000/default.htm>>. Acesso em: 20 maio 2010.

CARMONA, L.C.; BERLATO, M.A.; BERGONCI, J.I. Relação entre elementos meteorológicos e rendimento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, p.289-294, 2002.

CONFALONIERI, R. et al. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 220, p. 1395-1410, 2009.

ELLIS, R. H. et al. Rates of leaf appearance and panicle development in rice (*Oryza sativa* L.): a comparison at three temperatures. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 66, p. 129-138, 1993.

FAGERIA, N. K. et al. **Manejo da fertilidade do solo para o arroz irrigado**. 1 ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 250 p.

HAUN, J. R. Visual quantification of wheat development. *Agronomy Journal*, v.65, p.116-119, 1973.

HUNT, L. A. et al. Postanthesis temperature effects on duration and rate of grain filling in some winter and spring wheats. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 71, n. 5, p. 609-617, 1991.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANG. **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: Cambridge University, 2007. 996 p.

IRGA – INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Publicações**. Apresentação CENSO 2005. Porto Alegre, 2005. Cachoeirinha, 2005. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20060524160029.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2010.

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz. **Dados de safra: série histórica da área plantada, produção e rendimento**. Cachoeirinha, 2010. Online. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/dados.htm>. Acessado em: 30/11/11.

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz. **Série histórica de produção RS x Brasil**. Cachoeirinha, 2013. Disponível em: [http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131024101611producao\\_rs\\_e\\_brasil.pdf](http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131024101611producao_rs_e_brasil.pdf). Acessado em: 30/11/2013.

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

KRISHNAN, P. et al. Impact of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 122, p. 233-242, 2007.

KROPFF, M. J.; Van LAAR, H. H.; MATTHEWS, R. B. ORYZA1:an ecophysiological model for irrigated rice production. In: **SARP Research Proceedings**. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute - IRRI, 1994. 110 p.

LAGO, I. **Desenvolvimento do arroz e do arroz vermelho: modelagem e resposta à mudança climática**. 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

LONG, S. P. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: Has its importance been underestimated? **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 14, n. 6, p. 729-739, 1991.

LUZZARDI, R. et al. Avaliação preliminar da produtividade em campo e qualidade industrial de híbridos de arroz no Rio Grande do Sul. 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. v. 1, p. 70-72.

MALL, R.K.; AGGARWAL, P.K. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. I. Evaluation of impact assessment models. **Climatic Change**, v. 52, p.315-330, 2002.

MAHLMAN, J. D. Uncertainties in projections of human induced climate warnings. **Science**, Washington, v. 278, n. 5342, p. 1416-1417, 1997.

MAPA, 2013 – **Zoneamento agroclimático**. Portarias segmentadas por UF. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola/portarias-segmentadas-por-uf>. Acessado em: 30-11-2013.

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

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.

MONTEITH, J. L.; SCOTT, R. K. Weather and yield variation of crops. In: BLAXTER, K.; FOWDEN, L. **Food, nutrition and climate**. Englewood Cliffs: Applied science, 1982. p. 127-149.

MONTEIRO, J.E.B.A. et al. Rice yield estimation based on weather conditions and on technological level of production systems in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. vol.48, nº2, Brasília. Feb. 2013

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

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.

OLDEMAN, L.R. et al. Response of rice to weather variables. In: **International workshop on the impact of weather parameters on growth and yield of rice**. Los Baños: IRRI, 1986. p.5-39.

ROSENBERG, N. J. et al. **Microclimate: the biological environment**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 495 p.

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

SHEEHY, J. E.; MITCHELL, P. L.; HARDY, B. (Ed.). **Charting new pathways to C<sub>4</sub> rice**. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute - IRRI. 2007. 422 p.

SIÉ et al. Rice Crop duration and leaf appearance rate in a variable thermal environment. I. Development of an empirically broed model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 57, n.1., p. 1-13, 1998.

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Radiation Use Efficiency. **Advances in Agronomy**. vol. 65, 1999, p. 215–265.

SINGH, U.; RITCHIE, J. T.; GODWIN, D. C. **A Users Guide to CERES Rice v2.10. :** simulation manual. Muscle Shoals, AL, USA: International Fertilizer Development Center, 1993. 131 p.

SIONIT, N. et al. Interaction of temperature and CO<sub>2</sub> enrichment on soybean: photosynthesis and seed yield. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 67, n. 5, p. 629-636, 1987.

SIQUEIRA, O. J. W. et al. 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. et al. 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 Meio Ambiente, p. 33-63. 2001.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI. 2007. 161p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**, 28. Porto Alegre, SOSBAI, 2010. 188p.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**, 29. Itajaí, SC, SOSBAI, 2012. 177p.

SOMBROEK, W.G.; GOMES, R. The climatechange-Agricultureconundrum. In: BAZZAZ, F.; SOMBROEK, W. **Global climate change and agricultural production**. New York: John Wiley& Sons, 1996. Cap. 1, p. 1-14.

STAPPER, M.; HARRIS, H.C. Assessing de productivity of wheat genotypes in a Mediterranean climate, using a crop simulation model. **Field Crops Research**, v. 20, p. 129-152, 1989.

STEINMETZ, S. et al. Probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas do ar prejudiciais à fecundação das flores de arroz em distintas regiões produtoras do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Agropecuária Clima Temperado**, Pelotas, v.4, n.1, p.63-77. 2001.

STEINMETZ, S. et al. Mapeamento das probabilidades de ocorrência de temperatura mínimas do ar, durante o período reprodutivo do arroz irrigado, no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.1, p.169-179, 2003.

STEINMETZ, S. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. (Ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 45-74.

STEINMETZ, S. et al., **Zoneamento agroclimático do arroz irrigado por épocas de semeadura no Estado do Rio Grande do Sul (Versão 4)**. EMBRAPA Clima Temperado, Documentos 199, Pelotas, 2007. 34p.

STEINMETZ, S.; ALMEIDA, I.R. **Caracterização e mapeamento do risco de frio durante o período reprodutivo do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul**. EMBRAPA Clima Temperado, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 175, Pelotas, 2012. 24p.

STEINMETZ, S.; DEIBLER, A.N.; DA SILVA, J.B. Estimativa da produtividade de arroz irrigado em função da radiação solar global e da temperatura mínima do ar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.43, n.2, p.206-211, fev, 2013.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric 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.; 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, 2006.

STRECK, N. A. et al. Duração do ciclo de desenvolvimento de cultivares de arroz em função da emissão de folhas no colmo principal. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1086-1093, 2006.

STRECK, N. A.; BOSCO, L. C.; LAGO, I. Simulating leaf appearance in rice. **Agronomy Journal**, v.100, p.490-501, 2008.

STRECK, N. A. et al. Modeling the development of cultivated rice and weedy red rice. **Transactions of the ASABE**, v.54, p.371-384, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artemed, 2009. 848 p.

TUBIELLO, F. N. et al. Effects of climate change and elevated CO<sub>2</sub> on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 179-189, 2000.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Foreign Agricultural Service. **Production, Supply and Distribution Online: Custom Query**. USDA, 2010. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdQuery.aspx>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

UNSWORTH, M.H.; HOGSETT, W.E. Combined effect of changing CO<sub>2</sub>, temperature, UVB radiation, and O<sub>3</sub> on crop growth. In: BAZZAZ, F.; SOMBROEK, W. **Global climate change and agricultural production**. New York: John Wiley & Sons, Cap. 8, p. 171-198. 1996.

VU, J. C. V. et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on photosynthesis and Rubisco in rice and soybean. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 20, n. 1, p. 68-76, 1997.

WALTER, L.C. **Simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudança climática**. 2010. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

WALTER, L. C. et al. Adaptação e avaliação do modelo InfoCrop para simulação do rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.3, p.510-521, maio/jun. 2012.

WEERAKOON, W.M.W.; INGRAM, K.T.; MOSS, D.N. Atmospheric carbon dioxide and fertilizer nitrogen effects on radiation interception by rice. **Plant and Soil**, v.220, p.99-106, 2000.

WIEGAND, C. L.; CUELLAR, J. A. Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. **Crop Science**, Madison, v. 21, n. 1, p. 95-101, 1981.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of Rice crop science**. Los Baños: IRRI, 1981, 269p.

YOSHIDA, S.; PARAO, F.T. Climatic influence on yield and yield components of low-land rice in the tropics. In: IRRI (ed.). **Climate & rice**. Los Baños, 1976. p.471-494.