

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

Gean Leonardo Richter

**USO DE SUBMODELO DE COMPETIÇÃO POR PLANTAS DANINHAS  
NO MODELO SimulArroz**

Santa Maria, RS  
2018

**Gean Leonardo Richter**

**USO DE SUBMODELO DE COMPETIÇÃO POR PLANTAS DANINHAS NO MODELO  
SimulArroz**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: PhD. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS  
2018

Richter, Gean Leonardo  
USO DE SUBMODELO DE COMPETIÇÃO POR PLANTAS DANINHAS  
NO MODELO SimulArroz / Gean Leonardo Richter.- 2018.  
47 p.; 30 cm

Orientador: Nereu Augusto Streck  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Agronomia, RS, 2018

1. Arroz daninho 2. Capim-arroz 3. Perda de  
produtividade 4. Competição 5. Modelagem I. Streck, Nereu  
Augusto II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

---

© 2018

Todos os direitos reservados a Gean Leonardo Richter. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante citação da fonte.

Endereço: Av. Roraima, nº 1000, Bairro Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97105-900.

Fone +55 (55) 3220-8000; E-mail: geanleonardorichter@gmail.com

**Gean Leonardo Richter**

**USO DE SUBMODELO DE COMPETIÇÃO POR PLANTAS DANINHAS NO MODELO  
SimulArroz**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agronomia.

**Aprovado em 19 de fevereiro de 2018:**

---

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

---

**Isabel Lago, Dra. (UFSM)**

---

**André Andres, Dr. (EMBRAPA)**

Santa Maria, RS  
2018

## RESUMO

### USO DE SUBMODELO DE COMPETIÇÃO POR PLANTAS DANINHAS NO MODELO SimulArroz

AUTOR: Gean Leonardo Richter  
ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

Na versão 1.1 do SimulArroz não há opção de competição de plantas daninhas. O objetivo foi introduzir no SimulArroz a opção de perda de produtividade por arroz daninho (*Oryza sativa*) ou capim-arroz (*Echinochloa* spp.) sobre a produtividade do arroz irrigado. A competição do arroz daninho e do capim-arroz sobre a produtividade foi modelada pelo método de perda da produtividade, utilizando-se a equação da hipérbole retangular. Os coeficientes  $i$  e  $a$  da hipérbole retangular referentes a cada uma dessas espécies daninhas foram obtidos da literatura e em experimentos de campo conduzidos em 2016/2017 no Rio Grande do Sul. No código-fonte do SimulArroz foi implementado a perda de produtividade de modo a penalizar a produtividade nos três níveis tecnológicos (alto, médio e baixo) na maturidade fisiológica. Na classificação dos coeficientes encontrou-se valores de  $i_{\text{médio}} = 1,04, 1,50$  e  $3,57$  para arroz daninho no nível alto, médio e baixo respectivamente, e o coeficiente  $a = 100$  para os três níveis. Para o capim-arroz os valores de  $i_{\text{médio}} = 4,70, 10,49$  e  $15,51$  e  $a_{\text{médio}} = 101,63, 104,92$  e  $96,88$  sendo respectivos ao nível alto, médio e baixo. O desempenho foi avaliado pelas estatísticas raiz do erro médio quadrático (RQME), raiz do erro médio quadrático normalizado (RQMEn), índice "BIAS", índice de concordância modificado (dw) e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), com dados observados de experimentos e avaliações em lavouras comerciais. Conclui-se que foi possível introduzir a perda de produtividade pelo arroz daninho ou capim-arroz sobre a produtividade do arroz irrigado no SimulArroz.

**Palavras-chave:** Arroz daninho. Capim-arroz. Perda de produtividade. Competição. Modelagem.

## ABSTRACT

### INTRODUCTION OF THE SUBMODEL OF WEED COMPETITION IN THE MODEL SimulArroz

AUTHOR: Gean Leonardo Richter  
ADVISOR: Nereu Augusto Streck

In version 1.1 of SimulArroz there isn't the option of weed competition. The objective was to introduce in SimulArroz the option of yield loss by weedy rice (*Oryza sativa*) or barnyard grass (*Echinochloa spp.*) on irrigated rice. The competition of weedy rice and barnyard grass on yield was modeled by the method of yield loss, using the equation of the rectangular hyperbola. The coefficients  $i$  and  $a$  of the rectangular hyperbole referring to each of these weeds were obtained from the literature and field experiments conducted in 2016/2017 to Rio Grande do Sul. In the SimulArroz source code, yield loss was implemented to penalize yield in the three technological levels (high, medium and low) in physiological maturity. In the classification of coefficients, were found values of  $i_{\text{médio}} = 1.04, 1.50$  and  $3.57$  for low, medium and low levels respectively, to the weedy rice, and the coefficient  $a = 100$  for the three levels. For barnyard grass, the values of  $i_{\text{médio}} = 4.70, 10.49$  and  $15.51$  and value of  $a_{\text{médio}} = 101.63, 104.92$  and  $96.88$  were respectively high, medium and low. The performance was evaluated by root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (RMSEn), "BIAS" index, modified concordance index (dw) and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (COE), with observed data from experiments and evaluations on commercial fields. It was concluded that was possible to introduce the yield loss by weedy rice or barnyard grass on the yield of irrigated rice in SimulArroz.

**Keywords:** Weedy rice. Barnyard grass. Yield loss. Competition. Modeling.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	7
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	8
<b>2.1 A CULTURA DO ARROZ</b> .....	8
<b>2.2 AS PLANTAS DANINHAS NO ARROZ IRRIGADO</b> .....	10
<b>2.3 MODELAGEM NA CULTURA DO ARROZ</b> .....	11
<b>2.3.1 O modelo SimulArroz</b> .....	12
<b>2.3.2 Modelagem da competição de plantas daninhas sobre as culturas agrícolas</b> .....	14
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	17
<b>3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO DE COMPETIÇÃO DA PLANTAS DANINHAS SOBRE A CULTURA DO ARROZ</b> .....	17
<b>3.2 IMPLEMENTAÇÃO DA COMPETIÇÃO DE PLANTAS DANINHAS NO SimulArroz</b> .....	19
<b>3.3 AVALIAÇÕES DA COMPETIÇÃO DE ARROZ DANINHO SOBRE A CULTURA DO ARROZ IRRIGADO</b> .....	23
<b>3.4 EXPERIMENTOS DE COMPETIÇÃO DE CAPIM-ARROZ SOBRE A CULTURA DO ARROZ IRRIGADO</b> .....	25
<b>3.5 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO DA COMPETIÇÃO DE PLANTAS DANINHAS SOBRE A CULTURA DO ARROZ IRRIGADO NO SimulArroz</b> .....	26
<b>3.6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO SIMULARROZ COM O SUBMODELO DE PERDA DE PRODUTIVIDADE POR PLANTAS DANINHAS</b> .....	27
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	29
<b>4.1 ARROZ DANINHO</b> .....	29
<b>4.2 CAPIM-ARROZ</b> .....	35
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	41
<b>6. ORIENTAÇÕES E DEMANDAS PARA PRÓXIMOS ESTUDOS</b> .....	42
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	43

## 1. INTRODUÇÃO

O cultivo do arroz irrigado tem grande destaque no Rio Grande do Sul (RS), pois neste Estado são produzidos anualmente em torno de 70% da produção nacional, em área de cerca de 1,1 milhão de hectares (CONAB, 2017; IRGA, 2017). Porém, a produtividade média de arroz do RS de 2012 a 2017 foi de aproximadamente 7,5 Mg ha<sup>-1</sup> estando abaixo da produtividade obtida em experimentos e lavouras de alto nível tecnológico (12 a 15 Mg ha<sup>-1</sup>) (RIBAS, et al., 2016), e isto deve-se, em parte, ao controle insatisfatório das plantas daninhas (RUBIN et al., 2014). Destacam-se como as principais plantas daninhas do arroz aquelas pertencentes à mesma família da cultura (Poaceae), como arroz daninho (*Oryza sativa*) e o capim-arroz (*Echinochloa* spp.), pois competem pelos mesmos recursos com a cultura (radiação solar, nutrientes e água) (AGOSTINETTO et al., 2007; FLECK et al., 2004). A competição é a interação negativa que ambos indivíduos sofrem pelas exigências simultâneas que excedem os recursos do ambiente (BOOTH et al., 2003).

A perda de produtividade causada pelas plantas daninhas é alvo de estudos que utilizam modelos para descrevê-la, porém, não ocorre uma aplicação direta desses trabalhos no campo. Este fator biótico em conjunto com insetos e doenças agrupam-se em níveis tecnológicos no modelo SimulArroz (modelo calibrado e testado para as condições do RS, que calcula os principais processos ecofisiológicos da cultura do arroz) (ROSA et al., 2015), e, com este método não se consegue mensurar a influência dos fatores isolados na produtividade do arroz. Nesse sentido, há necessidade de realizar estudos com foco em acoplar submodelos para cada um dos fatores e permitir assim, uma maior aproximação com a realidade de cada lavoura. O objetivo foi introduzir um submodelo de perda de produtividade pela presença de arroz daninho e capim-arroz sobre a produtividade de grãos da cultura do arroz irrigado visando melhorar a capacidade preditiva do SimulArroz.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 A CULTURA DO ARROZ

O arroz (*Oryza sativa*) é uma monocotiledônea da família das poáceas e pertence ao grupo fotossintético C3, constituindo-se como o segundo cereal mais cultivado no mundo, ocupando área aproximada de 158 milhões de hectares, com 746,7 milhões de Mg ha<sup>-1</sup> de grãos em casca (SOSBAI 2016). Na safra de 2016/17 foram cultivados cerca de 2 milhões de hectares no território nacional, com uma produtividade média de 6,0 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo o maior produtor de arroz fora do continente asiático com 11,3 milhões de toneladas. Já no estado do Rio Grande do Sul (RS) foram cultivados 1,1 milhões de hectares, com uma produtividade média de 7,9 Mg ha<sup>-1</sup>, que representa cerca de 70% da produção nacional (CONAB, 2017; IRGA, 2017).

O RS apresenta destaque nacional quanto à produção de arroz devido às características do sistema de cultivo, sendo cultivado em ambientes inundados (com lâmina de água). Para suportar este ambiente a espécie tem aerênquima no colmo e nas raízes da planta, possibilitando assim a passagem de oxigênio da atmosfera até as células das raízes e parte do colmo que habitam em ambiente alagado (SOSBAI, 2016). O cultivo de arroz no RS está localizado na metade Sul do Estado, em regiões de terras baixas, que são áreas compostas de solos com drenagem deficiente (solos hidromórficos), e que apresentam compactação na camada sub-superficial (STRECK et al., 2008). O Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) divide a área onde cultiva-se arroz no RS em seis regiões orizícolas: Fronteira Oeste, Campanha, Zona Sul, Planície Costeira Interna, Planície Costeira Externa e Depressão Central.

Figura 1 - Mapa do Rio Grande do Sul com as representações das seis regiões de terras baixas na metade Sul do Estado (regiões orizícolas segundo o Instituto Rio Grandense do Arroz - IRGA). Em que 1 = Fronteira Oeste, 2 = Campanha, 3 = Depressão Central, 4 = Planície Costeira Interna, 5 = Planície Costeira Externa, 6 = Zona Sul. Fonte: IRGA, 2017.



Para entender o crescimento e desenvolvimento da cultura, temos que compreender o conceito, em que o crescimento consiste no aumento de tamanho irreversível através da divisão e expansão celular, já o desenvolvimento é a diferenciação celular e o aparecimento de um órgão, como exemplo uma folha (STRECK et al., 2003). Atualmente a escala fenológica mais utilizada na cultura do arroz mundialmente é a escala de Counce et al. (2000), que subdivide o crescimento e desenvolvimento em três fases: plântula (S), vegetativa (V) e reprodutiva (R). A fase vegetativa é representada pelo número de folhas expandidas no colmo principal (V1, V2, ... até a folha bandeira – VF), sendo considerada expandida uma folha quando esta apresenta a região do colar

onde as aurículas e a lígula estão visíveis, a qual separa a bainha da lâmina foliar. Na fase reprodutiva, que vai de R0 até R9 (R0 – Início do desenvolvimento da panícula, R1 – Diferenciação da panícula, R2 – Formação do colar da folha bandeira, R3 – Aparecimento da panícula acima do colar da folha bandeira, R4 – Antese, R5 – Expansão do grão em comprimento e largura, R6 – Expansão do grão em espessura, R7 – Ao menos um grão da panícula apresenta casca de coloração madura, R8 – Maturidade de um grão, R9 – Maturidade completa da panícula).

## 2.2 AS PLANTAS DANINHAS NO ARROZ IRRIGADO

Plantas daninhas são consideradas quaisquer plantas que ocorrem onde não são desejadas e que causam algum dano (BRIGHENTI; OLIVEIRA, 2011). Elas constituem um dos principais fatores que causam estresse biótico nas culturas agrícolas ao redor do mundo, em função da competição interespecífica por recursos do meio (radiação solar, água e nutrientes) com a cultura de interesse econômico (AGOSTINETTO et al., 2007; FLECK et al., 2004).

As principais espécies de plantas daninhas na cultura do arroz no RS são: arroz daninho (*Oryza sativa*), capim-arroz (*Echinochloa* spp.), papuã (*Urochloa* spp.), milhã (*Digitaria* spp.), capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica*), junquinho (*Cyperus* spp.), tiririca-amarela (*Cyperus esculentus*), cuminho (*Fimbristylis miliacea*), sagitária (*Sagittaria* spp.), angiquinho (*Aeschynomene* spp.), entre outras (SOSBAI, 2016). Dentre estas destacam-se algumas que têm maior habilidade competitiva relativa que o arroz cultivado, como por exemplo, o arroz daninho (*Oryza sativa*) e o capim-arroz (*Echinochloa* spp.) (AGOSTINETTO et al., 2007; FLECK et al., 2004; OLAJUMOKE, 2016).

O arroz daninho pertence à mesma espécie do arroz cultivado (AGOSTINETTO et al., 2001), torna o controle difícil através do uso de herbicidas seletivos, o que o caracteriza como a principal planta daninha (VILLA et al., 2006; OLAJUMOKE, 2016). Sendo a planta daninha que mais limita o aumento na produtividade média das lavouras de arroz irrigado no RS (AGOSTINETTO et al., 2004; RUBIN et al., 2014). Apresenta uma cor avermelhada no pericarpo, presença ou não de arista, normalmente um ciclo mais

longo e degrana precoce das sementes com dormência (AGOSTINETO et al., 2001) A competição entre arroz daninho e cultivado ocorre essencialmente pelos recursos de radiação solar e nutrientes (AGOSTINETO et al., 2004). Estima-se que uma planta por metro quadrado de arroz daninho tem potencial de reduzir a produtividade da cultura em cerca de 1 a 13% (AGOSTINETTO et al., 2005a).

Por sua vez, o capim-arroz é relatado como uma das mais importantes plantas daninhas da agricultura mundial (NORRIS et al., 2001; AMINPANAH et al., 2012). As espécies pertencentes ao gênero *Echinochloa*, conhecidas como capim-arroz, possuem metabolismo C4, conferindo maior eficiência fotossintética, apresentam um rápido crescimento inicial, alta capacidade de competição por recursos limitantes e dificuldade de controle, contudo, estão adaptadas a sobreviver em ambientes inundados, e ocorrem em altos níveis de infestação nas lavouras do RS (TIRONI et al., 2009; CONCENÇO et al., 2007). As espécies de capim-arroz com maior frequência no RS são o *Echinochloa colona* e *E. crusgalli* (SOSBAI, 2016). Entretanto, devido à dificuldade da correta identificação da espécie, tem sido utilizada a designação em nível de gênero na literatura para referenciar a planta daninha (AGOSTINETTO et al., 2010; GALON et al., 2007a; GALON et al., 2009; TIRONI et al., 2009). Estima-se que uma planta por metro quadrado de capim-arroz apresenta potencial de reduzir a produtividade da cultura em cerca de 4 a 30% (GALON et al., 2007b).

### 2.3 MODELAGEM NA CULTURA DO ARROZ

Para simular a produtividade da cultura do arroz existem vários modelos, desde empíricos a mecanísticos baseados em processos ecofisiológicos. Dentre estes modelos, destacam-se dois que foram calibrados e testados na Ásia, o ORYZA2000 (BOUMAN et al. 2004) e o InfoCrop (AGGARWAL et al., 2006). O ORYZA2000 é um modelo mecanístico baseado em processos, com bastante detalhes em termos de descrição do crescimento e desenvolvimento da planta, enquanto o InfoCrop é um modelo classificado como mecanístico simplificado, pois usa algumas simplificações em seus processos, como por exemplo para a fotossíntese que utiliza a eficiência de uso da radiação para

transformar a radiação solar interceptada pelo dossel em fitomassa diária. A vantagem do InfoCrop em relação ao ORYZA2000 é o menor número de coeficientes genéticos.

### 2.3.1 O modelo SimulArroz

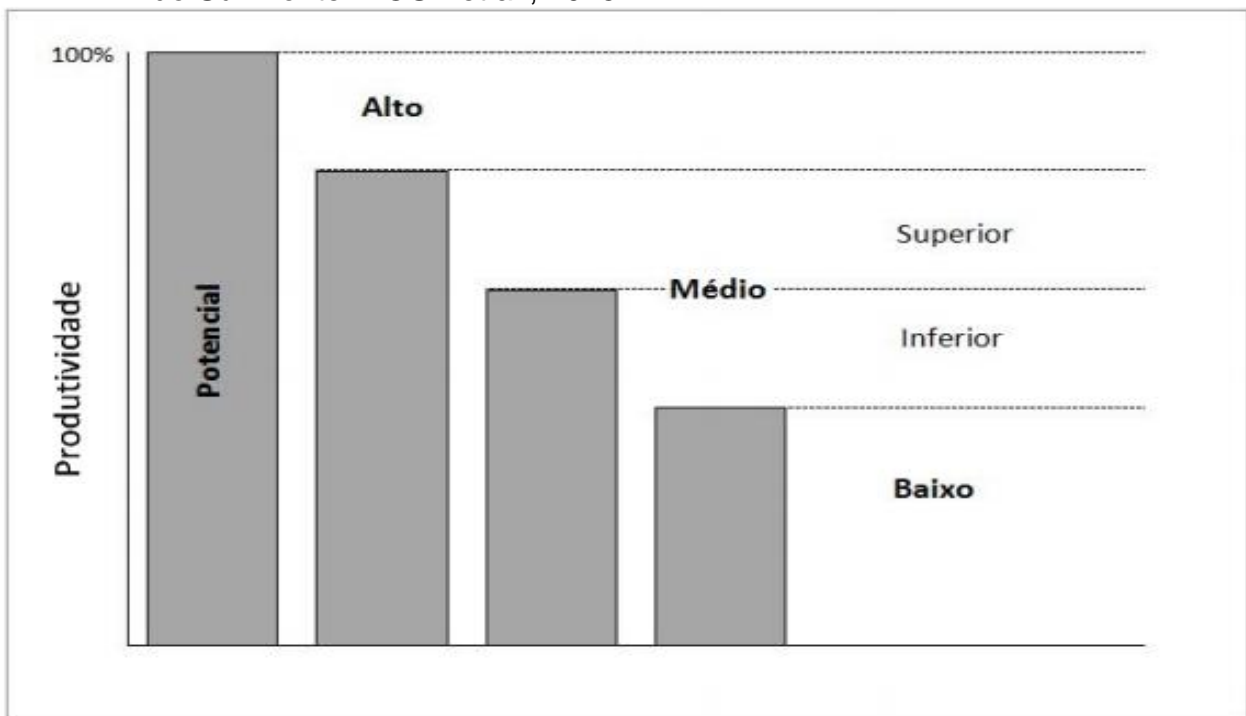
O SimulArroz é um modelo mecanístico dinâmico determinístico baseado em processos (*process-based model*), testado e calibrado para simular a produtividade do arroz irrigado no estado do RS, (ROSA et al., 2015). Parte do código do SimulArroz é resultado de dois modelos anteriores, o ORYZA2000, que é o modelo de simulação da cultura do arroz do Instituto Internacional de Pesquisa em Arroz (IRRI), nas Filipinas, e o InfoCrop, sendo ambos desenvolvidos e testados em ecossistemas de arroz na Ásia. O restante do código fonte foi desenvolvido para adaptar o modelo para as cultivares de arroz ao manejo das lavouras do RS, o que diferencia o SimulArroz dos outros dois. É, portanto, um produto para atender as demandas do arroz em sistema de inundação (alagamento) do solo e com cultivares de arroz adaptadas para condições de cultivo no estado do RS (ROSA et al., 2015; STRECK et al., 2013; WALTER et al., 2012; BENEDETTI et al., 2017). O aplicativo da versão 1.1 do SimulArroz é disponibilizado gratuitamente na internet ([www.ufsm.br/simularroz](http://www.ufsm.br/simularroz)).

A versão 1.1 do SimulArroz calcula os principais processos ecofisiológicos da cultura do arroz, como a produção de biomassa e seu particionamento para raízes, folhas, caule e grão, o desenvolvimento da cultura e a emissão de folhas no passo de tempo de um dia, também a produtividade na maturação fisiológica (R9) (BENEDETTI et al., 2017). Esta versão tem os dados de entrada (inputs) do modelo divididos em dois grupos, dados da cultura (cultivar ou grupo de maturação, data de semeadura, densidade de plantas, nível tecnológico e concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico) e dados meteorológicos (temperatura mínima e máxima diária e radiação solar). Porém, não prevê a competição de fatores bióticos de forma direta, como no exemplo da competição de plantas daninhas, para calcular a produtividade da cultura.

A forma de discriminação dos fatores bióticos no modelo SimulArroz ocorre por meio dos níveis tecnológicos “alto, médio e baixo”, ficando a critério do usuário definir na simulação qual o nível da lavoura que mais se aproxima da sua condição real (Figura 2).

O nível tecnológico alto é utilizado para lavouras que seguem os princípios do Projeto 10+ (IRGA, 2017) como alta adubação, entrada da água antecipada e com pouco ou sem a presença de dano abiótico (insetos, doenças e plantas daninhas). No nível baixo, por outro lado, a lavoura não se torna viável economicamente, utilizando pouca tecnologia de insumos, ocorre atrasos na entrada da água e as plantas sofrem com estresse por fatores bióticos (insetos, doenças e alta competição com plantas daninhas). Por fim, o nível médio é intermediário entre os dois níveis acima (WALTER, 2012). Ainda, há o potencial do modelo que é obtido somente em condições experimentais, onde os estresses bióticos (ocorrência de insetos, doenças e plantas daninhas) ou abióticos (falta de água e nutrientes) não interferem na produtividade da cultura (VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997).

Figura 2 - Níveis tecnológico potencial, alto, médio e baixo, considerados no SimulArroz v.1.1 para a cultura do arroz irrigado por inundação no estado do Rio Grande do Sul. Fonte: ROSA et al., 2015.

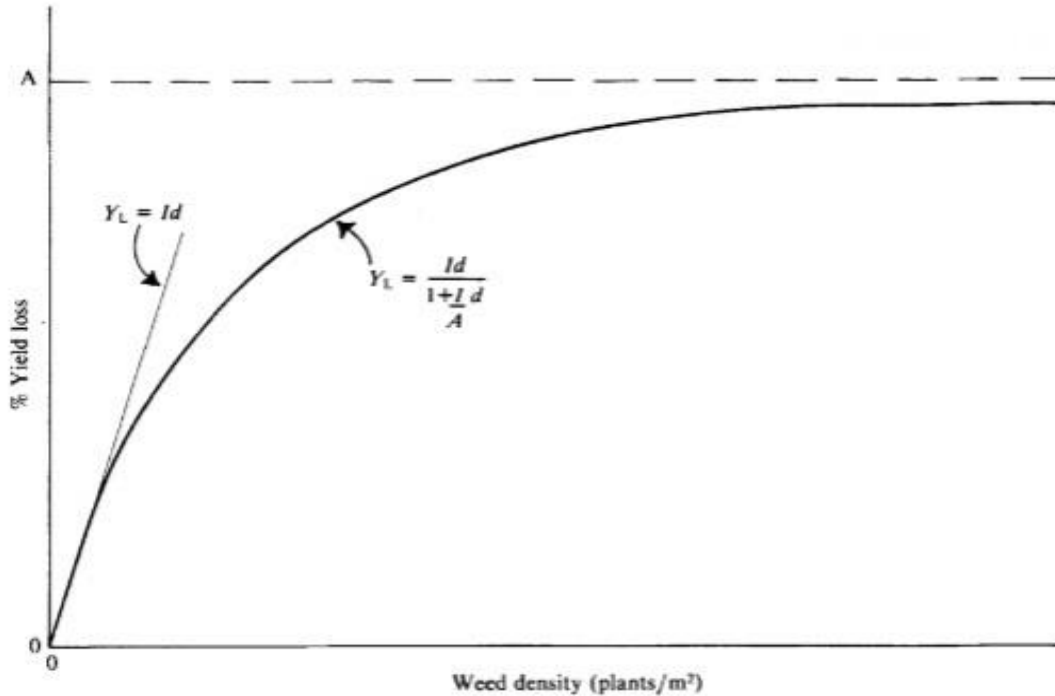


### **2.3.2 Modelagem da competição de plantas daninhas sobre as culturas agrícolas**

A abordagem clássica utilizada para modelar a competição de plantas daninhas sobre as culturas ocorre através da penalização da produtividade da cultura em função da densidade das plantas daninhas, da área foliar, da matéria seca das plantas daninhas e da cobertura do solo pela folhagem da planta daninha (AGOSTINETTO et al., 2005a; AGOSTINETTO et al., 2005b; AGOSTINETTO et al., 2007; AGOSTINETTO et al., 2010; COUSENS, 1985; FLECK et al., 2004; GALON et al., 2007a; GALON et al., 2007b). Para tanto, são usados modelos empíricos lineares e não-lineares, como por exemplo, as equações polinomiais (linear, quadrática e cúbica) (CHEMALE; FLECK, 1982; HARVEY, 1994), a equação sigmoideal (SWINTON; LYFORD, 1996) e a hipérbole retangular (COUSENS, 1985). Estes modelos são também chamados de modelos ou métodos de perda da produtividade (ADATI et al., 2006).

Destes modelos empíricos, o que melhor explica biologicamente a perda de produtividade e contém mais trabalhos realizados e publicados no RS é o modelo da hipérbole retangular (COUSENS, 1985; MAMUN, 2014; MOON et al., 2011). Isso se deve ao modelo representar a resposta linear da perda de produtividade em baixas densidades de plantas daninhas (quando predomina a competição interespecífica entre a cultura a planta daninha) (ADATI et al., 2006). O modelo também consegue representar a estabilização da curva de perda da produtividade quando a densidade de plantas daninhas é elevada e quando aumenta a competição intraespecífica, isto é, quando inicia a competição entre os indivíduos da espécie daninha (ADATI et al., 2006).

Figura 3 - O modelo hiperbólico retangular para relacionar a perda de rendimento com a densidade de ervas daninhas, ilustrando seus parâmetros  $a$  e  $i$ . Fonte: COUSENS, 1985.



Os coeficientes destes modelos empíricos necessitam ser estimados a partir de observações, o que geralmente é realizado através de experimentos de campo, mantendo-se iguais as plantas daninhas, as condições ambientais e o manejo (ADATI et al., 2006). Porém, esses coeficientes variam de acordo com a habilidade competitiva da cultivar, do manejo utilizado na lavoura, como a densidade da cultivar, a época de entrada da água, adubação, e, também dependem da planta daninha infestante e da sua emergência em relação à emergência da cultura (AGOSTINETTO et al., 2005a; AGOSTINETTO et al., 2005b; AGOSTINETTO et al., 2007; AGOSTINETTO et al., 2010; FLECK et al., 2004; GALON et al., 2007a; GALON et al., 2007b).

São conhecidos vários estudos que objetivaram avaliar a perda de produtividade de plantas daninhas em arroz irrigado, e, por conseguinte determinaram os coeficientes das equações supracitadas, cujos resultados estão disponíveis na literatura. Contudo, a aplicabilidade desses trabalhos muitas vezes é limitada à determinação do nível de dano



econômico (NDE) das plantas-alvo dos estudos, que representa a densidade da planta daninha que justifica a adoção do controle (AGOSTINETTO et al., 2005a; AGOSTINETTO et al., 2005b; AGOSTINETTO et al., 2010; GALON et al., 2007b). Desse modo, através da inclusão dos coeficientes dos modelos de competição de plantas daninhas nos modelos preditores da produtividade de culturas, como o SimulArroz, pode-se inferir sobre a produtividade da cultura mediante o nível de interferência de determinada densidade de plantas daninhas, podendo-se assim aumentar a sensibilidade do modelo aos estresses bióticos.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Para facilitar a compreensão dos materiais e métodos a divisão dos tópicos foi realizada visando a descrição do submodelo de perda de produtividade e sua inserção no modelo SimulArroz, posterior a descrição dos experimentos realizados e pôr fim a validação do modelo com o submodelo e uma exemplificação do mesmo.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO DE COMPETIÇÃO DA PLANTAS DANINHAS SOBRE A CULTURA DO ARROZ

A competição de plantas daninhas sobre a produtividade de arroz foi modelada pelo método de perda da produtividade (ADATI et al., 2006), utilizando-se o modelo da equação hipérbole retangular (COUSENS, 1985):

$$Y_L = (iD)[1+\beta D]^{-1} \quad (1)$$

$$\beta = ia^{-1} \quad (2)$$

em que  $Y_L$  é a perda da produtividade em porcentagem de grãos do arroz,  $D$  é a densidade da planta daninha em plantas  $m^{-2}$ ,  $i$  é a perda de produtividade em porcentagem de grãos do arroz por unidade de planta daninha quando a densidade de plantas daninhas se aproxima de zero,  $a$  é a perda da produtividade em porcentagem de grãos do arroz quando a densidade de plantas daninhas se aproxima do infinito e  $\beta$  é a competitividade da planta daninha (COUSENS, 1985; MAMUN, 2014).

Foi calculado o inverso da competitividade de cada espécie daninha, que representa a densidade de plantas daninhas que reduzem em 50% a produtividade ( $s$ ) (Equação 3). Este parâmetro facilita o entendimento da competição para diferentes hipérbolos retangulares, pois iguala um nível que facilita a compreensão da competição das plantas daninhas (COUSENS, 1985; MAMUN, 2014).

$$s = 1\beta^{-1} \quad (3)$$

Como variável preditora utilizada neste trabalho foi utilizada a densidade de plantas daninhas, pois é a mais fácil de quantificar e inserir no programa pelo usuário. Neste trabalho foram utilizadas duas plantas daninhas, o arroz daninho (*Oryza sativa*) e o capim-arroz (*Echinochloa spp.*), pois são as principais plantas daninhas na cultura do arroz irrigado. Os coeficientes *i* e *a* do modelo da hipérbole retangular referentes a cada uma dessas espécies daninhas foram obtidos de trabalhos realizados no Rio Grande do Sul e publicados na literatura, listados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Coeficiente *i*, coeficiente *a* da equação hipérbole retangular, a cultivar e o nível tecnológico (alto, médio e baixo) classificado no experimento de calibração para arroz daninho na cultura do arroz. Santa Maria, 2018.

Coeficiente <i>i</i>	Coeficiente <i>a</i>	Cultivar	Nível	Fonte
0,25	100	IRGA 417	Alto	AGOSTINETTO et al., 2005a
0,49	100	IRGA 417	Alto	FLECK et al., 2004
0,50	100	BR-IRGA 409	Alto	FLECK et al., 2004
0,51	100	BR-IRGA 409	Baixo	AGOSTINETTO et al., 2005b
0,63	100	BRS-38 Ligeirinho	Alto	FLECK et al., 2004
0,70	100	BRS-38 Ligeirinho	Médio	FLECK et al., 2004
0,72	100	BRS-38 Ligeirinho	Médio	FLECK et al., 2004
0,75	100	BRS-38 Ligeirinho	Alto	FLECK et al., 2004
0,77	100	BR-IRGA 409	Médio	AGOSTINETTO et al., 2005a
0,77	100	BR-IRGA 409	Médio	FLECK et al., 2004
0,94	100	BR-IRGA 409	Baixo	AGOSTINETTO et al., 2005b
0,97	100	IRGA 417	Baixo	AGOSTINETTO et al., 2005b
1,23	100	BRS-38 Ligeirinho	Alto	AGOSTINETTO et al., 2005b
1,25	100	IRGA 417	Alto	AGOSTINETTO et al., 2005b
1,25	100	IRGA 417	Alto	AGOSTINETTO et al., 2005b
1,25	100	BR-IRGA 409	Alto	AGOSTINETTO et al., 2005b
1,25	100	IRGA 417	Médio	AGOSTINETTO et al., 2005a
1,30	100	BR-IRGA 409	Alto	AGOSTINETTO et al., 2005b
1,37	100	IRGA 417	Alto	AGOSTINETTO et al., 2005b
1,50	100	BRS-38 Ligeirinho	Médio	AGOSTINETTO et al., 2005b
1,51	100	IRGA 417	Baixo	AGOSTINETTO et al., 2005b
1,54	100	BRS-38 Ligeirinho	Alto	AGOSTINETTO et al., 2005b
1,67	100	IRGA 417	Alto	AGOSTINETTO et al., 2005a
1,74	100	BR-IRGA 409	Médio	AGOSTINETTO et al., 2005b
1,95	100	IRGA 417	Médio	AGOSTINETTO et al., 2005b
4,07	100	IRGA 417	Médio	AGOSTINETTO et al., 2005a
4,81	100	IRGA 417	Baixo	AGOSTINETTO et al., 2005a
12,65	100	IRGA 417	Baixo	AGOSTINETTO et al., 2005a

Tabela 2 - Coeficiente  $i$ , coeficiente  $a$  da equação hipérbole retangular, a cultivar e o nível tecnológico (alto, médio e baixo) classificado no experimento de calibração para capim-arroz na cultura do arroz. Santa Maria, 2018.

Coeficiente $i$	Coeficiente $a$	Cultivar	Nível	Fonte
1,134	100,00	IRGA 424 RI	Alto	BECK et al., 2017
1,1715	100,00	Guri INTA CL	Alto	BECK et al., 2017
4,62	107,30	BRS Pelota	Alto	AGOSTINETTO et al., 2010
4,71	107,10	IRGA 417	Alto	GALON et al., 2007
6,01	98,97	BRS Pelota	Baixo	AGOSTINETTO et al., 2010
7,22	112,50	IRGA 416	Médio	GALON et al., 2007
8,14	96,30	BRS Pelota	Alto	AGOSTINETTO et al., 2010
8,40	99,09	BRS Pelota	Alto	AGOSTINETTO et al., 2007
9,79	108,30	IRGA 421	Médio	GALON et al., 2007
10,40	104,30	BRS Pelota	Médio	AGOSTINETTO et al., 2007
11,25	97,41	BRS Pelota	Baixo	AGOSTINETTO et al., 2007
11,38	96,19	BRS Atlanta	Médio	GALON et al., 2007
13,67	101,10	BRS Fronteira	Médio	GALON et al., 2007
29,27	94,27	AVAXI	Baixo	GALON et al., 2007

### 3.2 IMPLEMENTAÇÃO DA COMPETIÇÃO DE PLANTAS DANINHAS NO SimulArroz

Para a inserção do submodelo de perda de produtividade pelas duas plantas daninhas no modelo SimulArroz, decidiu-se por penalizar a produtividade em cada um dos três níveis tecnológicos no dia da maturidade fisiológica (R9 da escala de COUNCE et al. (2000)), contudo a competição deve ocorrer a partir do período anterior a interferência (PAI, período em que a cultura pode conviver com a planta sem apresentar competição por recursos, para o arroz irrigado este período dura em torno de 10 dias) até o dia da maturidade fisiológica (R9) (COUSENS, 1985; MAMUN, 2014). Para isso se realizou uma classificação das hipérbolas retangulares das Tabelas 1 e 2 de acordo com o nível tecnológico (alto, médio e baixo) aplicado no experimento de determinação das mesmas, após calculou-se a média de cada nível tecnológico, e nesta obtivemos três valores de  $i_{médio}$  para cada planta daninha, e três valores de  $a_{médio}$  para o capim-arroz. Para arroz daninho o coeficiente  $a$  da hipérbole retangular para todos os níveis foi 100,00, considerando-se que biologicamente não há perda de produtividade maior que 100%.

Esta classificação levou em conta os três níveis tecnológicos descritos no SimulArroz, sendo que o nível tecnológico alto são lavouras que seguem os princípios do Projeto 10+ (IRGA, 2017) como alta adubação, recomendação pela SOSBAI (2016), entrada da água em V3 e densidade de 200 plantas por metro quadrado. No nível baixo a condução foi realizada a fim de expressar diferença nos coeficientes, com redução na adubação e aplicada de forma incorreta, espaçamento maiores e/ou a lanço, atraso na entrada da água e falta da aplicação de agrotóxicos em momentos necessários. E o nível médio é intermediário entre os dois níveis acima (WALTER, 2012).

O código fonte do SimulArroz é em Fortran e foram tomadas as medidas necessárias para que o acoplamento da Equação 1 no modelo seja feito de modo a garantir a atual performance. Criou-se duas sub-rotinas, "WEEDS\_COEFICIENTS" e "WEEDS\_LOSS", a primeira contém alocados os coeficientes ( $i_{médio}$  e  $a_{médio}$ ) de todas as hipérboles retangulares, que será utilizada dependendo da escolha da planta daninha e do nível tecnológico (Figura 4), e a segunda contém a hipérbole retangular e foi encarregada de aplicar a penalização na produtividade no estágio R9 (Figura 5). Foi necessário alterar a sub-rotina "READ\_INPUT\_FROM\_KEYBOARD", que é responsável por informar as opções disponíveis aos usuários, a qual pode escolher utilizar o modelo com ou sem o submodelo de plantas daninhas, e, se a escolha for verdadeira, então poderá escolher o tipo de planta daninha e colocar a densidade da mesma (Figura 6).

Para valores de perda de produtividade maiores que 100% o modelo corrigirá para produtividade zero com o objetivo de não apresentar produtividade negativa para o usuário.

Figura 4 - Sub-rotina que contém os coeficientes  $a$  e  $i$  do modelo da hipérbole retangular (Equação 1) que foi introduzida no código fonte do modelo SimulArroz. Santa Maria, 2018.

```
subroutine WEEDS_COEFFICIENTS ()
  use SEED

  if ((weeds .EQ. 1) .OR. (weeds .EQ. 3)) then

    if (techLevel .EQ. 2) then
      weedyRiceCoefficientI = 1.04
      weedyRiceCoefficientA = 100.0
    elseif (techLevel .EQ. 3) then
      weedyRiceCoefficientI = 1.50
      weedyRiceCoefficientA = 100.0
    elseif (techLevel .EQ. 4) then
      weedyRiceCoefficientI = 3.57
      weedyRiceCoefficientA = 100.0
    endif

  endif

  if ((weeds .EQ. 2) .OR. (weeds .EQ. 3)) then

    if (techLevel .EQ. 2) then
      barnyardgrassCoefficientI = 4.70
      barnyardgrassCoefficientA = 101.63
    elseif (techLevel .EQ. 3) then
      barnyardgrassCoefficientI = 10.49
      barnyardgrassCoefficientA = 104.92
    elseif (techLevel .EQ. 4) then
      barnyardgrassCoefficientI = 15.51
      barnyardgrassCoefficientA = 96.88
    endif

  endif

  call LOG("WEEDS_COEFFICIENTS")
  return
end
```

Figura 5 - Sub-rotina que calcula a perda de produtividade de arroz em função da densidade de plantas daninhas (Equação 1) no código fonte do modelo SimulArroz. Santa Maria, 2018.

```

subroutine WEEDS_LOSS ()
  use SEED

  if (developStage(i) .GE. 2.0) then

    if ((weeds .EQ. 1) .OR. (weeds .EQ. 3)) then
      weedyRiceYieldLoss = (weedyRiceCoefficientI * weedyRiceDensity) / &
        (1 + ((weedyRiceCoefficientI / &
          weedyRiceCoefficientA) * weedyRiceDensity))
    endif

    if ((weeds .EQ. 2) .OR. (weeds .EQ. 3)) then
      barnyardgrassYieldLoss = (barnyardgrassCoefficientI * &
        barnyardgrassDensity) / (1 + ((&
          barnyardgrassCoefficientI / &
          barnyardgrassCoefficientA) * &
          barnyardgrassDensity))
    endif

    if (weeds .EQ. 1) then
      yieldLoss = weedyRiceYieldLoss
    elseif (weeds .EQ. 2) then
      yieldLoss = barnyardgrassYieldLoss
    elseif (weeds .EQ. 3) then
      yieldLoss = (weedyRiceYieldLoss + barnyardgrassYieldLoss)/2
    endif

    if (yieldLoss .GT. 100) then
      yieldLoss = 100
    endif

    yieldDryMatter = yieldDryMatter * (1.0 - (yieldLoss / 100))
    yield13Percent = yieldDryMatter * 1.1149
    yieldBags = yield13Percent / 50.0

  endif

  call LOG("WEEDS_LOSS")
  return
end

```

Figura 6 - Sub-rotina responsável por permitir ao usuário escolher a espécie e a densidade de plantas daninhas no código fonte do modelo SimulArroz. Santa Maria, 2018.

```

print*, 'INFORM IF YOU WANT USE THE WEEDS SUBMODEL (TRUE) OR NOT (FALSE)'
read*, weedschoice

if (weedschoice) then
  print*, 'INFORM IF THERE IS WEEDY-RICE (TYPE 1) OR &
        BARNYARDGRASS (TYPE 2) OR BOTH (TYPE 3) INFESTATION'
  read*, weeds

  if ((weeds .EQ. 1) .OR. (weeds .EQ. 3)) then
    print*, 'INFORM THE DENSITY OF WEEDY-RICE'
    read*, weedyRiceDensity
  endif

  if ((weeds .EQ. 2) .OR. (weeds .EQ. 3)) then
    print*, 'INFORM THE DENSITY OF BARNYARDGRASS'
    read*, barnyardgrassDensity
  endif
endif
endif

```

### 3.3 AVALIAÇÕES DA COMPETIÇÃO DE ARROZ DANINHO SOBRE A CULTURA DO ARROZ IRRIGADO

Como dados independentes para testar o modelo foram realizadas avaliações de densidade de plantas daninhas e produtividade em seis lavouras comerciais durante o ano agrícola 2016/17, três localizadas em São João do Polêsine e três em Santa Maria. Porém a maioria das lavouras apresentou um bom controle das invasoras, sendo possível utilizar somente uma em cada um dos municípios, com presença apenas de arroz daninho em ambas. O delineamento experimental foi completamente casualizado, com uma unidade por combinação de fatores, sendo que as diferentes densidades funcionaram como repetições, proporcionando a variância para as análises estatísticas pelo modelo não-linear proposto por Cousens (1985). As parcelas compreendem 6 linhas espaçadas de 17 cm e cinco metros de comprimento (5,1 m<sup>2</sup>).



O manejo das áreas seguiu o modelo adotado pelo agricultor, sendo que, em Santa Maria a lavoura foi semeada em 06/11/2016 com a cultivar PUITÁ INTA CL, a adubação foi de 250 kg ha<sup>-1</sup> de 05-15-30 na semeadura, e 150 kg ha<sup>-1</sup> de uréia na cobertura, sendo a recomendação para a cultura de acordo com a análise de solo (SOSBAI, 2016), e o manejo de insetos e doenças foi muito eficaz. Em São João do Polêsine a cultivar IRGA 424 RI foi semeada em 25/11/2016, a adubação foi de 200 kg ha<sup>-1</sup> de 05-15-30 na semeadura, e 100 kg ha<sup>-1</sup> de uréia na cobertura, uma dose menor que a recomendação (SOSBAI, 2016), e não ocorreu problemas com insetos e doenças. Porém em ambas as lavouras o agricultor perdeu a aplicação no “ponto de agulha” (aplicação de herbicida de ação total no momento da emissão do coleóptilo das plantas de arroz na superfície (SOSBAI, 2016)), o que favoreceu o arroz daninho que emergiu junto a cultura.

As avaliações das densidades de arroz daninho em ambas lavouras foram realizadas na maturidade fisiológica da cultura (R9) mediante contagem dos indivíduos presentes em área de 0,5 m<sup>2</sup>, subdividida em dois locais de cada parcela, as quais foram escolhidas aleatoriamente dentro da lavoura avaliada. A quantificação da produtividade de grãos do arroz irrigado foi obtida pela colheita na área útil (5,1 m<sup>2</sup>) de cada parcela, quando a cultivar estava próxima da maturação fisiológica, sendo os pesos corrigidos para 13% de umidade. Com os dados de produtividade de grãos foi calculada a perda de produtividade das parcelas com plantas daninhas em relação às parcelas mantidas sem infestação, de acordo com a equação 4.

$$PP (\%) = ((Pa - Pb) Pa^{-1}) * 100 \quad (4)$$

em que PP é a perda de produtividade em porcentagem, Pa é a produtividade sem a presença de capim-arroz e Pb a produtividade com a presença de capim-arroz.

Os dados obtidos foram submetidos a análises descritas no item 3.5. Para Santa Maria o modelo foi rodado no nível tecnológico alto, e para São João de Polêsine o modelo foi rodado no nível tecnológico médio.

### 3.4 EXPERIMENTOS DE COMPETIÇÃO DE CAPIM-ARROZ SOBRE A CULTURA DO ARROZ IRRIGADO

Foram realizados dois experimentos de campo na Estação Experimental do Arroz (EEA), pertencente ao Instituto Rio-Grandense Arroz (IRGA), localizada no município de Cachoeirinha, RS, durante o ano agrícola 2016/17. O delineamento experimental foi completamente casualizado, com uma unidade por combinação de fatores, sendo que as diferentes densidades funcionaram como repetições, proporcionando a variância para as análises estatísticas pelo modelo não-linear proposto por Cousens (1985). As parcelas compreendem 9 linhas espaçadas de 17 cm e seis metros de comprimento.

O arroz foi cultivado no sistema convencional, cuja semeadura foi realizada na data 23 de novembro de 2016, com densidade de 100 kg ha<sup>-1</sup>. A fertilidade do solo foi corrigida com base na análise do solo e os demais tratamentos culturais seguiram as recomendações da cultura (SOSBAI, 2016). No primeiro experimento utilizou-se a cultivar IRGA 424 RI e no segundo a cultivar GURI INTA CL. Quanto ao tratamento para ambos foram utilizadas as densidades de capim-arroz em infestação natural, sendo elas: 0, 1, 6, 10, 12, 16, 22, 200 e 246 plantas m<sup>-2</sup> e 0, 1, 2, 4, 16, 140, 158, 160, 204 e 220 plantas m<sup>-2</sup>, respectivamente. As determinações das densidades foram realizadas quando as plantas de arroz estavam em estágio de V3-V4, cujas plantas de capim-arroz foram protegidas com copos plásticos ou por pedaços de papel pardo, para que não fossem atingidas pelo herbicida, sendo utilizado o herbicida cyhalofop-butyl, na dose de 1,5 L ha<sup>-1</sup> de produto comercial. Após a aplicação realizou-se a adubação nitrogenada e entrada d'água utilizando a irrigação por inundação. Ao passar 13 dias, realizou-se a aplicação do herbicida pyrazossulfuron-methyl para o manejo das plantas daninhas da família cyperaceae.

As avaliações da variável explicativa de densidade de plantas daninhas foram realizadas 30 dias após a entrada da água, com a contagem das plantas presentes em duas áreas de 0,25 m<sup>2</sup> por parcela. A produtividade foi quantificada com a colheita de 3,6

m<sup>2</sup> e corrigida a 13% de umidade dos grãos obtidos. Com os dados de produtividade de grãos foi calculada a perda de produtividade das parcelas com plantas daninhas em relação às parcelas mantidas sem infestação (testemunhas), de acordo com a equação 4.

Os dados obtidos deste experimento foram utilizados por Beck et al. (2017) para estimativa dos valores de *i* e *a* para as duas cultivares (IRGA 424 Ri e GURI INTA CL) para o capim-arroz. Os dados também foram submetidos a análises descritas no item 3.5. Para as duas cultivares o modelo foi rodado no nível tecnológico alto.

### 3.5 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO DA COMPETIÇÃO DE PLANTAS DANINHAS SOBRE A CULTURA DO ARROZ IRRIGADO NO SimulArroz

O desempenho do modelo SimulArroz com o submodelo de competição das duas plantas daninhas foi avaliado pelas estatísticas raiz do quadrado médio do erro (RQME) – equação 5 (JANSSEN; HEUBERGER, 1995), raiz do quadrado médio do erro normalizado (RQMEn) – equação 6 (JANSSEN; HEUBERGER, 1995), índice “BIAS” – equação 7 (SAMBORANHA et al., 2013), índice de concordância modificado (dw) – equação 8 (WILLMOTT et al., 1985) e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) – equação 9 (NASH; SUTCLIFFE, 1970), dadas a seguir:

$$RQME = [\sum(Si-Oi)^2 n^{-1}]^{0,5} \quad (5)$$

$$RQMEn = 100*(RQME \bar{O}^{-1}) \quad (6)$$

$$BIAS = (\sum Si - \sum Oi) (\sum Oi)^{-1} \quad (7)$$

$$dw = 1 - [\sum |Si - Oi|] [\sum (|Si - \bar{O}|) + (|Oi - \bar{O}|)]^{-1} \quad (8)$$

$$COE = 1 - [\sum (Si - Oi)^2] [\sum (Si - \bar{O})^2]^{-1} \quad (9)$$

em que  $S_i$  são os valores simulados,  $O_i$  são os valores observados,  $\bar{O}$  é a média dos valores observados e  $n$  é o número de observações.

O “RQME” expressa o erro médio do modelo e quanto menor o RQME melhor é o modelo (JANSSEN; HEUBERGER, 1995). O “RQMEn” indica o erro médio relativo (JANSSEN; HEUBERGER, 1995). O índice  $d_w$  tende a resultar em um índice mais rigoroso, medindo o grau com que as simulações do modelo são livres de erro, ou seja, é uma medida da exatidão do modelo (WILLMOTT, 1985). O índice BIAS expressa o desvio médio dos valores estimados em relação aos valores observados, indicando assim a tendência do modelo em superestimar ou subestimar (SAMBORANHA et al., 2013). Por fim, o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), pode variar de 1 ao negativo infinito, e, quanto mais próximo de 1 melhor o modelo (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

### 3.6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO SIMULARROZ COM O SUBMODELO DE PERDA DE PRODUTIVIDADE POR PLANTAS DANINHAS

A inserção do submodelo de plantas daninhas no SimulArroz poderá ser usada como uma ferramenta para a tomada de decisão pelo agricultor para realizar a aplicação de herbicida, uma exemplificação é a utilização do nível de dano econômico (NDE). Foi calculado pela equação 10, adaptada por Lindquist e Kropff (1996), utilizando-se coeficiente  $i_{\text{médio}}$ .

$$\text{NDE} = \text{CC}(\text{RP}(i \cdot 100^{-1})(E \cdot 100^{-1}))^{-1} \quad (10)$$

em que NDE = nível de dano econômico (plantas  $\text{m}^{-2}$ ); CC = custo do controle (herbicida e aplicação, em dólares  $\text{ha}^{-1}$ ); R = rendimento de grãos de arroz ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); P = preço do arroz (dólares  $\text{kg}^{-1}$  de grãos);  $i$  é a perda de produtividade em porcentagem de grãos do arroz por unidade de planta daninha quando a densidade de plantas daninhas se aproxima de zero e E = nível de eficiência do herbicida (%).

Para as variáveis CC, P e E (Equação 10) foram usados os valores para o custo de controle (CC) correspondente de 105,61 dólares  $\text{ha}^{-1}$  (IRGA, 2017), ao preço do

produto (P), valor de 0,23 dólares  $\text{kg}^{-1}$  de grãos (R\$ 37,10 saco 50 kg para Santa Maria), e ao nível de eficiência do herbicida (E) valor de 95 % sendo este a eficiência atual dos produtos no controle de invasoras (SOSBAI, 2016). Os valores de  $i$  são os obtidos dos três níveis tecnológicos para as duas plantas daninhas.

Foi utilizado o modelo para estimar a produtividade de uma lavoura em Cachoeirinha, nos três níveis tecnológico para duas cultivares, a IRGA 424 RI, com produtividades simuladas respectivamente para os níveis tecnológicos (alto, médio e baixo) de 11570, 10141,2 e 8016,9  $\text{kg ha}^{-1}$  e para a cultivar GURI INTA CL com 9392,3, 8178,4 e 6231,7  $\text{kg ha}^{-1}$  respectivamente.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em modelos agrícolas a abordagem da perda de produtividade pela ocorrência de danos bióticos ocorre através da penalização de outros fatores, com da eficiência do uso da radiação, redução do índice de área foliar, entre outras (KROPFF et al., 1995; PINNSCHMIDT et a., 1995; VAN ITTERSUM et al., 2003; WEAVER, 1996). Porém a inserção da hipérbole retangular é algo novo em modelos de simulação da produtividade das culturas, sendo que com esta complementação, o deixa mais completo e é possível a utilização com finalidade prática, sendo o nível de dano econômico, e no meio científico com a previsão de produtividade em cenários de mudanças climáticas e na previsão de safra (IRGA, 2017).

### 4.1 ARROZ DANINHO

Na classificação realizada para os coeficientes do arroz daninho foram encontrados os valores de  $i_{\text{médio}}$  1,04, 1,50 e 3,57, respectivamente para os níveis tecnológicos alto, médio e baixo (Tabela 3). Os valores de  $i_{\text{médio}}$  diminuem quando há o aumento do nível tecnológico, isto é, a perda unitária (perda de produtividade de uma planta daninha por metro quadrado) reduz quando é realizado manejo mais eficiente na lavoura (AGOSTINETTO et al., 2004; AGOSTINETTO et al., 2007). No nível baixo o coeficiente  $i_{\text{médio}}$  foi elevado, ou seja, a perda unitária é maior, comparado ao nível alto, por exemplo. Tal ocorrência pode estar relacionada à emergência da planta daninha antes da cultura, ou pode ser decorrente do menor “k” (capacidade de suporte do ambiente), em que o ambiente suporta menor densidade de plantas, isto é, que inicialmente a densidade aumenta livremente, e quando chega a maiores densidades a taxa de aumento reduz até à medida em que os recursos vão se tornando insuficientes para sustenta-la ocorrendo uma estabilização próxima ao limite superior. Sendo que para o nível tecnológico baixo este limite superior pode ser muito inferior aos outros dois níveis tecnológicos (RADOSEVICH, 2007).

Tabela 3 - Classificação dos coeficientes  $i_{\text{médios}}$  e  $a_{\text{médios}}$ , com seus respectivos valores de competitividade e a densidade por metro quadrado que causa 50% de perda da produtividade nos três níveis tecnológicos para o arroz daninho. Santa Maria, 2018.

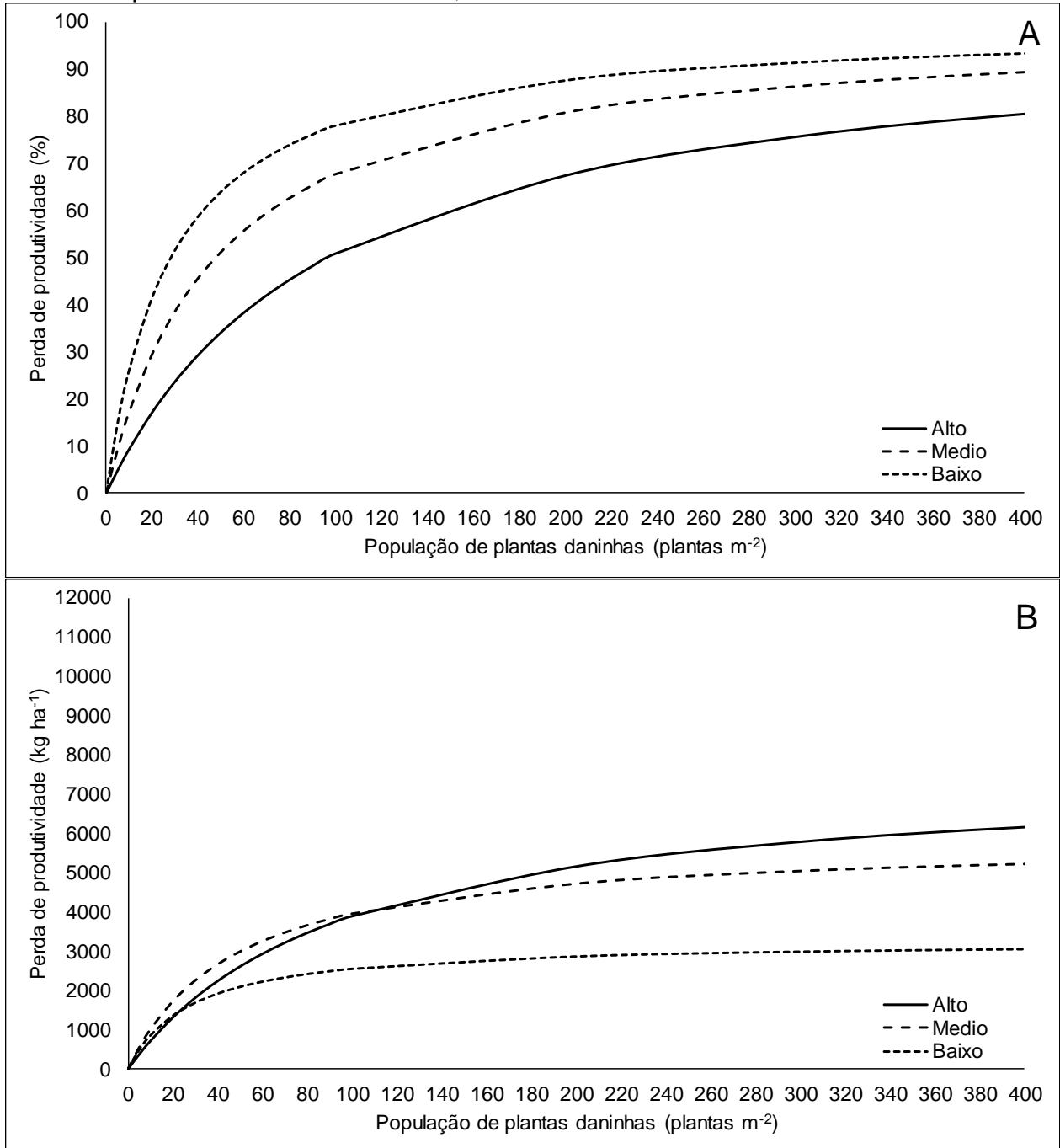
Nível tecnológico	Coeficiente $i_{\text{médio}}$	Coeficiente $a_{\text{médio}}$	$\beta$	s
Alto	1,04	100,00	0,0104	96
Médio	1,50	100,00	0,0150	67
Baixo	3,57	100,00	0,0357	28

\*  $\beta$  é a competitividade da planta daninha; s = densidade de plantas daninhas que reduz a produtividade em 50 %.

Calculando-se o inverso do indicativo de competitividade (s) (COUSENS, 1985; MAMUN, 2014), observa-se que a densidade de plantas daninhas por metro quadrado que promove perda de produtividade de 50% foi de 96, 67 e 28 plantas  $m^{-2}$  para os níveis tecnológicos alto, médio e baixo, respectivamente (Tabela 3). Esses valores confirmam que a capacidade de suporte do ambiente no nível tecnológico baixo é significativamente inferior aos outros, pela quantidade de recursos limitar o aumento da densidade para níveis maiores. Em ambientes com maior disponibilidade de recursos a cultura aumenta sua habilidade de competir com a planta daninha reduzindo a perda de produtividade com o aumento da densidade da mesma (RADOSEVICH, 2007; AGOSTINETTO et al., 2004; FLECK et al., 2004).

A perda de produtividade, em porcentagem, para o nível baixo foi superior aos demais níveis pelo valor de  $i_{\text{médio}}$  ser maior (Figura 7A). Contudo, a perda de produtividade, em  $kg\ ha^{-1}$ , demonstra uma estabilização da curva com menores densidades de plantas daninhas nos níveis tecnológicos baixo e posterior no médio (Figura 7B). No nível tecnológico baixo a capacidade de suporte do ambiente chega ao limite com densidades menores que os outros níveis, pois a disponibilidade de recursos é baixa, e aumentar a densidade de plantas daninhas não reflete em acréscimo da perda de produtividade (RADOSEVICH, 2007).

Figura 7 - Perda de produtividade de arroz nos três níveis tecnológicos (alto, médio e baixo) em porcentagem (A) e em  $\text{kg ha}^{-1}$  (B) em função da densidade de arroz daninho, simuladas a partir do SimulArroz com o submodelo de perda de produtividade. Santa Maria, 2018.





A validação do modelo com o submodelo de perda de produtividade apresentou um desempenho satisfatório, com valores de RQME inferiores que 2433 kg ha<sup>-1</sup>, que são próximos de 2134 kg ha<sup>-1</sup> encontrados por Rosa et al. (2015), e valores de RQMEn abaixo dos encontrados por Silva et al. (2016), que foi de 12,7 a 79,7 %, comparados com valores de 23,0 e 34,6 % obtidos neste trabalho (Tabela 4). Estes dois trabalhos, Rosa et al. (2015) e Silva et al. (2016) foram realizados com a utilização do SimulArroz, e mesmo com a inserção do submodelo de perda de produtividade não ocorreu a redução do desempenho do mesmo. As estatísticas dw, BIAS e COE mostram que para Santa Maria o ajuste foi melhor do que para São João de Polêsine, o que pode ser influência do número reduzido de observações nesta lavoura. O modelo não demonstrou nenhuma tendência pelo índice BIAS ser positivo em Santa maria, isto é, o modelo superestima a produtividade e negativo para São João de Polêsine subestimando a produtividade.

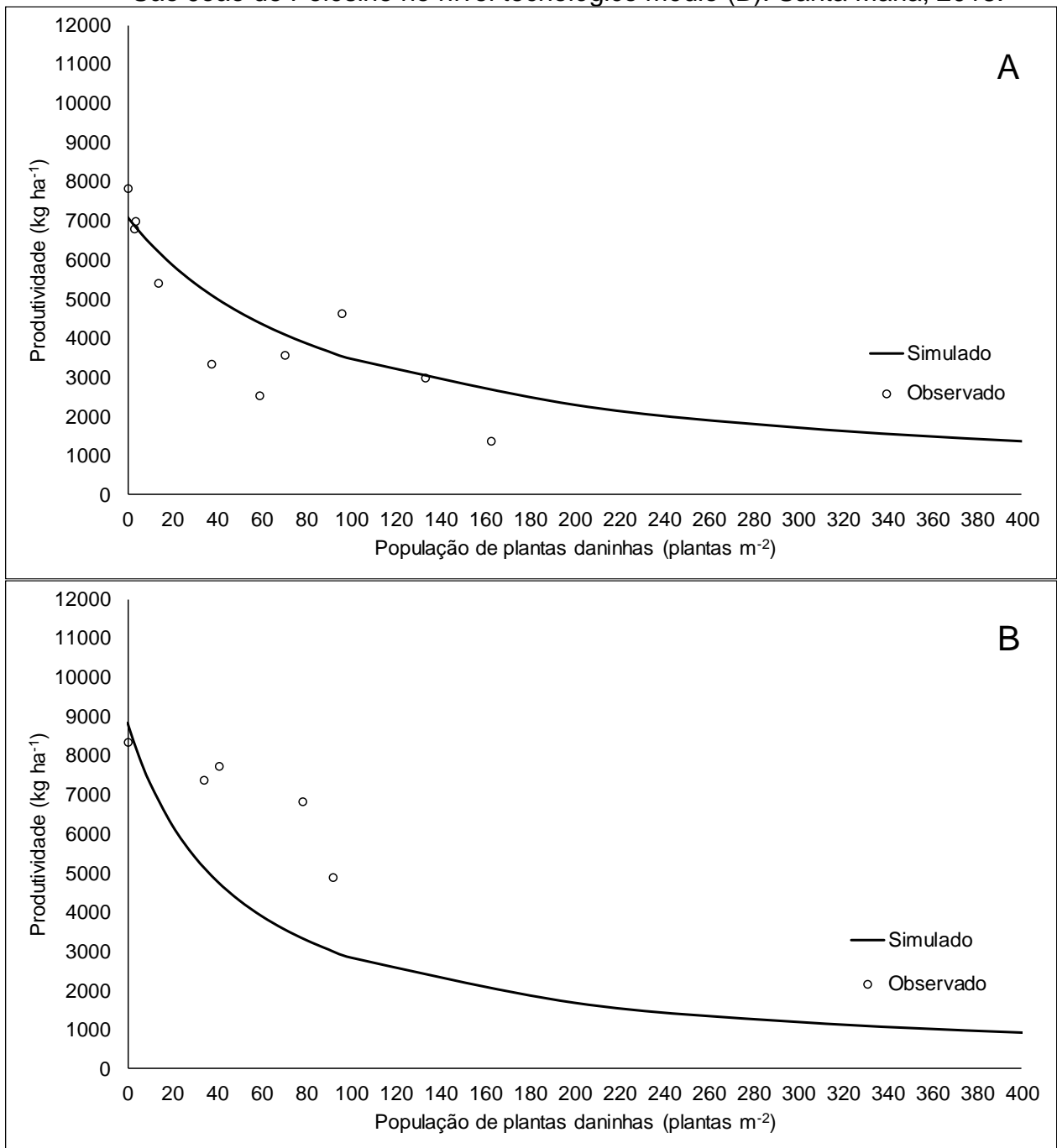
Tabela 4 - Desempenho do modelo SimulArroz com o submodelo de perda de produtividade em competição com arroz daninho. Santa Maria, 2018.

Local	RQME	RQMEn	dw	BIAS	COE
Santa Maria	1047	23,0	0,916	0,098	0,608
São João do Polêsine	2433	34,6	0,614	-0,285	0,290

\*RQME (kg ha<sup>-1</sup>) = raiz do quadrado médio do erro; RQMEn (%) = raiz do quadrado médio do erro normalizado; dw = índice de concordância; BIAS = índice "BIAS"; COE = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe.

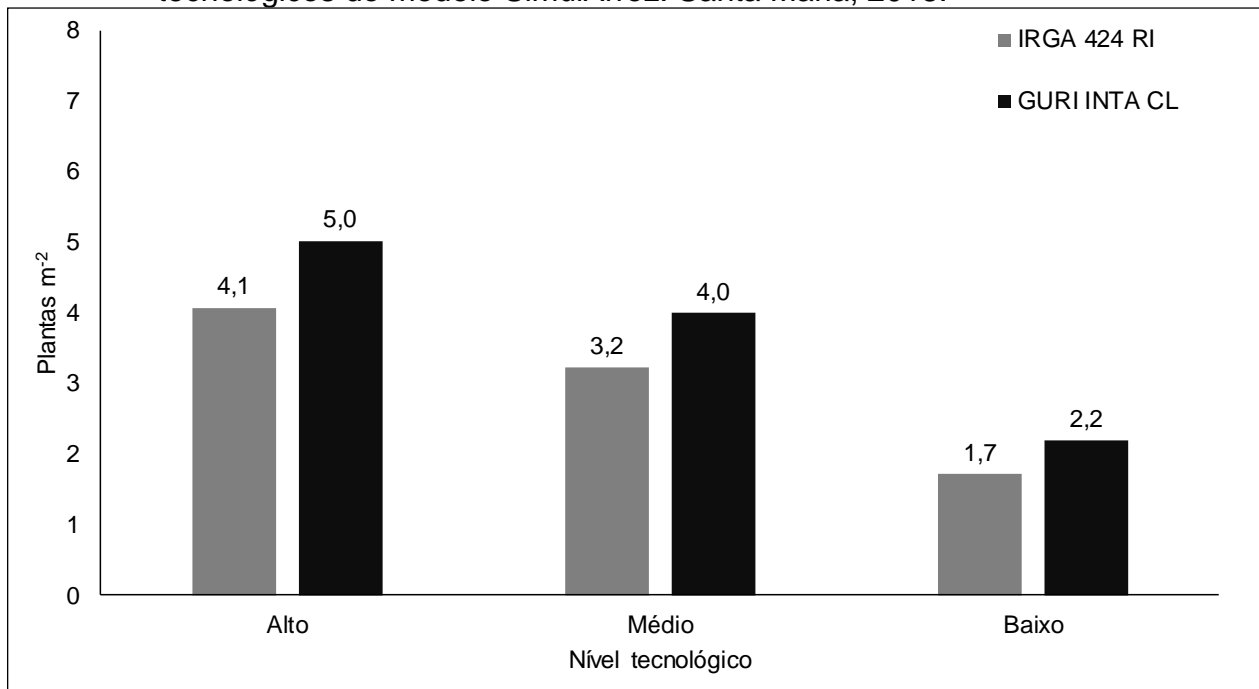
O desempenho do modelo SimulArroz com o submodelo de perda de produtividade para o arroz daninho consegue capturar as variações da produtividade com o aumento da densidade de plantas daninhas (Figura 8), contudo não se pode testar o modelo no nível tecnológico baixo com o arroz daninho.

Figura 8 - Produtividade de arroz em  $\text{kg ha}^{-1}$  em função da densidade de arroz daninho em duas lavouras comerciais em Santa Maria no nível tecnológico alto (A) e São João de Polêsine no nível tecnológico médio (B). Santa Maria, 2018.



Na figura 9 o nível de dano econômico para arroz daninho aumenta com o nível tecnológico, pois a tolerância de plantas por metro quadrado fica acima de 4 plantas por metro quadrado para as duas cultivares no nível tecnológico alto pelo suporte do ambiente ser maior. No nível baixo a tolerância é menor, pois a perda de produtividade unitária é maior, que fica acima de 3 % por planta por metro quadrado (AGOSTINETTO et al., 2005a; AGOSTINETTO et al., 2005b). No geral a cultivar IRGA 424 RI tem nível de dano econômico menor que a cultivar GURI INTA CL, pois tem maior produtividade, sendo que a perda absoluta é mais elevada quando a produtividade é maior.

Figura 9 - Nível de dano econômico para duas cultivares de arroz irrigado (IRGA 424 RI e GURI INTA CL) em função da densidade de arroz daninho nos três níveis tecnológicos do modelo SimulArroz. Santa Maria, 2018.



## 4.2 CAPIM-ARROZ

Para o capim-arroz a classificação dos coeficientes de hipérboles retangulares apresentou uma relação semelhante àquela observada para o arroz daninho, porém, com valores mais elevados devido a sua maior habilidade competitiva, rápido crescimento, maior porte, principalmente por ter metabolismo C4 com maior eficiência fotossintética que coloca a frente do arroz cultivado (OLAJUMOKE, 2016; TIRONI et al., 2009). Para os níveis tecnológicos alto, médio e baixo o valor de  $i_{\text{médio}}$  foi de 4,70, 10,49 e 15,51 respectivamente, e para o coeficiente  $a_{\text{médio}}$  a maioria dos trabalhos apresentam os valores do coeficiente variados, sendo que no presente trabalho os valores foram respectivamente 101,63, 104,92 e 96,88 (Tabela 5). A perda unitária (perda de produtividade causada por uma planta daninha por metro quadrado) aumenta consideravelmente com a redução do nível tecnológico, sendo muito superior ao arroz daninho, pois o ambiente suporta menos plantas de capim-arroz, isto é, a capacidade de suporte do ambiente é muito menor para o capim-arroz e pela sua demanda não há disponibilidade de recursos para o aumento populacional (RADOSEVICH, 2007; AGOSTINETTO et al., 2010; GALON et al., 2007a).

Tabela 5 - Classificação dos coeficientes  $i_{\text{médios}}$  e  $a_{\text{médios}}$ , com seus respectivos valores de competitividade e a densidade por metro quadrado que causa 50% de perda da produtividade nos três níveis tecnológicos para o capim-arroz. Santa Maria, 2018.

Nível tecnológico	Coefficiente $i_{\text{médio}}$	Coefficiente $a_{\text{médio}}$	$\beta$	s
Alto	4,70	101,63	0,0462	22
Médio	10,49	104,92	0,1000	10
Baixo	15,51	96,88	0,1601	6

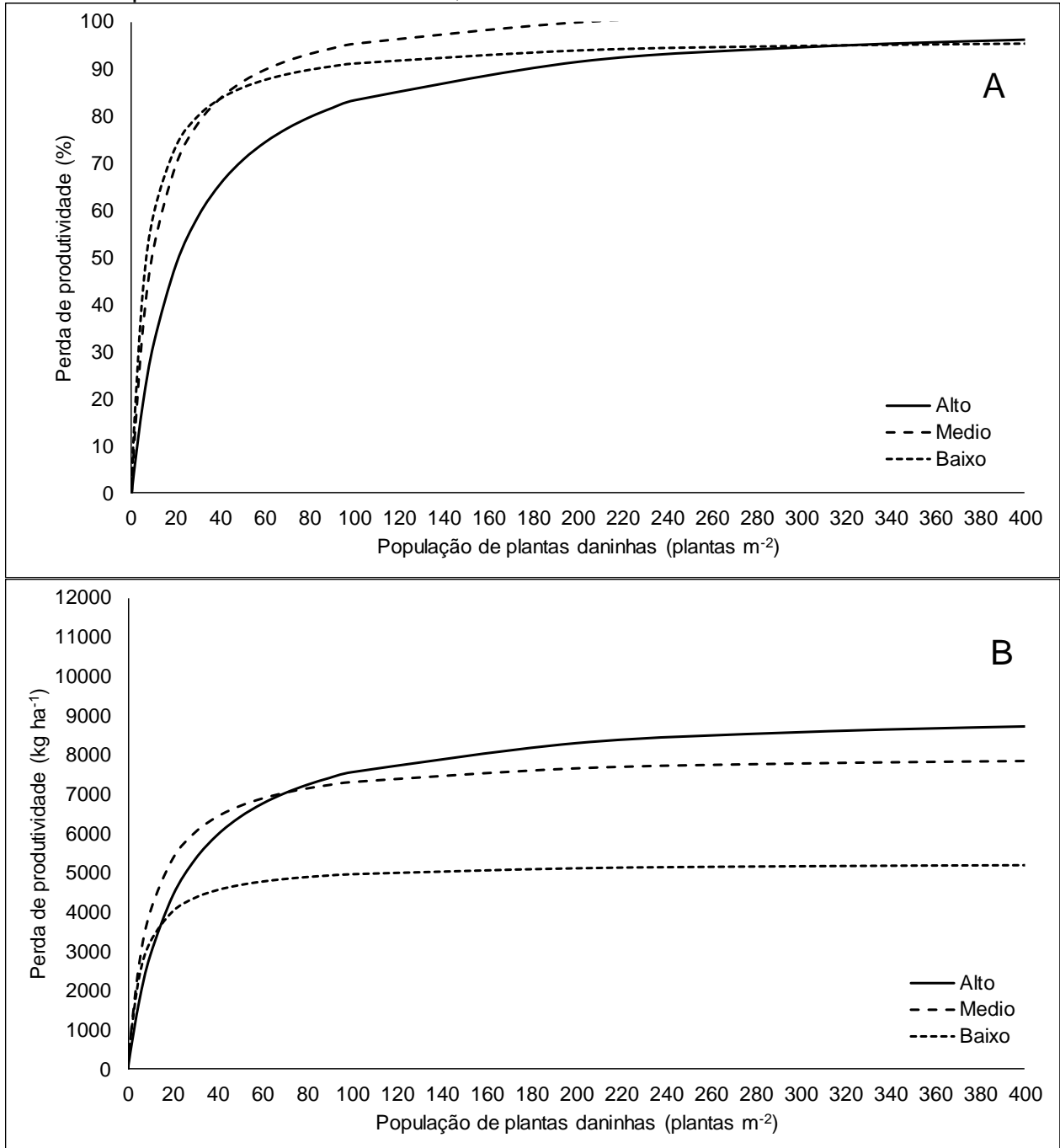
\*  $\beta$  é a competitividade da planta daninha; s = densidade de plantas daninhas que reduz a produtividade em 50 %.

Considerando-se o valor de  $i_{\text{médio}}$  definido nesse estudo, no nível tecnológico baixo do modelo SimulArroz, uma planta de capim-arroz  $\text{m}^{-2}$  pode promover a perda na produtividade no montante de cerca de 15%, evidenciando a menor competitividade da cultura do arroz nessa situação. Com base no inverso de  $\beta$  (s) de capim-arroz nos

diferentes níveis tecnológicos, observou-se que a densidade capim-arroz por metro quadrado dessa planta daninha que promove 50% de perda da produtividade é sempre menor que aquela observada no arroz daninho (Tabela 5). Os valores para o capim-arroz foram de 22, 10 e 6 plantas  $m^{-2}$  para os níveis alto, médio e, baixo, respectivamente (Tabela 5). Estes valores comprovam a baixa capacidade de suporte do ambiente ao capim-arroz, sendo que mesmo no nível tecnológico alto a densidade é menor que no nível tecnológico baixo para o arroz daninho, pelas características citadas anteriormente.

Observando os gráficos de perda de produtividade em porcentagem, os níveis médio e alto passam os 100% de perda de produtividade, pelo valor do coeficiente  $a_{médio}$  ser maior que 100 (Figura 10A). Porém, a perda de produtividade em  $kg\ ha^{-1}$ , demonstra o mesmo comportamento do arroz daninho para o capim-arroz, em que a perda de produtividade estabiliza em densidades menores quando a capacidade de suporte do ambiente é menor, isto é, no nível tecnológico baixo (Figura 10B) (RADOSEVICH, 2007).

Figura 10 - Perda de produtividade de arroz nos três níveis tecnológicos (alto, médio e baixo) em porcentagem (A) e em  $\text{kg ha}^{-1}$  (B) em função da densidade de arroz daninho, simuladas a partir do SimulArroz com o submodelo de perda de produtividade. Santa Maria, 2018.



Para o capim-arroz o desempenho do modelo SimulArroz com o submodelo de perda de produtividade foi melhor do que o arroz daninho, pois tem valores de RQME menores que 1558 kg ha<sup>-1</sup> e valores de RQMEn inferiores a 24,5 % (Tabela 6). As estatísticas dw e COE mostram que o modelo tem boa exatidão e o índice BIAS ficou com a tendência de subestimar a produtividade, pois os valores para ambos foram negativos.

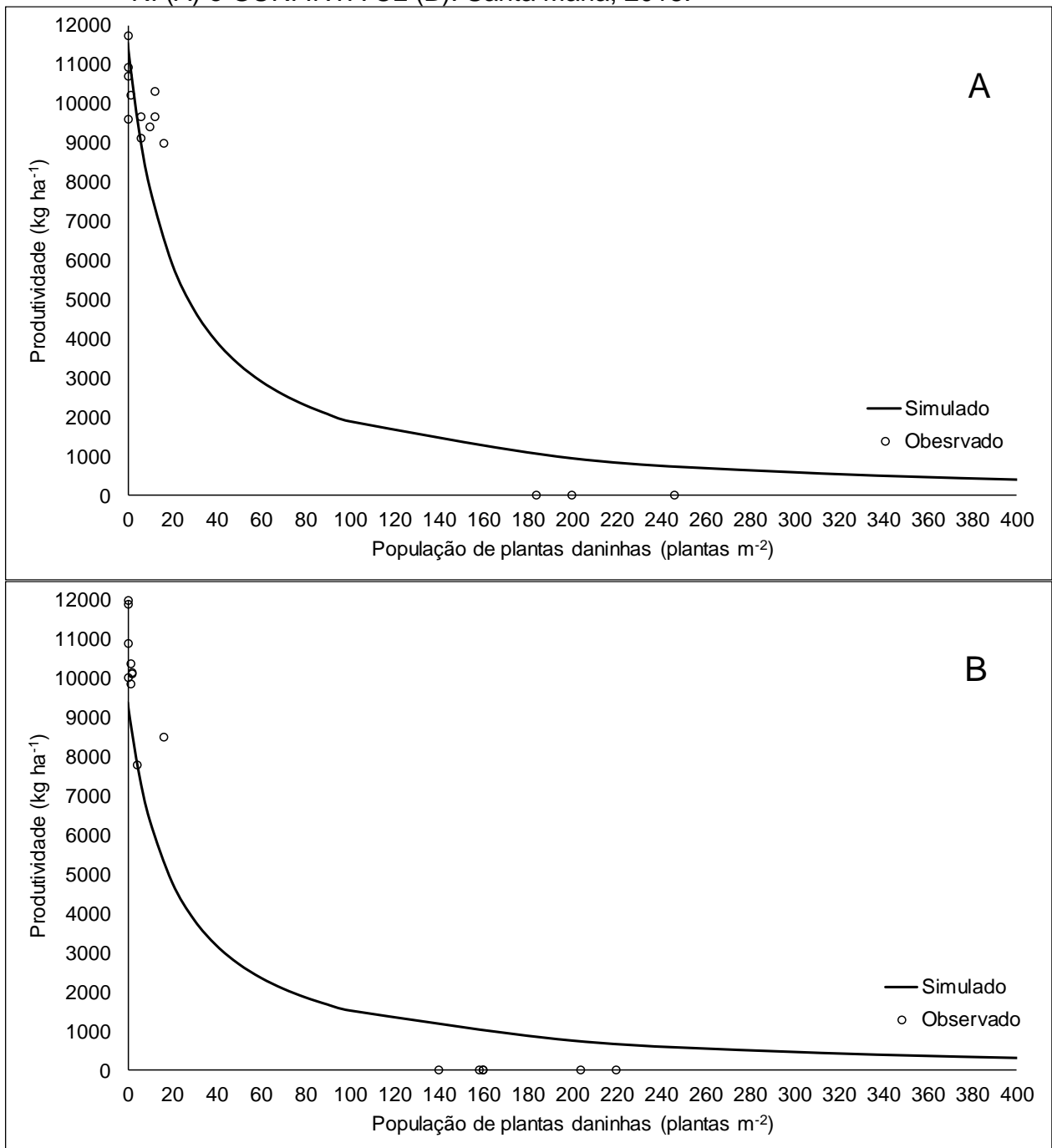
Tabela 6 - Desempenho do modelo SimulArroz com o submodelo de perda de produtividade em competição com capim-arroz. Santa Maria, 2018.

Cultivar	RQME	RQMEn	dw	BIAS	COE
IRGA 424 RI	1492	18,9	0,965	-0,029	0,855
GURI INTA CL	1558	24,5	0,969	-0,101	0,839

\*RQME (kg ha<sup>-1</sup>) = raiz do quadrado médio do erro; RQMEn (%) = raiz do quadrado médio do erro normalizado; dw = índice de concordância; BIAS = índice "BIAS"; COE = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe.

Para esta planta daninha somente foi possível testar o modelo no nível tecnológico alto, pois não variou as práticas de manejo no experimento, faltando assim os níveis tecnológicos médio e baixo (Figura 11). Contudo esses valores de desempenho do modelo são satisfatórios e demonstram boa capacidade preditiva.

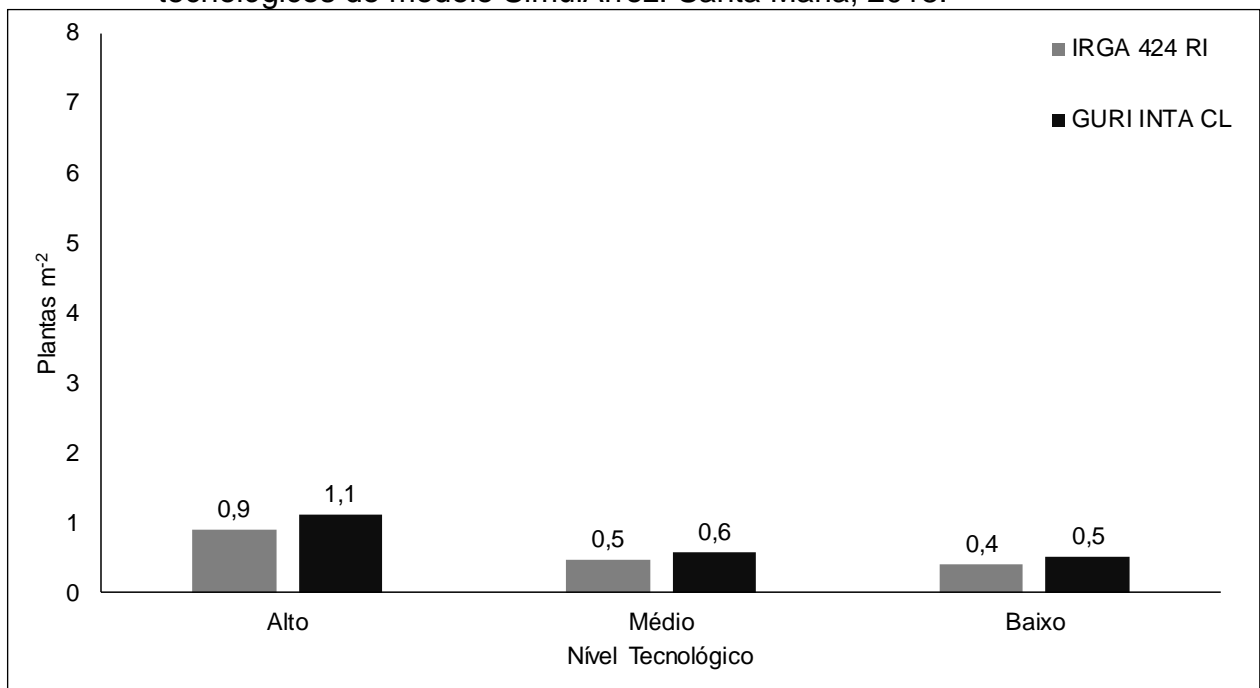
Figura 11 - Produtividade de arroz em  $\text{kg ha}^{-1}$  em função da densidade de capim-arroz para o experimento realizado em Cachoeirinha, para as cultivares IRGA 424 RI (A) e GURI INTA CL (B). Santa Maria, 2018.





Na figura 12 o nível de dano econômico para o capim-arroz observou-se que a tolerância é pequena mesmo para o nível tecnológico alto, pois a perda unitária de uma planta por metro quadrado fica próxima de 5 %, acima da perda de produtividade no arroz daninho para o nível tecnológico baixo (AGOSTINETTO et al., 2010; GALON et al., 2007b). O NDE ficou abaixo de 2 plantas  $m^{-2}$  para todos os fatores devido à redução de produtividade do capim-arroz.

Figura 12 - Nível de dano econômico para duas cultivares de arroz irrigado (IRGA 424 RI e GURI INTA CL) em função da densidade de arroz daninho nos três níveis tecnológicos do modelo SimulArroz. Santa Maria, 2018.



## 5. CONCLUSÃO

A perda de produtividade de arroz irrigado causada por uma planta de arroz daninho por metro quadrado no nível tecnológico baixo chega a 3,57 %, podendo chegar próximo a 3 sacos  $\text{ha}^{-1}$ . Para o capim-arroz, a perda de produtividade de arroz irrigado no nível tecnológico baixo é de 15,51 %, quatro vezes maior que o arroz daninho.

Com o aumento do nível tecnológico, se reduz a perda unitária (perda de produtividade de arroz irrigado causada por uma planta daninha por metro para ambas espécies), isto é, aumenta a competitividade da cultura em relação a planta daninha.

Conclui-se que é possível introduzir um submodelo de perda de produtividade pela presença de arroz daninho e capim-arroz sobre a produtividade de grãos da cultura do arroz irrigado no modelo SimulArroz, melhorando sua capacidade preditiva.

## 6. ORIENTAÇÕES E DEMANDAS PARA PRÓXIMOS ESTUDOS

O modelo da hipérbole retangular captura bem a perda de produtividade das duas espécies daninhas em diferentes níveis populacionais, porém é necessário um estudo mais aprofundado na interação das duas plantas daninhas (MOON et al., 2011).

A utilização da hipérbole retangular é um método empírico para a predição da produtividade de arroz em função da presença de plantas daninhas. Sugere-se em trabalhos futuros utilizar outras abordagens, como por exemplo a penalização sobre a eficiência do uso da radiação ou do índice de área foliar (KROPFF et al., 1995; VAN ITTERSUM et al., 2003).

## REFERÊNCIAS

- ADATI, C.; OLIVEIRA, V. A.; KARAM, D. Análise matemática e biológica dos modelos de estimativa de perdas de rendimento na cultura devido à interferência de plantas daninhas. **Planta daninha**, v. 24, n. 1, p. 1-12, 2006.
- 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**, v. 89, p. 1-25, 2006.
- AGOSTINETTO, D. et al. Arroz-vermelho: ecofisiologia e estratégias de controle. **Ciência Rural**, v. 31, n. 2, 2001.
- AGOSTINETTO, D. et al. Influência de cultivares de arroz e épocas da adubação nitrogenada nas relações de interferência da cultura com cultivar simulador de infestação de arroz-vermelho. **Planta daninha [online]**, v. 22, n. 2, p.185-193, 2004.
- AGOSTINETTO, D. et al. Dano econômico como critério na decisão sobre manejo de genótipos de arroz concorrentes em arroz irrigado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 40, n. 1, p. 1-9, 2005a.
- AGOSTINETTO, D. et al. Níveis de dano econômico para decisões de controle de genótipo simulador de arroz-vermelho em arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 11, n. 2, p. 175-183, 2005b.
- AGOSTINETTO, D. et al. Interferência de capim-arroz (*Echinochloa* spp.) na cultura do arroz irrigado (*Oryza sativa*) em função da época de irrigação. **Planta Daninha**, v. 25, n. 4, p. 689-696, 2007.
- AGOSTINETTO, D. et al. Interferência e nível de dano econômico de capim-arroz sobre o arroz em função do arranjo de plantas da cultura. **Planta daninha**, v. 28, p. 993-1003, 2010.
- AMINPANA, H.; SHARIFI, P.; FIROUZI, S. Interference Interactions of Two Species of *Echinochloa* Genus with Rice. **Chilean J. Agric. Res**, v. 72, n. 3, p. 364-370, 2012.
- BECK, M. et al. Perda de produtividade e nível de dano em cultivares do sistema clearfield® em função da competição com capim arroz (*Echinochloa* spp.). In: X Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 2017, Gramado. Anais do X Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 2017.
- BENEDETTI, R. P. et al. SimulArroz 1.1: Atualização do Modelo Matemático e Melhorias de Interface e Usabilidade. In: X Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 2017, Gramado - RS. X Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 2017.
- BRIGHENTI, A. M.; OLIVEIRA, M. F. Biologia de plantas daninhas. In: OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. **Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**, PR: Omnipax, 2011, 348p.

BOOTH, B.D.; MURPHY, S.D.; SWANTON, C.J. Interactions between populations I: competition and allelopathy. In: BOOTH, B.D.; MURPHY, S.D.; SWANTON, C.J. **Weed ecology in natural and agricultural Systems**. Wallingford: CAB International, 2003. 288p.

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 outubro de 2016.

CHEMALE, V. M.; FLECK, N. G. Avaliação de cultivares de soja (*Glycine max* (L) Merrill) em competição com *Euphorbia heterophylla* L. sob três densidades e dois períodos de ocorrência. **Planta Daninha**, v. 5, n. 2, p. 36-45, 1982.

CONAB. **Série histórica de área e produção plantada por unidades da federação**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em 2017.

CONCENÇO, G.; et al. Emergência e crescimento inicial de plantas de arroz e capim-arroz em função do nível de umidade no solo. **Planta Daninha**, v. 25, n. 3, p. 457-463, 2007.

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

COUSENS, R. A simple model relating yield loss to weed density. **Annals of Applied Biology**, v. 107, p. 239–252, 1985.

FLECK, N. G. et al. Interferência de plantas concorrentes em arroz irrigado modificada por métodos culturais. **Planta daninha**, v. 22, n. 1, p. 19-28, 2004.

GALON, L. et al. Estimativa das perdas de produtividade de grãos em cultivares de arroz (*Oryza sativa*) pela interferência do capim-arroz (*Echinochloa* spp.). **Planta daninha**, v. 25, n. 4, p. 697-707, 2007a.

GALON, L. et al. Níveis de dano econômico para decisão de controle de capim-arroz (*Echinochloa* spp.) em arroz irrigado (*Oryza sativa*). **Planta daninha**, v. 25, n. 4, p. 709-718, 2007b.

GALON, L. et al. Competição entre plantas de arroz e biótipos de capim-arroz (*Echinochloa* spp.) resistente e suscetível ao quinclorac. **Planta daninha**, v. 27, n. 4, p. 701-709, 2009.

HARVEY, R. G.; WAGNER, C. R. Using estimates of weed pressure to establish crop yield loss equations. **Weed Technol.**, v. 8, n. 1, p. 114-118, 1994.

HE H. B. et al. Separation of Allelopathy from Resource Competition Using Rice/Barnyardgrass Mixed-Cultures. **PLoS ONE**, 2012.

IRGA. **Série Histórica de Produção e Produtividade - RS x BR**. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/>. Acesso em 20 julho 2017.

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

KROPFF, M. J. et al. A two parameter model for prediction of crop loss by weed competition from early observations of relative leaf area of the weeds. **Annals of Applied Biology**, v. 126: p. 329–346, 1995.

LINDQUIST, J.L.; KROPFF, M.J. Application of an ecophysiological model for irrigated rice (*Oryza sativa*) - *Echinochloa* competition. **Weed Science**, v. 44, n. 1, p. 52-56, 1996.

MAMUN, M. A. A. Modelling Rice-Weed Competition in Direct-Seeded Rice Cultivation. **Agricultural Research**, v. 3, Issue 4, p. 346–352, 2014.

MOON, B. C. et al. Prediction of Rice Yield and Economic Thresholds by Some Weeds-Rice Competition in Transplanted Rice Cultivation. **Korean Journal of Weed Science**, v. 31, Issue 3, p. 289-293, 2011.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970.

NORRIS, R. F. et al. Spatial arrangement, density, and competition between barnyardgrass and tomato: I. Crop growth and yield. **Weed Science**, v. 49, n. 1, p. 61-68, 2001.

OLAJUMOKE, B. et al. Competitive ability of cultivated rice against weedy rice biotypes: A review. **Chilean J. Agric. Res**, v. 76, n. 2, p. 243-252, 2016.

PINNSCHMIDT, H. O. et al. Simulation of multiple species pest damage in rice using CERES-rice, **Agricultural Systems**, v. 48, n. 2, p. 193-222, 1995.

RADOSEVICH, S. R. et al. Ecology of weeds and invasive plants: Relationship to agriculture and natural resource management. 3.ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

RIBAS, G. G. et al. Acúmulo de matéria seca e produtividade em híbridos de arroz irrigado simulados com o modelo SimulArroz. **Pesq. agropec. bras.** [online]. v. 51, n. 12, p.1907-1917, 2016.

ROSA, H. T. et al. Simulação do crescimento e produtividade de arroz no Rio Grande do Sul pelo modelo SimulArroz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 1159–1165, 2015.

RUBIN, R. S. et al. Habilidade competitiva relativa de arroz irrigado com arroz-vermelho suscetível ou resistente ao herbicida imazapyr + imazapic. **Arq. Inst. Biol.** [online], v. 81, n. 2, p. 173-179, 2014.

SAMBORANHA, F. K. et al. Modelagem matemática do desenvolvimento foliar em mandioca. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 815-824, 2013.

SILVA, M. R. da et al. Modelagem numérica para previsão de safra de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesq. agropec. bras.**, v. 51, n. 7, p. 791-800, 2016.

SOSBAI [Sociedade Sul Brasileira de Arroz Irrigado]. Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Bento Gonçalves, 200 p. 2016.

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

STRECK, N. A. et al. Modelagem da emissão de folhas em arroz cultivado e em arroz vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 5, p. 559-567, 2008.

STRECK, N. A. 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: SOSBAI, 2013, p. 1618-1627.

SWINTON, S. M.; LYFORD, C. P. et al. A test for choice between hyperbolic and sigmoidal models of crop yield response to weed density. **J. Agric. Biol. Environ. Statistics**, v. 44, n. 1, p. 97-106, 1996.

TIRONI, S. P. et al. Habilidade competitiva de plantas de arroz com biótipos de capim-arroz resistente ou suscetível ao quinclorac. **Planta daninha**, v. 27, n. 2, p. 257-263, 2009.

VAN ITTERSUM, M. K.; RABBINGE R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input output combinations. **Field Crops Res**, v. 52, p. 197-208, 1997.

VAN ITTERSUM M.K. et al. On approaches and applications of the Wageningen crop models. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 201-234, 2003

VILLA, S. C. C. et al. Arroz tolerante a imidazolinonas: controle do arroz-vermelho, fluxo gênico e efeito residual do herbicida em culturas sucessoras não-tolerantes. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 761-768, 2006.

WALTER, L. C. et al. Adaptação e avaliação do modelo infocrop para simulação do rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 3, 2012.

WEAVER, S. E. Simulation of crop-weed competition: Models and their applications. **Phytoprotection**, 1996.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, p. 8995-9005, 1985.