

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

**FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO DE TERRAS BAIXAS  
CONTENDO IMIDAZOLINONAS**

**TESE DE DOUTORADO**

**Kelen Müller Souto**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**

**FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO DE TERRAS BAIXAS  
CONTENDO IMIDAZOLINONAS**

**Kelen Müller Souto**

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

**Orientador: Sérgio Luiz de Oliveira Machado**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**

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

Müller Souto, Kelen  
FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO DE TERRAS BAIXAS CONTENDO  
IMIDAZOLINONAS / Kelen Müller Souto.-2014.  
106 p. ; 30cm

Orientador: Sérgio Luiz de Oliveira Machado  
Coorientadores: Enio Marchesan, Luis Antonio Avila  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Agronomia, RS, 2014

1. Arroz irrigado 2. Contaminação ambiental 3.  
Fitorremediação 4. Imidazolinonas. I. de Oliveira  
Machado, Sérgio Luiz II. Marchesan, Enio III. Avila,  
Luis Antonio IV. Título.

---

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a **Kelen Müller Souto**. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: kelenmuller85@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

**FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO DE TERRAS BAIXAS CONTENDO  
IMIDAZOLINONAS**

elaborado por  
**Kelen Müller Souto**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Sérgio Luiz de Oliveira Machado, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

**Luis Antonio de Avila, Ph.D. (UFPel)**

**Cláudia das Neves Costa, Dra. (UFSM)**

**Alexandre Swarowsky, Ph.D. (UNIFRA)**

**Fabiane Pinto Lamego, Dra. (UFPel)**

Santa Maria, 25 de fevereiro de 2014.

## **DEDICO**

À minha amada avó **Emma Viegas Müller** (*in memoriam*), pelos inúmeros valores, pelo exemplo de ser humano e a certeza de que o trabalho, a honestidade e a humildade são os grandes impulsionadores para a busca de um futuro melhor. Saudade...

## **OFEREÇO**

À minha mãe, **Enilda Teresinha Viegas Müller**, por todo amor, compreensão, confiança, força e tempo que sempre dedicou a mim.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, o qual agradeço por todas oportunidades recebidas e por colocar pessoas boas no meu caminho, as quais sem elas não chegaria onde estou.

À minha mãe e minha avó (*in memoriam*), que me incentivaram desde o princípio e conduziram toda a minha formação com carinho, compreensão e apoio.

À toda a minha família, mas em especial a Andréa, Yasmin e Yago, por cuidarem da mãe, permitindo que eu passasse por essa fase da minha vida com maior tranquilidade.

Ao professor e principalmente amigo, Luis Antonio de Avila pelos ensinamentos, sinceridade e incontestável dedicação em minha orientação durante todo o curso de Pós-Graduação.

Ao Professor Sérgio Luiz de Oliveira Machado, pelo voto de confiança e pela oportunidade, pelas conversas, pelo exemplo profissional, orientação e principalmente, pela sua paciência.

Ao Professor Enio Marchesan, por me receber com profissionalismo e compreensão.

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia pela minha formação de qualidade, oportunidade de realização do curso e disponibilização da sua estrutura para a condução de meu trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Aos professores Nelson Kruse e Rodrigo Josemar Seminotti Jacques pelo convívio e grande aprendizado.

Aos **irmãos de coração** do Laboratório de Pesquisa de Controle de Plantas Daninhas, André Guareschi, Cezar Coradini, Fernando Piccinini, Geovane Reimche, Joanei Cechin, Keli Souza da Silva, Leonardo Urban, Liange Reck e Marcos Vinícius Palma Alves, pela grande amizade, ensinamentos, companheirismo e apoio nos trabalhos de pesquisa. E em especial, mas muito especial mesmo, à Andrisa Balbinot pela dedicação exclusiva ao trabalho de pesquisa e pela grande amizade e compreensão.

Aos colegas de Pós-graduação do Laboratório de Dinâmica de Herbicidas, da Universidade Federal de Pelotas, Bibiana Silveira de Moraes, Guilherme Cassol, Carla Zemolin, João Paulo Refatti, Marcos Marchesan, Mariah Marques, Fernando Martini, Ananda Scherner, Fábio Schreiber, Thaís D'Ávila, Diogo Balbé, Diogo Moura, Leonard Piveta, Alfran Martini e Marlon Bastiani, por terem me recebido como membro do grupo e pela prestatividade, amizade e ensinamentos. A todos os estagiários desse grupo, que de uma

forma ou outra auxiliaram na condução dos experimentos (sem vocês eu não teria conseguido... MUITO OBRIGADA). Em especial aos estagiários Luciano Cassol e Andrey Pivetta, pela incansável dedicação ao meu trabalho de pesquisa.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Arroz Irrigado, Gustavo Teló e Dâmaris Hansel, pelo apoio e amizade incondicional.

Aos funcionários do Departamento de Fitotecnia: João Colpo e em especial, ao ex-funcionário Gilmar, pela prestatividade e amizade.

Aos professores e funcionários do Departamento de Defesa Fitossanitária, pelo convívio diário e amizade, em especial ao Fernando Saccol Gnocato, grande amigo e nosso “Professor Pardal”.

Por fim a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o êxito desse trabalho, **MUITO OBRIGADA.**

## **EPÍGRAFE**

**“Para nós os grandes homens não são aqueles que resolveram os problemas, mas aqueles que os descobriram”**

*Albert Schweitzer*

## RESUMO

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

### **FITORREMEDIÇÃO DE SOLO DE TERRAS BAIXAS CONTENDO IMIDAZOLINONAS**

AUTOR: KELEN MÜLLER SOUTO  
ORIENTADOR: SÉRGIO LUIZ DE OLIVEIRA MACHADO  
Santa Maria, RS, 25 de FEVEREIRO de 2014

Herbicidas que apresentam atividade residual no solo, impedindo ou reduzindo a emergência de plantas daninhas, são insumos de grande importância para garantir a produtividade esperada das culturas comerciais. Todavia, esse residual pode comprometer as culturas subsequentes que não possuem tolerância ao princípio ativo desses produtos e quanto mais tempo permanecerem no solo, maior será a probabilidade de sofrerem lixiviação, contaminando o ambiente. Em vista do exposto, essa tese teve por objetivo avaliar a possibilidade de descontaminação de solo de cultivo de arroz irrigado com residual dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, através da utilização de plantas potencialmente fitorremediadoras. O presente estudo foi dividido em quatro capítulos: 1) Fitorremediação em vasos contendo solo de cultivo de arroz irrigado com residual de imidazolinonas; 2) Degradação de imidazolinonas em solo rizosférico de plantas fitorremediadoras; 3) Eficiência de *Vicia sativa* na remediação de solo contaminado com imazapir + imazapique em função do tipo de solo e 4) Uso de plantas na redução do residual das misturas formuladas de imazetapir + imazapique e imazapir + imazapique em codição de campo. Soja, ervilhaca, feijão-de-porco e, consórcio de trevo branco e cornichão, são plantas que possuem capacidade de remediar solo contaminado com os herbicidas pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas. A degradação dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir é maior em solo vegetado do que em solo sem vegetação, demonstrando efeito fitoestimulador dessas espécies vegetais sob a microbiota existente na rizosfera das mesmas. A ervilhaca é fitorremediadora de solo contaminado com a mistura formulada de imazapir + imazapique, mesmo em diferentes tipos de solo. O herbicida imazapir + imazapique causa maior efeito residual que imazetapir + imazapique em condições de campo.

**Palavras-chave:** Arroz irrigado. Contaminação ambiental. Fitorremediação. Imidazolinonas.

## ABSTRACT

Thesis Doctorate  
Graduate Program in Agronomy  
Universidade Federal de Santa Maria

### PHYTOREMEDIATION OF SOIL LAND CONTAINING LOW IMIDAZOLINONE

AUTHOR: KELEN MÜLLER SOUTO  
ADVISOR: SÉRGIO LUIZ DE OLIVEIRA MACHADO  
Santa Maria, RS, February 25<sup>th</sup>, 2014

Herbicides that present residual effect in the soil, preventing or reducing the emergence of weeds, are inputs of great importance to ensure the expected productivity of commercial crops. However, this residual can prejudice the next crops that do not have the tolerance to the active ingredient of these products and the longer they remain in the soil, the probability of leaching is higher, contaminating the environment. In view of the above, this doctorate thesis had as a goal evaluate the possibility of descontamination of rice cultivating soils with residual of the herbicides imazethapyr, imazapic and imazapyr, by the use of potential phytoremediator plants. The present study was divided in four chapters: 1) Phytoremediation in pots containing soil of irrigated rice with residual imidazolinone; 2) Imidazolinone degradation in rhizosphere of plants phytoremediator; 3) Efficiency of *Vicia sativa* in the remediation of soil contaminated with imazapyr + imazapic depending on soil type and 4) Use of plants in reducing the residual formulated mixtures of imazethapyr + imazapic and imazapyr + imazapic in codição field. Soybean, vetch, jack bean and consortium of white clover and birdsfoot trefoil, are plants that have the ability to remediate soil contaminated with herbicides belonging to the chemical group of the imidazolinone. The degradation of the herbicide imazethapyr, imazapyr and imazapic, is higher in vegetated soil than in bare soil, demonstrating phytoestimulator effect of these plant species under the existing microbiota in the rhizosphere of the same. Vetch is phytoremediation of soil contaminated with formulated mixture of imazapyr + imazapic even in different soil types. The herbicide imazapyr + imazapic causes greater residual effect that imazethapyr + imazapic, under field condition. .

**Key words:** Rice. Environment contamination. Phytoremediation. Imidazolinone.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Moléculas das imidazolinonas registradas para o uso na cultura do arroz irrigado no sistema Clearfield®. Anel piridínico representado pela cor cinza claro, anel imidazol por cinza escuro e radicais pela cor preta. .... 17

### ARTIGO 1

- Figura 1 - Redução da estatura, sintomas de fitointoxicação e redução da massa seca das plantas de arroz não Clearfield® (cultivar IRGA 417) cultivadas anteriormente as culturas estivais (A, C e E; respectivamente) e hibernais (B, D e F; respectivamente), em solo contaminado com cinco doses da mistura formulada de imazetapir + imazapique (75+25 g e.a. L<sup>-1</sup>), avaliada aos 21 dias após a emergência (DAE) em relação a testemunha (sem cultivo). Santa Maria, RS, 2013. .... 30

### ARTIGO 2

- Figura 1 - Concentração dos herbicidas imazetapir (A e B), imazapique (C e D) e imazapir (E e F) nos solos rizosféricos das espécies estivais (A, D e E) e hibernais (B, C e F), após 63 dias de incubação. Santa Maria, RS, 2013. .... 55

### ARTIGO 3

- Figura 1 - Mapa das regiões arrozeiras do Estado do Rio Grande do Sul com a identificação dos locais de coleta de solo (Alegrete, Palmares do Sul, Dom Pedrito e Santa Maria). .... 63

- Figura 2 - Estatura das plantas bioindicadoras (IRGA 417) semeadas em sucessão a cultura da ervilhaca, em diferentes solos (Santa Maria, Palmares do Sul, Alegrete e Dom Pedrito) contaminados com cinco doses da mistura formulada de imazapir+imazapique (525+175 g e.a. L<sup>-1</sup>), avaliada aos 21 dias após a emergência (DAE) em relação à testemunha (sem cultivo). Capão do Leão, RS, 2013. .... 67

- Figura 3 - Estatura das plantas (A), sintomas de fitointoxicação (B), avaliada aos 21 dias após a emergência (DAE) e redução da massa seca da parte aérea (C), avaliada aos 28 DAE, das plantas de arroz (bioindicadora) semeadas em sucessão a cultura da ervilhaca, quando essa foi cultivada em solos com diferentes características granulométricas, química e mineralógica. Capão do Leão, RS, 2013. .... 71

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO 1

- Tabela 1 - Doses recomendadas, seus respectivos equivalentes/ácido das formulações e as doses do Fator B, admitindo-se a aplicação de 150 g de e.a./ha para cada herbicida. .... 28
- Tabela 2 - Parâmetros das equações de regressão sigmoidal do tipo logístico, valores  $Gr_{50}$  (% da dose de referencia) com intervalos de confiança (IC) apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada em sucessão as espécies estivais e hibernais testadas, em resposta ao solo com residual de imazetapir + imazapique. Santa Maria, RS, 2013. .... 31
- Tabela 3 - Parâmetros das equações de regressão sigmoidal do tipo logístico, valores  $Gr_{50}$  (% da dose de referencia) com intervalos de confiança (IC) apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada em sucessão as espécies estivais e hibernais testadas, em resposta ao solo com residual de imazapir + imazapique. Santa Maria, RS, 2013. .... 33
- Tabela 4 - Parâmetros das equações de regressão sigmoidal do tipo logístico, valores  $Gr_{50}$  (% da dose de referencia) com intervalos de confiança (IC) apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada em sucessão as espécies estivais e hibernais testadas, em resposta ao solo com residual de imazetapir. Santa Maria, RS, 2013. .... 35
- Tabela 5 - Parâmetros das equações de regressão sigmoidal do tipo logístico, valores  $Gr_{50}$  (% da dose de referencia) com intervalos de confiança (IC) apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada em sucessão as espécies estivais e hibernais testadas, em resposta ao solo com residual de imazetapir. Santa Maria, RS, 2013. .... 37

### ARTIGO 2

- Tabela 1 - Total acumulado de  $CO_2$ , emitido do solo rizosférico de plantas estivais e hibernais em resposta a doses de imazetapir após 63 dias de incubação. Santa Maria, RS, 2013. .... 49
- Tabela 2 - Total acumulado de  $CO_2$ , emitido do solo rizosférico de plantas estivais e hibernais em resposta a doses de imazapique após 63 dias de incubação. Santa Maria, RS, 2013. .... 51

Tabela 3 - Total acumulado de CO <sub>2</sub> , emitido do solo rizosférico de plantas estivais e hibernais em resposta a doses de imazapir após 63 dias de incubação. Santa Maria, RS, 2013. ....	53
--	----

### **ARTIGO 3**

Tabela 1 - Local de coleta (cidade), classificação do solo, teores (%) de areia, silte e argila, matéria orgânica (%) e pH em água para os solos de Alegrete (ALE), Dom Pedrito (DP), Santa Maria (SM) e Palmares do Sul (PAL).....	64
---	----

Tabela 2 - Parâmetros das equações de regressão sigmoidal do tipo logístico, para a variável estatura de plantas, apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada 70 dias após a aplicação de imazapir + imazapique, em resposta ao cultivo de ervilhaca como planta remediadora. Capão do Leão, RS, 2013. ....	68
--	----

Tabela 3 - Parâmetros das equações de regressão sigmoidal do tipo logístico, para a variável fitointoxicação, apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada 70 dias após a aplicação de imazapir + imazapique, em resposta ao cultivo de ervilhaca como planta remediadora. Capão do Leão, RS, 2013. ....	69
--	----

Tabela 4 - Parâmetros das equações de regressão sigmoidal do tipo logístico, para a variável massa seca da parte aérea apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada 70 dias após a aplicação de imazapir + imazapique, em resposta ao cultivo de ervilhaca como planta remediadora. Capão do Leão, 2013.....	69
--	----

### **ARTIGO 4**

Tabela 1 - Visualização da distribuição temporal dos experimentos I e II. Capão do Leão, RS, 2013. ....	84
---	----

Tabela 2 - Fitointoxicação e massa da matéria seca, em relação à testemunha, das plantas hibernais semeadas em sucessão a cultura do arroz irrigado, em solo contaminado com os herbicidas imazetapir + imazapique (H1) e imazapir + imazapique (H2), mais testemunha. Capão do Leão, RS, 2013. ....	85
--	----

Tabela 3 - Fitointoxicação, número de plantas por metro linear e produtividade de grãos de plantas de arroz (cultivar IRGA 417), semeadas em sucessão as plantas hibernais potencialmente fitorremediadoras, em solo contaminado com os herbicidas imazetapir + imazapique (H1) e imazapir + imazapique (H2), mais testemunha. Capão do Leão, RS, 2013. ....	89
Tabela 4 - Estatura e massa seca da parte aérea de plantas de arroz (cultivar IRGA 417), semeadas em sucessão as plantas hibernais potencialmente fitorremediadoras, em solo contaminado com os herbicidas imazetapir + imazapique (H1) e imazapir + imazapique (H2), mais testemunha. Capão do Leão, RS, 2013. ....	90
Tabela 5 – Fitointoxicação e massa da matéria seca, em relação à testemunha, das plantas estivais semeadas em sucessão a cultura do arroz irrigado, em solo contaminado com os herbicidas imazetapir + imazapique (H1) e imazapir + imazapique (H2), mais testemunha. Capão do Leão, RS, 2013. ....	91
Tabela 6 – Fitointoxicação, estatura de plantas e massa seca da parte aérea de plantas de azevém, semeadas em sucessão as plantas estivais potencialmente fitorremediadoras, em solo contaminado com os herbicidas imazetapir + imazapique (H1) e imazapir + imazapique (H2), mais testemunha. Capão do Leão, RS, 2013. ....	94

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>ARTIGO 1 - FITORREMEDIAÇÃO EM VASOS CONTENDO SOLO DE CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO COM RESIDUAL DE IMIDAZOLINONAS.....</b>	<b>23</b>
Resumo .....	23
Abstract .....	23
Introdução .....	24
Material e Métodos.....	26
Resultado e Discussão.....	28
Conclusão .....	39
Referências Bibliográficas .....	40
<b>ARTIGO 2 - DEGRADAÇÃO DE IMIDAZOLINONAS EM SOLO RIZOSFÉRICO DE PLANTAS FITORREMEIADORAS .....</b>	<b>43</b>
Resumo .....	43
Abstract .....	43
Introdução .....	44
Material e Métodos.....	45
Resultado e Discussão.....	47
Conclusão .....	56
Referências Bibliográficas .....	57
<b>ARTIGO 3 - EFICIÊNCIA DE <i>Vicia sativa</i> NA REMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM IMAZAPIR + IMAZAPIQUE EM FUNÇÃO DO TIPO DE SOLO .....</b>	<b>60</b>
Resumo .....	60
Abstract .....	61
Introdução .....	61
Material e Métodos.....	63
Resultado e Discussão.....	66
Conclusão .....	73
Referências Bibliográficas .....	73
<b>ARTIGO 4 - USO DE ESPÉCIES VEGETAIS NA REDUÇÃO DO RESIDUAL DAS MISTURAS FORMULADAS DE IMAZETAPIR+IMAZAPIQUE E IMAZAPIQUE+IMAZAPIR.....</b>	<b>78</b>
Resumo .....	78
Abstract .....	79
Introdução .....	79
Material e Métodos.....	81
Resultado e Discussão.....	84
Conclusão .....	96
Referências Bibliográficas .....	96
<b>DISCUSSÃO GERAL .....</b>	<b>100</b>
<b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>102</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>103</b>

## INTRODUÇÃO

Para a obtenção de elevadas produtividades nas culturas agrícolas, é necessário, entre outros fatores, um manejo adequado para o controle de plantas daninhas, o qual pode ser realizado basicamente com a utilização de herbicidas. Hoje, a grande maioria dos herbicidas utilizados são moléculas orgânicas obtidas por rotas sintéticas, denominados xenobióticos.

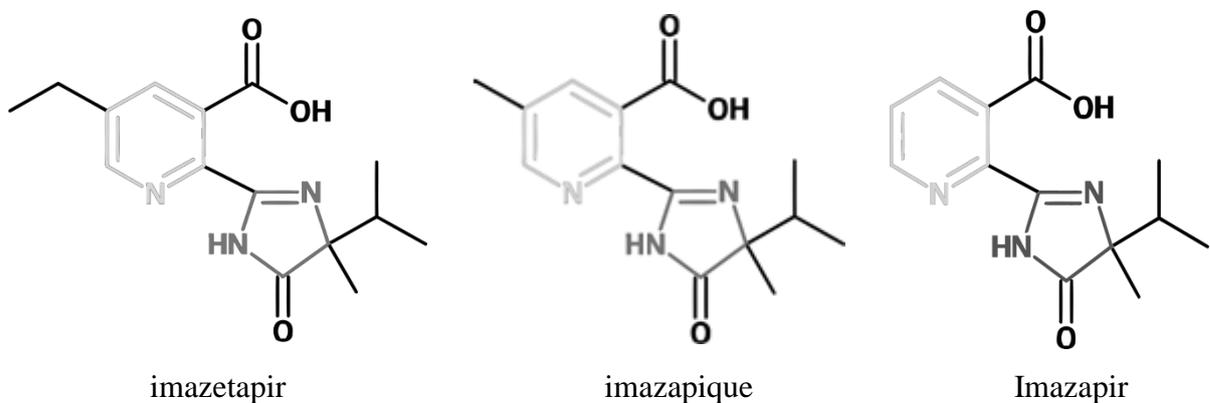
O solo é um dos destinos dos produtos químicos usados na agricultura, sejam eles aplicados diretamente neste ou na parte aérea das plantas. Ao entrarem em contato com o solo, os herbicidas estão sujeitos a processos físico-químicos que regulam seu destino no ambiente. A maioria desses compostos é transformada, predominantemente, por processos biológicos através de enzimas existentes em animais, plantas e microrganismos, e essas transformações geralmente resultam na degradação da estrutura molecular do composto em formas menos complexas (TAUK, 1990). No entanto, se as condições ambientais forem desfavoráveis para a degradação, as moléculas do pesticida podem permanecer no solo, dando origem ao denominado efeito residual (*carryover*), o que implica em problemas quando se trata da sucessão/rotação de espécies sensíveis a esses compostos (DAN et al., 2011).

Herbicidas pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas são exemplos de compostos que possuem alta persistência no solo, sendo que essa pode atingir até 540 dias após sua aplicação (PINTO et al., 2009), característica que pode ser desejável ou não. A persistência é positiva quando resulta em período suficiente para manter a cultura livre da competição de plantas daninhas (GAZZIERO et al., 1997). Todavia, é indesejável quando resulta em injúrias para culturas em sucessão ou rotação ou mesmo pode causar aumento de riscos de contaminação ambiental (SOUSA et al., 2012).

Imidazolinonas são herbicidas usualmente utilizados em áreas de várzea cultivadas sob o Sistema Clearfield<sup>®</sup>, considerado uma das principais alternativas no controle do arroz vermelho (STEELE et al., 2002), planta daninha responsável por perdas superiores a 20% no rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado (MARCHEZAN et al., 2011). Esse sistema de cultivo combina a utilização de herbicidas do grupo das imidazolinonas e cultivares de arroz resistente ao princípio ativo desses compostos (CROUGHAN, 1998). As moléculas de herbicidas atualmente registradas para esse fim são imazetapir, imazapir e imazapique (Figura 1), utilizadas isoladamente ou em misturas formuladas.

As imidazolinonas são uma das cinco famílias de herbicidas que inibem a enzima acetolactato sintase (ALS). A ALS é uma enzima chave na via responsável pela biossíntese

dos aminoácidos de cadeia ramificada (valina, leucina e isoleucina) em plantas (SHANER e SINGH, 1997). O efeito tóxico desses herbicidas ocorre devido à deficiência desses aminoácidos, o que ocasiona uma diminuição da síntese de proteínas e DNA. Em decorrência disso, ocorre a inibição da divisão celular e redução do transporte de assimilados até os pontos de crescimento, o que leva a uma redução do crescimento da planta (RODRIGUES, ALMEIDA, 2011). Essa família de herbicidas foi descoberta na década de 1970 e apresenta em comum um anel imidazol, diferenciando-se entre si devido à presença de diferentes radicais ligados aos anéis piridínicos e imidazóis (SENSEMAN, 2007) (Figura 1).



**Figura 1** – Moléculas das imidazolinonas registradas para o uso na cultura do arroz irrigado no sistema Clearfield<sup>®</sup>. Anel piridínico representado pela cor cinza claro, anel imidazol por cinza escuro e radicais pela cor preta. Fonte: Senseman (2007).

Segundo as recomendações técnicas (SOSBAI, 2012), os herbicidas recomendados para utilização no sistema Clearfield<sup>®</sup> são as misturas formuladas de imazetapir+imazapique (75 + 25 g e.a. L<sup>-1</sup>) em aplicação sequencial em pré-emergência e em pós-emergência precoce, totalizando 1,5 L/ha, quando as plantas de arroz-vermelho encontram-se no estágio de três a quatro folhas (estádios V3-V4); e imazapir+imazapique (525 + 175 g e.a. kg<sup>-1</sup>) na dose de 140 g/ha, em pós-emergência precoce, quando as plantas de arroz-vermelho encontrarem-se no estágio de três a quatro folhas (estádios V3-V4).

O herbicida imazetapir possui pKas de 2,1 e 3,9; o imazapique de 2,0; 3,9 e 11,1 e o imazapir de 1,9; 3,6 e 11,1; o que os caracteriza como ácidos fracos (SENSEMAN, 2007) tendo seu comportamento influenciado pelo meio. Esses herbicidas possuem longa persistência no solo, pois apresentam meia-vida de 60-90, 120 e 25-142 dias, respectivamente (RODRIGUES; ALMEIDA, 2011). Em solos com pH ácido, argilosos ou com alto teor de

matéria orgânica, esses herbicidas tendem a permanecer adsorvidos ao solo, não estando disponíveis à absorção pelas plantas. Com o aumento da umidade do solo esses herbicidas tornam-se menos adsorvidos (AVILA et al., 2005), assim como com o aumento do pH devido a auto-calagem do solo em condições de anaerobiose (STOUGAARD et al., 1990), e, portanto, mais disponíveis para as plantas e passíveis de sofrerem lixiviação (INOUE et al., 2007).

A utilização de espécies não tolerantes pode ser comprometida caso o intervalo entre a aplicação desses herbicidas e a semeadura da cultura em rotação não seja observado (WILLIAMS et al., 2002). Nos EUA, onde a tecnologia Clearfield® foi desenvolvida, recomenda-se a utilização do herbicida imazetapir por dois anos consecutivos, deixando o solo em repouso por, no mínimo, um ano. Apesar da orientação de estudos realizados no Brasil para que seja respeitada a mesma recomendação, muitos produtores acabam usando a tecnologia por mais de dois anos consecutivos. Além disso, deve-se considerar a diversidade de fatores relacionados à velocidade de degradação de um herbicida, o que dificulta estimar o tempo necessário para sua dissipação após a aplicação, uma vez que no ambiente existe um conjunto de condições e de variáveis que podem influenciar na decomposição do produto (SOUSA et al., 2012).

Em vista do exposto, é crescente a preocupação em despoluir áreas contaminadas com herbicidas pertencentes a este grupo químico, e para isto há várias tecnologias biológicas de remediação sendo pesquisadas em todo o mundo. Geralmente, essas tecnologias, conhecidas como Biorremediação, são fundamentadas nas atividades biodegradativas dos microrganismos e plantas, visando incrementar os processos já existentes na natureza (MELO et al., 2011).

Entre os muitos métodos de biorremediação disponíveis, alguns podem ser empregados em grandes extensões de solos contaminados. O nível de contaminação para que haja intervenção, pode ser aquele onde os níveis de resíduos presentes afetam o desenvolvimento de outras culturas agrícolas suscetíveis, ou que estejam além dos níveis aceitáveis estipulados pelos órgãos regulamentadores nacionais e internacionais, tais como a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) e a Environmental Protection Agency (USEPA) (SKLADANY; METTING, 1992).

Dentro dessa abordagem, a fitorremediação aparece como uma alternativa prática, eficiente e de baixo custo (SULMON et al., 2007). Esse processo consiste na descontaminação de solo ou água utilizando-se de plantas e sua microbiota associada (SANTOS et al., 2007) e de amenizantes (corretivos, fertilizantes, matéria orgânica etc.) do solo, além de práticas agronômicas que, aplicadas em conjunto, removem, imobilizam ou

tornam os contaminantes inofensivos ao ecossistema (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). Quando se obtêm uma planta capaz de reduzir a concentração de herbicidas no solo, na prática, o que se conquista é a antecipação da produção de culturas agrícolas de interesse econômico, antes impossibilitadas de serem cultivadas em determinadas áreas (D'ANTONINO et al., 2009).

Vários trabalhos mostram que o cultivo de determinadas espécies vegetais pode descontaminar áreas com a presença de xenobióticos, como os herbicidas com longo efeito residual no solo (BELO et al. 2011; PROCÓPIO et al. 2008, 2009; CARMO et al. 2008a, b; ASSIS et al. 2010 e SOUTO et al. 2013). Comparada com a seleção de plantas para a descontaminação de metais tóxicos, são complexas as limitações encontradas na seleção de espécies vegetais para a remediação de herbicidas, pois estes apresentam grande diversidade molecular diante das constantes transformações a que estão sujeitos (PIRES et al., 2003). Além disso, há o inconveniente de o contaminante (herbicida) ser desenvolvido para o controle do descontaminante, no caso, as plantas (SANTOS et al., 2006).

Tendo em vista que nem todas as espécies vegetais desenvolvem-se em ambientes contaminados, o primeiro passo é a identificação das espécies que, além de apropriadas às condições locais, sejam tolerantes ao contaminante (MARQUES et al., 2011), possuindo a habilidade de removê-lo, extraí-lo e/ou mineralizá-lo no ambiente (PROCÓPIO et al., 2009). A eficiência do processo de fitorremediação é medida pela redução do contaminante no solo a concentrações abaixo dos valores de referência e tempo requeridos (CUNNINGHAM et al., 1996).

A fitorremediação pode ser classificada, de acordo com o destino do contaminante, em processos de degradação, extração e contenção. A degradação engloba a fitodegradação e a rizodegradação e/ou fitoestimulação. Os mecanismos de extração são a fitoextração, fitovolatilização, fitoacumulação e a rizofiltração; e o processo denominado contenção engloba os mecanismos de fitoestabilização, controle hidráulico e capas vegetativas. Todos esses processos não são exclusivos e podem ocorrer simultaneamente, podendo acontecer isolados ou conjuntamente, envolvendo fatores edafoclimáticos e, principalmente, a interação entre a planta e os microrganismos a ela associados (CUNNINGHAM et al., 1996).

Pelo mecanismo de fitoextração tem-se a absorção do herbicida pelas raízes, o qual é armazenado na própria raiz ou transportado e acumulado na parte aérea (fitoacumulação) (VOSE et al., 2000). Para a implantação da técnica são utilizadas plantas específicas chamadas “hiperacumuladoras”, que acumulam nos seus tecidos grandes quantidades de contaminantes encontrados no solo ou na água (FERNANDEZ; ALCANTARA, 2009).

A rizofiltração é um processo de extração aplicada a ambientes aquáticos. Nesse processo, as plantas podem ser mantidas em sistemas hidropônicos, através dos quais a água contaminada pelo herbicida passa, podendo ser absorvida pelas raízes, que por sua vez concentram ou degradam o produto (RICE et al., 1997). Diferentemente, se o contaminante for absorvido e convertido em forma volátil, sendo este liberado na atmosfera, caracteriza a fitovolatilização (SANTOS et al., 2004).

A contenção dos contaminantes pode acontecer em função da característica química do solo e da atividade microbológica característica da rizosfera, além de alterações no solo e no contaminante (USEPA, 2000). Como exemplo, tem-se a alteração do pH ocasionada pelo exudato das plantas e pela produção de CO<sub>2</sub>, o que altera a solubilidade e mobilidade dos metais ou impacta a dissociação de compostos orgânicos. Por se tratar de uma técnica que apenas retém o contaminante, o seu uso muitas vezes pode ter um caráter provisório, até que outra forma de tratamento faça efetivamente a sua retirada (VIMIEIRO; SILVA, 2007). Se o poluente permanecer imobilizado na planta ou humificado na rizosfera de maneira indisponível aos microorganismos (SANTOS et al., 2004), bem como o uso das plantas e de suas raízes para prevenção da migração dos contaminantes feita pelo vento, erosão, lixiviação e dispersão no solo, estará caracterizada a fitoestabilização (USEPA, 2000).

Outra forma de contenção, o controle hidráulico, faz uso das plantas (árvores) para extração e consumo da água subterrânea, objetivando impedir a migração dos contaminantes (USEPA, 1999); já as capas vegetativas são coberturas vegetais, constituídas de capins ou árvores, feitas sobre aterros sanitários, para minimizar a infiltração de água da chuva, conter a disseminação dos resíduos poluentes, e evitar que o lixo fique a céu aberto (ANSELMO; JONES, 2005).

Pelo mecanismo de degradação tem-se a capacidade de metabolização do herbicida a um composto não-tóxico (ou menos tóxico) às culturas e ao ambiente, tendo como agente remediador a planta (VIMIEIRO; SILVA, 2007). Por esse processo, denominado fitodegradação, os herbicidas são degradados ou mineralizados dentro das células vegetais por enzimas específicas (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). A vantagem dessa técnica é que a mesma pode ocorrer em locais onde a biodegradação não pode, como por exemplo, quando a concentração do contaminante é elevada e tóxica aos microrganismos (VIMIEIRO; SILVA, 2007). Como desvantagens, D'Antonino et al. (2009), citam a possibilidade da formação de produtos tóxicos intermediários no processo de quebra dos contaminantes, bem como a difícil confirmação da destruição do contaminante durante a atividade metabólica da planta.

Outros mecanismos de degradação de poluentes são a rizodegradação, que ocorre quando a planta, considerada fitorremediadora, libera exudados capazes de degradar o contaminante (SANTOS et al., 2006); e a fitoestimulação que é apresentada juntamente com a rizodegradação devido à dificuldade de tratar esses dois processos separadamente, na qual há o estímulo à atividade microbiana, promovido pela liberação de exsudatos radiculares, que atuam degradando o composto no solo, o que caracteriza, em algumas plantas, a aptidão rizosférica para a biorremediação de compostos tóxicos (CUNNINGHAM et al., 1996). A fitoestimulação utiliza as raízes em crescimento (extremidades e ramificações laterais) para promover a proliferação de microrganismos degradadores na rizosfera, que usam os metabólitos exsudados da planta como fonte de carbono e energia. Além disso, as plantas podem secretar, elas próprias, enzimas biodegradativas.

Os principais mecanismos atuantes na fitorremediação de agrotóxicos orgânicos não clorados e herbicidas são a fitoestimulação e/ou rizodegradação e, em menor escala, a fitodegradação (D'ANTONINO et al., 2009). A fitorremediação por meio desses mecanismos principais tem despertado interesse, em razão das elevadas taxas de remediação obtidas com a utilização de plantas que, comprovadamente, aumentam a degradação microbiana de compostos orgânicos danosos no solo (ANDERSON et al., 1994), e das diferenças significativas observadas, quando são comparados solos vegetados e não vegetados (ARTHUR et al., 2000).

Áreas contendo plantas apresentam uma biodegradabilidade mais acelerada e completa se comparada com áreas não plantadas devido à: 1) expansão da população ativa dos microrganismos no solo (rizosfera) que se utilizam da fração “exudata” das raízes como fonte de alimento; 2) a rizodeposição também estimula transformações cometabólicas, assim sendo, muitos contaminantes são degradados via estimulação da microbiota pela presença do exudato e 3) algumas plantas produzem enzimas que transformam metabolicamente os contaminantes orgânicos, contribuindo para sua oxidação mais rápida pelos microrganismos presentes no solo (CUNNINGHAM et al., 1996).

A técnica da fitorremediação não é aplicável universalmente nem é um sistema perfeito. Ela apresenta muitos aspectos positivos, mas também existem inconvenientes. As limitações da fitorremediação de compostos orgânicos em geral e de agrotóxicos, relatadas por Cunningham et al. (1996) são: dificuldade na seleção de plantas para fitorremediação; o tempo requerido para obtenção de uma despoluição satisfatória pode ser longo; o contaminante deve estar dentro da zona de alcance do sistema radicular; elevados níveis do contaminante no solo podem impedir a introdução de plantas no sítio contaminado; pode

apresentar potencial de contaminação da cadeia alimentar; existe a possibilidade de a planta fitorremediadora tornar-se planta daninha; e melhoria nas condições do solo pode ser requerida, incluindo a quebração do contaminante para facilitar sua absorção pelas plantas, devido à quebra de pontes de ligação com partículas do solo.

O mercado de tecnologias ambientais disponível hoje é bastante amplo, sendo que uma atenção maior tem sido dispensada aos tratamentos de remediações de solos e águas subterrâneas. Os resultados obtidos até agora são, entretanto, ainda incipientes para a utilização de plantas na remediação de herbicidas. Informações como densidade populacional ideal, tempo de cultivo necessário para satisfatória descontaminação do solo, comportamento fitorremediador sob condições edafoclimáticas diversas e realização de trabalhos em campo, entre outras, são fundamentais para a recomendação segura dessa prática.

Em vista do exposto, essa tese teve por objetivo avaliar a possibilidade de descontaminação de solo de cultivo de arroz irrigado com residual dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, através da utilização de espécies vegetais potencialmente fitorremediadoras. Tendo como hipóteses que existem espécies cultivadas com capacidade de remediar áreas contaminadas com os herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir presentes no solo. Que essas plantas podem ser cultivadas em rotação com genótipos<sup>CL</sup> de arroz irrigado, removendo do solo resíduos dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, permitindo o cultivo posterior de genótipos de arroz não Clearfield ou de outras espécies não tolerantes a estes herbicidas, e que, plantas fitorremediadoras influenciam a atividade microbiana presente na rizosfera das mesmas, culminando na degradação das moléculas dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir.

# ARTIGO 1 - FITORREMEDIAÇÃO EM VASOS CONTENDO SOLO DE CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO COM RESIDUAL DE IMIDAZOLINONAS

## Resumo

A fitorremediação de herbicidas que apresentam persistência significativa no ambiente é uma tecnologia promissora para a agricultura sustentável. Em vista do exposto, esse trabalho teve como objetivo avaliar a capacidade de espécies vegetais na remediação dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, utilizados isolados e em mistura. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre seis espécies vegetais e cinco doses de herbicidas (zero, 25%, 50%, 100% e 200% da dose de referência para cada herbicida estudado). Para a avaliação do potencial fitorremediador dessas espécies foi realizado um bioensaio com arroz irrigado (*Oryza sativa*), cultivar IRGA 417, onde foram avaliadas a estatura, massa seca da parte aérea e sintomas de fitointoxicação. As espécies vegetais, soja (*Glycine max*) e ervilhaca (*Vicia sativa*), são consideradas fitorremediadoras do solo contaminado com os herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, quando presentes em mistura ou isolados. Soja, feijão-deporco, ervilhaca e consórcio de trevo branco e cornichão, são plantas fitorremediadoras de solo de cultivo de arroz irrigado contaminado com os herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, quando presentes em mistura ou isolados. O azevém e o arroz CL não são remediadoras de solo contaminado com herbicidas do grupo químico das imidazolinonas.

**Palavras-chave:** Biorremediação. *Oryza sativa*. Imazetapir. Imazapique. Imazapir.

## Abstract

The phytoremediation of herbicides that present significant persistence in the environment is a promising technology for sustainable agriculture. In view of the exposed, this work aimed to evaluate the efficiency of plant species in the remediation of the herbicides imazethapyr, imazapic, and imazapyr, used isolated or in formulations. The treatments were composed by the combination between six plant species and five herbicide doses: zero, 25%, 50%, 100% and 200% of the reference dose for each studied herbicide. For the evaluation of

the phytoremediating potential of the plant species was performed a bioassay with irrigated rice, cultivar IRGA 417, where plant stature, dry mass of the shoot and phytointoxication symptoms, were evaluated. The plant species soybean (*Glycine max*) and vetch (*Vicia sativa*) are considered high phytoremediator of soil contaminated with the herbicides imazethapyr, imazapic and imazapyr, when present in formulations or isolated. Soybean, jack bean, vetch and consortium of white and birdsfoot trefoil, are plants phytoremediator soil of irrigated rice contaminated with the herbicide imazethapyr, imazapyr and imazapic, when present in a mixture or isolated. Ryegrass and CL rice are not remediating contaminated with herbicides of the imidazolinone chemical group solo.

**Key words:** Bioremediation. *Oryza sativa*. Imazethapyr. Imazapic. Imazapyr.

## Introdução

Os herbicidas do grupo químico das imidazolinonas, que são recomendados para o controle de arroz vermelho na cultura do arroz (*Oryza sativa*) Clearfield<sup>®</sup> (STEELE et al., 2002), são herbicidas que possuem como principal característica a elevada persistência no solo, podendo causar fitointoxicação e redução no rendimento de grãos de culturas semeadas em sucessão/rotação que não sejam tolerantes a esses compostos (VILLA et al., 2006; PINTO et al., 2009; SOUSA et al., 2012). Assim, a utilização de culturas de inverno como pastagem, na rotação lavoura/pecuária, ou a escolha por implementar cultivares de arroz não-tolerante podem ser prejudicadas pela presença desses herbicidas no solo (VILLA et al., 2006).

Para a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul, os herbicidas recomendados para utilização nesse sistema de produção são as misturas formuladas de imazetapir + imazapique (75+25 g e.a. L<sup>-1</sup>); e imazapir + imazapique (525+175 g e.a. kg<sup>-1</sup>) (SOSBAI, 2012). Para esse grupo de herbicidas, pesquisas mostram que sua permanência no solo causa, em arroz não tolerante, menor estande de plantas (VILLA et al., 2006). Danos à cultura do sorgo em rotação com arroz Clearfield<sup>®</sup>, também foram registrados pela presença de resíduos desses herbicidas no solo, ocasionando redução no rendimento biológico, peso de mil grãos e produtividade de grãos (PINTO et al., 2009). Rodrigues e Almeida (2011) recomendam um intervalo de 300 dias entre a aplicação de herbicidas imidazolinonas e a semeadura do milho em rotação. Contudo, esse intervalo poderá ser superior a 1.100 dias, dependendo das

condições climáticas e do solo, para as culturas do milho, tomate, rabanete e pepino (SOUSA et al., 2012).

Buscando alternativas para a utilização de áreas agrícolas com presença de compostos persistentes e fitotóxicos no solo, tem-se dado ênfase para o emprego de espécies vegetais com capacidade de remover e/ou degradar xenobióticos presentes no mesmo (PIRES et al., 2003) e, conseqüentemente diminuir o riscos de fitotoxicidade a culturas sensíveis (*carryover*) e de contaminação ambiental. Trabalhos mostram que o cultivo de determinadas espécies vegetais pode descontaminar áreas com a presença de herbicidas com longo efeito residual no solo, e essas plantas apresentam maneiras específicas para a remoção, imobilização ou transformação de poluentes específicos.

A Fitorremediação (*fito* do grego “planta” e *remediação* do latim “voltar ao que era antes, limpar”), tem como principal mecanismo atuante a fitoestimulação e, em menor escala, a fitodegradação (D’ANTONIO et al., 2009). A fitoestimulação consiste na estimulação da comunidade microbiana do solo apta a biodegradar o contaminante, resultado da produção e liberação de exsudatos radiculares pela espécie vegetal (PROCÓPIO et al., 2009). Já a fitodegradação é a capacidade que a planta possui em metabolizar o contaminante, tornando-o um composto não-tóxico (ou menos tóxico) às culturas e ao ambiente (PIRES et al., 2003).

Diversos trabalhos tem demonstrado a eficiência dessa técnica na descontaminação de solos com residual dos herbicidas tebutiuron, picloram, trifloxysulfuron-sodium, sulfentrazone e a mistura imazetapir+imazapique, empregando-se plantas como *Canavalia ensiformis*, *Stizolobium aterrimum*, *Eleusine coracana*, *Panicum maximum* e *Helianthus annuus* (BELO et al., 2011; PROCÓPIO et al., 2008 e 2009; CARMO et al., 2008a e b; ASSIS et al., 2010; e SOUTO et al., 2013).

Em vista do exposto, objetivou-se nesse trabalho avaliar a capacidade fitorremediadora das culturas estivais feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), soja (*Glycine max*) e arroz Clearfield® (*Oryza sativa* cultivar Puitá INTA CL); e das culturas hibernais, azevém (*Lolium multiflorum*), consórcio de trevo branco (*Trifolium repens*) + cornichão (*Lotus corniculatus*), ervilhaca (*Vicia sativa*), na diminuição do residual dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, isolados e em mistura.

## Material e Métodos

O experimento foi realizado em casa de vegetação, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em dois momentos, de acordo com a estação de cultivo das culturas testadas, nos anos agrícola de 2011/12; tendo sido utilizado como substrato o solo coletado do horizonte A classificado como Planossolo Hidromórfico eutrófico arênico com classe textural franco siltosa (EMBRAPA, 2006), com as seguintes características: pH água (1:1) = 6,2; teor de argila = 200 gKg<sup>-1</sup>, teor de matéria orgânica = 32 gKg<sup>-1</sup>, P = 16,2 mg dm<sup>-3</sup>, K = 180 mg dm<sup>-3</sup>, Ca = 5,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, Mg = 3,2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, Al = 0,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e índice SMP = 6,6.

**Experimento de verão** - O experimento foi realizado nos meses de novembro e dezembro de 2011 e janeiro e fevereiro de 2012, conduzido em blocos ao acaso, em esquema fatorial 4x5x5, com três repetições. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre fatores, sendo o Fator A as culturas: feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), soja (*Glycine max*) e arroz Clearfield® (*Oryza sativa* cultivar Puitá INTA CL); mais um tratamento controle – sem cultivo prévio, o Fator B: os herbicidas imazetapir+imazapique, imazapir+imazapique, imazetapir, imazapique e imazapir; e o Fator C: zero, 25%, 50%, 100% e 200% da dose de referência. Admitiu-se como dose de referência o uso de 150 g de ingrediente ativo ha<sup>-1</sup> para todos os herbicidas (dose baseada na quantidade de ingrediente ativo presente na dosagem recomendada para a aplicação a campo da mistura formulada de imazetapir+imazapique - 1500 ml ha<sup>-1</sup> = 150 g e.a. ha<sup>-1</sup>) (Tabela 1). Totalizando 300 unidades experimentais (vasos) por estação de cultivo.

O experimento foi conduzido em vasos de polietileno com capacidade de 3,6 dm<sup>3</sup>. O solo, destorroado e peneirado, foi acondicionado nos vasos onde recebeu a aplicação dos herbicidas nas doses descritas anteriormente, 48 horas antes da semeadura das culturas, utilizando-se pipetador de precisão. Após a aplicação, adicionou-se água em volume suficiente para que o solo atingisse sua capacidade de campo, permitindo assim a distribuição homogênea do herbicida em toda a unidade experimental. As unidades experimentais foram mantidas sob irrigação diária durante todo o período de cultivo das espécies estudadas, a fim de conservar a umidade do solo em torno de 80% da capacidade de campo.

Transcorridos 60 dias após a emergência, as plantas foram cortadas na altura do coleto, não tendo sido efetuada a retirada das raízes do solo. Após sete dias, foi realizada a semeadura da cultivar de arroz não tolerante ao princípio ativo do herbicida utilizado, IRGA

417, como planta teste (bioindicadora) (PINTO et al., 2011), com o intuito de avaliar a capacidade fitorremediadora das espécies anteriormente cultivadas em solo contaminado.

As características avaliadas para determinação do potencial fitorremediador das plantas testadas foram fitointoxicação, estatura e massa seca da parte aérea das plantas de arroz (IRGA 417). Essas variáveis biométricas relacionadas ao crescimento das plantas mostram-se eficientes em evidenciar as respostas biológicas esperadas diante da presença de moléculas herbicidas no solo (MADALÃO et al., 2012).

Os sintomas de fitointoxicação foram avaliados visualmente, comparando-se com a testemunha e atribuindo-se notas de acordo com a aparência da parte aérea da planta de arroz, utilizando escala variando de 0 a 100%, para ausência de sintomas até a morte da planta, respectivamente (FRANS et al., 1986). A estatura das plantas foi avaliada medindo-se do solo até a extremidade das folhas mais altas. Ambas as avaliações foram feitas aos 21 dias após emergência (DAE). Aos 28 DAE, as plantas foram cortadas rente ao solo para determinação de massa da matéria seca da parte aérea, obtida por meio de pesagem do material colhido, secado em estufa de circulação forçada ( $70 \pm 2$  °C) por 72 horas.

**Experimento de inverno-** O experimento foi realizado nos meses de julho a novembro de 2012, conduzido em blocos ao acaso, em esquema fatorial 4x5x5, com três repetições. Os tratamentos foram compostos pelo Fator A: as culturas hibernais: azevém (*Lolium multiflorum*), consórcio de trevo branco (*Trifolium repens*) + cornichão (*Lotus corniculatus*), ervilhaca (*Vicia sativa*), e um tratamento sem planta de cobertura (pousio). Os Fatores B e C foram os mesmos descritos no experimento de verão. O experimento foi conduzido exatamente da mesma forma que o experimento de verão e as variáveis avaliadas para a determinação da capacidade fitorremediadora das plantas testadas foram as mesmas citadas e detalhadas na metodologia anterior.

Os dados obtidos foram analisados previamente quanto ao atendimento das pressuposições da análise de variância, normalidade e homocedasticidade, e posteriormente foram submetidos à análise de variância ( $p < 0,05$ ). Utilizou-se o programa SigmaPlot® para confecção das curvas de dose resposta; sendo que as mesmas foram determinadas pelo modelo log-logístico de 3 parâmetros (SEEFELDT et al., 1995), conforme segue:

(1)

$$y = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b\right]}$$

onde:  $y$  = porcentagem de controle;  $x$  = dose do herbicida; e “ $a$ ”,  $x_0$  e “ $b$ ” = parâmetros da equação, sendo que “ $a$ ” é a diferença entre os pontos máximo e mínimo da curva,  $x_0$  é a dose que proporciona 50% de resposta da variável e “ $b$ ” é a declividade da curva.

A partir dos parâmetros das curvas de dose resposta, pode-se calcular o  $GR_{50}$ , ou seja, a dose herbicida que causou 50% na redução da estatura e massa seca da parte aérea e 50% de fitointoxicação nas plantas de arroz não tolerante quando comparadas com a testemunha (sem cultivo prévio). A partir destes cálculos, é possível inferir que quanto maior é o valor de  $GR_{50}$ , maior é o potencial remediador da cultura estudada (SOUTO, 2010).

Tabela 1 – Doses recomendadas, seus respectivos equivalentes/ácido das formulações e as doses do Fator B, admitindo-se a aplicação de 150 g de e.a./ha para cada herbicida.

<b>Herbicidas</b>	<b>Dose recomendada/ha</b>	<b>Equivalente/ácido (g/L)</b>	<b>Dose aplicada admitindo-se 150 g e.a./ha*</b>
Imazetapir+imazapique	1500 ml	75 + 25	1500 ml
Imazapir+imazapique	140 g	525 + 175	214 g
Imazetapir	1000 ml	106	1450 ml
Imazapique	350 g	700	214 g
Imazapir	4000 ml	250	600 ml

\*100% da dose de referência.

## **Resultados e Discussão**

Através da análise das curvas de dose resposta das culturas estudadas constatou-se efeito significativo ( $p \leq 0,05$ ) sobre o residual dos herbicidas testados nas variáveis estatura de plantas, fitointoxicação e massa seca da parte aérea das plantas de arroz não tolerante, IRGA 417, semeadas em sucessão às espécies estivais e hibernais testadas e, também, quando não houve cultivo anterior (testemunha). Para esses tratamentos, o aumento das doses, independente do herbicida, resultou em plantas de menor estatura e massa seca e plantas com maior fitointoxicação, sendo que a intensidade desses efeitos variou com a cultura testada (Figura 1 – ilustrativa).

Como para cada variável dependente analisada destacam-se diferentes culturas, foram avaliados os resultados dos valores de GR<sub>50</sub> para cada uma delas, nos diferentes herbicidas testados, na variável dependente massa seca. Usou-se essa variável como base porque, dentre as três variáveis analisadas, a produção de grãos na cultura do arroz está relacionada com a produção de matéria seca, através da produção biológica e do índice de colheita (IC) (YOSHIDA, 1981). Também, o acúmulo de massa correlaciona-se com a maior capacidade de absorção de herbicidas pelas raízes (MADALÃO et al., 2013).

*Imazetapir + imazapique (75 + 25 g e.a. L<sup>-1</sup>)*

Com base na sobreposição do intervalo de confiança, foi possível observar que houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os valores de GR<sub>50</sub> apresentados pelas culturas estudadas e o solo sem cultivo no mesmo período (testemunha), demonstrando o potencial fitorremediador dessas plantas em solo contaminado com a mistura herbicida de imazetapir + imazapique (Tabela 2).

Observou-se que a cultura da soja foi a que apresentou maior potencial remediador entre as plantas estivais, diferindo significativamente das demais plantas avaliadas no mesmo período. Para que houvesse 50% de redução da massa seca das plantas utilizadas como bioindicadoras, foi necessária dose superior a 200% ( $> 3000 \text{ ml ha}^{-1}$ ) da dose de referência para esse herbicida ( $1500 \text{ ml ha}^{-1}$ ) (Tabela 2).

Para as culturas hibernais, o solo cultivado anteriormente com ervilhaca possibilitou um melhor desenvolvimento do arroz (cultivar IRGA 417) em solo contaminado com a mistura herbicida estudada, diferindo das demais plantas hibernais testadas. Para que houvesse 50% de redução na massa seca das plantas, foi necessária 57% da dose de referência (855 ml) da mistura formulada de imazetapir + imazapique.

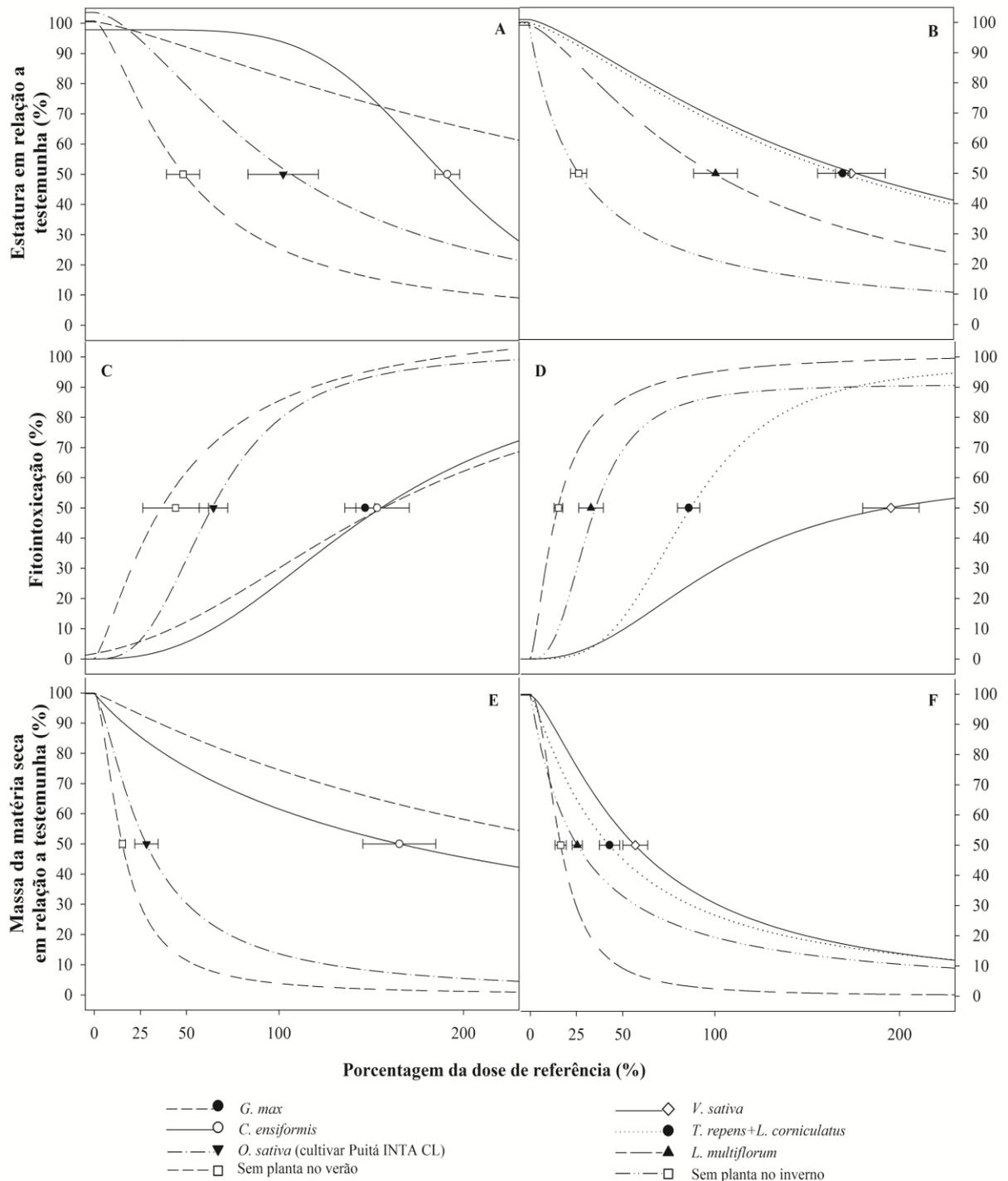


Figura 1 - Estatura, sintomas de fitointoxicação e massa da matéria seca das plantas de arroz não Clearfield® (cultivar IRGA 417) cultivadas em sucessão as culturas estivais (A, C e E; respectivamente) e hibernais (B, D e F; respectivamente), em solo contaminado com cinco doses da mistura formulada de imazetapir + imazapique (75+25 g e.a. L<sup>-1</sup>), avaliada aos 21 dias após a emergência (DAE) em relação a testemunha (sem cultivo). Santa Maria, RS, 2013.

Tabela 2 – Parâmetros das equações de regressão sigmoïdal do tipo logístico, valores  $Gr_{50}$  (% da dose de referência) com intervalos de confiança (IC) apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada em sucessão as culturas estivais e hibernais testadas, em resposta ao solo com residual de imazetapir + imazapique. Santa Maria, RS, 2013.

<b>Estatura de plantas (%) aos 21 DAE</b>					
Espécies	<sup>1</sup> a	<sup>2</sup> b	<sup>3</sup> GR <sub>50</sub>	<sup>4</sup> 95% IC	R <sup>2</sup>
<b>Estivais</b>					
Soja	100,4	1,27	>200 <sup>5</sup>	-	0,99
Feijão-de-porco	97,8	4,98	191,2	187,8-194,6	0,99
<sup>6</sup> Arroz CL <sup>®</sup>	103,5	1,65	102,3	83,2-121,4	0,95
S.cultivo verão	100,7	1,48	48,10	43,5-52,6	0,99
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	100,9	1,35	174,7	172,0-175,9	0,98
<sup>7</sup> Consórcio	99,7	1,36	169,9	156,3-193,0	0,99
Azevém	99,0	1,41	101,1	95,1-107,0	0,99
S.cultivo inverno	100,3	0,99	26,9	22,5-31,2	0,99
<b>Fitointoxicação de plantas (%) aos 21 DAE</b>					
<b>Estivais</b>					
Soja	58,9	-3,13	84,4	79,2-89,5	0,99
Feijão-de-porco	98,2	-2,51	153,1	135,7-170,6	0,99
Arroz CL <sup>®</sup>	101,6	-2,87	64,5	56,7-72,2	0,99
S.cultivo verão	114,3	-1,32	44,0	26,2-61,8	0,98
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	61,4	-2,32	103,2	87,9-118,5	0,99
Consórcio	97,9	-3,40	85,8	79,7-91,8	0,99
Azevém	91,0	-2,72	32,8	26,1-39,4	0,98
S.cultivo inverno	101,6	-1,43	15,2	12,8-17,5	0,99
<b>Massa da matéria seca da parte aérea de plantas (%) aos 28 DAE</b>					
<b>Estivais</b>					
Soja	99,9	1,07	>200 <sup>5</sup>	-	0,99
Feijão-de-porco	99,9	0,93	165,2	112,6-161,1	0,97
Arroz CL <sup>®</sup>	99,7	1,46	28,2	21,8-34,5	0,99
S.cultivo verão	99,9	1,72	15,2	13,6-16,7	0,99
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	99,6	1,43	56,8	50,0-63,6	0,99
Consórcio	99,7	1,18	42,9	37,3-48,4	0,99
Azevém	100,0	1,03	25,3	22,6-28,1	0,99
S.cultivo inverno	99,9	2,05	16,4	13,3-19,4	0,99

<sup>1</sup>a: diferença entre os pontos máximo e mínimo da curva; <sup>2</sup>b: declividade da curva; <sup>3</sup>GR<sub>50</sub>: dose do herbicida que causa 50% de redução da variável analisada; <sup>4</sup>IC: intervalo de confiança a 95% de probabilidade; <sup>5</sup>>200 valores correspondentes a GR<sub>50</sub>>270%; <sup>6</sup>CL: arroz resistente aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas. <sup>7</sup>Consórcio de trevo branco + cornichão.

*Imazapir + imazapique (525+175 g e.a. kg<sup>-1</sup>)*

Para as culturas estivais, os valores estimados para o acúmulo de fitomassa da espécie que indica a presença de residual da associação dos herbicidas imazapir + imazapique (arroz não CL), mostram que as culturas da soja e feijão-de-porco, apresentaram os maiores valores de GR<sub>50</sub>, 83% e 51% (178 g ha<sup>-1</sup> e 109 g ha<sup>-1</sup>), respectivamente, da dose de referência para esse herbicida (214 g ha<sup>-1</sup>), não diferindo significativamente entre si, porém, diferindo do solo sem cultivo prévio nesta mesma estação (Tabela 3), o que permite inferir que essas plantas possuem potencial fitorremediador de solo contaminado com os herbicidas imazapir+imazapique. O mesmo não pode ser afirmado para o arroz CL<sup>®</sup> (cultivar Puitá INTA CL), pois este não diferiu estatisticamente da testemunha (solo sem cultivo) (Tabela 3).

Para as plantas cultivadas no inverno, os maiores valores de GR<sub>50</sub> foram encontrados para a cultura da ervilhaca (51% - 109 g ha<sup>-1</sup>) e pelo consórcio de trevo branco + cornichão (49% - 104 g ha<sup>-1</sup>), não diferindo significativamente entre si, porém apresentando diferença estatística entre a cultura do azevém e a testemunha (solo sem cultivo), demonstrada através da não sobreposição dos intervalos de confiança dessas espécies; podendo então ser consideradas culturas com potencial remediador dessa associação de herbicidas. O mesmo não pode ser afirmado para a cultura do azevém (GR<sub>50</sub>= 17% - 36 g ha<sup>-1</sup>), pois essa não apresentou diferença estatística em relação a testemunha (GR<sub>50</sub>= 14% - 30 g ha<sup>-1</sup>) (Tabela 3).

Tabela 3 – Parâmetros das equações de regressão sigmoideal do tipo logístico, valores  $Gr_{50}$  (% da dose de referência) com intervalos de confiança (IC) apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada em sucessão as culturas estivais e hibernais testadas, em resposta ao solo com residual de imazapir + imazapique. Santa Maria, RS, 2013.

<b>Estatura de plantas (%) aos 21 DAE</b>					
Espécies	<sup>1</sup> a	<sup>2</sup> b	<sup>3</sup> GR <sub>50</sub>	<sup>4</sup> 95% IC	R <sup>2</sup>
<b>Estivais</b>					
Soja	99,7	0,73	<sup>5</sup> >200	-	0,99
Feijão-de-porco	101,5	1,37	<sup>5</sup> >200	-	0,95
<sup>6</sup> Arroz CL <sup>®</sup>	100,0	1,15	125,8	101,3-150,2	0,97
S.cultivo verão	100,7	1,78	43,0	35,7-50,2	0,99
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	98,8	1,40	220,9	166,2-275,5	0,98
<sup>7</sup> Consórcio	101,3	1,23	179,0	148,4-209,5	0,97
Azevém	100,7	1,06	54,0	37,2-70,7	0,99
S.cultivo inverno	100,0	1,00	30,8	21,5-40,1	0,99
<b>Fitointoxicação de plantas (%) aos 21 DAE</b>					
<b>Estivais</b>					
Soja	102,3	-1,31	92,1	55,6-128,5	0,99
Feijão-de-porco	90,1	-3,10	80,4	75,3-85,4	0,99
Arroz CL <sup>®</sup>	104,1	-1,00	78,3	64,8-91,76	0,99
S.cultivo verão	105,6	-1,40	26,8	25,7-27,8	0,99
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	82,8	3,81	122,4	107,1-137,6	0,90
Consórcio	63,8	39,8	66,9	61,1-72,6	0,98
Azevém	99,8	-1,82	35,2	27,7-42,6	0,99
S.cultivo inverno	100,6	-1,02	14,3	12,8-15,7	0,99
<b>Massa da matéria seca da parte aérea de plantas (%) aos 28 DAE</b>					
<b>Estivais</b>					
Soja	98,4	1,38	82,8	62,8-102,7	0,98
Feijão-de-porco	99,6	1,38	50,8	36,3-65,4	0,98
Arroz CL <sup>®</sup>	99,8	1,12	20,4	9,4-31,3	0,98
S.cultivo verão	99,9	1,45	14,9	5,1-24,6	0,98
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	100,8	1,29	50,6	37,4-63,7	0,98
Consórcio	99,8	1,11	49,3	36,3-62,2	0,99
Azevém	99,9	0,88	16,6	11,8-21,3	0,99
S.cultivo inverno	99,9	1,35	13,7	9,56-17,8	0,99

<sup>1</sup>a: diferença entre os pontos máximo e mínimo da curva; <sup>2</sup>b: declividade da curva; <sup>3</sup>GR<sub>50</sub>: dose do herbicida que causa 50% de redução da variável analisada; <sup>4</sup>IC: intervalo de confiança a 95% de probabilidade; <sup>5</sup>>200 valores correspondentes a GR<sub>50</sub>>270%; <sup>6</sup>CL: arroz resistente aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas. <sup>7</sup>Consórcio de trevo branco + cornichão.

*Imazetapir* (106 g e.a. L<sup>-1</sup>) e *Imazapir* (250 g e.a. L<sup>-1</sup>)

Analisando os valores de  $GR_{50}$  apresentados pelas plantas testadas para a variável dependente massa seca da parte aérea das plantas de arroz (bioindicadora) pode-se observar que, independente da cultura (estival ou hiberna), todas podem ser consideradas remediadoras de solo contaminado com os herbicidas imazetapir e imazapir isoladamente, pois diferem estatisticamente da testemunha (solo sem cultivo) através da não sobreposição de seus intervalos de confiança (Tabela 4).

Soja e feijão-de-porco demonstraram maior potencial fitorremediador desses herbicidas, não diferindo entre si, porém diferindo significativamente da cultura do arroz CL (cultivar Puitá INTA CL). Para essas leguminosas estivais, a dose responsável por 50% de redução da massa seca da planta bioindicadora foi 51% (739 ml ha<sup>-1</sup>) e 64% (928 ml ha<sup>-1</sup>), respectivamente, da dose de referência para o herbicida imazetapir (1450 ml ha<sup>-1</sup>); e 69% (414 ml ha<sup>-1</sup>) e 58% (348 ml ha<sup>-1</sup>) da dose de referência para o herbicida imazapir (600 ml ha<sup>-1</sup>) (dados não apresentados).

Para as culturas hibernais, não houve diferença significativa entre as culturas da ervilhaca, consórcio de trevo branco e cornichão e azevém, tanto quando utilizado o herbicida imazetapir ( $GR_{50}= 42\% - 609 \text{ ml ha}^{-1}$ ;  $GR_{50}= 35\% - 507 \text{ ml ha}^{-1}$  e  $GR_{50}= 40\% - 580 \text{ ml ha}^{-1}$ , respectivamente) (Tabela 4); quanto para o herbicida imazapir ( $GR_{50}= 23\% - 138 \text{ ml ha}^{-1}$ ;  $GR_{50}= 24\% - 144 \text{ ml ha}^{-1}$  e  $GR_{50}= 23\% - 138 \text{ ml ha}^{-1}$ , respectivamente) (dados não apresentados), podendo essas plantas ser utilizadas para a redução do residual de solo contaminado com os herbicidas imazetapir e imazapir, aplicados separadamente.

Tabela 4 – Parâmetros das equações de regressão sigmoïdal do tipo logístico, valores Gr<sub>50</sub> (% da dose de referência) com intervalos de confiança (IC) apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada em sucessão as culturas estivais e hibernais testadas, em resposta ao solo com residual de imazetapir. Santa Maria, RS, 2013.

<b>Estatura de plantas (%) aos 21 DAE</b>					
Espécies	<sup>1</sup> a	<sup>2</sup> b	<sup>3</sup> GR <sub>50</sub>	<sup>4</sup> 95% IC	R <sup>2</sup>
<b>Estivais</b>					
Soja	101,0	1,14	<sup>5</sup> >200	-	0,96
Feijão-de-porco	99,5	1,39	>200	-	0,99
<sup>6</sup> Arroz CL <sup>®</sup>	10,34	1,67	134,9	130,0-139,7	0,95
S.cultivo verão	96,4	3,71	76,5	67,9-85,0	0,99
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	101,5	1,26	114,0	109,2-118,7	0,98
<sup>7</sup> Consórcio	101,5	1,35	129,5	125,1-133,8	0,96
Azevém	100,4	1,14	59,4	47,8-71,3	0,99
S.cultivo inverno	100,3	0,97	46,5	34,3-58,6	0,99
<b>Fitointoxicação de plantas (%) aos 21 DAE</b>					
<b>Estivais</b>					
Soja	117,7	-1,10	137,8	124,6-150,9	0,97
Feijão-de-porco	84,0	-2,21	73,0	68,2-77,7	0,99
Arroz CL <sup>®</sup>	90,5	-2,56	82,9	66,8-98,9	0,99
S.cultivo verão	107,2	-2,93	60,8	33,9-87,6	0,95
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	102,8	-0,59	99,8	76,3-123,3	0,99
Consórcio	87,4	-2,59	61,2	57,0-65,3	0,97
Azevém	95,5	-2,85	26,6	24,8-28,3	0,99
S.cultivo inverno	103,3	-0,83	7,0	5,4-8,5	0,99
<b>Massa da matéria seca da parte aérea de plantas (%) aos 28 DAE</b>					
<b>Estivais</b>					
Soja	98,1	1,31	50,9	39,7-61,6	0,94
Feijão-de-porco	98,2	1,50	63,8	55,3-72,2	0,96
Arroz CL <sup>®</sup>	99,8	1,39	32,7	26,4-38,9	0,99
S.cultivo verão	99,9	1,51	15,9	9,4-22,3	0,99
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	100,2	1,30	42,1	38,2-46,0	0,99
Consórcio	100,0	0,89	35,2	28,7-41,7	0,99
Azevém	99,9	1,60	40,0	35,5-44,5	0,99
S.cultivo inverno	99,9	1,72	12,8	7,7-17,8	0,99

<sup>1</sup>a: diferença entre os pontos máximo e mínimo da curva; <sup>2</sup>b: declividade da curva; <sup>3</sup>GR<sub>50</sub>: dose do herbicida que causa 50% de redução da variável analisada; <sup>4</sup>IC: intervalo de confiança a 95% de probabilidade; <sup>5</sup>>200 valores correspondentes a GR<sub>50</sub>>270%; <sup>6</sup>CL: arroz resistente aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas. <sup>7</sup>Consórcio de trevo branco + cornichão.

*Imazapique* (700 g e.a. L<sup>-1</sup>)

Analisando-se os valores de GR<sub>50</sub> apresentados pelas plantas estivais avaliadas, pode-se afirmar que tanto a cultura da soja, quando o feijão-de-porco apresentaram potencial fitorremediador de solo contaminado com o herbicida imazapique, diferindo estatisticamente da testemunha (sem cultivo no verão). O mesmo não ocorrendo com a cultura do arroz CL<sup>®</sup> (Tabela 5). A soja atingiu GR<sub>50</sub> com 72% (154 g ha<sup>-1</sup>) da dose de referencia para esse composto (214 g ha<sup>-1</sup>) não diferindo significativamente do feijão-de-porco que apresentou GR<sub>50</sub>=83% (177 g ha<sup>-1</sup>)

Para as plantas hibernais, apenas a cultura da ervilhaca diferiu significativamente da testemunha, sendo essa potencialmente fitorremediadora de solo contaminado com o herbicida imazapique. Essa leguminosa atingiu GR<sub>50</sub> com 72% (154 g ha<sup>-1</sup>) da dose de referencia para esse herbicida. Para o consórcio de trevo branco e cornichão, azevém e solo sem cultivo no inverno, os valores de GR<sub>50</sub> variam entre 26, 25 e 20%, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 – Parâmetros das equações de regressão sigmoideal do tipo logístico, valores Gr<sub>50</sub> (% da dose de referencia) com intervalos de confiança (IC) apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada em sucessão as culturas estivais e hibernais testadas, em resposta ao solo com residual de imazetapir. Santa Maria, RS, 2013.

<b>Estatura de plantas (%) aos 21 DAE</b>					
Espécies	<sup>1</sup> a	<sup>2</sup> b	<sup>3</sup> GR <sub>50</sub>	<sup>4</sup> 95% IC	R <sup>2</sup>
<b>Estivais</b>					
Soja	100,2	1,75	<sup>5</sup> >200	-	0,99
Feijão-de-porco	99,0	1,97	218,3	175,9-260,6	0,97
<sup>6</sup> Arroz CL <sup>®</sup>	102,8	2,41	103,3	89,5-117,0	0,95
S.cultivo verão	95,1	2,02	71,8	60,6-82,9	0,95
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	102,1	1,24	145,6	124,4-166,7	0,97
<sup>7</sup> Consórcio	101,6	1,74	92,2	76-3,5-110,8	0,95
Azevém	100,5	1,18	69,5	58,9-80,0	0,99
S.cultivo inverno	100,1	1,11	24,2	16,9-31,4	0,99
<b>Fitointoxicação de plantas (%) aos 21 DAE</b>					
<b>Estivais</b>					
Soja	103,7	7,85	97,8	71,5-124,0	0,95
Feijão-de-porco	128,6	-1,75	147,1	112,0-182,1	0,98
Arroz CL <sup>®</sup>	98,6	-2,73	53,4	38,3-68,4	0,99
S.cultivo verão	92,7	1,36	22,8	9,2-36,4	0,92
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	102,8	-1,31	155,7	144,3-167,0	0,99
Consórcio	101,6	-2,63	62,3	43,0-81,5	0,98
Azevém	93,2	-2,61	27,7	24,1-31,2	0,99
S.cultivo inverno	98,6	-1,61	10,2	7,5-12,9	0,99
<b>Massa da matéria seca da parte aérea de plantas (%) aos 28 DAE</b>					
<b>Estivais</b>					
Soja	99,3	1,23	71,6	59,1-84,0	0,99
Feijão-de-porco	100,4	1,09	83,2	56,5-109,8	0,98
Arroz CL <sup>®</sup>	99,8	1,43	18,4	10,28-26,5	0,99
S.cultivo verão	99,9	1,76	15,3	10,2-20,3	0,99
<b>Hibernais</b>					
Ervilhaca	100,0	1,27	71,9	63,2-80,5	0,92
Consórcio	100,0	1,05	26,1	23,9-28,2	0,99
Azevém	99,7	1,87	25,0	17,2-32,7	0,98
S.cultivo inverno	100,0	4,96	19,8	19,7-19,8	1,00

<sup>1</sup>a: diferença entre os pontos máximo e mínimo da curva; <sup>2</sup>b: declividade da curva; <sup>3</sup>GR<sub>50</sub>: dose do herbicida que causa 50% de redução da variável analisada; <sup>4</sup>IC: intervalo de confiança a 95% de probabilidade; <sup>5</sup>>200 valores correspondentes a GR<sub>50</sub>>270%; <sup>6</sup>CL:arroz resistente aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas. <sup>7</sup>Consórcio de trevo branco+cornichão.

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, foi possível observar que a presença de espécies vegetais causa impacto positivo na dissipação de moléculas herbicidas no solo, em comparação com solos sem vegetação. Resultados semelhantes foram encontrados por Pires et al. (2005) com a utilização de feijão-de-porco em solo contaminado com tebutiuron. Áreas contendo plantas apresentam uma biodegradabilidade mais acelerada e completa quando comparadas com áreas não vegetadas, devido à expansão da população ativa dos microrganismos no solo (rizosfera) que se utilizam da fração “exudata” das raízes (rizodeposição) como fonte de alimento (SPILBORGHS; CASARINI, 1998).

A utilização da fitorremediação é baseada na tolerância natural ou desenvolvida, que algumas plantas exibem a determinados tipos de compostos ou mecanismos de ação (PIRES et al., 2003). A seletividade dos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas em algumas culturas, como soja [*Glycine max* (L) Merrill] e trigo (*Triticum aestivum* L.), é baseada principalmente na habilidade das plantas em metabolizar o herbicida rapidamente em formas não-tóxicas (MONQUEIRO et al., 2000). Do mesmo modo, várias espécies de plantas daninhas, como *Echinochloa crus-galli* (L) Beauv, *Solanum nigrum* (L) e *Sorghum halepense* (L) Pers, são naturalmente tolerantes a certos inibidores da ALS pela inativação metabólica (HUTCHISON et al., 1984). Ervilhaca, soja e feijão-de-porco foram as plantas mais tolerantes aos diferentes herbicidas do grupo químico das imidazolinonas, isolados ou em mistura, em comparação com outras espécies analisadas como, milho, tomate, cenoura e pepino (ALVES; CARVALHO, 2010).

Todos os herbicidas testados contam com a degradação microbiana como principal mecanismo de dissipação (GOETZ et al., 1990), justificando o destaque das leguminosas no presente trabalho, pois provavelmente essas tenham utilizado a fitoestimulação como mecanismo de remediação dos herbicidas estudados. Souto et al. (2013), comprovaram que plantas de *Stizolobium aterrimum* liberam rizodeposições que estimulam a atividade microbiana existente na rizosfera dessa, à degradar moléculas da mistura formulada de imazetapir + imazapique presentes em solo de cultivo de arroz.

Também há a possibilidade de ter ocorrido a fitodegradação desses compostos no solo, explicados pela capacidade que as plantas estudadas possuem em metabolizar (fitodegradação) o contaminante até compostos não-tóxicos (ou menos tóxicos) à planta e ao ambiente (PROCÓPIO et al., 2009), ou simplesmente possuem a habilidade de compartimentalizar as moléculas desses agrotóxicos (CUNNINGHAM et al., 1996). Como a massa vegetal das plantas anteriormente cultivadas foi retirada, junto pode ter sido retirado o

herbicida que estava compartimentalizado em algum órgão de reserva, permitindo assim o desenvolvimento normal das plantas de arroz.

Estudos indicam que *Stizolobium aterrimum* e *Canavalia ensiformis* são eficientes na descontaminação de áreas tratadas com os herbicidas trifloxysulfuron-sódio e tebuthiuron e que o provável mecanismo envolvido na descontaminação é a interação da fitoestimulação e fitodegradação (PROCÓPIO et al. 2005). Em trabalho semelhante, a permanência ou retirada da parte aérea das plantas de *C. ensiformis* e *S. aterrimum* da área contaminada com trifloxysulfuron-sódio, após o período de remediação, não interferiu no desenvolvimento posterior de plantas de feijão, indicando que o produto pode estar sendo degradado internamente nos tecidos (fitodegradação) ou inativado por outros mecanismos rizosféricos, sendo, provavelmente, a fitoestimulação da microbiota associada à rizosfera (PROCÓPIO et al., 2006).

Trabalhos preliminares descrevem as espécies *Helianthus annuus* e *Dolichos. lablab*, bem como a leguminosa *Crotalaria juncea*, como potencialmente fitorremediadoras de solos contaminados com sulfentrazone (BELO et al., 2011; MADALÃO et al., 2012). Também há relatos de que a espécie *Panicum maximum* cv. Tanzânia influenciou o nível de fitotoxicidade do herbicida picloram sobre a cultura da soja semeada em sucessão e tem capacidade de remediar solos contaminados com esse herbicida (PROCÓPIO et al., 2009; ASSIS et al. 2010).

## **Conclusão**

Soja, feijão-de-porco, ervilhaca e consórcio de trevo branco e cornichão, são plantas fitorremediadoras de solo de cultivo de arroz irrigado contaminado com os herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, quando presentes em mistura (imazetapir + imazapique e imazapir + imazapique) ou isolados.

O azevém e o arroz CL não são remediadoras de solo contaminado com herbicidas do grupo químico das imidazolinonas.

## Referências Bibliográficas

ALVEZ, V.; CARVALHO, F.T. Seletividade de herbicidas (imidazolinonas), aplicados ao solo, no crescimento inicial de culturas agrícolas. I. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 27., 2010, Ribeirão Preto. **Resumos...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2010. p. 2553-2557.

ASSIS, R.L. et al. Fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram por plantas de *Panicum maximum* em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 845-853. 2010.

BELO, A.F. et.al. Potencial de espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Planta daninha**, v. 29, n. 4, p. 821-828, 2011.

BELO, A.F. et al. Efeito da umidade do solo sobre a capacidade de *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* em remediar solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v. 25, n. 2, p. 239-249, 2007.

CARMO, M.L. et al. Seleção de plantas para fitorremediação de solos contaminados com picloram. **Planta Daninha**, v. 26, n. 2, p. 301-313, 2008a.

CARMO, M.L.; PROCOPIO, S. O.; PIRES, F. R. et al. Influência do período de cultivo de *Panicum maximum* (Cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v. 26, p. 315-322, 2008b.

CUNNINGHAM, S.D. et al. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Advances in Agronomy**, v.56, p.55-114, 1996.

D'ANTONINO, L, et al. Efeitos de culturas na persistência de herbicidas auxínicos no solo. **Planta Daninha**. v.27, n.2, p.371-378, 2009.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solo. 2ª ed., Rio de Janeiro: EMBRAPA, 306 p. 2006.

FRANS, R. et al. **Experimental design and techniques for measuring and analysing plant responses to weed control practices**. In: CAMPER, N.D. (Ed.) Research methods in weed science. 3 ed. Champaign: Southern Weed Science Society, 1986, 37p

GOETZ, A.; LAVY, T.; GBUR, E. Degradation and field persistence of imazethapyr. **Weed Science**, v. 38, n. 2, p. 421-428, 1990.

HUTCHISON, J.M.; SHAPIRO, R.; SWEESTER, P. B. Metabolism of chlorsulfuron by tolerant broadleaves. **Pesticide Biochemistry Physiology**, v. 22, p. 243-247, 1984.

MADALAO, J.C. et al . Susceptibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone. **Revista. Ceres**, v. 60, n. 1, p. 111-121, 2013.

MADALÃO, J.C. et.al. Fitorremediação de solos contaminados com o herbicida sulfentrazone por espécies de adubos verdes. **Revista de Ciências Agrárias**. v. 55, n. 4, p. 288-296, 2012.

MARCHESAN, E. et al. Arroz tolerante a imidazolinonas: banco de sementes de arroz - vermelho e fluxo gênico. **Planta Daninha**, v.29, n.esp., p.1099-1105, 2011.

MONQUERO, P.A. et.al. Lixiviação e persistência dos herbicidas sulfentrazone e Imazapic. **Planta Daninha**, v. 28, n. 1, p. 185-195, 2010.

MONQUEIRO, P.A.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; DIAS, C. T. S. Resistência de plantas daninhas aos herbicidas inibidores da ALS na cultura da soja (*Glycine max*). **Planta daninha**, v. 18, n. 3, p. 419-425, 2000.

PINTO, J. J. O. et al. Atividade residual de imazethapyr + imazapic em arroz semeado em rotação com o arroz Clearfield®. **Planta Daninha**,v. 29, n. 1, p. 205-216, 2011.

PINTO, J. J. O. et al. Atividade residual de imazethapyr + imazapic para sorgo granífero (*Sorghum bicolor*) semeado em rotação com o arroz irrigado. **Planta Daninha**, v. 27, n. especial, p. 1015 - 1024, 2009.

PIRES, F.R. et al. Inferências sobre atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 627-634, 2005.

PIRES, F.R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v.21, n.2, p.335-341, 2003.

PROCÓPIO, S.O. et al. **Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009. 32p.

PROCÓPIO, S.O. *et al.* Fitorremediação de solo contaminado com picloram por capim-pé-degalinha-gigante (*Eleusine coracana*). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 32, p. 2517-2524, 2008.

PROCÓPIO, S.O. *et al.* Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por diferentes densidades populacionais de feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 3, p. 444-449, 2006.

RODRIGUES, B.N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de Herbicidas**. 6 ed. Londrina, 2011.

SEEFELDT, S.S; JENSEN, J. E; FUERST, P. Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships. **Weed Technology**, v. 9, n. 2, p. 218-225, 1995.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI) Arroz Irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Gravataí, RS: SOSBAI, 176p. 2012.

SOUSA, C.P. *et al.* Crescimento de espécies bioindicadoras do residual do herbicida (imazethapyr+imazapic), semeadas em rotação com arroz Clearfield®. **Planta Daninha**, v. 30, n. 1, p. 105-111, 2012.

SOUTO, K.M. *et al.* Biodegradação dos herbicidas imazetapir e imazapique em solo rizosférico de seis espécies vegetais. **Ciencia Rural**, v. 43, n. 10, p. 1790-1796, 2013.

SOUTO, K.M. *et al.* **Fitorremediação de solo de várzea contaminado com os herbicidas imazetapir e imazapique**. 2010. 110f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Curso de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.

SPILBORGH, M. C. F.; CASARINI, D. C. P. Biorremediação do solo contaminado com compostos orgânicos. **Revista Meio Ambiente Industrial**, n. 12, p. 66-69, 1998.

STEELE, G. L. *et al.* Control of red rice (*Oryza sativa*) in imidazolinone-tolerant rice (*O. sativa*). **Weed Technology**, v. 16, n. 3, p. 627-630, 2002.

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.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Manila, The International Rice Research Institute, 1981. 269p.

## ARTIGO 2 – DEGRADAÇÃO DE IMIDAZOLINONAS EM SOLO RIZOSFÉRICO DE PLANTAS FITORREMEIADORAS

### Resumo

A fitorremediação é uma das alternativas mais promissoras quanto à descontaminação de áreas que receberam intensas aplicações de herbicidas. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência das rizodeposições de plantas fitorremediadoras na degradação dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir. A biodegradação desses herbicidas nas doses de 0, 150, 300 e 750 g i.a. ha<sup>-1</sup>, no solo rizosférico das espécies de *Canavalia ensiformis*, *Glycine max*, *Oryza sativa* cultivar Puitá INTA CL, *Lolium multiflorum*, *Lotus corniculatus* e *Trifolium repens* em consórcio, *Vicia sativa* e em solo sem cultivo, foi estimada através da quantificação da produção de C-CO<sub>2</sub> e da degradação dos herbicidas no solo por cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massa. Soja, feijão-de-porco, ervilhaca e consórcio de trevo branco + cornichão são culturas consideradas fitoestimuladoras da microbiota do solo na degradação dos herbicidas pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas.

**Palavras-chave:** Fitoestimulação. Imidazolinonas. Persistência no solo. Microrganismos.

### Abstract

Phytoremediation is one of the most promising alternatives regarding the decontamination of areas that received heavy applications of herbicides. This study aimed to evaluate the influence of rhizodeposits plant species, potentially phytoremediator in degradation of the herbicides imazethapyr, imazapyr and imazapic. The biodegradation of these herbicides at doses of 0, 150, 300 and 750 g ai ha<sup>-1</sup>, in the rhizosphere of species of *Canavalia ensiformis*, *Glycine max*, *Oryza sativa* cultivar Puita INTA CL, *Lolium multiflorum*, *Lotus corniculatus* and *Trifolium repens* in a consortium, *Vicia sativa* and bare soil, was estimated by measuring the production of C-CO<sub>2</sub> and the degradation of herbicides in soil by liquid chromatography coupled with mass spectrometry. Soybean, jack bean, vetch

and white clover + birdsfoot trefoil, a consortium, presented phytostimulation capacity of soil microbes in the degradation of herbicides belonging to the imidazolinone chemical group.

**Key words:** Phytostimulation. Imidazolinone. Persistence in soil. Microorganisms.

## Introdução

A fitorremediação tem despertado interesse em função das elevadas taxas de remediação obtidas com a utilização de plantas que, comprovadamente, aumentam a degradação microbiana de compostos orgânicos nocivos presentes no solo e das diferenças observadas, quando são comparados solos vegetados e não vegetados (PIRES et al., 2005). Através de exsudatos solúveis (açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, peptídeos, nucleotídeos, vitaminas e outros compostos biologicamente ativos) as plantas podem modificar as características químicas do solo presente na rizosfera (RICHARDSON et al., 2009), estimulando a comunidade microbiana a degradar compostos tóxicos, processo esse conhecido como fitoestimulação (PROCÓPIO et al., 2009).

Essa técnica é considerada uma alternativa para sistemas de cultivo que apresentam a necessidade de se remover herbicidas de alta persistência no solo (SANTOS et al., 2010), como é o caso dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas e que possuem meia vida no solo variando entre 90, 120 e 142 dias, respectivamente (SENSEMAN, 2007). Esses herbicidas são utilizados em áreas de cultivo de arroz irrigado, tanto em pré como em pós-emergência, para o controle do arroz vermelho que é considerada a principal planta daninha da lavoura arrozeira (STEELE et al., 2002).

A elevada atividade das moléculas no solo, sua persistência por longos períodos e a sensibilidade de algumas culturas a esses herbicidas impõem restrições ao uso de determinadas culturas em rotação/sucessão ao arroz irrigado com a utilização desses compostos (ROMAN et al., 2007). Além disso, quanto maior o tempo de permanência do herbicida no solo, maior é a possibilidade de contaminação de outros compartimentos ambientais, como as águas subsuperficiais, através da lixiviação do próprio herbicida e/ou de seus metabólitos (PIRES et al., 2003).

Vários estudos têm relatado a contribuição das plantas, estimulando, por meio do efeito rizosférico, a mineralização de alguns herbicidas, tais como metolachlor (PERKOVICH et al. 1996), tebutiuron (PIRES et al., 2005b) trifloxissulfuron - sódio ( PROCÓPIO et al., 2007; SANTOS et al., 2010), sulfentrazone (BELO et al., 2011) e a mistura formulada de imazetapir e imazapique (SOUTO et al., 2013). Uma bactéria de solo foi isolada por Wang et al. (2006) - *Arthrobacter crystallopoietes* (WWX-1) -, a qual degrada imazaquin em altas concentrações, apresentando máxima atividade a 35°C e pH 5,0. Esta bactéria também é capaz de degradar outras imidazolinonas, podendo ser usada como uma ferramenta para biorremediar solo e água contaminados com imidazolinonas.

Através da avaliação da atividade microbiana na rizosfera, pode-se inferir sobre o papel da microbiota, quando estimulada pelas raízes das plantas, na remediação dos herbicidas (PROCÓPIO et al., 2009b). Tendo em vista que a degradação microbiana é um dos principais mecanismos de dissipação desses herbicidas no ambiente (WITT e FLINT, 1997), torna-se fundamental a identificação de espécies de plantas que estimulem o crescimento de microrganismos degradadores na rizosfera, culminando com o aumento das taxas de biodegradação do herbicida no solo. Em vista do exposto, esse trabalho tem como objetivo avaliar a influência das rizodeposições de plantas fitorremediadoras na degradação dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir

## Material e Métodos

O experimento foi realizado em duas etapas, de acordo com a estação de cultivo das culturas testadas, sendo a primeira em casa de vegetação e a segunda em laboratório.

*Etapa 1* - No período hibernar (junho a agosto de 2012) foram cultivadas, em vasos contendo 3,6 dm<sup>3</sup> de solo livre de herbicida, as plantas de azevém (*Lolium multiflorum*), ervilhaca (*Vicia sativa*), trevo branco (*Trifolium repens*) e cornichão (*Lotus corniculatus*) em consórcio e um tratamento sem planta de cobertura (testemunha). Da mesma forma, plantas soja (*Glycine max*), arroz Clearfield® (*Oryza sativa* cultivar Puitá INTA CL), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e um tratamento sem plantas de cobertura (testemunha), foram cultivadas no período estival (outubro a dezembro de 2012); totalizando 40 vasos por estação de cultivo, dispostos no delineamento inteiramente casualizado. O solo utilizado pertence à unidade de mapeamento Vacacaí, coletado no horizonte A e classificado como Planossolo Háplico Eutrófico arênico (EMBRAPA, 2006), com classe textural franco siltosa e as

seguintes características:  $\text{pH}_{(1:1 \text{ H}_2\text{O})} = 6,2$ ; argila =  $200 \text{ g kg}^{-1}$ , matéria orgânica<sub>(Walkley-Black)</sub> =  $32 \text{ g kg}^{-1}$ ,  $\text{P}_{(\text{Mehlich-1})} = 16,2 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $\text{K}_{(\text{Mehlich-1})} = 180 \text{ mg dm}^{-3}$ ,  $\text{Ca}_{(\text{KCl } 1\text{M})} = 5,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ,  $\text{Mg}_{(\text{KCl } 1\text{M})} = 3,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ,  $\text{Al}_{(\text{KCl } 1\text{M})} = 0,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e índice SMP = 6,6. Este foi previamente corrigido, em relação à acidez e ao teor de nutrientes, de acordo com as recomendações para a cultura da soja.

*Etapa 2* - Cinquenta e cinco dias após a emergência, as plantas foram retiradas dos vasos e o solo aderido às raízes foi coletado e considerado como sendo solo rizosférico (SANTOS et al., 2009). Esse solo recebeu imediatamente a aplicação de diferentes concentrações dos herbicidas, conforme descrito abaixo. Simultaneamente, as amostras de solo mantidas sob as mesmas condições, mas sem cultivo (solo não rizosférico) foram utilizadas como controle. A biodegradação dos herbicidas foi quantificada em dois experimentos, de acordo com a época de cultivo das espécies utilizadas.

**Experimento de verão** - amostras de solo rizosférico das plantas estivais foram peneiradas em malha de 2,0 mm de abertura, secas à sombra por 24 horas, sendo 100g acondicionadas em frascos respirométricos de vidro com capacidade de 1L. Logo após, diferentes doses do produto técnico (imazetapir, imazapique e imazapir) foram adicionadas utilizando-se pipetador de precisão.

O experimento foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4x3x4, contendo três repetições. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre fatores, sendo o Fator A: amostras de solo rizosférico das culturas de soja, feijão-deporco, arroz CL<sup>®</sup> e solo não rizosférico (testemunha). Fator B: os herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir (produtos técnicos), e Fator C: 0, 150, 300 e 750 g i.a. ha<sup>-1</sup> para cada herbicida utilizado.

Os frascos respirométricos foram equipados com aparato de captura de CO<sub>2</sub>, composto por um copo plástico de 50 mL contendo 20 mL de NaOH 0,5 M, fechados hermeticamente e incubados em triplicata à temperatura ambiente no laboratório (20 a 25°C). Durante um período de 63 dias, semanalmente os frascos foram abertos e a solução de NaOH recebia um mL de BaCl<sub>2</sub> 1 M e procedia-se a titulação com HCl 1M, utilizando fenolftaleína como indicador. A solução de HCl foi padronizada com a solução de TRIS ou THAM (tris-hidroximetil amino metano) (Merck<sup>TM</sup>), conforme Tedesco et al. (1995). Três frascos foram incubados sem solo, sendo estes utilizados como prova em branco. A produção de C-CO<sub>2</sub> foi quantificada através da fórmula de Stotzky (1965) (Equação 1):

$$\text{C-CO}_2 \text{ (mg kg}^{-1} \text{ de solo)} = (\text{B-T}) \times \text{eq} \times \text{M} \times 10 \quad (1)$$

Onde B é o volume (em mL) da solução de HCl gasto para titular a prova em branco (testemunha sem solo); T é o volume (em mL) da solução de HCl gasto para titular os tratamentos; eq é o equivalente-grama do C, que é 6; M é a molaridade da solução padronizada de HCl e 10 é o fator de conversão para quilogramas de solo.

Ao final do período de respirometria (63 dias), as amostras de solo foram acondicionadas em sacos de papel e encaminhadas ao Laboratório de Análise de Resíduos de Pesticidas (LARP-UFSM), onde foi realizada a detecção e a quantificação dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir ainda existentes nas amostras de solo rizosférico. Para isto utilizou-se a técnica de cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massa (LC-MS-MS) descrita por ZANELLA et al. (2003), onde as amostras foram acidificadas e pré-concentradas em cartuchos contendo 500 mg do adsorvente STRATA C18, sendo a diluição executada por duas vezes com 500 µL de metanol. A detecção e a quantificação dos herbicidas foram realizadas utilizando-se HPLC-UV, a 220 nm, equipado com uma coluna Bondesil C18 (250 × 4,6 mm i.d; 5 µm), com fase móvel constituída de metanol e água (60:40 vv<sup>-1</sup>), ajustada a pH 4,0 com ácido fosfórico, com vazão de 0,8 mL min<sup>-1</sup>.

**Experimento de inverno** – conduzido e avaliado da mesma forma que o experimento de verão, porém no período compreendido entre os meses de agosto a outubro e com o solo rizosférico das culturas hibernais azevém, ervilhaca, trevo branco e cornichão (em consórcio), mais amostra de solo não cultivado.

Os dados obtidos foram analisados previamente quanto ao atendimento das pressuposições da análise de variância (normalidade e homocedasticidade da variância), e submetidos à análise da variância ( $p \leq 0,05$ ). O teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) foi utilizado para comparação entre os tratamentos herbicidas e as diferentes espécies avaliadas.

## Resultados e Discussão

Com base na avaliação da taxa de liberação do C-CO<sub>2</sub> do solo, observou-se que 63 dias de incubação foram suficientes para a estimativa do total acumulado de C-CO<sub>2</sub>, uma vez que nesse intervalo de tempo, a liberação do total de gases apresentou tendência à estabilização com posterior decréscimo, independente do herbicida testado. Observou-se o efeito do solo rizosférico na taxa de evolução acumulada de C-CO<sub>2</sub>, de acordo com a concentração herbicida utilizada para cada cultura avaliada (Tabelas 1, 2 e 3).

A produção de C-CO<sub>2</sub> aumentou com o incremento da concentração do herbicida aplicada no solo rizosférico das plantas hibernais e estivais. Porém, houve decréscimo na evolução acumulada de C-CO<sub>2</sub> na maior dose testada (750 g i.a.ha<sup>-1</sup> da dose referencia), para a maioria das culturas, independente da molécula herbicida. Essa menor porcentagem de mineralização, na maior dose aplicada, pode ser devido ao efeito tóxico do herbicida sobre os microrganismos do solo rizosférico, comprometendo a atividade dos mesmos. Zhang et al. (2010) relataram que o herbicida imazetapir, aplicado em solo cultivado com soja, não teve efeitos adversos sobre a biomassa microbiana do solo quando aplicado na dose de campo, porém apresentou efeito tóxico quando aplicado em taxas mais elevadas. Os resultados do presente trabalho remetem a possibilidade de que, após sucessivas aplicações de herbicidas do grupo das imidazolinonas, pode ocorrer redução da degradação microbiana no ambiente, o que conduziria a maior persistência dos herbicidas no solo e o maior efeito fitotóxico na cultura em sucessão/rotação.

De maneira geral, o solo que não recebeu tratamento herbicida apresentou a menor taxa de evolução acumulada de C-CO<sub>2</sub>, demonstrando que as moléculas herbicidas servem de substrato para os microrganismos presentes no solo rizosférico das espécies testadas. Embora os agrotóxicos possam ter efeito negativo na população microbiana, estudos mostram que bactérias podem resistir, e até mesmo proliferar, na presença de agrotóxicos em elevadas concentrações, maiores que as taxas aplicadas no campo (SOARES et al., 2011). A aplicação de qualquer xenobiótico ao solo pode alterar a estrutura de uma comunidade microbiana (JOHNSON et al., 2001) e a magnitude da influência dessa aplicação dependerá tanto das propriedades do solo como também das características específicas dos microrganismos e do produto aplicado (YANG et al., 2007).

*Imazetapir* - Para as culturas estivais, o maior acúmulo de CO<sub>2</sub> foi observado em solo rizosférico cultivado com soja e feijão-de-porco, diferindo significativamente das demais culturas testadas. Quando comparada a taxa de liberação C-CO<sub>2</sub>, pode-se afirmar que o solo rizosférico da soja apresentou valores superiores, diferindo das demais culturas nas doses de 0, 150 e 300 g e.a. ha<sup>-1</sup>. Para a maior dose testada (750 g i.a. ha<sup>-1</sup>), o solo que apresentou maior mineralização do herbicida imazetapir foi aquele cultivado com feijão-de-porco, diferindo estatisticamente das demais espécies. O solo sem cultivo (não rizosférico) apresentou as menores taxas de evolução de C-CO<sub>2</sub>, não diferindo do solo rizosférico do arroz CL<sup>®</sup>, apenas nas maiores doses testadas (300 e 750 g i.a. ha<sup>-1</sup>) (Tabela 1).

Tanto para a cultura da soja quanto para a cultura do feijão-de-porco, a maior taxa de evolução de C-CO<sub>2</sub>, deu-se na dose de 300 g e.a. ha<sup>-1</sup>, diferindo estatisticamente das demais.

A maior taxa de liberação de C-CO<sub>2</sub>, em solo rizosférico de arroz CL<sup>®</sup> foi observada na dose de 150 g i.a. ha<sup>-1</sup>, diferindo significativamente das demais doses testadas (Tabela 1).

Para as plantas hibernais utilizadas, observou-se maior acúmulo de CO<sub>2</sub> no solo rizosférico proveniente da ervilhaca e do consórcio de trevo branco+cornichão, independente da dose herbicida testada, diferindo significativamente das demais. O solo não rizosférico (sem cultivo) foi o que apresentou as menores taxas de evolução de C-CO<sub>2</sub>, não diferindo da cultura do azevém apenas no tratamento sem herbicida (Tabela 1). Para a cultura da ervilhaca e consórcio de trevo branco + cornichão, a maior mineralização foi observada no tratamento que continha 300 g i.a.ha<sup>-1</sup> de imazetapir, diferindo das demais doses testadas. O mesmo foi observado para a cultura do azevém CL (Tabela 1).

Tabela 1 – Total acumulado de CO<sub>2</sub> emitido de solo rizosférico de plantas estivais e hibernais em resposta a doses de imazetapir após 63 dias de incubação. Santa Maria, RS, 2013.

<b>Total de CO<sub>2</sub> acumulado (mg kg<sup>-1</sup>)</b>				
Solo rizosférico	----- Doses de imazetapir (g de ingrediente ativo)* -----			
	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>300</b>	<b>750</b>
----- Plantas estivais -----				
Soja	158,1 aC	372,6 aB	648,7 aA	152,6 bC
Feijão-de-porco	110,2 bC	334,8 bB	433,5 bA	319,5 aB
Arroz CL**	103,6 bC	241,9 cA	177,4 cB	106,9 cC
Sem cultivo	45,3 cD	126,5 dB	161,3 cA	79,3 cC
C.V. (%)	----- 6,22 -----			
----- Plantas hibernais -----				
Ervilhaca	270,3 aC	363,9 aB	557,3 aA	374,9 aB
Consórcio***	334,1 aC	423,1 aB	596,1 aA	375,2 aC
Azevém	181,4 bC	288,0 bB	419,8 bA	225,2 bBC
Sem cultivo	130,8 bA	190,5 cA	152,8 cA	122,8 cA
C.V. (%)	----- 14,32 -----			

\*Dose baseada na quantidade de ingrediente ativo presente na dosagem recomendada para a aplicação a campo da mistura formulada de imazetapir + imazapique (1500 ml ha<sup>-1</sup> - 150 g i.a. ha<sup>-1</sup>). \*\*Arroz tolerante aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas (cultivar Puitá Inta CL). \*\*\*Consórcio de trevo branco + cornichão. Médias seguidas de letras minúsculas iguais, na coluna (cultura) e maiúsculas iguais, na linha (doses de imazetapir) não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

*Imazapique* - O feijão-de-porco foi a cultura que apresentou as maiores taxas de evolução de C-CO<sub>2</sub>, nas doses de 150 e 300 g i.a. ha<sup>-1</sup>, não diferindo significativamente da cultura da soja apenas na dose de 300 g i.a. ha<sup>-1</sup>, sendo que os solos rizosféricos das duas leguminosas estivais testadas foram os que apresentaram a maior mineralização do herbicida imazapique. Na maior dose testada (750 g i.a. ha<sup>-1</sup>) a planta com maior acúmulo de CO<sub>2</sub> foi o feijão-de-porco, diferindo das demais espécies, para essa mesma dose, não havendo diferença significativa entre solo rizosférico de soja e arroz CL<sup>®</sup>. O solo sem cultivo apresentou o menor acúmulo de CO<sub>2</sub>, diferindo do solo rizosférico do arroz CL<sup>®</sup> apenas nas maiores doses testadas (300 e 750 g i.a. ha<sup>-1</sup>) (Tabela 2).

Para a soja, o maior acúmulo de CO<sub>2</sub> ocorreu na dose de 300 g i.a. ha<sup>-1</sup>, sendo observada diferença estatística das demais doses testadas, porém, não havendo diferença significativa quando comparadas a menor e a maior dose de imazapique (zero e 750 g i.a. ha<sup>-1</sup>). A maior mineralização do herbicida imazapique, em solo rizosférico de feijão-de-porco, foi observada nas doses de 150 e 300 g i.a. ha<sup>-1</sup>, não havendo diferença significativa entre essas doses. Para o solo rizosférico do arroz CL<sup>®</sup>, a maior taxa de liberação de C-CO<sub>2</sub> foi observada no solo que recebeu 300 g i.a. ha<sup>-1</sup> do herbicida testado. Para o solo não rizosférico, a maior taxa de liberação foi observada na dose de 150 g i.a. ha<sup>-1</sup>, diferindo das demais doses testadas (Tabela 2).

Para as doses de 150 e 300 g i.a. ha<sup>-1</sup>, o solo rizosférico da ervilhaca e do consórcio de trevo branco + cornichão apresentaram maior acúmulo de CO<sub>2</sub>, diferindo das demais culturas testadas. Para o solo sem aplicação de herbicida, o solo cultivado com o consórcio de trevo branco + cornichão apresentou a maior taxa de liberação de C-CO<sub>2</sub>, diferindo significativamente das demais culturas, comprovando a liberação de exudatos radiculares por essas leguminosas. Para a maior dose testada (750 g i.a. ha<sup>-1</sup>), a cultura da ervilhaca apresentou o maior acúmulo de CO<sub>2</sub>, diferindo das demais, demonstrando que os microrganismos existentes na rizosfera dessa leguminosa toleram e degradam doses elevadas do herbicida imazapique. O solo não rizosférico apresentou as menores taxas de evolução de CO<sub>2</sub> independente da dose testada. A cultura do azevém não diferiu estatisticamente da ervilhaca e do solo sem cultivo (não rizosférico), quando não foi aplicado herbicida no solo, para a maior dose testada (750 g i.a. ha<sup>-1</sup>), não houve diferença estatística entre a cultura do azevém e o consórcio de trevo branco e cornichão, bem como com o solo sem cultivo (Tabela 2).

A ervilhaca apresentou maior taxa de liberação de C-CO<sub>2</sub> nas doses de 150 e 750 g i.a. ha<sup>-1</sup>, diferindo estatisticamente das demais doses testadas. Para o consórcio de trevo branco e

cornichão e para o solo rizosférico proveniente da cultura do azevém, a maior mineralização do herbicida imazapique se deu na dose de 150 g e.a. ha<sup>-1</sup>, diferindo das demais doses testadas. Também foi observado maior acúmulo de CO<sub>2</sub> na dose de 150 g e.a. ha<sup>-1</sup> para o solo sem cultivo (não rizosférico), diferindo das demais doses (Tabela 2).

Tabela 2 – Total acumulado de CO<sub>2</sub> emitido de solo rizosférico de plantas estivais e hibernais em resposta a doses de imazapique após 63 dias de incubação. Santa Maria, RS, 2013.

<b>Total de CO<sub>2</sub> acumulado (mg kg<sup>-1</sup>)</b>				
Solo rizosférico	----- Doses de imazapique (g de ingrediente ativo)* -----			
	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>300</b>	<b>750</b>
----- Plantas estivais -----				
Soja	178,6 aC	392,0 bB	477,7 aA	189,4 bC
Feijão-de-porco	146,3 bC	466,7 aA	500,0 aA	260,8 aB
Arroz CL**	62,7 cC	197,1 cB	312,0 bA	188,4 bB
Sem cultivo	61,3 cD	194,1 cA	108,0 cC	134,8 cB
C.V. (%)	----- 6,22 -----			
----- Plantas hibernais -----				
Ervilhaca	234,3 bC	469,5 aA	335,6 aB	478,5 aA
Consórcio***	329,9 aB	512,9 aA	377,1 aB	237,7 bC
Azevém	195,8 bcB	326,5 bA	231,7 bB	192,3 bcB
Sem cultivo	124,3 cB	207,1 cA	139,0 cB	133,7 cB
C.V. (%)	----- 14,32 -----			

\*Dose baseada na quantidade de ingrediente ativo presente na dosagem recomendada para a aplicação a campo da mistura formulada de imazetapir + imazapique (1500 ml ha<sup>-1</sup> - 150 g i.a. ha<sup>-1</sup>). \*\*Arroz tolerante aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas (cultivar Puitá Inta CL). \*\*\*Consórcio de trevo branco + cornichão. Médias seguidas de letras minúsculas iguais, na coluna (cultura) e maiúsculas iguais, na linha (doses de imazapique) não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

*Imazapir* - Para as doses de 150 e 300 g i.a. ha<sup>-1</sup>, a cultura que demonstrou maior efeito sobre a microbiota do solo foi a soja, diferindo estatisticamente das demais. Na maior dose testada (750 g i.a. ha<sup>-1</sup>), observou-se maior acúmulo de CO<sub>2</sub> quando o solo foi cultivado com feijão-de-porco, diferindo das demais culturas. Não houve diferença estatística entre essas leguminosas no solo que não recebeu o herbicida imazapir, porém observou-se diferença em relação as culturas do arroz CL<sup>®</sup> e o solo não rizosférico (sem cultivo). A cultura do arroz

CL<sup>®</sup> diferiu estatisticamente do solo sem cultivo apenas nas doses zero e 300 g i.a. ha<sup>-1</sup> (Tabela 3).

Para a soja, o maior acúmulo de CO<sub>2</sub> foi observado na dose de 150 g i.a. ha<sup>-1</sup>, diferindo significativamente das demais, evidenciando efeito negativo na atividade microbiana nas maiores doses do herbicida imazapir para o solo rizosférico dessa cultura. A maior mineralização do herbicida imazapir foi observada na maior dose testada (750 g i.a. ha<sup>-1</sup>) para o solo rizosférico da cultura do feijão-de-porco, diferindo significativamente das demais doses utilizadas. Para o solo rizosférico do arroz CL<sup>®</sup>, não foi observada diferença estatística entre as doses testadas, o mesmo foi observado para o solo não rizosférico (sem cultivo), apenas sendo diferenciado das demais doses o solo que não recebeu herbicida, sendo que este apresentou a menor taxa de acúmulo de CO<sub>2</sub> (83,4 mg kg<sup>-1</sup>) (Tabela 3).

Para as plantas hibernais, a maior taxa de liberação de C-CO<sub>2</sub> foi observada no solo rizosférico da ervilhaca na dose de 300 g i.a. ha<sup>-1</sup>, diferindo estatisticamente das demais culturas. Não houve diferença estatística entre as espécies avaliadas quando não foi aplicado o herbicida imazapir no solo, com exceção do solo não rizosférico. Ervilhaca e trevo branco + cornichão em consórcio, apresentaram as maiores taxas de liberação de C-CO<sub>2</sub> quando analisada a dose de 150 g i.a. ha<sup>-1</sup>, não diferindo significativamente entre si. Para essa mesma dose, não houve diferença significativa entre o solo rizosférico do azevém em relação ao solo sem cultivo. Na maior dose testada (750 g i.a. ha<sup>-1</sup>), a maior mineralização do herbicida imazapir foi observada no solo rizosférico proveniente do consórcio de trevo branco e cornichão, diferindo estatisticamente das demais cultura. As menores taxas de evolução de C-CO<sub>2</sub>, para essa dosagem, se deram no solo rizosférico do azevém e este não diferiu estatisticamente do solo não rizosférico (sem cultivo) (Tabela 3).

Tanto ervilhaca quanto o trevo branco e cornichão em consórcio, apresentaram o maior acúmulo de C-CO<sub>2</sub> na dose de 300 g i.a. ha<sup>-1</sup>, diferindo significativamente das demais doses testadas. Sendo que, para a ervilhaca, as menores taxas de liberação de C-CO<sub>2</sub> foram observadas na maior dose testada (750 g i.a. ha<sup>-1</sup>) e no tratamento que não recebeu o herbicida imazapir. Para o consórcio de trevo branco + cornichão, não houve diferença estatística entre as doses zero, 150 e 750 g i.a. ha<sup>-1</sup>. Para o solo rizosférico do azevém, pode-se observar maior mineralização do imazapir na dose de 300 g i.a. ha<sup>-1</sup>, diferindo estatisticamente das demais, porém essa diferença não foi observada entre a dose 150 e o solo que não recebeu herbicida. O menor acúmulo de CO<sub>2</sub>, para esta espécie, foi observado na maior dose testada (750 g i.a. ha<sup>-1</sup>). As maiores taxas de evolução de C-CO<sub>2</sub>, para o solo sem cultivo, foram observadas nas

menores doses testadas (zero, 150 e 300 g i.a. ha<sup>-1</sup>), não diferindo estatisticamente entre si (Tabela 3).

Tabela 3 – Total acumulado de CO<sub>2</sub> emitido de solo rizosférico de plantas estivais e hibernais em resposta a doses de imazapir após 63 dias de incubação. Santa Maria, RS, 2013.

<b>Total de CO<sub>2</sub> acumulado (mg kg<sup>-1</sup>)</b>				
Solo rizosférico	----- Doses de imazapir (g de ingrediente ativo)* -----			
	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>300</b>	<b>750</b>
----- Plantas estivais -----				
Soja	188,1 aC	409,8 aA	356,5 aB	327,8 bB
Feijão-de-porco	187,1 aC	201,4 bB	254,0 bB	396,6 aA
Arroz CL**	122,8 bA	150,7 cA	161,0 cA	131,4 cA
Sem cultivo	83,4 cB	133,5 cA	110,7 dA	124,4 cA
CV (%)	----- 6,22 -----			
----- Plantas hibernais -----				
Ervilhaca	196,8 aC	275,0 aB	593,7 aA	165,0 bC
Consórcio***	209,5 aB	256,7 aB	373,1 bA	272,9 aB
Azevém	174,7 aB	188,6 bB	274,1 cA	116,3 cC
Sem cultivo	137,6 bA	152,1 bA	101,9 dA	75,1 cB
CV (%)	----- 14,32 -----			

\*Dose baseada na quantidade de ingrediente ativo presente na dosagem recomendada para a aplicação a campo da mistura formulada de imazetapir + imazapique (1500 ml ha<sup>-1</sup> - 150 g i.a. ha<sup>-1</sup>). \*\*Arroz tolerante aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas (cultivar Puitá Inta CL). \*\*\*Consórcio de trevo branco + cornichão. Médias seguidas de letras minúsculas iguais, na coluna (cultura) e maiúsculas iguais, na linha (doses de imazapir) não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

Com base nos resultados observados, independente da estação de cultivo das plantas estudadas, admite-se que os microrganismos existentes na rizosfera dessas plantas toleram a presença de até o dobro da dose utilizada no campo (300 g i.a.ha<sup>-1</sup>), utilizando as moléculas dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir como substratos para o seu crescimento e multiplicação. O pesticida pode atuar de formas distintas sobre os microrganismos do solo, de um lado pode influenciar os microrganismos responsáveis pela sua degradação e por outro, pode atuar como substrato para o seu crescimento (OLIVEIRA et al., 2009).

A taxa de liberação de C-CO<sub>2</sub> observada refere-se a quantidade de CO<sub>2</sub> liberado pela microbiota do solo quando esta degrada componentes presentes no mesmo. Esta "respiração do solo" consiste em um indicador sensível da decomposição de resíduos, volume de carbono orgânico metabolizado e perturbações no ecossistema do solo (PAUL et al., 1999). De maneira geral, a taxa de liberação de C-CO<sub>2</sub> foi maior nos solos rizosféricos das espécies vegetais soja, feijão-de-porco, ervilhaca e trevo branco + cornichão em consórcio, demonstrando que houve maior mineralização das moléculas dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir no solo cultivado com essas espécies. Cabe ressaltar que os microrganismos associados às raízes do feijão-de-porco demonstraram maior tolerância a maior dose testada, independente do herbicida utilizado. Pires et al. (2005) avaliando solos submetidos à elevada contaminação com a aplicação de tebuthiuron, em uma concentração 55 vezes superior à dose comercial, observou que a cultura do feijão-de-porco apresentou os maiores valores de taxa de evolução de CO<sub>2</sub>.

Para confirmação de que essa elevada liberação de C-CO<sub>2</sub> realmente é proveniente da degradação dos herbicidas adicionados ao solo, foi realizada a detecção e quantificação dos herbicidas remanescentes após o período de incubação (respirometria) através da técnica de cromatografia acoplada a espectrometria de massas (LC-MS-MS). Essa mostrou elevada degradação dos herbicidas, maior que 80%, independente da cultura e do herbicida testado (Figura 1).

Corroborando com os resultados obtidos com a taxa de liberação de CO<sub>2</sub> (respirometria), a maior mineralização das moléculas dos contaminantes foi obtida em solo vegetado, diferindo significativamente da testemunha (solo sem cultivo), independente da estação de cultivo (Figura 1). Resultados semelhantes foram obtidos por Souto et al. (2013), quando testaram a fitoestimulação de espécies hibernais e estivais na degradação da mistura formulada de imazetapir+imazapique. Em estudos realizados por Wang et al. (2007), a degradação de imazapir foi 2,3 a 4,4 vezes mais lenta em solos estéreis, quando comparada com a de solo em condições naturais. Tais afirmações deixam evidente a importância da população microbiana do solo na dissipação desses herbicidas.

Para as culturas estivais, soja e feijão-de-porco foram as plantas que apresentaram maior mineralização dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, apenas diferindo entre si quando analisado o herbicida imazetapir, na maior dose testada (750 g i.a. ha<sup>-1</sup>) (Figura 1C e D). Nesse patamar de contaminação e para esse herbicida, a planta que se destacou como fitorremediadora foi o feijão-de-porco, mineralizando mais de 99% do herbicida presente no solo. Embora a presença do arroz CL tenha contribuído para a degradação dos herbicidas no solo, esse obteve menor resposta que as leguminosas estivais testadas. Santos et al. (2009),

estudando a biodegradação do glifosato, observou resultados mais promissores em solo cultivado com a cultura do soja, em comparação com feijão-de-porco e mucuna preta.

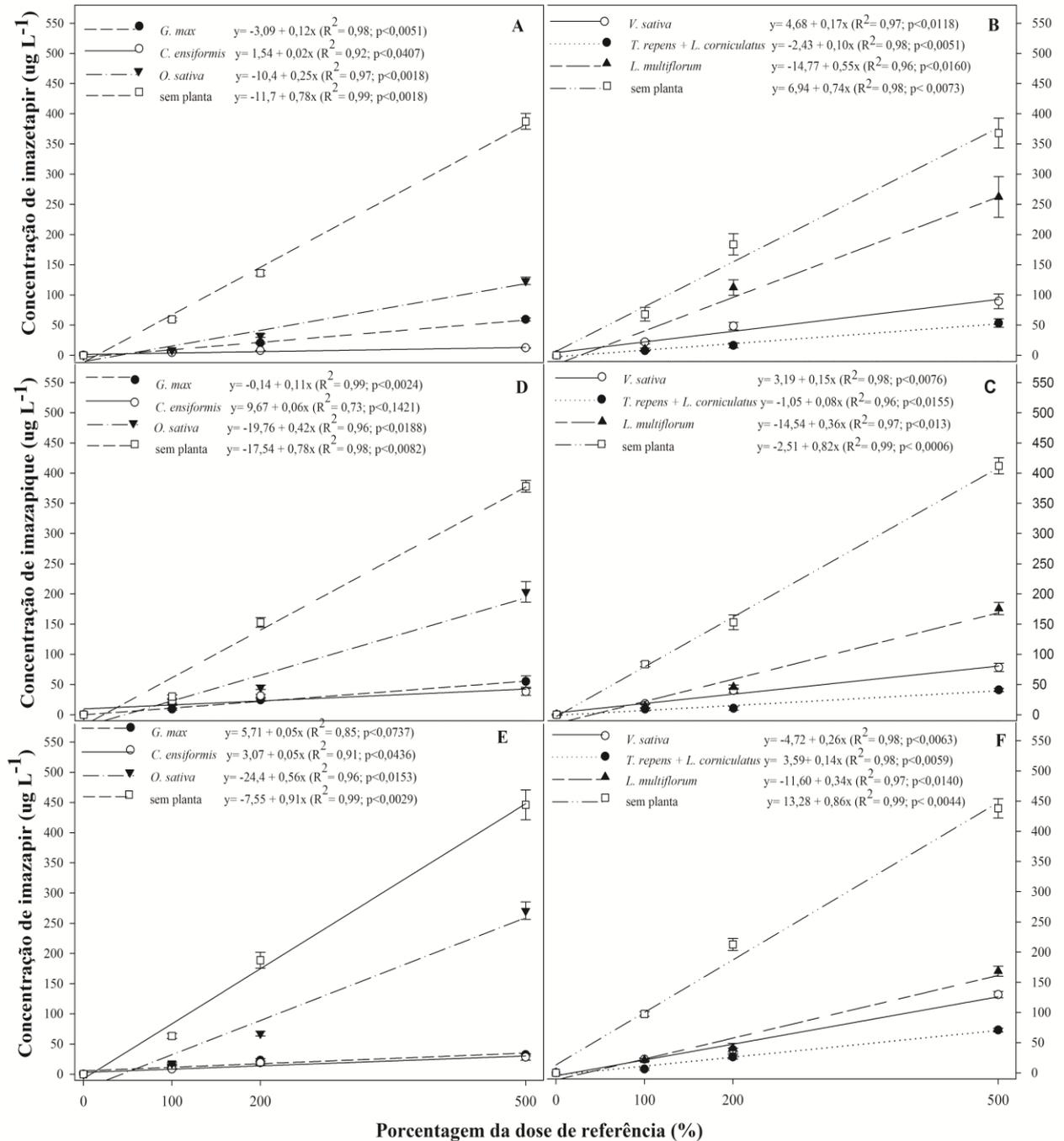


Figura 1 – Concentração dos herbicidas imazetapir (A e B), imazapique (C e D) e imazapir (E e F) nos solos rizosféricos das culturas estivais (A, D e E) e hibernais (B, C e F), após 63 dias de incubação. Santa Maria, RS, 2013.

Para as culturas hibernais, ervilhaca e o consórcio de trevo branco+cornichão foram as culturas que apresentaram as maiores taxas de mineralização, havendo considerável diminuição das concentrações dos três herbicidas estudados no solo rizosférico dessas plantas. Para o herbicida imazetapir, a cultura da ervilhaca, o consórcio de trevo branco + cornichão e a cultura do azevém, diferem estatisticamente entre si nas maiores doses utilizadas (300 e 750 g i.a. ha<sup>-1</sup>) (Figura 1A e B). Para os herbicidas imazapique e imazapir, essa diferença foi observada apenas na maior dose testada. Para esse patamar de contaminação, a planta com maior potencial de fitoestimulação foi o consórcio das leguminosas, trevo branco e cornichão, apresentando mais de 98% de mineralização das moléculas herbicidas (Figura 1C, E e F).

Além da contribuição das rizodeposições liberadas pelas plantas testadas, a elevada porcentagem de mineralização dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir no solo, observada no presente trabalho deve-se também às adequadas condições de umidade, temperatura e disponibilidade de nutrientes inorgânicos em que o experimento foi conduzido, propiciando alta atividade dos microrganismos associados às raízes dessas plantas (SOUTO et al., 2013). Condições estas que dificilmente ocorrem em condições de campo, o que pode resultar em menores porcentagens de biodegradação, se comparadas às condições do laboratório.

Independente da planta cultivada (estival ou hiberna), as maiores concentrações dos herbicidas recuperados (menor mineralização), foram observadas na maior dose testada (Figura 1), comprovando o efeito negativo de altas concentrações desses herbicidas sob a microfauna do solo (ZHANG et al., 2010). Os resultados do presente trabalho remetem a possibilidade de que após sucessivas aplicações de herbicidas do grupo das imidazolinonas, pode ocorrer redução da degradação microbiana no ambiente, o que conduziria a maior persistência dos herbicidas no solo e o maior efeito fitotóxico na cultura em sucessão.

## **Conclusão**

A produção de C-CO<sub>2</sub> do solo de cultivo de arroz irrigado, após a contaminação com os herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, é maior em solo vegetado do que em solo sem vegetação.

Soja, feijão-de-porco, ervilhaca e consórcio de trevo branco + cornichão são culturas consideradas fitoestimuladoras da microbiota do solo na degradação dos herbicidas pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas.

### Referencias Bibliográficas

BELO, A.F. et al. Potencial de espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Planta Daninha**, v. 29, n. 4, p. 821-828, 2011.

EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

JOHNSEN, K. et al. Pesticide effects on bacterial diversity in agricultural soils- a review. **Biology and Fertility of Soil**, v. 33, n. 6, p. 155-162, 2001.

OLIVEIRA, T.A. et al. Efeito da interação do nicosulfuron e chlorpyrifos sobre o banco de sementes e os atributos microbianos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 563-570, 2009.

PAUL, E.A. et al. Evolution of CO<sub>2</sub> and soil carbon dynamics in biologically managed, row-crop agroecosystems. **Applied Soil Ecology**, v. 11, n. 1, p. 53-65, 1999.

PERKOVICH, B.S. et al. Enhanced mineralization of [<sup>14</sup>C] atrazine in *Kochia scoparia* rhizosferic soil from a pesticide-contaminated site. **Pesticide Science**, v. 46, p. 391-396, 1996

PIRES, F.R. et al. Inferências sobre atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 627-634, 2005.

PIRES, F.R. et al. Fitorremediação de solos contaminados por herbicidas. **Planta Daninha**, v. 21, p. 335-341, 2003.

PROCÓPIO, S.O. et al. **Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas**. Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009. 32p. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/index.php?idpagina=fixas&pagina=publicacoesonline>

PROCÓPIO, S.O. et al. Development of bean plants in soil contaminated with the herbicide trifloxysulfuron-sodium after *Stizolobium aterrimum* and *Canavalia ensiformis* cultivation. **Planta Daninha**, v. 25, p. 87-96, 2007.

RICHARDSON, A.E. et al. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. **Plant and Soil**, v. 321, n. 1/2, p. 305-339, 2009.

ROMAN, E.S. et al. **Como funcionam os herbicidas: da biologia á aplicação**. Passo Fundo: Berthier, 2007. 160p.

SANTOS, E. A. Atividade rizosférica de solo tratado com herbicida durante processo de remediação por *Stizolobium aterrimum*. **Pesquisa Agropecuária tropical**, v. 40, n. 1, p. 1-7, 2010.

SANTOS, J. B. et al. Biodegradation of glyphosate in rhizospheric soil cultivated with *Glycine max*, *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum*. **Planta Daninha**, v. 27, n. 4, p. 781-787, 2009.

SENSEMAN, S.A. (Ed.). **Herbicide Handbook**. 9.ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2007. 458 p

SOARES, I.A. et al. Fungos na biorremediação de áreas degradadas. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 78, n. 2, p. 341-350, 2011.

SOUTO, K.M. et al. Biodegradação dos herbicidas imazetapir e imazapique em solo rizosférico de seis espécies vegetais. **Ciência Rural**, v. 43, n. 10, p. 1790-1796, 2013.

STEELE, G.L. et al. Control of red rice (*Oryza sativa*) in imidazolinone-tolerant rice (*Oryza sativa*). **Weed Technology**, v. 16, n. 3, p. 627-630, 2002.

STOTZKY, G. Microbial Respiration. In: BLACK, C. A. (ed.). **Methods in Soil Analysis**. Madison: ASSA, p. 1550-1572, 1965.

TEDESCO, M.J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174p.

YANG, Y. et al. Effects of weed management practices on orchard soil biological and fertility properties in southeastern China. **Soil and Tillage Research**, v. 93, n. 1, p. 179–185, 2007.

WANG, X. et al. Utilization and degradation of imazaquin by a naturally occurring isolate of *Arthrobacter crystallopoietes*. **Chemosphere**, v. 67, n. 11, p. 2156-2162, 2007.

WITT, W.W.; FLINT, J. F. Microbial degradation of imazaquin and imazethapyr. **Weed Science**, v. 45, p. 586-591, 1997.

ZHANG, C. et al. The effect of imazethapyr on soil microbes in soybean fields in northeast China. **Chemistry and Ecology**, v. 26, n. 3, p. 173-182, 2010.

# **ARTIGO 3 - EFICIÊNCIA DE *Vicia sativa* NA REMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM IMAZAPIR + IMAZAPIQUE EM FUNÇÃO DO TIPO DE SOLO**

## **Resumo**

A fitorremediação é uma alternativa extremamente viável para a descontaminação de solo contaminado com herbicidas com longo residual no solo, entretanto, o comportamento desses compostos e conseqüentemente a eficiência na descontaminação, pode variar em função das propriedades do solo. Em vista do exposto, esse trabalho teve como objetivo avaliar o potencial fitorremediador da ervilhaca (*Vicia sativa*), em diferentes solos, contaminados com a mistura formulada de imazapir+imazapique. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre fatores, sendo o Fator A composto pela cobertura do solo com ervilhaca e um tratamento sem planta de cobertura (testemunha). O Fator B composto de solos provenientes de quatro locais de coleta com diferentes características e o Fator C por doses da mistura formulada de imazapir+imazapique – zero, 25%, 50%, 100% e 200% da dose recomendada. Após a contaminação do solo com as doses de herbicidas, o solo foi cultivado com *V. sativa* ou deixado em pousio por 60 dias, e logo após esse período, para a avaliação do potencial fitorremediador dessa espécie, foi realizado um bioensaio com arroz irrigado, cultivar IRGA 417, onde foram avaliadas a estatura, massa seca da parte aérea e sintomas de fitointoxicação. A ervilhaca é fitorremediadora da mistura formulada de imazapir+imazapique, mesmo em solos com diferentes características texturais, químicas e mineralógicas.

**Palavras-chave:** Contaminação ambiental. Imidazolinonas. Persistência. Remediação.

## Abstract

Phytoremediation is a very feasible for the decontamination of soil contaminated with herbicides with long residual soil alternatively, however, the behavior of these compounds and therefore the efficiency of decontamination can vary depending on soil properties. In view of the above, this study aimed to evaluate the phytoremediation potential of vetch (*Vicia sativa*) in different soils contaminated with formulated mixture of imazapyr + imazapic. The treatments consisted of combinations of factors, and the factor A consists of the mulch with vetch and no cover crop treatment (control). Factor B consists of soils from four sampling sites with different characteristics and factor C for doses of formulated mixture of imazapyr + imazapic - zero, 25%, 50%, 100% and 200% of the recommended dose. After the soil contamination with herbicide rates, the soil was cultivated with *V. sativa* or left fallow for 60 days, and soon thereafter, to evaluate the phytoremediation potential of this species, a bioassay was performed with rice, IRGA 417, where the height were evaluated, dry mass of the part area and symptoms of phytointoxication. Vetch is phytoremediation of formulated mixture of imazapyr + imazapic, even in soils with different textural, chemical and mineralogical characteristics.

**Key words:** Environmental contamination. Imidazolinone. Persistence. Remediation.

## Introdução

A utilização de plantas como agente descontaminante de poluentes orgânicos, como herbicidas, em solos e recursos hídricos é denominada fitorremediação (MARQUES et al., 2011), e apresenta-se como uma alternativa para sistemas de cultivo onde necessita-se reduzir a persistência de herbicidas com longo período residual no solo, como é o caso do imazapir e do imazapique, pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas (SENSEMAN, 2007). Esses são utilizados em lavouras de arroz irrigado conduzidas sob o sistema Clearfield®, para o controle do arroz vermelho, planta daninha responsável por perdas superiores a 20% no rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado (MARCHEZAN et al., 2011).

Esses herbicidas têm sua persistência no solo variando de 31 a 410 dias para imazapique (GRYMES, 1995) e até 436 dias para imazapir (COX, 1998), característica que impede o cultivo de culturas como milho, sorgo, azevém (PINTO et al., 2009a; 2009b;

2009c), girassol (SANTOS et al., 2012), dentre outras, em sucessão ao arroz irrigado ou mesmo a semeadura, em anos posteriores a aplicação, de cultivares de arroz que não são tolerantes a esses produtos (KRAEMER et al., 2009a). Essa alta persistência deve-se, principalmente, à baixa degradação do herbicida em condição de anaerobiose (KRAEMER et al., 2009b), condição comum ao longo do cultivo do arroz irrigado na entressafra.

Contudo, a dinâmica desses herbicidas também é afetada por propriedades do solo, como pH, textura (LOUX; REESE, 1993), teor de matéria orgânica (INOUE et al., 2010) e umidade do solo (AVILA et al., 2005); bem como pelas características físico-químicas intrínsecas das moléculas, como solubilidade e capacidade de ionização (pKa) (RODRIGUES; ALMEIDA, 2011), alterando assim, a sorção desses herbicidas pelos colóides do solo.

O termo sorção envolve todos os processos em que os agroquímicos entram em contato com a matriz do solo. É um processo que determina quanto do herbicida ficará retido na matriz do solo e quanto ficará disponível na solução do solo (KRAEMER et al., 2009b). Essa proporção afeta a absorção desses herbicidas pelas plantas, bem como sua degradação microbiana, fotólise, lixiviação e transporte (GRAVILESCU et al., 2005). Em solos com pH ácido, argilosos ou com alto teor de matéria orgânica, esses herbicidas tendem a permanecer adsorvidos ao solo. Em ambientes alagados ou com textura mais arenosa, esses apresentam maior disponibilidade e mobilidade, podendo sofrer processos de dissipação.

Dessa forma, os herbicidas geralmente apresentam comportamentos distintos em função das diferenças mineralógicas e químicas dos solos onde são aplicados, o que torna os estudos de dissipação no ambiente ainda mais complexos (ROSSI et al., 2005). A variabilidade das propriedades físico-químicas do solo pode provocar retenção diferencial desses herbicidas que, por sua vez, se reflete na disponibilidade destes compostos na solução do solo; podendo gerar uma variação no controle de plantas daninhas, ou na injúria às plantas sensíveis ao princípio ativo desses herbicidas, influenciando também a capacidade fitorremediadora de plantas utilizadas para esse fim.

Há evidências sugerindo que a utilização de práticas que estimulem a degradação de herbicidas no solo durante o período da entressafra do arroz pode reduzir a persistência destes, minimizando os danos aos cultivos subsequentes. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial fitorremediador da ervilhaca (*Vicia sativa*), em solos com diferentes características texturais, químicas e mineralógicas, contaminados com a mistura formulada de imazapir+imazapique (525+175 g e.a.L<sup>-1</sup>).

## Material e Métodos

Para a realização do experimento, amostras de solo foram coletadas, na profundidade de 0-10 cm, em quatro municípios do Rio Grande do Sul – BR (Figura 1). Os municípios foram escolhidos de acordo com sua localização em importantes regiões produtoras de arroz irrigado e quanto às classes de solos mais representativas para esse cultivo. As amostras de solo foram coletadas no mês de abril de 2013, quando a temperatura encontrava-se em torno de 25°C, em lavouras de arroz irrigado sem histórico de aplicação de herbicidas do grupo químico das imidazolinonas.

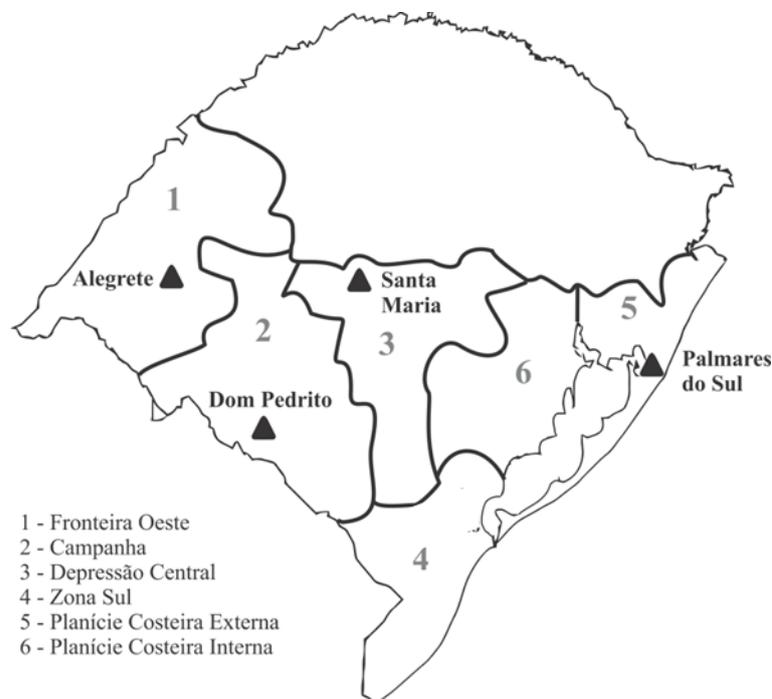


Figura 1 – Mapa das regiões arrozeiras do Estado do Rio Grande do Sul com a identificação dos locais de coleta de solo (Alegrete, Palmares do Sul, Dom Pedrito e Santa Maria). ▲ = ponto de coleta.

Os solos predominantes nas regiões de coleta foram classificados como Vertissolo Ebânico (Fronteira Oeste), Chernossolo Argilúvico (Campanha) e Planossolo Háplico (Depressão Central e Planície Costeira Externa) (Embrapa, 2006), apresentando as seguintes características (Tabela 1):

**Tabela 1** – Local de coleta (cidade), unidade de mapeamento, teores (%) de areia, silte e argila, matéria orgânica (%) e pH em água para os solos de Alegrete (ALE), Dom Pedrito (DP), Santa Maria (SM) e Palmares do Sul (PAL).

Local da coleta	Unidade de Mapeamento	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Matéria orgânica (%)	pH em água
SM	Vacacaí	44,35	53,83	18,85	1,5	5,1
PAL	Palmares	93,05	5,35	1,60	1,3	5,1
ALE	Escobar	10,34	21,93	33,81	3,4	5,5
DP	Ponche Verde	27,52	59,27	9,60	1,7	4,8

Depois de efetuadas as coletas, as amostras foram transportadas para a casa de vegetação da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), localizada no município de Capão do Leão, RS, onde, no ano agrícola 2013, foi conduzido o experimento em blocos ao acaso, em esquema fatorial 2x4x5, com três repetições. Os tratamentos foram compostos pela combinação entre fatores, sendo o Fator A a espécie vegetal ervilhaca (*Vicia sativa*) mais um tratamento sem planta de cobertura (testemunha). O Fator B quatro locais de coleta de solo com diferentes características: Santa Maria (SM), Palmares do Sul (PAL), Alegrete (ALE) e Dom Pedrito (DP); e o Fator C doses da mistura formulada de imazapir+imazapique – zero, 25%, 50%, 100% e 200% da dose recomendada (140 g/ha) (SOSBAI, 2012), totalizando 120 unidades experimentais.

O experimento foi conduzido em vasos de polietileno com capacidade de 3 dm<sup>3</sup>, recobertos por sacos plásticos, para que não houvesse perda do herbicida através de lixiviação. Os solos, destorroados e peneirados, foram acondicionados nos vasos e receberam a aplicação do herbicida nas doses descritas anteriormente, 48 horas antes da semeadura da cultura, utilizando-se pipetador de precisão para adicionar as soluções na superfície do solo. Após a aplicação, o solo recebeu água em volume suficiente para que o mesmo atingisse sua capacidade de campo, permitindo assim a distribuição homogênea do herbicida em toda a unidade experimental. As unidades experimentais foram mantidas sob irrigação diária, a fim de se conservar a umidade do solo em torno de 80% da capacidade de campo.

A cultura da ervilhaca foi semeada na densidade de 100 plantas por m<sup>2</sup> e após sua emergência efetuou-se o desbaste, deixando três plantas por vaso. Transcorrido 60 dias após a emergência, a cultura foi cortada na altura do coleto, não sendo efetuada a retirada das raízes

do solo. Após sete dias, foi realizada a semeadura, em todas as unidades experimentais, da cultivar de arroz não tolerante ao princípio ativo dos herbicidas utilizados, IRGA 417, como planta bioindicadora (PINTO et al., 2011), com o intuito de avaliar a capacidade fitorremediadora da espécie anteriormente cultivada em solo contaminado. Após a emergência das plantas de arroz, efetuou-se o desbaste, deixando-se quatro plantas por vaso.

As características avaliadas para determinação do potencial fitorremediador da planta testada foram fitointoxicação, estatura e massa seca da parte aérea das plantas de arroz não Clearfield®. Essas variáveis biométricas relacionadas ao crescimento das plantas mostraram-se eficientes em evidenciar as respostas biológicas esperadas diante da presença de moléculas herbicidas no solo (MADALÃO et al., 2012).

Os sintomas de fitointoxicação foram avaliados visualmente, comparando-se com a testemunha e atribuindo-se notas de acordo com a aparência da parte aérea de cada espécie, utilizando escala variando de 0 a 100%, para ausência de sintomas até a morte de planta, respectivamente (FRANS et al., 1986). A estatura das plantas foi avaliada medindo-se a extremidade das folhas mais altas. Ambas as avaliações foram feitas aos 21 dias após emergência (DAE). Aos 28 DAE, as plantas foram cortadas rente ao solo para determinação de massa da matéria seca da parte aérea, obtida por meio de pesagem do material colhido, secado em estufa de circulação forçada ( $70 \pm 2$  °C) por 72 horas.

Os dados obtidos foram analisados previamente quanto ao atendimento das pressuposições da análise de variância, normalidade e homocedasticidade, e posteriormente foram submetidos à análise de variância ( $p \leq 0,05$ ). Utilizou-se o programa SigmaPlot® para confecção das curvas de dose resposta; sendo que as mesmas foram determinadas pelo modelo log-logístico de 3 parâmetros (SEEFELDT et al., 1995), conforme segue:

$$y = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b\right]}$$

onde:  $y$  = porcentagem de controle;  $x$  = dose do herbicida; e “ $a$ ”,  $x_0$  e “ $b$ ” = parâmetros da equação, sendo que “ $a$ ” é a diferença entre os pontos máximo e mínimo da curva,  $x_0$  é a dose que proporciona 50% de resposta da variável e “ $b$ ” é a declividade da curva.

A partir dos parâmetros das curvas de dose resposta, pode-se calcular o  $GR_{50}$ , ou seja, a dose herbicida que causou 50% na redução da estatura e massa seca da parte aérea e 50% de

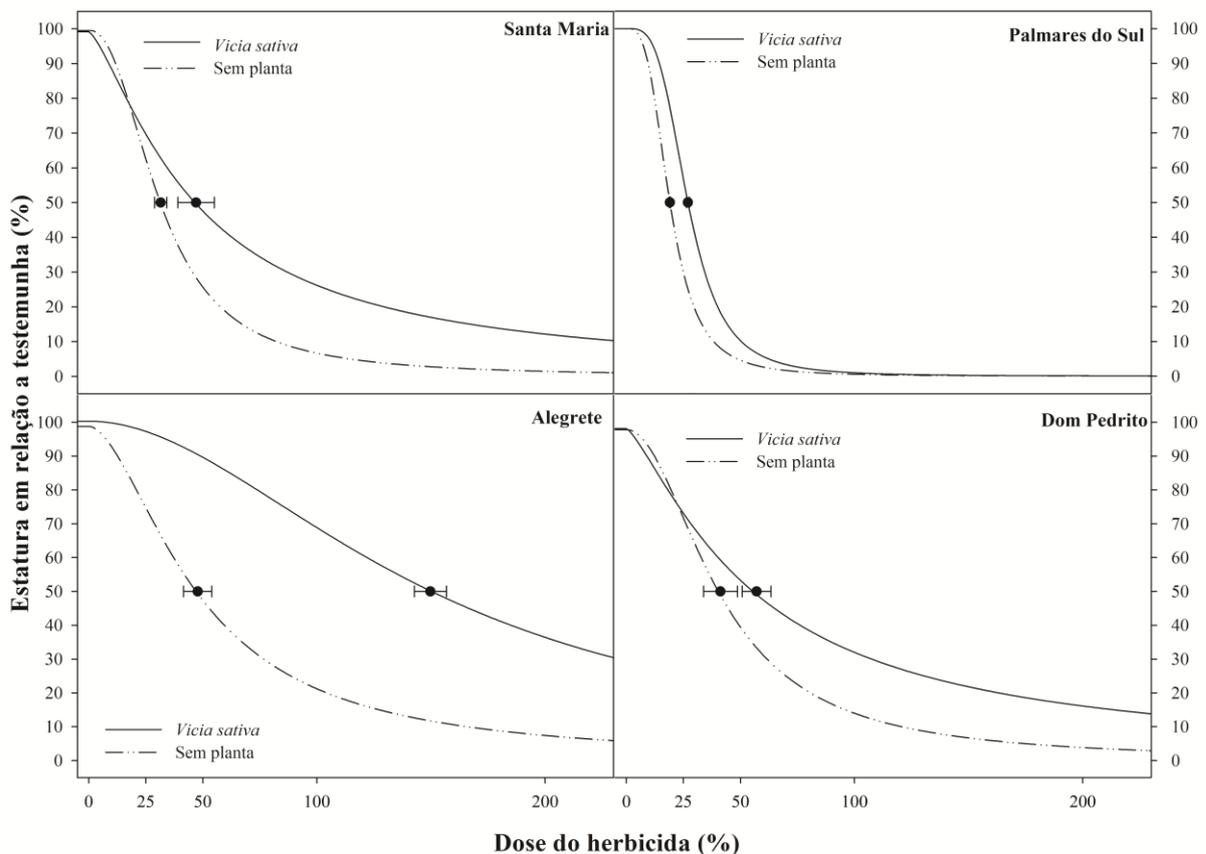
fitointoxicação nas plantas de arroz não tolerante quando comparadas com a testemunha. A partir destes cálculos, é possível inferir que quanto maior é o valor de  $GR_{50}$ , maior é o potencial remediador da planta estudada (SOUTO, 2010).

## **Resultados e Discussão**

Como não houve interação tripla entre os fatores avaliados ( $p > 0,1568$ ), esses foram analisados separadamente quando a capacidade fitorremediadora da cultura estudada (Fator A x Fator C) (Figura 2 – ilustrativa) e quanto à eficiência dessa cultura em solos com diferentes características mineralógicas, texturais e químicas (Fator B x Fator C) (Figura 3).

Através da análise das curvas de dose resposta da espécie estudada (Figura 2) e do solo analisado (Figura 3), constatou-se efeito significativo ( $p \leq 0,05$ ) sobre o residual do herbicida testado nas variáveis estatura de plantas, fitointoxicação e massa seca da parte aérea das plantas de arroz não tolerante, IRGA 417, semeadas em sucessão à ervilhaca e, também, quando não houve cultivo anterior. Independente do solo em que a ervilhaca foi cultivada, o aumento das doses resultou em plantas de menor estatura e massa seca da parte aérea e plantas com maiores sintomas de fitointoxicação.

A ervilhaca mostrou-se fitorremediadora da mistura herbicida utilizada (imazapir + imazapique) em todos os diferentes solos utilizados como substrato, quando analisado a redução de estatura das plantas de arroz (IRGA 417) (Tabela 2). Isso é evidenciado pela diferença significativa entre os valores de  $GR_{50}$  apresentados pela planta bioindicadora para essa variável, quando os solos foram cultivados anteriormente com a ervilhaca em comparação com os solos que permaneceram sem cobertura durante a condução do experimento (testemunha) (Tabela 2).



**Figura 2** – Estatura das plantas bioindicadoras (IRGA 417) semeadas em sucessão a cultura da ervilhaca, em diferentes solos (Santa Maria, Palmares do Sul, Alegrete e Dom Pedrito) contaminados com cinco doses da mistura formulada de imazapir + imazapique ( $525 + 175 \text{ g e.a. L}^{-1}$ ), avaliada aos 21 dias após a emergência (DAE) em relação à testemunha (sem cultivo). Capão do Leão, RS, 2013.

A presença de espécie vegetal causa impacto positivo na dissipação de moléculas herbicidas no solo, em comparação com solos sem vegetação. Áreas contendo plantas apresentam uma biodegradabilidade mais acelerada e completa quando comparadas com áreas não vegetadas (SOUTO et al., 2013). Isso é atribuído, principalmente, ao mecanismo denominado fitoestimulação, onde os microrganismos existentes na rizosfera das plantas são estimulados a degradar o contaminante, através da liberação de rizodeposições (PROCÓPIO et al., 2009). Quando as condições ambientais favorecem o desenvolvimento dos microrganismos e a biodisponibilidade dos herbicidas, a degradação das imidazolinonas aumenta (KRAEMER et al., 2009b).

**Tabela 2** – Parâmetros das equações de regressão sigmoideal do tipo logístico, para a variável estatura de plantas, apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada 70 dias após a aplicação de imazapir + imazapique, em resposta ao cultivo de ervilhaca como planta remediadora. Capão do Leão, RS, 2013.

Solo	Cultura	Parâmetros das equações				
		<sup>1</sup> a	<sup>2</sup> b	<sup>3</sup> GR <sub>50</sub>	<sup>4</sup> 95% IC	R <sup>2</sup>
SM	Ervilhaca	99,1	4,07	47,07	39,0-55,0	0,98
	Sem planta	99,5	1,37	31,50	30,1-32,8	0,99
PAL	Ervilhaca	99,8	0,30	26,90	26,6-27,2	0,99
	Sem planta	99,9	0,26	19,10	18,8-19,3	0,99
ALE	Ervilhaca	100,3	3,10	149,70	146,7-152,7	0,99
	Sem planta	98,7	2,76	47,70	45,0-50,4	0,99
DP	Ervilhaca	98,1	6,80	57,06	50,3-63,7	0,97
	Sem planta	97,7	3,80	41,24	33,7-48,7	0,98

<sup>1</sup>a: diferença entre os pontos máximo e mínimo da curva; <sup>2</sup>b: declividade da curva; <sup>3</sup>GR<sub>50</sub>: dose do herbicida que causa 50% de redução estatura de plantas; <sup>4</sup>IC: intervalo de confiança a 95% de probabilidade; SM: Santa Maria; PAL: Palmares do Sul; ALE: Alegrete; DP: Dom Pedrito.

Para as variáveis fitointoxicação e massa seca da parte aérea das plantas de arroz, cultivar IRGA 417, os resultados corroboram com os obtidos para a redução da estatura de plantas, pois independente do solo, a cultura da ervilhaca mostrou-se eficiente na descontaminação do solo contaminado com a mistura herbicida de imazapir + imazapique, diferindo estatisticamente da testemunha (solo sem cultivo anterior), pela não sobreposição de seus intervalos de confiança obtidos através do GR<sub>50</sub> desses tratamentos (Tabelas 3 e 4).

O principal mecanismo de dissipação das imidazolinonas no solo é a degradação microbiana (FLINT; WITT, 1997). A degradação de imazapir foi 2,3 a 4,4 vezes mais lenta em solos estéreis, quando comparada com a de solo em condições naturais (WANG et al., 2006). Já para imazetapir e imazaquin, foi determinado que 100% dos herbicidas foram degradados em solos não estéreis e 15% em solo estéril após cinco meses (FLINT; WITT, 1997). Em vários trabalhos, é relatada a contribuição das plantas, estimulando, por meio do efeito rizosférico, a mineralização de alguns herbicidas, tais como metolachlor (PERKOVICH et al. 1996), tebutiuron (PIRES et al., 2005) trifloxissulfuron - sódio ( PROCÓPIO et al., 2007; SANTOS et al., 2010), sulfentrazone (BELO et al., 2011) e a mistura formulada de imazetapir e imazapique (SOUTO et al., 2013).

**Tabela 3** – Parâmetros das equações de regressão sigmoidal do tipo logístico, para a variável fitointoxicação, apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada 70 dias após a aplicação de imazapir + imazapique, em resposta ao cultivo de ervilhaca como planta remediadora. Capão do Leão, RS, 2013.

Solo	Cultura	Parâmetros das equações				
		<sup>1</sup> a	<sup>2</sup> b	<sup>3</sup> GR <sub>50</sub>	<sup>4</sup> 95%IC	R <sup>2</sup>
SM	Ervilhaca	117,0	-2,09	75,51	59,5-91,4	0,99
	Sem planta	103,1	-2,63	35,04	34,1-35,8	0,99
PAL	Ervilhaca	101,6	-2,88	31,02	29,2-32,8	0,99
	Sem planta	100,6	-2,95	22,63	22,3-22,9	0,99
ALE	Ervilhaca	126,4	-2,09	156,6	134,6-178,6	0,99
	Sem planta	114,8	-1,09	67,30	49,1-85,4	0,99
DP	Ervilhaca	145,8	-1,76	90,43	70,4-110,4	0,99
	Sem planta	105,5	-2,00	40,50	37,4-43,5	0,99

<sup>1</sup>a: diferença entre os pontos máximo e mínimo da curva; <sup>2</sup>b: declividade da curva; <sup>3</sup>GR<sub>50</sub>: dose do herbicida que causa 50% de fitointoxicação na planta bioindicadora; <sup>4</sup>IC: intervalo de confiança a 95% de probabilidade; SM: Santa Maria; PAL: Palmares do Sul; ALE: Alegrete; DP: Dom Pedrito.

**Tabela 4** – Parâmetros das equações de regressão sigmoidal do tipo logístico, para a variável massa seca da parte aérea apresentados pela planta bioindicadora (arroz cultivar IRGA 417) semeada 70 dias após a aplicação de imazapir + imazapique, em resposta ao cultivo de ervilhaca como planta remediadora. Capão do Leão, RS, 2013.

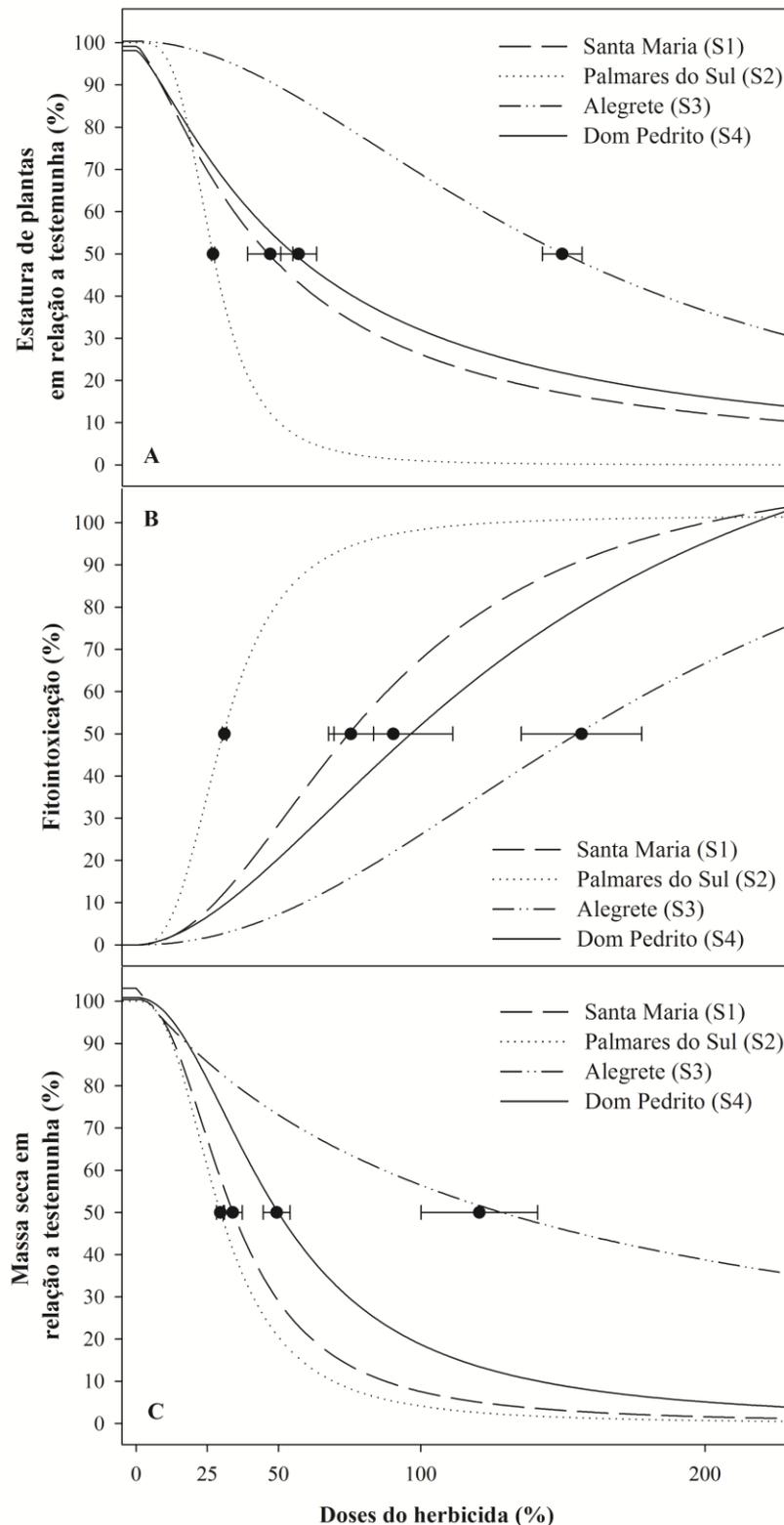
Solo	Cultura	Parâmetros das equações				
		<sup>1</sup> a	<sup>2</sup> b	<sup>3</sup> GR <sub>50</sub>	<sup>4</sup> 95%IC	R <sup>2</sup>
SM	Ervilhaca	100,4	2,32	33,96	30,6-37,2	0,98
	Sem planta	99,9	2,75	17,61	17,0-18,2	0,99
PAL	Ervilhaca	100,0	2,59	29,64	28,1-31,8	0,99
	Sem planta	100,0	1,99	5,70	3,64-7,75	0,99
ALE	Ervilhaca	103,1	1,00	120,7	79,7-161,6	0,99
	Sem planta	100,4	2,33	33,96	31,0-37,0	0,99
DP	Ervilhaca	100,8	2,09	49,48	45,0-54,0	0,97
	Sem planta	99,9	1,98	24,38	23,0-25,0	0,98

<sup>1</sup>a: diferença entre os pontos máximo e mínimo da curva; <sup>2</sup>b: declividade da curva; <sup>3</sup>GR<sub>50</sub>: dose do herbicida que causa 50% de redução na massa seca da parte aérea da planta bioindicadora; <sup>4</sup>IC: intervalo de confiança a 95% de probabilidade; SM: Santa Maria; PAL: Palmares do Sul; ALE: Alegrete; DP: Dom Pedrito.

Quando analisado a eficiência da ervilhaca na fitorremediação dos herbicidas imazapir e imazapique em solos com diferentes características, pode-se observar que os maiores valores de  $GR_{50}$ , foram obtidos quando essa foi cultivada no solo de Alegrete (ALE), independente da variável analisada, diferindo estatisticamente dos demais (Figura 3), sendo necessários 149,7% (209,5 g) da dose recomendada da mistura herbicida para causar 50% na redução da estatura das plantas, 156,6% (219,2 g) para causar 50% de fitointoxicação e 120,7% (168,9 g) para causar redução 50% de redução na massa seca da parte aérea do arroz sensível a esses compostos (Tabelas 2, 3 e 4). Porém, tais resultados não são suficientes para inferir que no solo de Alegrete houve maior fitorremediação, pois, o melhor desenvolvimento da planta bioindicadora, pode também ser atribuído a baixa biodisponibilidade das moléculas herbicidas na solução do solo, devido a maior sorção, provocada pelos maiores teores de argila e matéria orgânica presente no solo de Alegrete em comparação com os demais solos. O processo de fitorremediação não é baseado apenas nas características da planta utilizada, mas também nas características do meio em que o contaminante está inserido.

De maneira geral, solos com maior teor de matéria orgânica e argila apresentam maior adsorção dos herbicidas (LI et al., 2003; SI et al., 2006) por apresentarem maior área superficial específica e conseqüentemente maior quantidade de sítios de ligação. Os resultados de pesquisa sobre o efeito do teor de argila na retenção dos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas são diferentes: alguns sugerem que ele aumenta a sorção (WEI; WEIPING, 1998; LOUX et al., 1989), enquanto outros sugerem que não afeta a sorção das imidazolinonas (MADAMI et al., 2003). Monqueiro et al. (2010), ao estudarem a persistência e lixiviação do imazapir em dois solos com diferentes características físicas e químicas, constataram que a mobilidade dessa molécula nos solos é influenciado pelo pH, teor de argila e conteúdo de matéria orgânica.

O principal mecanismo que envolve a sorção das moléculas das imidazolinonas no solo é a partição hidrofóbica entre elas e as porções hidrofóbicas da matéria orgânica (KRAEMER et al., 2009b). No entanto, a presença de minerais de argila expansíveis (2:1), geralmente encontradas em vertissolos (solo de Alegrete), aumenta a capacidade de adsorção e diminui a dessorção de herbicidas devido às cargas geradas a partir das substituições isomórficas nas estruturas desses minerais (FONTES et al., 2001).



**Figura 3** – Estatura das plantas (A), sintomas de fitointoxicação (B), avaliadas aos 21 dias após a emergência (DAE) e redução da massa seca da parte aérea (C), avaliada aos 28 DAE, das plantas de arroz (bioindicadora) semeadas em sucessão a cultura da ervilhaca, quando essa foi cultivada em solos com diferentes características granulométricas, química e mineralógica. Capão do Leão, RS, 2013.

Os menores valores de  $GR_{50}$  foram observados no solo proveniente de Palmares do Sul (PAL), diferindo estatisticamente dos demais, quando analisado a redução da estatura das plantas de arroz ( $GR_{50}=26,9 - 37,6$  g), sintomas de fitointoxicação ( $GR_{50}=31,0 - 43,4$  g) e redução da massa seca da parte aérea ( $GR_{50}= 29,6 - 41,4$  g) (Tabelas 2, 3 e 4). Corroborando com resultados do solo de Alegrete (ALE), esses valores devem-se ao baixo teor de argila e matéria orgânica presente neste solo, o que diminui a capacidade de sorção tornando a concentração dos herbicidas maior na solução do solo, onde podem ser prontamente absorvidos pelas plantas (FIRMINO et al., 2008a), fato esse que pode predispor as espécies vegetais que não são tolerantes ao princípio ativo desses compostos. Em solos arenosos, a movimentação dos herbicidas será ainda maior do que em solos siltosos ou argilosos (MONQUEIRO et al., 2010).

Nesse sentido, Firmino et al. (2008b) acharam correlação positiva entre a relação de sorção de imazapir e os teores de MO e argila sob três solos de Minas Gerais. A relação de sorção de um solo muito argiloso é 3,5 vezes maior que a de um solo franco-argilo-arenoso e 5,8 vezes maior que a de uma areia franca. Contudo, esse tipo de interação é desprezível em solos com teores de matéria orgânica maiores que 1% (REGITANO et al., 2001).

Para os solos de Santa Maria (SM) e Dom Pedrito (DP), não houve diferença significativa entre os valores de  $GR_{50}$  nas variáveis estatura ( $Gr_{50}S1= 47,0$  e  $Gr_{50}S4=56,0$ ) e fitointoxicação ( $Gr_{50}S1= 75,5$  e  $Gr_{50}S4= 90,4$ ). Sendo observada essa diferença apenas quando avaliado a redução da massa seca da parte aérea da planta bioindicadora. Esses solos possuem textura média, prevalecendo a presença de silte ( $S1=53,83\%$  e  $S4= 59,83\%$ ), em relação a areia e a argila, sendo os teores desse e o percentual de matéria orgânica bastante próximos ( $S1=1,5\%$  e  $S2=1,7\%$ ) (Tabela 1), podendo-se afirmar que a predominância do silte nesses dois solos torna-os morfologicamente semelhantes e por isso o comportamento dos herbicidas também se equivalem. Dados que corroboram com Alonso et al. (2011), quando analisado o comportamento do imazetapir em solos com textura média sob o milho, utilizada como planta bioindicadora.

O pH do solo também tem grande influencia na disponibilidade das imidazolinonas no solo, pois esses herbicidas possuem natureza anfótera, presença de ambos os grupos funcionais ácidos e básicos (RODRIGUES; ALMEIDA, 2011). Contudo, em todos os solos testados, o pH do solo é maior que o  $pK_a$  dos herbicidas utilizados (imazapir = 2,0 e 3,9 e imazapir = 1,9 e 3,9 ) (Tabela 1), podendo-se afirmar que, independente do solo, a maioria das moléculas do composto estão na sua forma dissociada ( $R-COO^-$ ), sendo repelidas pelas cargas negativas da matriz do solo e por isso permanecendo mais biodisponíveis na solução,

sendo passíveis de absorção pelas plantas e degradação pelos microrganismos. Sendo assim, os diferentes resultados obtidos entre os solos são atribuídos principalmente à diferença entre os teores de argila e matéria orgânica presente em cada substrato.

## Conclusão

A ervilhaca é fitorremediadora da mistura formulada de imazapir+imazapique, mesmo em solos com diferentes características texturais, químicas e mineralógicas.

## Referências Bibliográficas

ALONSO, D.G. et al. Carryover potencial of herbicides used for *Conyza* sp. Control. In: Proceeding of 2011 Weed Science Society of America Annual Meeting: Portland, USA: **Weed Science Society of America**, p. sp., 2011.

AVILA, L.A. et al. Efeito da umidade do solo na sorção e disponibilidade de imazetapir em três solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26.; 2005, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: UFSM, p.190-193, 2005.

BELO, A.F. et.al. Potencial de espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Planta Daninha**, v. 29, n. 4, p. 821-828, 2011.

COX, L.; KOSKINEN, W.C; YEN, P.Y. Changes in sorption of imidacloprid with incubation time. **Soil Science Society of America**, v. 62, p. 342-347, 1998.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solo. 2ª ed., Rio de Janeiro: EMBRAPA, 306 p. 2006.

FIRMINO, L.E. et al. Movimento do herbicida imazapyr no perfil de solos tropicais. **Planta Daninha**, v. 26, n. 1, p. 223-230, 2008a.

FIRMINO, LE et al. Sorção e lixiviação de imazapyr em solos com diferentes texturas. **Planta Daninha**, v. 26, n. 2, p. 395-402, 2008b

FLINT, J.L.; WITT, W.W. Microbial degradation of imazaquin and imazethapyr. **Weed Science**, v. 45, n. 4, p. 586-591, 1997.

FONTES, M. P. et al. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agrícola**, v. 58, n. 3, p. 627-646, 2001.

FRANS, R. et al. **Experimental design and techniques for measuring and analysing plant responses to weed control practices**. In: CAMPER, N.D. (Ed.) Research methods in weed science. 3 ed. Champaign: Southern Weed Science Society, 1986, 37p

GRAVILESCU, M. Fate of pesticides in the environment and its bioremediation. **Engineer Life Science**, v. 5, p. 497-526, 2005.

GRYMES, C.F.; CHANDLER, J.M.; NESTER, P.R. Response of soybean (*Glycine max*) and rice (*Oryza sativa*) in rotation to AC 263, 222. **Weed Technology**, v. 9, n. 3, p. 504-511, 1995.

INOUE, M. H. et al. Potencial de lixiviação de herbicidas utilizados na cultura do algodão em colunas de solo. **Planta Daninha**, v. 28, n. 4, p. 825-833, 2010.

KRAEMER, A.F. et al. Persistência dos herbicidas imazethapyr e imazapic em solo de várzea sob diferentes sistemas de manejo. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 581-588, 2009a.

KRAEMER, A.F. et al. Destino ambiental dos herbicidas do grupo das imidazolinonas: revisão. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 629-639, 2009b.

LI, H. et al. Sorption and desorption of pesticides by clay minerals and humic acid-clay complexes. **Soil Science Society of America**, v. 67, p. 122-131, 2003.

LOUX, M. M.; REESE, K. Effect of soil type and pH on persistence and carryover of imidazolinones herbicides. **Weed Technology**, v. 7, n. 2, p. 452-458, 1993.

LOUX, M. M. et al. Adsorption of imazaquin and imazethapyr on soils, sediments and selected adsorbants. **Weed Science**, v. 37, n. 5, p. 712-718, 1989.

MADANI, M. E. et al. pH effect and kinetic studies of the binding behaviour of imazethapyr herbicide on some Moroccan soils. **Fresenius Environmental Bull.**, v. 12, n. 9, p. 1114-1119, 2003.

MADALÃO, J.C. et al . Susceptibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone. **Revista. Ceres**, v. 60, n. 1, p. 111-121, 2013.

MARCHESAN, E. et al. Arroz tolerante a imidazolinonas: banco de sementes de arroz - vermelho e fluxo gênico. **Planta Daninha**, v. 29, n.esp., p. 1099-1105, 2011.

MARQUES, M. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 35, p. 1-11, 2011.

MONQUERO, P.A. et.al. Lixiviação e persistência dos herbicidas sulfentrazone e Imazapic. **Planta Daninha**, v. 28, n. 1, p. 185-195, 2010.

PERKOVICH, B.S. et al. Enhanced mineralization of [<sup>14</sup>C] atrazine in *Kochia scoparia* rhizosferic soil from a pesticide-contaminated site. **Pesticide Science**, v. 46, p. 391-396, 1996

PINTO, J. J. O. et al. Atividade residual de imazethapyr + imazapic em arroz semeado em rotação com o arroz Clearfield®. **Planta Daninha**, v. 29, n. 1, p. 205-216, 2011.

PINTO, J.J.O. et al. Milho (*Zea mays*) como espécie bioindicadora da atividade residual de (imazethapyr+imazapic). **Planta Daninha**, v. 27, n. esp., p. 1005-1014, 2009a.

PINTO, J. J. O. et al. Atividade residual de imazethapyr + imazapic para sorgo granífero (*Sorghum bicolor*) semeado em rotação com o arroz irrigado. **Planta Daninha**, v. 27, n. especial, p. 1015 - 1024, 2009b.

PINTO, J. J. O. et al . Atividade residual de (imazethapyr+imazapic) sobre azevém anual (*Lolium multiflorum*), semeado em sucessão ao arroz irrigado, sistema Clearfield®. **Planta daninha**, v. 27, n. 3, 2009c .

PIRES, F.R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 335-341, 2003.

PRATA, F.; LAVORENTI, A. Comportamento de herbicidas no solo: influência da matéria orgânica. **Revista de Biociência**, v. 6, n. 2, p. 17-22, 2000.

PROCÓPIO, S.O. et al. **Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009. 32p.

PROCÓPIO, S.O. et al. Development of bean plants in soil contaminated with the herbicide trifloxysulfuron-sodium after *Stizolobium aterrimum* and *Canavalia ensiformis* cultivation. **Planta Daninha**, v. 25, p. 87-96, 2007.

REGITANO, B. et al. Imazaquin mobility in tropical soils in relation to soil moisture and rainfall timing. **Weed Research**, v. 42, p. 271, 2002.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de Herbicidas**. 6 ed. Londrina, PR: Edição do autores, 2011. 697p.

ROSSI, C. V. S.; ALVES, P. L. C. A.; MARQUES J. J. Mobilidade do sulfentrazone em Latossolo Vermelho e em Chernossolo. **Planta Daninha**, v. 23, n. 4, p. 701-710, 2005.

SANTOS, E. A. Atividade rizosférica de solo tratado com herbicida durante processo de remediação por *Stizolobium aterrimum*. **Pesquisa Agropecuária tropical**, v. 40, n. 1, p. 1-7, 2010.

SANTOS, G. et al. Uso do novo sistema Clearfield® na cultura do girassol para o controle de plantas daninhas dicotiledôneas. **Planta Daninha**, v. 30, n. 2, p. 359-365, 2012.

SEEFELDT, S.S; JENSEN, J. E; FUERST, P. Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships. **Weed Technology**, Champaign, v. 9, n. 2, p. 218-225, 1995.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI) Arroz Irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Gravataí, RS: SOSBAI, 176p. 2012.

SOUTO, K.M. et al. Biodegradação dos herbicidas imazetapir e imazapique em solo rizosférico de seis espécies vegetais. **Ciencia Rural**, v 43, n. 10, p. 1790-1796, 2013.

SOUTO, K.M. et al. **Fitorremediação de solo de várzea contaminado com os herbicidas imazetapir e imazapique**. 2010. 110f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Curso de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.

SENSEMAN, S. A. **Herbicide handbook**. Lawrence: Weed Science Society of America, 2007, p.458.

SI, Y. et al. Influence of organic amendment on the adsorption and leaching of ethametsulfuron-methyl in acidic soils in China. **Geoderma**, v. 130, p. 66-76, 2006.

WANG, X.; WANG, H.; FAN, D. Degradation and metabolism of imazapyr in soils under aerobic and anaerobic conditions. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 86, n. 8, p. 541–551, 2006.

WEI, Z.; WEIPING, L. Adsorption-desorption and photolysis of the herbicide imazethapyr in soil-water environment. **China Environmental Science.**, v. 18, n. 5, p. 476-480, 1998.

## **ARTIGO 4 - USO DE PLANTAS NA REDUÇÃO DO RESIDUAL DAS MISTURAS FORMULADAS DE IMAZETAPIR+IMAZAPIQUE E IMAZAPIQUE + IMAZAPIR EM CONDIÇÃO DE CAMPO**

### **Resumo**

A fitorremediação de herbicidas representa uma importante área a ser investigada, uma vez que esses compostos são amplamente utilizados na agricultura, apresentando potencialidade de contaminação para o solo e água. Em vista do exposto, esse trabalho tem como objetivo avaliar, em nível de campo, a fitorremediação do solo contaminado com os herbicidas do grupo químico das imidazolinonas através da utilização das culturas de azevém (*Lolium multiflorum*), trevo branco (*Trifolium repens*) + cornichão (*Lotus corniculatus*) em consórcio, soja (*Glycine max*) e arroz irrigado (*Oryza sativa* cultivar Puitá INTA CL). Os tratamentos foram compostos pelas misturas formuladas de imazetapir + imazapique e imazapir + imazapique, nas doses comerciais, mais um tratamento controle, sem aplicação de herbicidas; e pelas plantas potencialmente fitorremediadoras. Para a avaliação do potencial fitorremediador dessas culturas foram avaliadas a estatura e sintomas de fitointoxicação, aos 14, 21, 28 e 42 dias após a emergência, e massa da matéria seca da parte aos 55 dias após a emergência das plantas bioindicadoras (arroz cultivar IRGA 417 para as plantas hibernais e azevém para as plantas estivais). Soja no verão e o consórcio de trevo branco + cornichão no período de inverno são remediadoras de solo contaminado com as misturas formuladas de imazetapir + imazapique e imazapir + imazapique. O herbicida imazapir + imazapique causa maior efeito residual que imazetapir + imazapique.

**Palavras-chave:** Contaminação ambiental. Fitorremediação. Imidazolinonas.

## Abstract

Herbicide phytoremediation represents an important area to be investigated, since these compounds are widely used in agriculture, with the potential for contamination of soil and water. In view of the above, this study aims to evaluate, under field conditions, the phytoremediation of contaminated herbicides of the imidazolinone chemical group soil through the use of plant species ryegrass (*Lolium multiflorum*), white clover (*Trifolium repens*) + birdsfoot (*Lotus corniculatus*) in consortium, soybean (*Glycine max*) and rice (*Oryza sativa* cultivar Puita INTA CL). The treatments consisted of formulated mixtures of imazethapyr + imazapic and imazapyr + imazapic in commercial doses, plus a control without application of herbicides and plant species by potentially phytoremediator. For the evaluation of the phytoremediation potential of these species height and herbicide symptoms, at 14, 21, 28 and 42 days after emergence, and dry mass of the part were evaluated at 55 days after emergence of bioindicator plants (rice IRGA 417 for cool season plants and ryegrass plants for summer). Soybean in the summer and the consortium of white clover + birdsfoot trefoil during winter are remediating soil contaminated with formulated mixtures of imazethapyr + imazapic and imazapyr + imazapic. The herbicide imazapyr + imazapic causes greater residual effect than imazethapyr + imazapic.

**Key words:** Environmental contamination. Phytoremediation. Imidazolinone.

## Introdução

Para a obtenção de elevadas produtividades nas culturas agrícolas, é necessário, entre outros fatores, um manejo adequado para o controle de plantas daninhas, o qual pode ser realizado basicamente com a utilização de herbicidas. Independente do local de aplicação, o destino final desses compostos é o solo e uma vez em contato com o mesmo, estão sujeitos a interações com plantas e microrganismos. Segundo Tauk (1990), essas interações relacionam-se com a produção de enzimas com capacidade de transformar a maioria dos agroquímicos em formas menos tóxicas ou atóxicas.

De acordo com as características físico-químicas da molécula e as condições do meio, o herbicida pode permanecer no solo, dando origem ao denominado efeito residual (DAN et

al., 2011), o que implica em problemas quando se trata da sucessão de espécies sensíveis a esses compostos. Além disso, quanto maior o tempo de permanência do herbicida no solo, maior é a possibilidade de contaminação de outros compartimentos ambientais, como as águas sub-superficiais, através da lixiviação do próprio herbicida e/ou de seus metabólitos (INOUE et al., 2008).

Herbicidas pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas são exemplos de compostos que possuem alta persistência no solo, variando de alguns meses até três anos (SENSEMAN, 2007), dependendo das características do ambiente em que se encontram (AVILA et al., 2010). Esses compostos são utilizados em áreas de cultivo de arroz irrigado cultivadas sob o Sistema Clearfield® para o controle do arroz vermelho, principal planta daninha dessa cultura (SANTOS et al., 2007). Segundo as recomendações técnicas (SOSBAI, 2012), os herbicidas recomendados para utilização nesse sistema de produção são as misturas formuladas de imazetapir + imazapique (75+25 g e.a. L<sup>-1</sup>); e imazapir + imazapique (525+175 g e.a. kg<sup>-1</sup>).

Nesse contexto, várias alternativas biológicas de remediação estão sendo pesquisadas em todo o mundo, uma vez que é crescente a preocupação em descontaminar áreas tratadas com herbicidas desse grupo químico. Entre essas alternativas, a fitorremediação (*fito* do grego “planta” e *remediação* do latim “voltar ao que era antes, limpar”), destaca-se como uma solução de remediação de baixo custo, utilizando plantas selecionadas para a remoção de poluentes orgânicos em solos ou água contaminados (CUNNINGHAM et al., 1996).

Essa técnica apresenta como principal consequência a redução da mobilidade e disponibilidade da molécula do contaminante (CUNNINGHAM et al., 1996), sendo que a possibilidade de uma planta ser fitorremediadora depende do tipo de poluente, devendo-se testar várias espécies para que seja detectada aquela que possui maior seletividade em relação a molécula em questão (MADALÃO et al., 2012).

É comprovada a eficiência dessa técnica na descontaminação de solos com residual de herbicidas tebuthiuron, picloram, trifloxysulfuron-sodium, sulfentrazone e a mistura herbicida imazetapir + imazapique, empregando-se plantas como *Canavalia ensiformis*, *Stizolobium aterrimum*, *Eleusine coracana*, *Panicum maximum* e *Helianthus annuus* (PROCÓPIO et al., 2009; CARMO et al., 2008; ASSIS et al., 2010; BELO et al., 2011; SOUTO et al., 2013).

Cada espécie apresenta características específicas para a remoção, imobilização ou transformação de determinados contaminantes (CUNNINGHAM et al., 1996). Nesse sentido, é necessário que mais estudos sejam realizados nessa área, a fim de melhor conhecermos a capacidade fitorremediadoras de cada espécie. Em vista do exposto, esse trabalho tem como

objetivo avaliar, em nível de campo, a fitorremediação do solo contaminado com os herbicidas compostos pelas misturas formuladas de imazetapir + imazapique ( $75 + 25 \text{ g e.a. L}^{-1}$ ) e imazapir + imazapique ( $525 + 175 \text{ g e.a. kg}^{-1}$ ) utilizando as culturas do azevém (*Lolium multiflorum*), trevo branco (*Trifolium repens*) + cornichão (*Lotus corniculatus*) em consórcio, soja (*Glycine max*) e arroz irrigado (*Oryza sativa* cultivar Puitá INTA CL).

## Material e Métodos

O estudo foi conduzido em períodos distintos, de acordo com a estação de cultivo das plantas avaliadas (Tabela 1). Ambos experimentos foram conduzidos em campo, em área sistematizada, no Centro Agropecuário da Palma (CAP) pertencente à Universidade Federal de Pelotas (UFPel), durante os anos agrícolas 2011/12 e 2012/13. O solo do local foi classificado como Planossolo Hidromórfico eutrófico solódico, unidade de mapeamento Pelotas (Embrapa, 2006), apresentando as seguintes características: pH água (1:1) = 4,9; teor de argila = 13%, teor de matéria orgânica 1,3%, P =  $6,6 \text{ mg dm}^{-3}$ , K =  $42 \text{ mg dm}^{-3}$ , Ca =  $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , Mg =  $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e índice SMP = 5,1.

Na estação de cultivo 2011/2012, anteriormente a introdução das plantas estudadas, ambas as áreas foram cultivadas sob Sistema Clearfield® utilizando a cultivar Puitá INTA CL, na densidade de  $100 \text{ kg de sementes ha}^{-1}$  com a aplicação dos herbicidas imazetapir + imazapique ( $75+25 \text{ g e.a. L}^{-1}$ ) e imazapir + imazapique ( $525+175 \text{ g e.a. kg}^{-1}$ ), em faixas, nas doses recomendadas,  $1500 \text{ mL/ha}^{-1}$  e  $140 \text{ g/ha}^{-1}$ , respectivamente; simulando assim condições reais de campo que culminam no efeito residual desses herbicidas no solo. Da mesma forma, uma faixa foi deixada sem a aplicação de herbicida, sendo utilizada como testemunha. Os demais tratamentos culturais foram efetuados conforme as recomendações técnicas da pesquisa para o cultivo de arroz irrigado no Sul do Brasil (SOSBAI, 2012).

### Experimento I: *Efeito do uso de plantas hibernais*

O experimento foi conduzido em delineamento blocos ao acaso, arranjado em esquema fatorial 3X3 com parcelas subdivididas e quatro repetições. Nas faixas (parcelas principais) o fator A foi composto pelas misturas herbicidas: imazetapir + imazapique e imazapir + imazapique, nas doses anteriormente citadas, além de um tratamento testemunha (sem aplicação de herbicida). Nas subparcelas, o fator B foi composto pelas culturas do azevém (*Lolium multiflorum*), trevo branco (*Trifolium repens*) + cornichão (*Lotus*

*corniculatus*) e um tratamento sem presença de plantas de cobertura (pousio), totalizando 36 parcelas.

No período de entressafra (inverno de 2012), em sucessão ao cultivo da área com a cultivar Puitá Inta CL (Tabela 1), cada faixa foi subdividida em parcelas de 5x2 metros sendo realizado o cultivo das espécies hibernais potencialmente fitorremediadoras, azevém na densidade de 25 kg de semente/ha; consórcio de trevo branco + cornichão na densidade de 12 kg de semente/ha (4 kg de trevo branco + 8 kg de cornichão) e subparcelas sem presença de plantas de cobertura (pousio). O manejo das espécies hibernais foi realizado conforme recomendações técnicas para cada cultura.

As variáveis avaliadas para determinação da tolerância das culturas de inverno foram sintomas de fitointoxicação aos 21 e 50 dias após emergência (DAE), e a massa da matéria seca da parte aérea aos 60 DAE. Os sintomas de fitointoxicação foram avaliados visualmente, atribuindo-se notas de acordo com os sintomas apresentados pela planta em resposta a aplicação do herbicida, utilizando escala variando de 0 a 100%, para ausência de sintomas até a morte de planta, respectivamente (FRANS et al., 1986). A massa da matéria seca da parte aérea foi realizada cortando as plantas rentes ao solo e obtida por meio de pesagem do material colhido, secado em estufa de circulação forçada ( $70 \pm 2$  °C) por 72 horas.

Na estação de cultivo 2012/2013, com o objetivo de determinar a capacidade fitorremediadora das espécies anteriormente citadas, semeou-se nas subparcelas anteriormente cultivadas com as plantas hibernais, a cultivar de arroz IRGA 417, sensível aos herbicidas utilizados, e, portanto utilizada como planta bioindicadora da presença de resíduos dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir no solo (PINTO et al., 2011), na densidade de 110 kg de sementes ha<sup>-1</sup>. O preparo do solo foi realizado no sistema plantio direto, e todo o manejo da cultura foi realizado de acordo com as recomendações técnicas (SOSBAI, 2012).

As variáveis avaliadas, nas plantas de arroz não Clearfield<sup>®</sup>, para determinação do potencial fitorremediador das plantas cultivadas anteriormente, em nível de campo, foram: população inicial de plantas (número de plantas/m<sup>2</sup>) aos 14 DAE, estatura de plantas e sintomas de fitointoxicação aos 14, 21, 28 e 42 DAE, massa da matéria seca da parte aérea aos 30 e 55 DAE e produtividade de grãos. Os sintomas de fitointoxicação e a massa seca da parte aérea foram avaliados conforme metodologia citada anteriormente (FRANS et al., 1986). A estatura das plantas foi avaliada, através de régua graduada adotando-se a extremidade das folhas mais altas. Os dados referentes à variável-resposta produtividade do arroz foram obtidos a partir da colheita manual, quando os grãos atingiram umidade próxima

a 22%, em área útil de 4 m<sup>2</sup> (4 x 1 m) da área central de cada parcela, corrigindo-se o teor de umidade para 13% e extrapolando os dados para kg ha<sup>-1</sup>.

Os dados obtidos foram analisados previamente quanto ao atendimento das pressuposições da análise de variância (normalidade e homocedasticidade da variância), e submetidos à análise da variância ( $p \leq 0,05$ ). O teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) foi utilizado para comparação entre os tratamentos herbicidas.

#### Experimento II - *Efeito do uso de plantas estivais*

Para atingir os objetivos desse estudo, o experimento II foi conduzido de forma similar ao experimento I, porém, o fator B foi composto pelas plantas estivais soja (*Glycine max*), Arroz CL (*Oryza sativa* cultivar Puitá INTA CL) e um tratamento sem presença de plantas de cobertura (pousio), totalizando 36 parcelas.

Durante a entressafra (inverno de 2012), a área foi cultivada com azevém (Tabela 1), a fim de manter cobertura vegetal durante o inverno. Na estação de cultivo 2012/2013, em rotação com o arroz cultivado sob o Sistema Clearfield<sup>®</sup>, semeou-se nas subparcelas, as culturas da soja e arroz CL, nas densidades de 400.000 pl/ha e 100 kg de sementes/ha, respectivamente, e um tratamento sem presença de plantas de cobertura (pousio) (Tabela 1).

As variáveis avaliadas para determinação da tolerância das culturas de verão foram sintomas de fitointoxicação aos 21 e 50 dias após emergência (DAE), e matéria seca aos 60 DAE. Os sintomas de fitointoxicação foram avaliados visualmente, atribuindo-se notas de acordo com os sintomas apresentados pela planta em resposta a aplicação do herbicida, utilizando escala variando de 0 a 100%, para ausência de sintomas até a morte de planta, respectivamente.

Com o objetivo de determinar a capacidade fitorremediadora das culturas estivais, no período de entressafra, após o cultivo das mesmas (inverno 2013), foi semeada, nas subparcelas, a cultura do azevém (Tabela 1), utilizada como planta bioindicadora da presença de resíduos dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir no solo (PINTO et al., 2009).

As características avaliadas, nas plantas de azevém, para determinação do potencial fitorremediador das espécies cultivadas anteriormente, em nível de campo, foram sintomas de fitointoxicação e estatura de plantas aos 14, 21, 28 e 42 DAE e matéria seca da parte aérea das plantas aos 55 DAE. Todas as avaliações foram realizadas de acordo com a metodologia anteriormente citada.

Os dados obtidos foram analisados previamente quanto ao atendimento das pressuposições da análise de variância (normalidade e homocedasticidade da variância), e

submetidos à análise da variância ( $p \leq 0,05$ ). O teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) foi utilizado para comparação entre os tratamentos herbicidas.

Tabela 1 – ‘Visualização da distribuição temporal dos experimentos I e II. Capão do Leão, RS, 2013.

		ESTAÇÃO DE CULTIVO			
		2011/12 (verão)	2012 (inverno)	2012/13 (verão)	2013 (inverno)
<b>Experimento I</b>	Plantas hibernais	- Imazetapir + imazapique	<u>Plantas</u> <u>fitorremediadoras:</u>	<u>Bioensaio:</u>	
		- Imazapir + imazapique	- Trevo branco + cornichão	Irga 417 (arroz não CL)	XXXX
		- Puitá INTA CL	- Azevém		
<b>Experimento II</b>	Plantas estivais	- Imazetapir + imazapique		<u>Plantas</u> <u>fitorremediadoras:</u>	<u>Bioensaio:</u>
		- Imazapir + imazapique	Azevém	- Soja	Azevém
		- Puitá INTA CL		- Puitá INTA CL	

## Resultados e discussão

### Experimento I (Efeito do uso de plantas hibernais)

Quanto ao nível de tolerância das plantas testadas, verificou-se interação significativa entre os herbicidas e as culturas testadas para todas as variáveis respostas avaliadas ( $p \leq 0,05$ ). Para as plantas hibernais, o consórcio de trevo branco + cornichão apresentou as melhores respostas em comparação com a cultura do azevém. Essas leguminosas apresentaram menores sintomas de fitointoxicação, tanto aos 21 DAE quando aos 50 DAE, independente do herbicida testado (Tabela 1).

Foi observado maior fitointoxicação das plantas, independente da espécie analisada, quando estas foram cultivadas sob solo contaminado com a mistura formulada de imazapir + imazapique, diferindo significativamente ( $p < 0,05$ ) do solo contaminado com a mistura formulada de imazetapir + imazapique (Tabela 2). Similarmente, Lima et al. (2012), relataram que ao se aplicar  $1 \text{ L ha}^{-1}$  de imazetapir + imazapique não foi observado efeito nas características relacionadas a fisiologia das plantas de *L. multiflorum* e *T. repens*; e esse mesmo resultado foi observado para *L. corniculatus* e *V. sativa* ao se aplicar 1 ou  $2 \text{ L ha}^{-1}$ . No entanto, Pinto et al. (2009) observaram que o *L. multiflorum* foi severamente afetado quanto a estatura de plantas e o rendimento biológico após o cultivo em sucessão ao arroz Clearfield® (CL).

No que se refere à redução da massa da matéria seca da parte aérea das culturas hibernais testadas, o azevém apresentou a maior redução em relação à testemunha (sem residual herbicida), independente do herbicida testado, diferindo significativamente ( $p \leq 0,05$ ) do consórcio de leguminosas (Tabela 2). Tanto para as culturas do trevo branco e cornichão, quanto para a cultura do azevém, observou-se maior redução da massa seca no solo com residual de imazapir + imazapique, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos (Tabela 2), enfatizando os resultados de fitointoxicação.

Tabela 2 – Fitointoxicação e massa seca da parte aérea, em relação à testemunha, das plantas hibernais semeadas em sucessão a cultura do arroz irrigado, em solo contaminado com os herbicidas imazetapir + imazapique (H1) e imazapir + imazapique (H2), mais testemunha. Capão do Leão, RS, 2013.

Culturas hibernais	Fitointoxicação						Massa seca da parte aérea (60 DAE)		
	----- % -----						----- % -----		
	21 DAE*			50 DAE					
Test**	H1	H2	Test	H1	H2	Test	H1	H2	
Consórcio***	-	2,5 bB	13,2 bA	-	0,0 Bb	20,0 bA	-	91,7 aA	67,5 aB
Azevém	-	15,0 aB	23,0 aA	-	6,2 aB	27,5 aA	-	81,5 bA	51,8 bB
C.V. (%)	----- 26,04 -----			----- 31,21-----			----- 6,41-----		

\*Dias após emergência. \*\*Testemunha (sem aplicação de herbicida). \*\*\*Consórcio de Trevo branco + cornichão. Médias seguidas de letras minúsculas iguais, na coluna (cultura) e maiúsculas iguais, na linha (herbicidas) não diferem entre si pelo teste Tukey a 5 %.

Avaliando o desenvolvimento da cultivar de arroz irrigado não tolerante aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas (IRGA 417) após o cultivo das plantas hibernais potencialmente remediadoras (bioensaio), pode-se observar interação significativa ( $p \leq 0,05$ ) entre essas para as variáveis fitointoxicação, número de plantas por metro linear e produtividade (Tabela 3), o mesmo não ocorrendo para as variáveis estatura de plantas e massa seca da parte aérea, onde o efeito das plantas e a resposta apresentada pela planta bioindicadora a presença do residual dos herbicidas testados, foram analisados separadamente (Tabela 4).

Com relação aos sintomas de fitointoxicação apresentados pelas plantas de arroz não tolerantes (IRGA 417) semeada em sucessão as espécies hibernais testadas, para ambas as misturas formuladas, observou-se menor efeito tóxico quando o arroz foi semeado em sucessão ao consórcio de trevo branco e cornichão, diferindo significativamente dos tratamentos que receberam azevém ou permaneceram em pousio durante a entressafra, independente do período avaliado, 14, 21, 28 e 42 DAE (dados não mostrados) Em contra partida, o arroz cultivado após a cultura do azevém, apresentou os maiores sintomas de fitointoxicação, não diferindo significativamente quando cultivado em sucessão a área sem cultivo, apenas na avaliação realizada aos 14 DAE (Tabela 3).

Para as parcelas que receberam anteriormente o consórcio de leguminosas, não houve diferença entre os herbicidas testados, o mesmo foi observado para as parcelas que foram cultivadas com azevém na entressafra, diferindo apenas nas avaliações feitas aos 14 DAE, onde os maiores efeitos foram constatados na presença do residual de imazapir + imazapique. Para as parcelas que permaneceram em pousio, observaram-se maiores sintomas de fitointoxicação nas plantas de arroz não tolerantes, quando estas foram cultivadas na presença do residual dos herbicidas imazapir + imazapique, não apresentando diferença significativa entre os tratamentos herbicidas apenas nas duas últimas avaliações, 28 e 42 DAE (dados não mostrados) (Tabela 3).

Não foi observado sintomas de fitointoxicação aos 42 DAE (dados não mostrados), independente da espécie anteriormente cultivada e do residual herbicida analisado, demonstrando a capacidade de recuperação das plantas de arroz irrigado ao longo do seu desenvolvimento (WEBSTER; MASSON, 2001).

Com relação ao número de plantas de arroz por metro linear, avaliado aos 14 DAE, pode-se afirmar que, da mesma forma que nas avaliações de fitointoxicação, o consórcio de trevo branco e cornichão apresentaram os maiores resultados em comparação com as demais espécies, não diferindo significativamente das parcelas anteriormente deixadas em pousio na

entressafra, apenas nas parcelas que não receberam tratamento herbicida (controle) (Tabela 3). O menor número de plantas de arroz foi observado nas parcelas controle, após o cultivo do azevém, diferindo significativamente das demais espécies. Independente do herbicida testado, não houve diferença significativa entre as parcelas de azevém e as parcelas que permaneceram em pousio.

Não foi observado efeito do tratamento herbicida sob as plantas de arroz semeadas após o cultivo do consórcio das leguminosas, entretanto, para a cultura do azevém, o maior número de plantas por metro linear foi encontrado nas parcelas com residual de imazetapir + imazapique. Para o tratamento que não recebeu cultivo na entressafra, o maior número de plantas de arroz foi observado onde não se aplicou nenhum tratamento herbicida (Tabela 3).

Quanto a variável estatura de plantas, pode-se observar maior estatura das plantas de arroz quando estas foram cultivadas posteriormente ao consórcio de leguminosas, diferindo estatisticamente das demais espécies. Para os herbicidas testados, as maiores estaturas foram observadas no tratamento controle, não havendo diferença significativa entre os herbicidas imazetapir + imazapique e imazapir + imazapique (Tabela 4).

Da mesma forma, para as avaliações de massa seca da parte aérea, os maiores resultados foram obtidos no consórcio de trevo branco + cornichão e no tratamento que não recebeu herbicida (controle) (Tabela 4). O acúmulo de massa constitui uma importante característica das plantas fitorremediadoras, pois, normalmente, relaciona-se com a maior capacidade de absorção de herbicidas pelas raízes e maior acúmulo, e/ou degradação, na parte aérea (MADALÃO et al., 2012).

Para a variável produtividade, nota-se o mesmo comportamento das demais variáveis analisadas, onde as maiores produtividades foram encontradas nas parcelas anteriormente cultivadas com o consórcio de trevo branco + cornichão (média de  $9.517 \text{ kg ha}^{-1}$ ), não sendo observada diferença estatística apenas nas parcelas cultivadas com azevém na entressafra e que se desenvolveram na presença do residual dos herbicidas imazetapir e imazapique. As menores produtividades foram encontradas onde não havia cultura anterior (pousio) (média de  $6.309 \text{ kg ha}^{-1}$ ), não diferindo estatisticamente da cultura do azevém (média de  $8.068 \text{ kg ha}^{-1}$ ) apenas onde não havia residual de herbicida (testemunha) (Tabela 3).

Para as parcelas cultivadas anteriormente com trevo branco + cornichão, a produtividade foi prejudicada quando o arroz foi cultivado em solo com residual de imazapir + imazapique, diferindo dos demais tratamentos. Não houve diferença significativa entre os tratamentos imazetapir + imazapique e testemunha, sendo esses os que apresentaram as

maiores produtividades, quando receberam o consórcio das leguminosas (9.897 kg ha<sup>-1</sup> e 10.207 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) (Tabela 3).

Para a cultura do azevém, as parcelas sem residual de herbicida apresentaram os melhores resultados (8.743 kg ha<sup>-1</sup>), não diferindo das parcelas com a presença dos herbicidas imazetapir + imazapique (7.997 kg ha<sup>-1</sup>), tratamento esse, que por sua vez, não diferiu das parcelas com residual de imazapir + imazapique (7.464 kg ha<sup>-1</sup>). Para as parcelas deixadas em pousio anteriormente a cultura do arroz, a produtividade não foi afetada apenas nas parcelas onde não tivemos presença de herbicidas (8.015 kg ha<sup>-1</sup>), diferindo significativamente dos demais tratamentos. Corroborando com os resultados citados acima, a menor produtividade foi observada nas parcelas com residual da mistura formulada de imazapir + imazapique (4.377 kg ha<sup>-1</sup>) (Tabela 3).

A tecnologia desenvolvida para reduzir as altas infestações de arroz vermelho (*Oryza sativa* L.) na cultura do arroz irrigado pode involuntariamente resultar na redução da produtividade, bem como a desvalorização do produto final. Zhang et al. (2000) constataram diminuição na produtividade de arroz não tolerante de 69% pelo efeito residual de imazetapir. Santos et al. (2006), relataram que o efeito residual de herbicidas do grupo químico das imidazolinonas alterou a produtividade do arroz não tolerante em torno de 50%. No entanto, em trabalho realizado por Kraemer et al. (2009), o residual da mistura formulada de imazetapir e imazapique causou fitotoxicidade de 50% na cultivar não tolerante IRGA 417, reduziu o estande de plantas, mas sem alterar a produtividade.

Tabela 3 – Fitointoxicação, número de plantas por metro linear e produtividade de grãos de plantas de arroz não tolerante (cultivar IRGA 417), semeadas em sucessão as plantas hibernais potencialmente fitorremediadoras, em solo contaminado com os herbicidas imazetapir + imazapique (H1) e imazapir + imazapique (H2), mais testemunha. Capão do Leão, RS, 2013.

Cultura	Fitointoxicação						Número de plantas/m linear			Produtividade de grãos kg ha <sup>-1</sup>		
	14 DAE*		21 DAE		28 DAE		14 DAE					
	H1	H2	H1	H2	H1	H2	Test**	H1	H2	Test*	H1	H2
Consórcio***	7,0 bA	11,7 bA	16,2 cA	13,7 cA	14,5 cA	11,2 cA	53,0 aA	50,0 Aa	56,2 aA	10.20 7aA	9.897 aA	8.44 8 aB
Azevém	15,5 aB	23,7 aA	56,2 aA	62,5 aA	46,2 aA	48,7 aA	28,7 bB	35,2 bA	33,0 bAB	8.743 bA	7.997 bA	7.46 4 aB
Pousio	12,5 abB	27,5 aA	25,0 bB	35,0 bA	27,5 bA	28,7 bA	47,5 aA	33,0 bB	36,2 bB	8.015 bA	6.536 cB	4.37 7 bC
C.V. (%)	----- 32,26 - -----		----- 17,75 - -----		----- 13,03 - -----		----- 8,54 -----			----- 8,63 -----		

\*Dias após emergência. \*\* Testemunha (sem aplicação de herbicida). \*\*\*Consórcio de Trevo branco+cornichão. Médias seguidas de letras minúsculas iguais, na coluna (cultura) e maiúsculas iguais, na linha (herbicidas) não diferem entre si pelo teste Tukey a 5 %.

Tabela 4 – Estatura e massa seca da parte aérea de plantas de arroz não tolerante (cultivar IRGA 417), semeadas em sucessão as plantas hibernais potencialmente fitorremediadoras, em solo contaminado com os herbicidas imazetapir + imazapique (H1) e imazapir + imazapique (H2), mais testemunha. Capão do Leão, RS, 2013.

	Estatura (cm)				Massa Seca (gramas/planta)	
	14 DAE	21 DAE	28 DAE	42 DAE	30 DAE	55 DAE
Consórcio	39,3 a	45,8 a	47,7 a	61,5 a	30,9 a	37,8 a
Azevém	37,2 b	44,1 b	45,7 b	61,1 a	24,8 b	36,7 a
Pousio	34,2 c	42,5 b	44,9 b	60,5 a	23,7 b	37,0 a
Testemunha	38,2 a	45,3 a	46,9 a	63,6 a	30,1 a	39,4 a
H1	35,8 b	43,2 b	45,1 b	60,7 b	23,8 b	36,7 b
H2	36,9 c	44 ab	46,1 ab	61,0 b	22,7 b	35,8 b
Média	36,90	44,16	46,10	61,2	26,46	37,16
C.V. (%)	----- 3,85 -- ----	----- 3,68 --- ----	----- 2,43 --- ----	----- 3,61- -----	----- 8,68 ----	----- 9,05 ----

\*Dias após emergência. \*\* Testemunha (sem aplicação de herbicida). \*\*\*Consórcio de Trevo branco + cornichão. Médias seguidas de letras minúsculas iguais, na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5 %

## Experimento II (Efeito do uso de plantas estivais)

Com relação ao nível de tolerância das plantas estivais testadas, podem-se observar sintomas de fitointoxicação, apenas na cultura da soja e nas avaliações realizadas aos 50 DAE, comprovando que a cultivar de arroz Puitá INTA CL é resistente aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas (GALON et al., 2012). Verificou-se efeito tóxico na cultura da soja, quando esta foi cultivada sob solo com residual da mistura formulada de imazapir + imazapique, não sendo observados sintomas de fitointoxicação quando a mesma desenvolve-se na presença da mistura de imazetapir + imazapique (Tabela 5). Da mesma forma, houve redução na massa da matéria seca da parte aérea apenas nas plantas de soja cultivadas sob solo com residual da mistura herbicida de imazapir + imazapique. As plantas de arroz CL, não apresentaram redução de massa seca, independente do herbicida testado, diferindo estatisticamente da cultura da soja quando esta foi cultivada sob solo com residual de imazapir+imazapique (Tabela 5).

Tabela 5 – Fitointoxicação e massa seca da parte aérea, em relação à testemunha, das plantas estivais semeadas em sucessão a cultura do arroz irrigado, em solo contaminado com os herbicidas imazetapir + imazapique (H1) e imazapir + imazapique (H2), mais testemunha. Capão do Leão, RS, 2013.

Culturas estivais	Fitointoxicação						Massa seca da parte aérea (60 DAE)		
	----- % -----						----- % -----		
	21 DAE*			50 DAE					
Test**	H1	H2	Test	H1	H2	Test	H1	H2	
Arroz CL***	-	0,0	0,0	-	0,0 aA	0,0 bA	-	100,0aA	100,0aA
Soja	-	0,0	0,0	-	0,0 aB	7,5 aA	-	98,7 aA	82,9 bB
C.V. (%)	----- 20,01 -----			----- 18,01-----			----- 8,53-----		

\*Dias após emergência.\*\*Testemunha (sem aplicação de herbicida).\*\*\*Cultivar resistente aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas (Puitá INTA CL). Médias seguidas de letras minúsculas iguais, na coluna (cultura) e maiúsculas iguais, na linha (herbicidas) não diferem entre si pelo teste Tukey a 5 %.

Avaliando-se o potencial fitorremediadora das plantas estivais cultivadas em rotação com arroz Clearfield®, pode-se observar interação significativa ( $p \leq 0,05$ ) entre as essas plantas e a variável fitointoxicação apresentadas pelas plantas de azevém (bioindicadora) (Tabela 6).

Para a variável estatura de plantas, a interação entre a redução da mesma e os herbicidas testados, foi observada apenas aos 28 e 42 DAE, sendo que para a variável massa seca da parte aérea não houve interação significativa. Isso pode ser explicado que pelo fato de que a resposta visual de toxidez dos herbicidas pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas pode ser observada antecipadamente à redução da estatura e massa seca da parte aérea. A inibição da enzima acetolactato sintase (ALS), mecanismos de ação desses herbicidas, resulta em clorose internerval e ou, arroxamento foliar em torno de 7 a 10 dias após a aplicação, com posterior paralização do crescimento da planta (OLIVEIRA Jr. et al., 2011).

Com relação aos sintomas de fitointoxicação apresentados pela cultura do azevém semeada em sucessão as espécies estivais testadas, tanto em solo com presença de residual de imazetapir + imazapique, quando imazapir + imazapique, observou-se menor efeito tóxico quando o arroz foi semeado em rotação com cultura da soja, diferindo significativamente dos tratamentos que foram cultivados com arroz Clearfield® (cultivar Puitá INTA CL) ou permaneceram em pousio durante a condução do experimento, independente do período avaliado (14, 21, 28 e 42 DAE). Não foi observada diferença significativa entre o arroz CL e as parcelas deixadas em pousio aos 21 e 28 DAE. Para as avaliações feitas aos 14 e 42 DAE a parcela sem cobertura de plantas apresentou os maiores sintomas de toxidez, diferindo significativamente das demais (Tabela 6), demonstrando a relação positiva entre a degradação de herbicidas e a presença de plantas, comparadas a solos não vegetados (SANTOS et al., 2007).

Analisando os herbicidas testados, pode observar maiores sintomas de toxidez, independente da cultura avaliada, quando as plantas bioindicadoras (azevém) foram cultivadas em solo com residual da mistura formulada de imazapir + imazapique, não havendo diferença significativa apenas nas avaliações realizadas aos 21 e 28 DAE para a cultura da soja (Tabela 6).

Para a variável estatura apresentada pela planta bioindicadora, da mesma forma que para os sintomas de fitointoxicação, as plantas de soja apresentaram os melhores resultados, demonstrando redução da estatura da parte aérea inferior as demais plantas testadas. Para a cultivar Puitá INTA CL e para as parcelas mantidas em pousio, houve diferença significativa apenas no tratamento controle (sem herbicidas), sendo que a redução da estatura foi maior nas parcelas anteriormente cultivadas com arroz Clearfield® (Tabela 6).

Avaliando-se os herbicidas testados, observou-se diferença significativa entre esses apenas quando a cultura bioindicadora foi cultivada nas parcelas que receberam anteriormente a cultura da soja. Para essa cultura, as maiores reduções de estatura foram observadas na

presença do residual da mistura formulada de imazapir + imazapique, diferindo estatisticamente das demais plantas avaliadas (Tabela 6).

Para as avaliações referentes a massa seca da parte aérea das plantas de arroz não tolerante ao princípio ativo dos herbicidas testados, observou-se diferença significativa entre as plantas testadas, sendo que a cultura da soja foi a cultura que apresentou os maiores valores de massa seca, seguido das parcelas anteriormente cultivadas com arroz Clearfield® e das parcelas que permaneceram em pousio durante a condução do experimento, respectivamente (Tabela 6). Para os herbicidas testados, não houve diferença significativa entre a mistura formulada de imazetapir + imazapique e o tratamento controle (sem residual herbicida).

As maiores reduções na massa seca da parte aérea da planta bioindicadora, foram observadas quando essa foi cultivada na presença do residual dos herbicidas imazapir + imazapique, demonstrando o maior efeito residual dessa mistura em relação as demais (Tabela 6). Segundo Barbosa et al. (2005), o herbicida imazapir apresenta persistência no solo muito superior ao imazetapir podendo, assim, causar maior impacto ambiental e maiores injúrias as plantas sensíveis.

Tabela 6 – Fitointoxicação, estatura de plantas e massa seca da parte aérea de plantas de azevém, semeadas em sucessão as plantas estivais potencialmente fitorremediadoras, em solo contaminado com os herbicidas imazetapir + imazapique (H1) e imazapir + imazapique (H2), mais testemunha.

Cultura	Fitointoxicação (%)												Massa Seca	
	14 DAE*			21 DAE			28 DAE			42 DAE			(55 DAE)	
	Test.**	H1	H2	Test.	H1	H2	Test.	H1	H2	Test.	H1	H2	Cultura	
Soja	-	3,5 aB	9,5 aA	-	20,2aA	17,0 aA	-	19,5 aA	19,5 aA	-	13,7 aB	24,5 aA	Soja	22,30 a
Puitá Inta***	-	27,5 bB	46,2 bA	-	32,5 bB	54,0 bA	-	56,2 bB	62,5 bA	-	45,0 bB	62,5 bA	Puitá Inta***	11,80 b
Pousio	-	30,0 bB	53,7 cA	-	40,0 bB	55,0 bA	-	53,2 bB	68,0 bA	-	61,2 cB	71,2 cA	Pousio	8,89 c
C.V. (%)	----- 14,46 -----			----- 13,90 -----			----- 8,62 -----			----- 9,19 -----				
Cultura	Estatura (cm)												Herbicida	
	14 DAE			21 DAE			28 DAE			42 DAE				
	Test.	H1	H2	Test.	H1	H2	Test.	H1	H2	Test.	H1	H2	Test.	
Soja	14,3 <sup>ns</sup>	12,9 <sup>ns</sup>	14,9 <sup>ns</sup>	16,3 <sup>ns</sup>	18,6 <sup>ns</sup>	18,6 <sup>ns</sup>	26,2 aA	24,0 aA	20,0 aB	31,2 aA	34,9 aA	24,2 aB	H1	15,10 a
Puitá Inta***	7,39 <sup>ns</sup>	7,12 <sup>ns</sup>	6,92 <sup>ns</sup>	9,22 <sup>ns</sup>	8,72 <sup>ns</sup>	7,55 <sup>ns</sup>	9,25 cB	12,5 bA	12,0 bA	13,0 bA	14,7 bA	12,0 bA	H2	12,17 b
Pousio	8,22 <sup>ns</sup>	7,61 <sup>ns</sup>	8,92 <sup>ns</sup>	9,60 <sup>ns</sup>	10,91 <sup>ns</sup>	9,34 <sup>ns</sup>	13,0 bA	11,5 bA	10,9 bA	15,7 bA	13,8 bA	14,0 bA	Média	14,39
C.V. (%)	----- 12,03 -----			----- 15,32 -----			----- 15,51 -----			----- 10,34 -----			C.V.	17,25 (%)

\*Dias após emergência. \*\* Testemunha (sem aplicação de herbicida). \*\*\*Cultivar de arroz irrigado tolerante aos herbicidas testados. Médias seguidas de letras minúsculas iguais, na coluna (cultura) e maiúsculas iguais, na linha (herbicidas) não diferem entre si pelo teste Tukey a 5 %.

A principal exigência a ser cumprida para que uma planta seja selecionada como potencialmente fitorremediadora é que a mesma seja tolerante ao pesticida (CUNNINGHAM et al., 1996). A seletividade dos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas em algumas culturas, como soja e trigo (*Triticum aestivum* L.), é baseada principalmente na habilidade das plantas em metabolizar o herbicida rapidamente em formas não-tóxicas (MONQUEIRO et al., 2000). Do mesmo modo, várias espécies de plantas daninhas, como *Echinochloa crus-galli* (L) Beauv, *Solanum nigrum* (L) e *Sorghum halepense* (L) Pers, são naturalmente tolerantes a certos inibidores da ALS pela inativação metabólica (HUTCHISON et al., 1984). Corroborando com esses resultados, Hartwing et al. (2008) também encontraram seletividade em culturas como aveia (*Avena sativa*) e trigo a herbicidas inibidores da enzima acetolactato sintase (ALS).

As diferenças de tolerância e capacidade de fitorremediação apresentada pelas plantas avaliadas aos dois herbicidas utilizados podem ser atribuídas aos diferentes componentes de cada mistura. Isto, porque a mistura formulada de imazapir + imazapique além de apresentar maior concentração de imazapique na sua formulação, possui o ingrediente ativo imazapir, em substituição a imazetapir, encontrado na mistura formulada de imazetapir + imazapique.

O composto imazapir é um herbicida não seletivo enquanto o imazetapir, pertencente à mesma classe do imazapir e que difere apenas pela presença de um grupo etil no anel piridínico (COBB, 1992) é seletivo para a cultura da soja, isso remete que o potencial biológico de uma classe de compostos está intimamente relacionado com a natureza dos grupos funcionais e/ou substituintes presentes na molécula. Os diferentes radicais ligados ao anel piridínico das moléculas dos herbicidas pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas não conferem maior ou menor eficiência do produto, mas sim, norteia sua dinâmica no ambiente (TAN et al., 2005). Também segundo estes autores, o imazetapir e o imazapique são semelhantes no que diz respeito ao comportamento no ambiente, porém imazapir, devido a presença do hidrogênio no anel piridina, tende a ser mais polar; e por isso mais solúvel em água, tendendo a ficar na solução do solo, podendo assim sofrer lixiviação (FIRMINO et al., 2008).

As plantas que apresentaram maior potencial fitorremediador foram o consórcio de trevo branco + cornichão, e a cultura da soja, pois as mesmas permitiram o desenvolvimento normal das plantas de arroz não tolerante aos herbicidas do grupo químico das imidazolinonas, em comparação com solo sem vegetação. Isso evidencia que o cultivo dessas espécies na entressafra ou em rotação pode ser uma alternativa para áreas com residual dessa

classe de herbicidas, onde se pretende introduzir culturas não tolerantes em sistemas de sucessão/rotação.

Provavelmente, o maior aporte de nitrogênio ao solo, proporcionado pelas leguminosas em relação a gramíneas (azevém e arroz CL) (CARVALHO et al., 2010), proporcionou o melhor desenvolvimento das plantas bioindicadoras. Essa maior concentração de nitrogênio no solo também pode ter influenciado positivamente a atividade microbiana do solo, conseqüentemente aumentando a taxa de degradação dos herbicidas em questão, já que esses contam com a degradação microbiana e a decomposição fotolítica como principais mecanismos de dissipação (TAN et al., 2005). Essa técnica, conhecida como fitoestimulação refere-se a aptidão rizosférica para a biorremediação de compostos tóxicos (CUNNINGHAM et al., 1996).

Outro aspecto a ser considerado é que a maioria dos compostos orgânicos passa por transformações nas células das plantas, antes de serem isolados em vacúolos ou ligarem-se a estruturas celulares insolúveis, como a lignina (MACEK et al. 2000). Normalmente, leguminosas apresentam maiores teores de lignina em comparação com gramíneas (FUKUSHIMA; SAVIOLI, 2001) e isso pode ter influenciado no processo de fitorremediação dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir.

## **Conclusão**

Soja no verão e o consórcio de trevo branco + cornichão no período de inverno, são remediadoras de solo contaminado com as misturas formuladas de imazetapir + imazapique e imazapir + imazapique.

O herbicida imazapir + imazapique causa maior efeito residual que imazetapir + imazapique.

## **Referências Bibliográficas**

ASSIS, R.L. et al. Fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram por Plantas de *Panicum maximum* los função fazer Teor de Água. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 845-853. 2010.

AVILA, L. A. et al. Retorno da produção de arroz irrigado com cultivares convencionais após o uso do sistema Clearfield®. **Planta Daninha**, v. 28, n. 1, p. 123-129, 2010.

BARBOSA, L. C. A. et al. Síntese de novas fitotoxinas derivadas do oxabicyclo[3.2.1]oct-6-en-3-ona. **Química Nova**, v. 28, n. 3, p. 444-450, 2005.

BELO, A.F. et.al. Potencial de espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Planta daninha**, v. 29, n. 4, p. 821-828, 2011.

CARMO, M.L.; PROCOPIO, S. O.; PIRES, F. R. et al. Influência do período de cultivo de *Panicum maximum* (Cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v. 26, p. 315-322, 2008.

CARVALHO, A. M. et al. Teores de hemiceluloses, celulose e lignina em plantas de cobertura com potencial para sistema plantio direto no Cerrado. Embrapa Cerrados, 2010. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 290).

COBB, A. **Herbicides and Plant Physiology**, Chapman & Hall: London, 1992.

CUNNINGHAM, S. D. et al. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Advances in Agronomy**, v. 56, p. 55-114, 1996.

DAN, H. A. et al. Atividade residual de herbicidas pré-emergentes aplicados na cultura da soja sobre o milheto cultivado em sucessão. **Planta Daninha**, v. 29, n. 2, p. 437-445, 2011.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solo. 2ª ed., Rio de Janeiro: EMBRAPA, 306 p. 2006.

FIRMINO, L. E. et al. Movimento do herbicida imazapyr no perfil de solos tropicais. **Planta Daninha**, v. 26, n. 1, p. 223-230, 2008.

FRANS, R. et al. **Experimental design and techniques for measuring and analysing plant responses to weed control practices**. In: CAMPER, N.D. (Ed.) Research methods in weed science. 3 ed. Champaign: Southern Weed Science Society, 1986, 37p.

FUKUSHIMA, R.S.; SAVIOLI, N.M.F. Correlação entre digestibilidade In vitro da parede celular e três métodos analíticos para a avaliação quantitativa da lignina. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 2, p. 302-309, 2001.

GALON, L. et al. Eficácia e seletividade de herbicidas do grupo das imizadolinonas aplicados em arroz irrigado. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 11, n. 3, p. 284-295, 2012.

HARTWING, I. et al. Tolerância de trigo (*Triticum aestivum*) e aveia (*Avena* sp.) a herbicidas inibidores da enzima acetolactato sintase (ALS). **Planta daninha**, v. 26, n. 2, p. 361-368, 2008.

HUTCHISON, J. M.; SHAPIRO, R.; SWEESTER, P. B. Metabolism of chlorsulfuron by tolerant broadleaves. **Pesticide Biochemistry Physiology**, v. 22, p. 243-247, 1984.

INOUE, M.H. et al. Lixiviação e degradação de diuron em dois solos de textura contrastante. **Acta Scientiarum Agronomy**. v. 30, n. 5, p. 631-638, 2008.

KRAEMER, A.F. et al. Persistência dos herbicidas imazethapyr e imazapic em solo de várzea sob diferentes sistemas de manejo. **Planta daninha**, v. 27, n. 3, p. 581-588, 2009<sup>a</sup>

LIMA, A.M. et al. Influência de imazethapyr+imazapic em características relacionadas à fisiologia de espécies de inverno. I. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 28., 2012, Ribeirão Preto. **Resumos...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2012. p. 88-92.

MACEK, T. et al. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. **Biotechnology Advances**, v. 18, n. 1, p. 23-34, 2000.

MADALAO, J.C. et al. Susceptibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone. **Revista. Ceres**, v. 60, n. 1, p. 111-121, 2013

MONQUEIRO, P. A.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; DIAS, C. T. S. Resistência de plantas daninhas aos herbicidas inibidores da ALS na cultura da soja (*Glycine max*). **Planta daninha**, v. 18, n. 3, p. 419-425, 2000.

OLIVEIRA JÚNIOR, R.S. Mecanismos de ação herbicida In: OLIVEIRA JÚNIOR, R.S. et al. **Bioecologia e Manejo de Plantas Daninhas**. Guaíba: Agropecuária, 2011. p. 141-192.

PINTO, J. J. O. et al. Atividade residual de imazethapyr + imazapic em arroz semeado em rotação com o arroz Clearfield®. **Planta Daninha**, v. 29, n. 1, p. 205-216, 2011.

PINTO, J.J.O. et al. Atividade residual de (imazethapyr+imazapic) sobre azevém anual (*Lolium multiflorum*), semeado em sucessão ao arroz irrigado, sistema Clearfield®. **Planta Daninha**, v. 27, n. 3, p. 609-619, 2009.

PROCÓPIO, S.O. et al. **Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009. 32p.

SANTOS, F.M. et al. **Alternativas de controle químico do arroz-vermelho e persistência dos herbicidas (imazethapyr + imazapic) e clomazone na água e no solo**. 2006. 72f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

SANTOS, E.A. et al. Fitoestimulação por *Stizolobium aterrimum* como processo de remediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v. 25, n. 2, p. 259-265, 2007.

SENSEMAN, S. A. (Ed.). **Herbicide handbook**. 9 ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2007.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI) Arroz Irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Gravataí, RS: SOSBAI, 176p. 2012.

SOUTO, K.M. et al. Biodegradação dos herbicidas imazetapir e imazapique em solo rizosférico de seis espécies vegetais. **Ciencia Rural**, v 43, n. 10, p. 1790-1796, 2013.

TAN, S. et al. Imidazolinone-tolerant crops: history, current status and future. **Pest Management Science**, v. 61, n. 3, p. 246-257, 2005.

TAUK, S. M. Biodegradação de resíduos orgânicos no solo. **Revista Brasileira de Geociência**, São Paulo, v. 20, n. 1-4, p. 299-301, 1990.

WEBSTER, E. P.; MANSSON, J. A. Acetolactate synthase-inhibiting herbicides on imidazolinon-tolerant rice. **Weed Science**, v. 49, p. 652-657, 2001.

ZHANG, W. et al. Effect of rotational crop herbicides on water- and dry-seeded *Oryza sativa*. **Weed Science**, v. 48, n. 6, p. 755-760, 2000.

## DISCUSSÃO GERAL

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, foi possível observar que a presença de plantas causa impacto positivo na dissipação de moléculas herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir no solo, em comparação com solos sem vegetação. Áreas contendo plantas apresentam biodegradabilidade mais acelerada e completa quando comparadas com áreas não vegetadas, devido à expansão da população ativa dos microrganismos no solo (rizosfera) que se utilizam da fração “exudata” das raízes (rizodeposição) como fonte de alimento (SPILBORGHS; CASARINI, 1998).

Feijão-de-porco e ervilhaca demonstraram capacidade fitorremediadora de solo contaminado com herbicidas do grupo químico das imidazolinonas, quando esse se encontrava acondicionado em vasos. Já soja e consórcio de travo branco e cornichão, foram consideradas plantas fitorremediadoras de solo contaminados com esses herbicidas, tanto em ambiente de casa de vegetação (vasos) quanto em campo. Isso evidencia que o cultivo dessas espécies na entressafra ou em rotação pode ser uma alternativa para áreas com residual dessa classe de herbicidas, onde se pretende introduzir culturas não tolerantes em sistemas de sucessão/rotação.

Todos os herbicidas testados contam com a degradação microbiana como principal mecanismo de dissipação (GOETZ et al., 1990), justificando o destaque das leguminosas no presente trabalho, pois provavelmente essas tenham utilizado a fitoestimulação como mecanismo de remediação dos herbicidas estudados. O maior aporte de nitrogênio ao solo, proporcionado pelas leguminosas em relação a gramíneas (azevém e arroz CL) (CARVALHO et al., 2010), pode ter proporcionado o melhor desenvolvimento das plantas bioindicadoras. Essa maior concentração de nitrogênio no solo também pode ter influenciado positivamente a atividade microbiana do solo, conseqüentemente aumentando a taxa de degradação dos herbicidas em questão. Essa técnica, conhecida como fitoestimulação refere-se a aptidão rizosférica para a biorremediação de compostos tóxicos (CUNNINGHAM et al., 1996).

Também há a possibilidade de ter ocorrido a fitodegradação desses compostos no solo, explicados pela capacidade que as plantas estudadas possuem em metabolizar (fitodegradação) o contaminante até compostos não-tóxicos (ou menos tóxicos) à planta e ao ambiente (PROCÓPIO et al., 2009), ou simplesmente possuem a habilidade de compartimentalizar as moléculas desses agrotóxicos (CUNNINGHAM et al., 1996).

O processo de fitorremediação não é baseado apenas nas características da planta utilizada, mas também nas características do meio em que o contaminante está inserido, principalmente no que se refere a características físico-químicas do solo que se pretende remediar. De maneira geral, solos com maior teor de matéria orgânica e argila apresentam maior adsorção dos herbicidas (LI et al., 2003; SI et al., 2006) por apresentarem maior área superficial específica e conseqüentemente maior quantidade de sítios de ligação.

Através dos resultados obtidos na presente tese, pode-se afirmar que o uso da fitorremediação poderá resultar em maior segurança no cultivo de arroz não Clierfield, em áreas onde os herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir tenham sido aplicados. Além disso, o cultivo de soja, ervilhaca, feijão-de-porco, trevo branco e cornichão após a aplicação desses herbicidas contribui na redução de riscos de ocorrência de impactos ambientais adversos.

## **CONCLUSÕES GERAIS**

Soja, ervilhaca, feijão-de-porco e, consórcio de trevo branco e cornichão, são plantas que possuem capacidade de remediar solo contaminado com os herbicidas pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas.

A degradação dos herbicidas imazetapir, imazapique e imazapir, é maior em solo vegetado do que em solo sem vegetação, demonstrando efeito fitoestimulador dessas espécies vegetais sob a microbiota existente na rizosfera das mesmas.

A ervilhaca é fitorremediadora de solo contaminado com a mistura formulada de imazapir + imazapique, mesmo em diferentes tipos de solo.

O herbicida imazapir + imazapique causa maior efeito residual que imazetapir + imazapique em condições de campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 299-352, 2000.

ANDERSON, T. A.; KRUGER, E. L.; COATS, J. R. Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant. **Chemosphere**, v. 28, p. 1551-1557, 1994.

ANSELMO, A. L. F.; JONES, C. M. Fitorremediação de solos contaminados – O estado de arte. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 25., 2005, Porto Alegre, RS **Anais...**Porto Alegre: PUCRS, 2005. p. 5273-5280.

ARTHUR, E. L. et al. Degradation of an atrazine and metolachlor herbicide mixture in pesticide-contaminated soils from two agrochemical dealerships in Iowa. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 119, p. 75-90, 2000.

ASSIS, R. L. et al. Fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram por plantas de *Panicum maximum* em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v 30, n. 5, p. 845-853. 2010.

AVILA, L. A.; SENSEMAN, S. A.; ULLMAN, J. L.; LEE, D. J.; MCCAULEY, G.; CHANDLER, J.; KRUTZ, L. Efeito da umidade do solo na sorção e disponibilidade de imazetapir em três solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26.; 2005, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2005. p. 190-193.

BELO, A. F. et al. Potencial de espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone. **Planta Daninha**, v. 29, n. 4, p. 821-828, 2011.

CARMO, M. L. et al. Seleção de plantas para fitorremediação de solos contaminados com picloram. **Planta Daninha**, v. 26, n. 2, p. 301-313, 2008a.

CARMO, M. L.; PROCOPIO, S. O.; PIRES, F. R. et al. Influência do período de cultivo de *Panicum maximum* (Cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com picloram. **Planta Daninha**, v. 26, p. 315-322, 2008b.

CROUGHAN, T. P. Herbicide resistant rice. In: **United States Patent** [5,773,704], 1998. Disponível em: <<http://patFs.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=/netahtml/srchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=5,773,704.WKU.&OS=PN/5,773,704&RS=PN/5,773,74/>>. Acesso em: 23 jun. 2013.

CUNNINGHAM, S. D. et al. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants **Advances in Agronomy**, v. 56, p. 55-114, 1996.

DAN, H. A. et al. Atividade residual de herbicidas pré-emergentes aplicados na cultura da soja sobre o milho cultivado em sucessão. **Planta Daninha**, v. 29, n. 2, p. 437-445, 2011.

D'ANTONINO, L. et al. Efeitos de culturas na persistência de herbicidas auxínicos no solo. **Planta Daninha**, v. 27, n. 2, p. 371-378, 2009.

FERNANDES, M. F.; ALCÂNTARA, G. Z. **Biorremediação de Solos – Estado da Arte**. Adesol Produtos Químicos Ltda. São Paulo. Disponível em: <<http://www.ufsc.br/ccb/PDF/c2.PDF>>. Acesso em: 23 nov. 2009.

GAZZIERO, D. L. P. et al. Persistência dos herbicidas imazaquin e imazethapyr no solo e os efeitos sobre plantas de milho e pepino. **Planta Daninha**, v. 15, n. 2, p. 162-169, 1997.

INOUE, N. H. et al. Potencial de lixiviação de imazapic e isoxaflutole em colunas de solo. **Planta Daninha**, v. 25, n. 3, p. 547-555, 2007.

MARCHEZAN, E. et al. Rice herbicides monitoring in two Brazilian rivers during the rice growing season. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 2, p. 131-137, 2007.

MARQUES, M. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 35, p. 1-11, 2011.

PINTO, J. O. et al. Milho (*Zea mays*) como espécie bioindicadora da atividade residual de (imazethapyr + imazapic). **Planta Daninha**, v. 27, p. 1005-1014, 2009. Número Especial.

PIRES, F. R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 335-341, 2003.

PROCÓPIO, S. O. et al. **Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas**. Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2009. 32p. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/index.php?idpagina=fixas&pagina=publicacoesonline>

PROCÓPIO, S. O. *et al.* Fitorremediação de solo contaminado com picloram por capim-pé-degalinha-gigante (*Eleusine coracana*). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 32, p. 2517-2524, 2008.

RENNER, K. A.; SCHABENBERGER, O.; KELLS, J.J. Effect of tillage application method on corn (*Zea mays*) response to imidazolinone residues in soil. **Weed Technology**, v. 12, n. 2, p. 281-285, 1998.

RICE, P. J.; ANDERSON, T. A.; COATS, J. R. Phytoremediation of herbicidecontaminated surface water with aquatic plants. In: PHYTOREMEDIATION OF SOIL AND WATER CONTAMINANTS, Washington, 1996, DC. **ACS Symposium Series...**Washington, DC: American Chemical Society, 1997. p. 133-151.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de Herbicidas**. 6. ed. Londrina, 2011.

SANTOS, E. A. *et al.* Fitoestimulação por *Stizolobium aterrimum* como processo de remediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v. 25, n. 2, p. 259-265, 2007.

SANTOS, E. A. *et al.* Fitoestimulação como processo de descontaminação de solos com trifloxysulfuron-sodium. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 25., 2006, Brasília. **Anais...** Brasília: SBCPD, 2006. p. 142.

SANTOS, J. B. *et al.* Fitorremediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v. 22, n. 2, p. 323-330, 2004.

SENSEMAN, S. A. (Ed.). **Herbicide handbook**. 9 ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2007.

SKLADANY, G. J.; METTING JUNIOR, F. B. Bioremediation of contaminated soil. In: METTING JUNIOR, F. B. (Ed). **Soil Microbial Ecology**: applications in agricultural and environmental managemet. New York: M. Dekker, p.483-513, 1992.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI) Arroz Irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. Gravataí, RS: SOSBAI, 176p. 2012.

SOUSA, C. P. *et al.* Crescimento de espécies bioindicadoras do residual do herbicida (imazethapyr+imazapic), semeadas em rotação com arroz Clearfield®. **Planta Daninha**, v. 30, n. 1, p. 105-111, 2012.

SOUTO, K. M. et al. Biodegradação dos herbicidas imazetapir e imazapique em solo rizosférico de seis espécies vegetais. **Ciencia Rural**, v. 43, n. 10, p. 1790-1796, 2013.

STEELE, G. L. et al. Control of red rice (*Oryza sativa*) in imidazolinone-tolerant rice (*O. sativa*). **Weed Technology**, v. 16, n. 3, p. 627-630, 2002.

STOUGAARD, R. N.; SHEA, P. .; MARTIN, A. R. Effect of soil type and pH on adsorption, mobility and efficacy of imazaquin and imazethapyr. **Weed Science**, v. 36, n. 1, p. 67-73, 1990.

SULMON, C. et al. Sucrose amendment enhances phytoaccumulation of the herbicide atrazine in *Arabidopsis thaliana*. **Environmental Pollution**, v. 145, p. 507-515, 2007.

TAUK, S.M. Biodegradação de resíduos orgânicos no solo. **Revista Brasileira de Geociência**, v. 20, n. 1-4, p. 299-301, 1990.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Introduction to Phytoremediation**. EPA/600/R-99/107. Cincinnati, Ohio, National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, 2000.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Phytoremediation Resource Guide**. EPA/542/B-99/003. Washington, DC, Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office, 1999.

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.

VIMIEIRO, G. V.; SILVA, F. V. B. Fitorremediação para tratamentos de áreas contaminadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte, MG. **Anais**. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Engenharia e Sanitária e Ambiental, 2007.

VOSE, J. M. et al. Leaf water relations and sapflow in Eastern cottonwood (*Populus deltoides* Bartr.) trees planted for phytoremediation of a groundwater pollutant. **International Journal Phytoremediation**, v. 2, p. 53-73, 2000.

WILLIAMS, B. J.; STRAHAN, R.; WEBSTER, E. P. Weed management systems for Clearfield Rice. **Louisiana Agricultural**, v. 45, n. 3, p. 16-17, 2002.