

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade



Dissertação

**Lixiviação de herbicidas do grupo das imidazolinonas
em solos de cultivo de arroz irrigado**

João Paulo Refatti

Pelotas, 2013

JOÃO PAULO REFATTI

**LIXIVIAÇÃO DE HERBICIDAS DO GRUPO DAS IMIDAZOLINONAS EM
SOLOS DE CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Fitossanidade (área de conhecimento: Herbologia).

Orientador: Luis Antonio de Avila, Ph. D.

Coorientador: Dr. Dirceu Agostinetto

José Alberto Noldin, Ph. D.

Dra. Roberta Manica-Berto

Pelotas, 2013

Dados de catalogação na fonte:
Maria Beatriz Vaghetti Vieira – CRB-10/1032
Biblioteca de Ciência & Tecnologia - UFPel

R332I Refatti, João Paulo

Lixiviação de herbicidas do grupo das imidazolinonas em solos de cultivo de arroz irrigado / João Paulo Refatti. – 81 f. : il. – Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Pelotas. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Pelotas, 2013. – Orientador Luis Antonio Avila ; co-orientador Dirceu Agostinetto, José Alberto Noldin, Roberta Manica-Berto.

1.Poluição ambiental. 2.Fitotoxicidade. 3.Imazapic. 4.Imazapyr. 5.Imazethapyr. I.Avila, Luis Antonio. II.Agostinetto, Dirceu. III.Noldin, José Alberto. IV.Nanica-Berto, Roberta. V.Título.

Banca Examinadora

Nelson Diehl Kruse, Dr.

Jesus Juares de Oliveira Pinto, Dr.

Edinalvo Rabaioli Camargo, Ph. D.

Luis Antonio de Avila, Ph. D.
(Orientador)

Aos meus pais, João e Neiva;
Às minhas irmãs, Liliane e Rejane.
À minha namorada, Silvana.
A todos os amigos.

OFEREÇO E DEDICO

“Há um tempo em que é preciso abandonar as
roupas usadas,
que já tem a forma do nosso corpo,
e esquecer os nossos caminhos,
que nos levam sempre aos mesmos lugares.
É o tempo da travessia...
e, se não ousarmos fazê-la,
teremos ficado, para sempre,
à margem de nós mesmos.”

Fernando Pessoa

Agradecimentos

A DEUS, pela sua presença constante na minha vida e conforto nas horas difíceis.

A minha família, pelo carinho, apoio, dedicação, incentivo e ensinamentos que me guiam em todos os momentos da minha vida.

A minha namorada Silvana que esteve presente em todos os momentos, pelo amor, carinho, confiança e incentivo.

Ao professor Luis Antonio de Avila, pela amizade, dedicação, ensinamentos e orientação durante o curso de Graduação e Pós-graduação.

Ao professor Dirceu Agostinetto, Roberta Manica-Berto e José Alberto Noldin pela coorientação, dedicação, apoio e amizade.

Ao professor Jesus Juarez de Oliveira Pinto, Edinalvo Rabaioli Camargo e Carlos Eduardo Schaedler pela amizade e ajuda.

À Universidade Federal de Pelotas pela oportunidade de realização do curso de Pós-graduação e a Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de realização da graduação. Ao Programa de Pós-graduação em Fitossanidade pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

À CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro na condução da pesquisa e pelas bolsas de mestrado e pós-doutorado.

Aos meus colegas de pós-graduação Luiz Fernando Dias Martini, Angela da Cas Bundt, Diogo Balbé Helgueira, Diogo da Silva Moura, Guilherme Vestena Cassol, Leonard Piveta, Alfran Tellechea Martini, Carla Zemolin, Karen Piraini Martins, Marcos Garcia Marquezan, Mariah Marques, pelo convívio, amizade, companheirismo e auxílio na execução dos trabalhos.

Aos estagiários e bolsistas do Laboratório de Dinâmica de Herbicidas no Ambiente: Luciano Cassol, Andrey Pivetta, Igor Pacheco, Marcelo Zimmer, Marlon Ouriques Bastiani, Rodrigo Ribeiro Pestana, Cleiton Brandão, Thais D'Avila Rosa e Vinícios Rafael Gehrke, pela amizade e auxílio na execução dos experimentos.

A todos meus amigos e todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o êxito do trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

Resumo

REFATTI, João Paulo. Lixiviação de herbicidas do grupo químico das imidazolinonas em solos de cultivo de arroz irrigado. 2013. 81f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Os herbicidas são utilizados intensamente na agricultura e constituem-se em uma importante ferramenta na obtenção de elevadas produtividades e qualidade do produto final. Na cultura do arroz irrigado, os herbicidas pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas, são uma eficiente alternativa para o controle das principais plantas daninhas da cultura, dentre elas, o arroz vermelho. Entretanto, a dinâmica desses herbicidas no ambiente deve ser melhor esclarecida para que não ocorra contaminação de águas superficiais e subterrâneas e para reduzir o efeito residual para culturas não tolerantes. Em vista do exposto, foram conduzidos três estudos junto à Universidade Federal de Pelotas nos anos agrícolas de 2010/11 e 2011/12. No artigo I o objetivo foi avaliar o efeito de diferentes solos de cultivo de arroz irrigado na lixiviação de imazethapyr, imazapyr e imazapic. No artigo II, o objetivo foi avaliar o efeito da elevação do pH, através da calagem, na lixiviação de imazethapyr e imazapyr. Já no artigo III, o objetivo foi avaliar a persistência e lixiviação dos herbicidas imazethapyr, e das misturas formuladas de imazethapyr + imazapic e imazapyr + imazapic em área de arroz irrigado. Com os resultados desta dissertação, foi possível concluir que, o solo com baixo teor de argila e matéria orgânica tem maior lixiviação de herbicidas,

observado através dos sintomas fitotóxicos na cultivar não tolerante, até a profundidade de 30 cm. A lixiviação é menor no solo com maior teor de argila e matéria orgânica. A elevação do pH, através da calagem, aumenta a lixiviação dos herbicidas imazapyr e imazethapyr em solo de cultivo de arroz irrigado. Além disso, é possível concluir que os herbicidas imazethapyr e as misturas formuladas de imazethapyr + imazapic e imazapyr + imazapic apresentam elevado potencial de lixiviação, atingindo profundidades de até 25 cm, em solo de cultivo de arroz irrigado, um ano após sua aplicação. Os herbicidas imidazolinonas utilizados no sistema Clearfield® de arroz irrigado apresentam elevada persistência no solo, podendo seus efeitos fitotóxicos ser observados até dois anos após sua aplicação.

Palavras-chave: Poluição ambiental. fitotoxicidade. imazapic. imazapyr. imazethapyr

Abstract

REFATTI, João Paulo. **Leaching of imidazolinone herbicides group in irrigated rice soils.** 2013. 81f. Master of Science - Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Herbicides are used intensively in agriculture as an important tool in obtaining high yield and quality products. In irrigated rice, herbicides belonging to the imidazolinone chemical group, are an effective alternative for controlling major weeds, among them, the red rice. However, the dynamics of these herbicides in the environment should be clarified to avoid contamination of surface and groundwater and to reduce carryover effects on non-tolerant crops. Therefore, three studies were conducted at the Universidade Federal de Pelotas in the years 2010/11 and 2011/12. In article I the objective was to evaluate the effect of different rice soils in the leaching of imazethapyr, imazapyr and imazapic. In article II, the objective was to evaluate the effect of increasing soil pH by liming on leaching of imazethapyr and imazapyr. Lastly in article III, the objective was to evaluate the persistence and leaching of the herbicide imazethapyr, and formulated mixtures of imazethapyr + imazapic and imazapyr + imazapic in irrigated rice field. With the results of this dissertation, it was concluded that the soil with low clay and organic matter have greater leaching of herbicides, with injury symptoms in non-tolerant rice cultivar being detected to a depth of 30 cm. Leaching is lower in soils with higher clay and organic matter. Elevation of soil pH by liming increases leaching of the herbicide imazapyr and imazethapyr in irrigated rice soil. Moreover, it can be concluded

that herbicides imazethapyr and formulated mixtures of imazethapyr + imazapic and imazapyr + imazapic have high leaching potential, reaching depths of up to 25 cm in irrigated rice soil one year after their application. The imidazolinone herbicides used in the Clearfield[™] rice system have high persistence in soil and their phytotoxic effects can be observed up to two years after application.

Keywords: Environmental pollution. phytotoxicity. imazapic. imazapyr. imazethapyr

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..... 20
- Figura 2 -** 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, Pelotas e Santa Maria) 29
- Figura 3 -** Desenho esquemático do extrator de solo (A) e do corte da unidade experimental demonstrando suas principais partes (B) 31
- Figura 4 -** Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da fitotoxicidade observada aos 07 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas..... 35
- Figura 5 -** Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da fitotoxicidade observada aos 14 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas..... 36
- Figura 6 -** Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da fitotoxicidade observada aos 21 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas..... 36
- Figura 7 -** Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da fitotoxicidade observada aos 07 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas..... 37
- Figura 8 -** Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da redução da estatura de plantas observada 21 dias após a

emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas.....	38
Figura 9 - Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da redução da estatura de plantas observada aos 28 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas.....	38
Figura 10 - Desenho esquemático do extrator de solo (A) e do corte da unidade experimental demonstrando suas principais partes e região calcareada/revolvida (B).	48
Figura 11 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr avaliada a partir da fitotoxicidade observada aos 07 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água.....	53
Figura 12 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr avaliada a partir da fitotoxicidade observada aos 14 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água.....	53
Figura 13 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr avaliada a partir da fitotoxicidade observada aos 21 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água.....	54
Figura 14 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr avaliada a partir da fitotoxicidade observada aos 28 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água.....	54
Figura 15 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr, avaliada a partir da redução da estatura em relação à testemunha, observada aos 21 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água.....	55
Figura 16 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr, avaliada a partir da redução da estatura em relação à testemunha, observada aos 28 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água.....	56

- Figura 17** - Estimativa da lixiviação de imidazolinonas avaliada a partir da fitotoxicidade observada aos 14 (A) e 21 (B) dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas um ano após a aplicação dos herbicidas 68
- Figura 18** - Estimativa da lixiviação de imidazolinonas avaliada a partir da redução da estatura em relação à testemunha observada aos 14 (A) e 21 (B) dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas um ano após a aplicação dos herbicidas..... 70
- Figura 19** - Estimativa da lixiviação de imidazolinonas avaliada a partir da fitotoxicidade observada aos 14 (A) e 21 (B) dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas dois anos após a aplicação dos herbicidas 72
- Figura 20** - Estimativa da lixiviação de imidazolinonas avaliada a partir da redução da estatura em relação à testemunha observada aos 14 (A) e 21 (B) dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas dois anos após a aplicação dos herbicidas .. 73

Lista de Tabelas

- Tabela 1** - Local de coleta (cidade), região orizícola, latitude, longitude, classe de solo e porcentagem da classe de solo no total da área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul e Ocorrência em percentual..... 29
- Tabela 2** - Teor de argila, matéria orgânica (MO) e pH em água para as camadas (CAM) de 0-5 a 25-30 cm dos solos de Alegrete (ALE), Dom Pedrito (DP), Santa Maria (SM), Pelotas (PEL) e Palmares do Sul (PAL)..... 32
- Tabela 3** - Herbicidas utilizados no experimento com as respectivas formulas química, pKa, Kow, $t_{1/2}$, Koc e solubilidade em água dos herbicidas utilizados. 49
- Tabela 4** - Tabela com os dados de pH em água, teor de argila, matéria orgânica (MO), saturação por alumínio (S. Al), saturação por bases (S. B.) e capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva para o solo de Faxinal do Soturno. 50
- Tabela 5** - Tabela com a descrição dos tratamentos. 65

Sumário

1. Introdução.....	18
2. Artigo I - Lixiviação de imidazolinonas em diferentes solos de cultivo de arroz irrigado	24
3. Artigo II - Efeito da calagem na lixiviação de imazethapyr e imazapyr em solo de cultivo de arroz irrigado	44
4. Artigo III - Lixiviação e efeito residual de herbicidas do sistema clearfield® em solo de cultivo de arroz irrigado	60
6. Conclusões.....	77
7. Referências.....	79
VITA.....	81

1. Introdução

Nas últimas décadas, tem aumentado a preocupação com o meio ambiente, principalmente com relação à conservação dos recursos naturais existentes. Com isso, a agricultura tem sido frequentemente o foco das discussões devido à crescente utilização de produtos químicos para atender o aumento da demanda por alimentos e, recentemente, para produção de energia através de fontes renováveis. No âmbito ambiental, além da necessidade de ajudar a frear as mudanças climáticas globais (aquecimento global), há necessidade de preservação da qualidade ambiental no tocante ao uso e destino dos contaminantes.

A contaminação ambiental, causada pelo uso de agroquímicos (nutrientes, agrotóxicos, nematicidas, acaricidas e bactericidas, dentre outros), é uma das principais preocupações relacionadas à atividade agrícola. Os agrotóxicos são usados nas culturas agrícolas para manter e/ou elevar suas produtividades. Estima-se que, sem a utilização de agrotóxicos, cerca de 50% da produção agrícola mundial poderia ser perdida (RICE et al., 2007). Assim, os agrotóxicos tornaram-se uma ferramenta indispensável para a obtenção de elevada produtividade nos atuais sistemas agrícolas. Estima-se que mais de 500 diferentes formulações de agrotóxicos estejam sendo utilizadas na agricultura (GAVRILESCU, 2005). Nesse cenário, o desenvolvimento de novas tecnologias de produção tem sido baseado na utilização de grandes quantidades de agrotóxicos, o que torna a produção de alimentos e fibras cada vez mais dependente desses produtos.

Além disso, a grande maioria do volume de agrotóxicos aplicados em uma cultura tem como destino final o solo (GAVRILESCU, 2005). Uma vez no solo, os agrotóxicos podem ser transportados através dos processos de volatilização, escoamento superficial, escoamento sub-superficial e lixiviação, podendo sofrer degradação biótica e/ou abiótica além de ficarem retidos no solo ou serem absorvidos pelas plantas.

Dentre os agrotóxicos, merece destaque os herbicidas, por serem muitas vezes aplicados diretamente ao solo. Esses são largamente utilizados em todo o mundo, correspondendo a cerca de 50 a 60% do total de agrotóxicos comercializados anualmente (CARTER, 2000). A utilização de herbicidas tem contribuído de maneira significativa para a expansão e o desenvolvimento da agricultura brasileira sendo de fundamental importância na obtenção dos atuais níveis de produção agrícola. Contudo, esses são muitas vezes aplicados erroneamente, sem os devidos cuidados, causando danos ao ambiente como contaminação de rios e reservas subterrâneas de água.

O arroz irrigado é uma das culturas de grande importância no mundo, sendo considerada uma das principais fontes de carboidrato e estando presente na dieta de diversos povos. Para garantir o fornecimento desse cereal frente à grande demanda, são muitas vezes, utilizados herbicidas de elevada persistência para controlar as principais plantas daninhas da cultura. Dentre essas plantas destaca-se o arroz vermelho (*Oryza sativa* L.), que por pertencer à mesma espécie do arroz cultivado, apresenta semelhanças morfofisiológicas com esse (AGOSTINETTO et al., 2001). Tais semelhanças entre ambos tornavam difícil o seu controle visto que os agricultores dispunham apenas de métodos mecânicos, físicos e culturais. A falta de um método mais eficiente de controle tornava algumas áreas inviáveis para o cultivo do arroz irrigado, sendo algumas delas abandonadas devido à alta infestação de arroz vermelho.

Entretanto, nas últimas décadas foi desenvolvido o sistema Clearfield®, o qual combina a utilização de cultivares de arroz tolerante e herbicidas do grupo das imidazolinonas para o controle de plantas daninhas. As moléculas de herbicidas atualmente registradas para esse fim são imazethapyr, imazapyr e imazapic (Fig. 1) que são utilizadas isoladamente ou em misturas formuladas.

Na cultura do arroz irrigado as imidazolinonas são aplicadas em pré e/ou pós-emergência, como herbicidas seletivos, em genótipos tolerantes, para o controle de um amplo espectro de plantas daninhas de folhas largas e gramíneas.

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. 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) (Fig. 1).

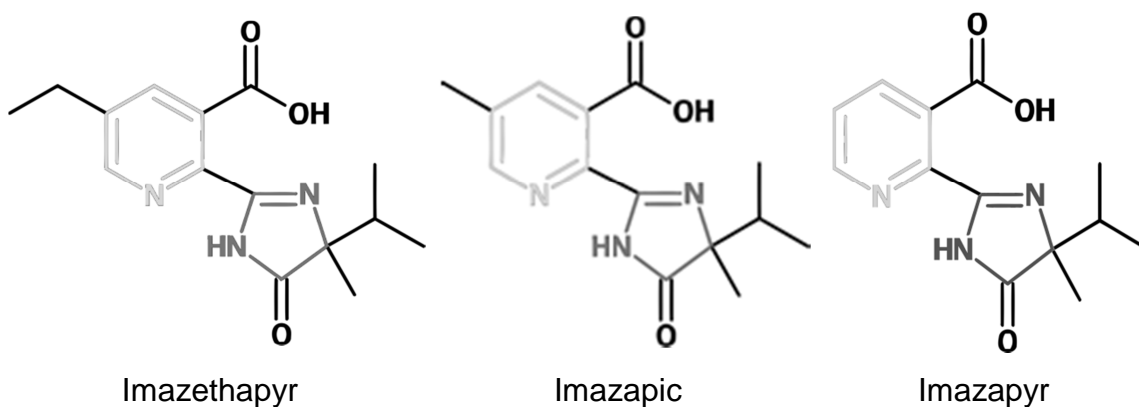


Figura 1. Moléculas das imidazolinonas registradas para o uso na cultura do arroz irrigado no sistema Clearfield®. Anel piridínico representado pela cor cinza claro, anel imidazol por cinza escuro e radicais pela cor preta. Fonte: Senseman (2007).

Os herbicidas imidazolinonas possuem a característica de serem relativamente persistentes no solo com meia-vida variando entre 30 a 150 dias Senseman (2007) e, podem apresentar efeitos residuais para as culturas em sucessão e/ou rotação. Além disso, tem sido relatado que as imidazolinonas apresentam elevado potencial de lixiviação devido às suas constantes de dissociação (pK_a) relativamente baixas (3,3 - 3,9) (CARTER, 2000; POLUBESOVA et al., 2002, REGITANO et al., 2002; SENSEMAN, 2007) e alta solubilidade. Apesar disso, as imidazolinonas são amplamente utilizadas devido às suas baixas doses de aplicação, grande espectro de controle (TREZZI e VIDAL, 2001) e seletividade em uma ampla gama de sistemas de cultivo.

A natureza anfótera, presença de ambos os grupos funcionais ácidos e básicos, das imidazolinonas permite a estes herbicidas apresentarem-se na natureza na forma aniônica, catiônica ou neutra, dependendo do potencial de hidrogênio (pH) do meio em que se encontram (PUSINO et al., 1997, STOUGAARD et al., 1990). Com isso, quando o pH do solo é maior que o seu pK_a , estes herbicidas apresentam-se geralmente na forma aniônica (COO^-) também chamada de forma dissociada, e na forma molecular ($COOH$) ou associada quando o pH do solo é mais baixo que o pK_a da molécula (LOUX e REESE, 1993). Devido à estrutura molecular específica desses herbicidas, fatores tais como o pH do solo, o teor de carbono orgânico, e a força molecular podem afetar a sua persistência no meio ambiente (JOHNSON et al., 2000).

Contudo, as imidazolinonas podem apresentar comportamentos distintos dependendo do ambiente em que se encontram. Propriedades do solo como pH (LOUX; REESE, 1993), teor de matéria orgânica (STOUGAARD et al., 1990), textura (LOUX; REESE, 1993) e umidade do solo (BAUGHMAN e SHAW, 1996) afetam diretamente esse comportamento, alterando a retenção desses herbicidas pelos colóides do solo. A retenção das partículas das imidazolinonas, pelo processo de sorção, influencia o potencial de lixiviação dessas no solo. A lixiviação de um herbicida, por sua vez, consiste na percolação desse pelo perfil do solo, através do movimento da água, atingindo as camadas inferiores.

As imidazolinonas apresentam alto potencial de lixiviação (LOUX; REESE, 1993; TU et al., 2004; MONQUERO et al., 2008; KRAEMER et al., 2009; MARTINI et al., 2010.) o que as caracterizam como sendo de considerável risco de contaminação do lençol freático subterrâneo. Tal fato se agrava em áreas de cultivo de arroz irrigado, as quais apresentam esse lençol próximo à superfície. Portanto, a inadequada utilização desses herbicidas, no cultivo do arroz irrigado nessas áreas, pode causar grandes problemas ambientais. Além disso, a lixiviação dos herbicidas para camadas mais profundas, onde a temperatura, radiação e atividade microbiana são menores, dificultam sua degradação aumentando ainda mais a persistência e os riscos.

Contudo, poucas são as informações a respeito da dinâmica das imidazolinonas nos diferentes solos de cultivo de arroz irrigado, visto que, a maioria das pesquisas estão relacionadas com a utilização desses herbicidas em outras culturas e em áreas de sequeiro. Entretanto, existem alguns resultados de pesquisa que revelam a presença de imidazolinonas em mananciais hídricos superficiais próximos de áreas produtoras de arroz irrigado (SILVA et al., 2009).

O avanço da pesquisa e desenvolvimento de cultivares de soja (*Glycine max* L.) tolerantes ao encharcamento, tem tornado possível o cultivo dessa em rotação com o arroz irrigado e apresenta-se como uma importante alternativa no controle de arroz vermelho. Apesar de, nessas condições, ser utilizado o glifosato como principal herbicida para o controle de plantas daninhas, o uso de imidazolinonas pode vir a ser uma potencial alternativa de controle. Isso agravaria os riscos de contaminação e surgimento de plantas resistentes uma vez que as imidazolinonas passariam a ser aplicadas continuamente na mesma área. Além disso, o efeito residual desses herbicidas pode causar fitotoxicidade a outras culturas também usadas em rotação/sucessão com o arroz irrigado como é o caso de pastagens.

Nesse contexto, o solo tem uma grande influência sobre o destino e o comportamento das imidazolinonas aplicadas às culturas. Com isso, compreender a dinâmica desses herbicidas em diferentes condições de solos é fundamental para a avaliação precisa de seu comportamento ambiental e vital

para garantir o uso seguro de produtos novos e existentes. Também é necessário, a fim de desenvolver e validar modelos matemáticos de simulação para uso como ferramentas de previsão do destino ambiental desses herbicidas.

Em vista do exposto, os objetivos dessa dissertação foram: i) avaliar a lixiviação dos herbicidas imazethapyr, imazapyr e imazapic em diferentes solos de cultivo de arroz irrigado; ii) avaliar a influência do pH do solo na lixiviação dos herbicidas imazethapyr e imazapyr em solo de cultivo de arroz irrigado; iii) determinar o potencial de lixiviação e o efeito residual dos herbicidas utilizados no sistema Clearfield[®] de arroz irrigado.

3. Artigo I - Lixiviação de imidazolinonas em diferentes solos de cultivo de arroz irrigado⁶

Imidazolinone leaching in different irrigated rice soils

REFATTI, J. P.¹; AVILA, L.A.²; AGOSTINETTO, D.³; MANICA-BERTO, R.⁴; CASSOL, L. L.⁵; MOURA, D. S.¹; PIVETTA, A.⁵

RESUMO - Os herbicidas do grupo químico das imidazolinonas utilizados na tecnologia Clearfield® de produção de arroz irrigado apresentam elevado potencial de lixiviação. Entretanto, o comportamento desses herbicidas pode variar em função das propriedades do solo. O objetivo desse estudo foi avaliar a lixiviação dos herbicidas imazethapyr, imazapyr e imazapic em diferentes solos de cultivo de arroz irrigado. Para isso, foram coletadas amostras indeformadas de solo de cinco locais do Estado do Rio Grande do Sul - Brasil, com auxílio de tubos de PVC de 150 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento, as mesmas foram utilizadas para a realização de um bioensaio. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, arranjado em esquema fatorial, sendo o fator A constituído por cinco solos e o fator B os herbicidas imazethapyr, imazapic e imazapyr (todos a 100 g i.a. ha⁻¹), aplicados sobre a superfície das colunas de solo. Para a análise, foi considerado um terceiro fator (fator C), constituído de seis camadas de solo (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30 cm). Após 60 dias da aplicação dos herbicidas as unidades experimentais foram seccionadas em camadas de 5 cm e utilizadas para a elaboração do bioensaio com plantas de arroz não tolerante. Os resultados mostraram que o solo com baixo teor de argila e matéria orgânica teve maior lixiviação de herbicidas, com sintomas fitotóxicos detectados até a profundidade de 30 cm. A menor lixiviação foi observada em solo com maior teor de argila e matéria orgânica.

Palavras-chave: imazethapyr, imazapyr, imazapic, transporte de herbicida, matéria orgânica

¹ Mestrando(a), Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade, Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Bolsista CAPES; ² Professor Adjunto, Ph.D., Departamento de Fitossanidade, UFPel, Caixa Postal 354, 96010-900 Pelotas-RS, Brasil, <laavilabr@gmail.com>; ³ Professor Adjunto, Dr. Departamento de Fitossanidade, UFPel, Pelotas-RS, Brasil, <agostineto@ig.com.br>; ⁴ Pós-Doutorado(a) Universidade Federal de Pelotas, UFPel, Brasil. Bolsista do(a): Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES. ⁵ Graduando de agronomia.

⁶ Artigo formatado segundo normas da revista Planta Daninha;

ABSTRACT - The imidazolinone herbicides used in the Clearfield™ rice production system have high leaching potential. However, the behavior of these herbicides can vary depending on soil properties. The objective of this study was to evaluate the leaching of imidazolinone herbicides in different irrigate rice soils. Therefore, undisturbed samples were collected in soils of five different locations in the state of Rio Grande do Sul - Brazil, using a PVC pipes of 150 mm diameter and 40 mm long. These samples were used to conduct a bioassay. Factor A included five soils and factor B the herbicides imazethapyr, imazapic and imazapyr (all at 100 g a.i. ha⁻¹), applied on the surface of the soil columns. For the analysis, it was considered a third factor (factor C), which consisted of six soil layers (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 and 25-30 cm). Sixty days after herbicide application experimental units were sectioned into five layers of 5 cm each. Layers were used to conduct a bioassay with non-tolerant rice. The results showed that soil with low clay and organic matter has greater herbicides leaching with herbicides symptoms detected up to a 30 cm depth. The lowest leaching was observed in soils with higher clay and organic matter contents.

Keywords: *herbicide transport, imazapic, imazapyr, imazethapyr, matter organic*

INTRODUÇÃO

A lixiviação é um dos principais processos de transporte de moléculas não voláteis e com baixo coeficiente de sorção. Durante o processo de lixiviação, essas moléculas percolam através do perfil do solo juntamente com o fluxo de água. Diversas propriedades do solo (textura, estrutura, teor de matéria orgânica e pH), assim como condições climáticas (temperatura e precipitação) e características intrínsecas de cada molécula, afetam diretamente a dinâmica desse processo. Dessa forma, os herbicidas geralmente apresentam comportamentos distintos em função dos vários locais onde são aplicados, o que torna os estudos de dissipação no ambiente ainda mais complexos.

O uso de herbicidas para o controle de plantas daninhas tem sido uma importante ferramenta contribuindo para o aumento da produtividade de várias culturas no mundo inteiro. Entretanto, a utilização indiscriminada, sem o devido conhecimento do seu potencial de contaminação e risco à saúde humana, pode causar grandes problemas ambientais e aos seres humanos. A poluição de mananciais hídricos, por exemplo, pode ocorrer quando os mesmos estiverem localizados próximos às áreas consideradas de risco, inviabilizando, com isso, seu uso futuro.

Na última década, o emprego de uma nova tecnologia nas lavouras orizícolas, que faz uso de herbicidas do grupo químico das imidazolinonas juntamente com cultivares tolerantes, tem gerado discussão quanto à contaminação do ambiente e principalmente às reservas de água subterrâneas. No sistema Clearfield[®], nome pelo qual é conhecida a tecnologia, utilizam-se herbicidas de elevada persistência no solo, os quais eram anteriormente aplicados em culturas de sequeiro como soja e cana-de-açúcar dentre outras.

Além da tecnologia Clearfield[®], para o controle de plantas daninhas em áreas de produção de arroz irrigado, também são utilizadas a rotação e/ou sucessão de culturas com soja, pastagens de inverno e pousio no verão. Nos últimos anos, com o avanço dos estudos no desenvolvimento de cultivares de soja tolerante ao encharcamento, essa cultura tem sido preferencialmente utilizada pelos agricultores visto que oferece maior lucratividade. Entretanto, apesar da elevada seletividade de algumas imidazolinonas à cultura da soja, alguns herbicidas de elevado efeito residual, utilizadas no arroz irrigado, não são recomendados para a cultura. A longa persistência desses herbicidas no solo pode afetar também as espécies naturais ou cultivadas durante o inverno, diminuindo a

quantidade e qualidade das pastagens. Segundo Williams et al. (2002), a produção de culturas não tolerantes pode ser afetada caso o intervalo entre a aplicação de imazethapyr e a semeadura da cultura em rotação não seja observado.

As imidazolinonas, quando aplicadas nas lavouras, podem atingir o solo através do contato direto durante a pulverização, por escoamento das gotas que se formam na superfície das folhas, ou com a morte das plantas e sua incorporação ao solo. Uma vez no solo, esses herbicidas podem ser absorvidos pelas raízes, sorvidos aos colóides do solo, dissolvidos na solução do solo ou sofrer algum processo de degradação. Também podem sofrer lixiviação ou serem carregados horizontalmente através do escoamento superficial, atingindo locais não alvo.

A sorção das imidazolinonas aos colóides do solo depende de vários fatores, dentre eles o pH, o teor de matéria orgânica, a textura, a umidade e a temperatura, esses, por sua vez, variam em sua influência, dependendo do lugar e do momento (Koskinen e Harper, 2001; Curran et al., 1992; Wang e Weiping, 1999; Madami et al., 2003). Em geral, a sorção de herbicidas diminui com o aumento da temperatura (Biggar e Cheung, 1973; Fusi et al., 1993). Porém, para as imidazolinonas essa relação pode ser inversa, como para imazapyr, onde a sorção pode aumentar com o aumento da temperatura (Wang e Weiping, 1999; Jenkins et al., 2000).

A matéria orgânica, além do seu elevado potencial de sorção, está relacionada com a atividade de microrganismos, sendo mais abundante nas camadas superficiais do solo. A sorção de herbicida na matéria orgânica é mais estável que a resultante da ligação com minerais do solo. Dessa forma, os solos com altos teores de matéria orgânica apresentam menor tendência geral de lixiviação, representando menor risco de contaminação ao lençol freático (Cox et al., 1998).

Outra importante característica do solo diz respeito à sua classe textural, a qual, juntamente com a matéria orgânica, possui grande relação com a sorção de herbicidas. Solos com elevado teor de argila apresentam maior área superficial e consequentemente, maior número de sítios de ligação o que resulta em maior sorção dos herbicidas. Além disso, os diferentes tipos de argila 1:1 (não-expansível) e 2:1 (expansíveis) também apresentam grande influência na capacidade de sorção de cada solo.

Nesse contexto, solos com diferentes características podem oferecer diferentes condições de lixiviação para os herbicidas do grupo químico das imidazolinonas. A

correta utilização desses herbicidas, considerando as características edáficas do local onde serão utilizados, podem diminuir problemas de contaminação de mananciais hídricos. Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a lixiviação dos herbicidas imazethapyr, imazapyr e imazapic em diferentes solos de cultivo de arroz irrigado.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização do experimento, amostras de solo foram coletadas em cinco municípios do Rio Grande do Sul – BR (Figura 2). Os municípios foram escolhidos de acordo com sua localização em importantes regiões produtora de arroz irrigado e quanto às classes de solos mais representativas onde se encontram a maior parte das lavouras orizícolas do Estado. As amostras de solo foram coletadas entre os meses de outubro a novembro de 2011 em lavouras de arroz irrigado sem histórico de aplicação de herbicidas do grupo químico das imidazolinonas.

Os solos predominantes nas regiões de coleta foram classificados como Vertissolo Ebânico (Fronteira Oeste), Chernossolo Argilúvico (Campanha) e Planossolo Háplico (Zona Sul, Depressão Central e Planície Costeira Externa) (Tabela 1).

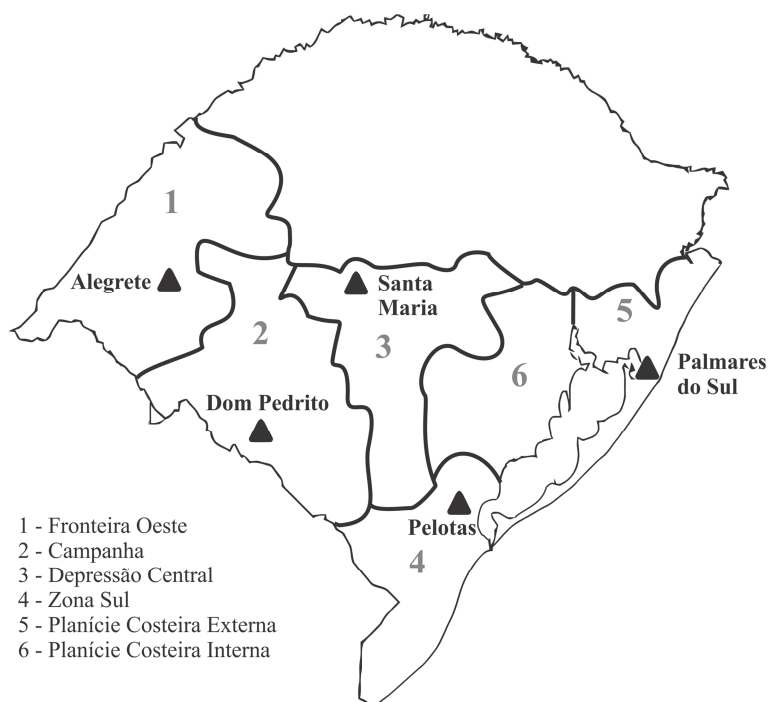


Figura 2 - Mapa das regiões arrozeiras do Estado do Rio Grande do Sul com a identificação dos locais de coleta de solo (Alegrete, Palmares do Sul, Dom Pedrito, Pelotas e Santa Maria). ▲= ponto de coleta.

Tabela 1 - Local de coleta (cidade), região orizícola, latitude, longitude, classe de solo e porcentagem da classe de solo no total da área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul e Ocorrência em percentual.

Local de coleta	Região	Latitude	Longitude	Classe de solo	Ocorrência (%) ¹
Alegrete	Fronteira Oeste	29°42'22,45"S	55°51'18,30"O	Vertissolo	1,4
Dom Pedrito	Campanha	31°10'8,15"S	54°45'4,61"O	Chernossolo	16,1
Santa Maria	Depressão Central	29°43'21,23"S	53°43'35,42"O	Planossolo	56,0
Pelotas	Zona Sul	31°48'24,90"S	52°28'51,67"O	Planossolo	56,0
Palmares do Sul	Planície Costeira Externa	30°25'47,69"S	50°29'29,44"O	Planossolo	56,0

¹ Fonte: Pinto et al. (2004).

As colunas de solo foram coletadas com o auxílio de um extrator de solo (Figura 3-A) constituído por um cilindro de metal onde foram inseridos tubos de PVC no seu interior para evitar a quebra dos mesmos durante a extração. As colunas de solo foram coletadas até uma profundidade de 30 cm, através da inserção de tubos de PVC, sem que houvesse a desestruturação das camadas. As colunas de solo consistiram-se nas unidades experimentais da primeira etapa do experimento. Os tubos possuíam 40 cm de comprimento por 150 mm de diâmetro, os mesmos, posteriormente à coleta, tiveram sua base vedada por um tampo (CAP-PVC) (Figura 3-B). Após 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 2011/2012, foi conduzido o experimento.

O experimento foi arranjado, em casa de vegetação, no delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições sendo conduzido em duas etapas. Na primeira etapa, foram aplicados os tratamentos herbicidas na superfície das unidades experimentais e estabelecido lâmina de água para simular uma condição real de lavoura de arroz irrigado. Os herbicidas utilizados foram: imazethapyr ($100 \text{ g i.a. ha}^{-1}$), imazapic ($100 \text{ g i.a. ha}^{-1}$), imazapyr ($100 \text{ g i.a. ha}^{-1}$) e mais um tratamento testemunha sem aplicação. Os herbicidas foram aplicados com o auxílio de um borrifador. O volume de calda utilizado foi de 10 ml por unidade experimental. Para que não houvesse a contaminação das bordas internas superiores e posterior escorrimento pelas laterais, durante a aplicação dos tratamentos, foi utilizado um tubo PVC de menor diâmetro no interior da parte superior dos tubos que continha o solo. Após isso, esse tubo de menor diâmetro foi limpo e descartado. Um dia após a aplicação dos tratamentos, foi estabelecida uma lâmina de água constante de 6 cm de altura acima do nível do solo por 60 dias simulando as condições de cultivo. Em lavoura comercial o período em que o solo fica com lâmina é de aproximadamente 80 dias, não sendo adotado esse intervalo de tempo nesse experimento devido à necessidade de condições climáticas ideais para a realização do bioensaio. Após esse período, as unidades experimentais foram cortadas longitudinalmente e o solo removido para a condução do bioensaio na segunda etapa.

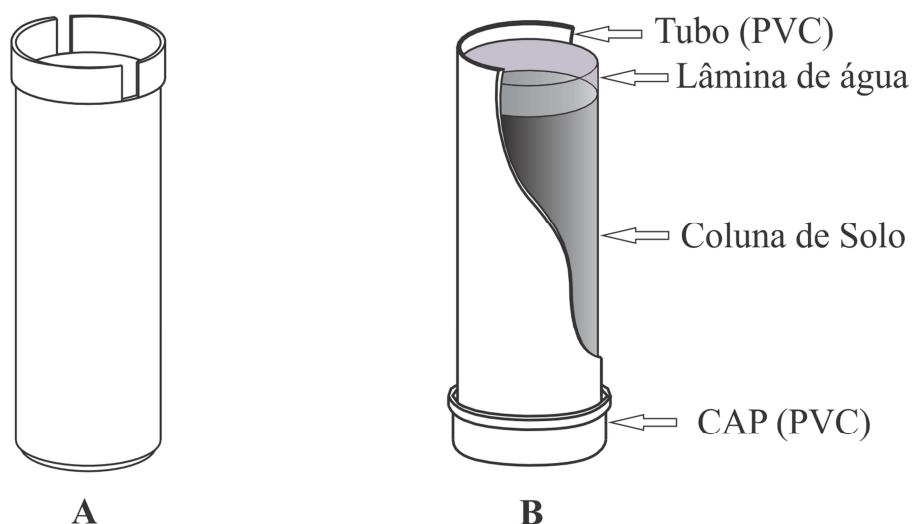


Figura 3 - Desenho esquemático do extrator de solo (A) e do corte da unidade experimental demonstrando suas principais partes (B).

A segunda etapa do experimento consistiu na condução de um bioensaio com o solo retirado das colunas de solo. Para isso, as unidades experimentais foram seccionadas de 5 em 5 cm de profundidade. O solo de cada camada foi destorroado e uma alíquota de 400 g foi colocada em potes de 500 ml de capacidade devidamente identificados. Após isso, cada solo armazenado nos potes, foi adubado com o equivalente a 300 kg ha^{-1} da fórmula 05-20-20 ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$) e semeado arroz da cultivar IRGA 417, sensível ao grupo químico das imidazolinonas. Após 20 dias da semeadura, aplicou-se nitrogênio na forma de uréia (70 kg ha^{-1} de N). Para que houvesse melhor uniformidade na aplicação de N, a uréia foi diluída anteriormente em água, e após, aplicado 10 ml da solução em cada pote. Em seguida da aplicação do nitrogênio, os potes foram mantidos com dois centímetros de lâmina de água até o fim da condução do experimento.

O bioensaio foi conduzido nos meses de fevereiro e março de 2012 em casa de vegetação. O delineamento utilizado foi blocos ao acaso com três repetições em esquema fatorial. O fator A constituiu-se de cinco locais de coleta de solo com diferentes características. O fator B de três dos principais herbicidas aplicados na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul, sendo eles imazethapyr, imazapic e imazapyr, além de um tratamento testemunha sem herbicida. O fator C consistiu das camadas dos solos (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30 cm) obtidas pelo seccionamento das unidades experimentais.

Durante a extração das colunas de solo, foram coletados aproximadamente 300 g de solo de todas as camadas de cada local. Essas amostras foram enviadas para laboratório, onde foram feitas análises físico-químicas para determinar o teor de argila e matéria orgânica, bem como, o pH em água de cada amostra (Tabela 2).

Tabela 2 - Teor de argila (%), matéria orgânica (%) e pH em água para as camadas (CAM) de 0-5 a 25-30 cm dos solos de Alegrete (ALE), Dom Pedrito (DP), Santa Maria (SM), Pelotas (PEL) e Palmares do Sul (PAL).

C A M (cm)	Argila (%)					Matéria Orgânica (%)					pH em Água				
	ALE	DP	SM	PEL	PAL	ALE	DP	SM	PEL	PAL	ALE	DP	SM	PEL	PAL
0-5	23	17	15	16	15	4,4	2,3	2,1	2,3	1,4	5,4	4,7	5	5,1	5,5
5-10	23	18	16	16	15	3,4	1,7	1,5	1,8	1,3	5,5	4,8	5,1	5,1	5,1
10-15	23	20	16	18	15	2,8	1,4	1,4	1,8	1,3	5,5	5,4	4,7	5,2	5,1
15-20	25	17	15	16	14	2,7	0,9	1,2	1,5	0,8	5,3	5,4	4,8	5,3	5,5
20-25	26	17	15	16	15	2,6	0,8	1,2	1,4	0,5	5,5	5,8	4,5	5,4	5,4
25-30	23	20	16	18	15	2,2	0,8	1,1	1,1	0,5	5,4	5,9	4,7	5,1	5,4

Nas plantas de arroz não tolerante foram avaliados: fitotoxicidade, estatura de planta e massa seca da parte aérea (MSPA) (dados não apresentados). A avaliação da toxicidade dos herbicidas às plantas de arroz aos 07, 14, 21 e 28 dias após a emergência (DAE) foi realizada visualmente atribuindo-se notas de 0 a 100%. Nessa escala, zero corresponde à ausência de sintomas de fitotoxicidade e 100% corresponde à morte das plantas de arroz (Gazziero et al., 1995). A estatura das plantas foi determinada com o auxílio de régua milimetrada aos 07, 14 (dados não mostrados), 21 e 28 DAE, medindo-se no colmo principal, a distância do nível do solo até a extremidade da última folha com colar formado. Para determinação da MSPA, as plantas de arroz foram cortadas ao nível do solo aos 28 DAE e submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 60°C, até se obter massa constante, quando então foram pesadas. A lixiviação foi estimada através de bioensaio utilizando as avaliações de fitotoxicidade e redução de estatura em relação às plantas testemunhas.

Os dados foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e à homocedasticidade pelo teste de Levene, posteriormente foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$). Quando necessário, os dados foram transformados. Em caso de significância, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve interação significativa ($p \leq 0,05$) entre tratamentos herbicidas, profundidade e solo para todas as variáveis analisadas. Por isso, todos os fatores foram analisados em conjunto considerando-se as diferenças estatísticas obtidas através do teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Os dados de fitotoxicidade e estatura mostram que houve lixiviação dos herbicidas imazethapyr, imazapic e imazapyr, sendo os efeitos fitotóxicos detectados até a profundidade de 25-30 cm (Figura 4 a 9). Houve diferença entre camadas de solo, sendo que os herbicidas apresentaram maior efeito sobre as plantas de arroz irrigado nas camadas mais superiores para a maioria dos solos avaliados. Tal resultado indica que mesmo as imidazolinonas apresentando potencial de lixiviação, a tendência é de concentrarem-se nas camadas mais próximas à superfície, o que corrobora com resultados obtidos por Kraemer et al. (2009) e Martini et al. (2011), ambos trabalhando em um Planossolo Hidromórfico eutrófico arênico.

O solo de Alegrete (vertissolo) apresentou menor lixiviação para todos os herbicidas testados em todas as avaliações sendo observados seus efeitos fitotóxicos até a camada de 5-10 cm. Além disso, esse solo foi o que apresentou menor índice de toxicidade às plantas de arroz não tolerantes quando comparado dentro de uma mesma camada. Isso se deve às características intrínsecas do solo de Alegrete o qual apresenta elevado teor de matéria orgânica e argila (Tabela 2) comparando com os demais solos. De maneira geral, solos com maior teor de matéria orgânica e argila apresentam maior adsorção dos herbicidas (Li et al., 2003; Hager e Nordby, 2004; Si et al., 2005) por apresentarem maior área superficial específica e consequentemente maior número de sítios de ligação. Além disso, a presença de minerais de argila expansíveis, geralmente encontradas nesse solo (vertissolo), aumenta a capacidade de adsorção e diminui a

dessorção de herbicidas devido às cargas geradas a partir das substituições iônicas isomórficas nas estruturas desses minerais (Fontes et al., 2001).

Quanto ao solo de Dom Pedrito, o mesmo apresentou lixiviação semelhante ao de Santa Maria e Pelotas, porém, com níveis de fitotoxicidade, em geral mais baixos nas camadas superficiais na maioria das avaliações. Esse resultado pode estar relacionado com a maior degradação dos herbicidas nesse solo. O herbicida imazethapyr apresentou menor fitotoxicidade nesse solo quando comparado com os outros herbicidas dentro da camada de 5-10 cm. Tal fato pode estar relacionado à menor disponibilidade do herbicida devido à menor solubilidade. Essa menor fitotoxicidade pode não estar relacionada com a menor concentração desse herbicida em uma determinada camada, quando comparado com os demais, pois, o efeito biológico causado por um mesmo volume de produto pode ser diferente entre eles. Para esse solo foi observado toxicidades às plantas de arroz até a profundidade de 20-25 cm, sendo que na última avaliação (28 DAE) foi detectado efeito dos herbicidas até a profundidade de 15-20 cm. Isso pode ser explicado pela recuperação das plantas, quanto aos sintomas provocados pelos herbicidas, na última avaliação.

Os solos de Santa Maria e Pelotas apresentaram comportamento semelhante quanto à lixiviação, sendo a fitotoxicidade observada até a camada de 20-25 cm. Aos 21 DAE, para o solo de Pelotas, foram observados efeitos fitotóxicos do herbicida imazethapyr até a profundidade de 25-30 cm, entretanto, não diferiu estatisticamente da camada ligeiramente superior (20-25 cm). Isso, aliado à ligeiramente maior fitotoxicidade observada nesse solo, pode estar relacionada com o maior teor de areia. Em geral, o imazethapyr foi o herbicida que causou menor toxicidade ao arroz nesses dois solos. Isso pode ser observado na maioria das camadas sendo indiferente em alguma delas quando comparado com os outros herbicidas na mesma camada.

Dentre os solos avaliados, a maior lixiviação ocorreu no solo de Palmares do Sul, sendo observados os efeitos fitotóxicos na camada mais profunda avaliada (25-30 cm). Em algumas épocas de avaliação, para essa camada, foram obtidos valores de fitotoxicidade próximo a 90% não diferindo das demais camadas deste solo. Tais resultados devem-se ao baixo teor de argila e matéria orgânica presente neste solo, o que diminui a capacidade de sorção tornando os herbicidas mais propensos ao processo de lixiviação (Firmino et al., 2008). Esses resultados corroboram com os obtidos por

Jourdan et al. (1998) o qual mostra que imazethapyr movimentou-se em profundidade em um solo arenoso, atingindo 20 cm cinco dias após a aplicação do herbicida. Segundo Rossi e colaboradores (2005), em solos arenosos, a lixiviação é maior que em solos siltosos ou argilosos. Nesse solo, os herbicidas imazethapyr e imazapic apresentaram os maiores valores de toxicidade à cultivar IRGA 417 utilizada como bioindicadora.

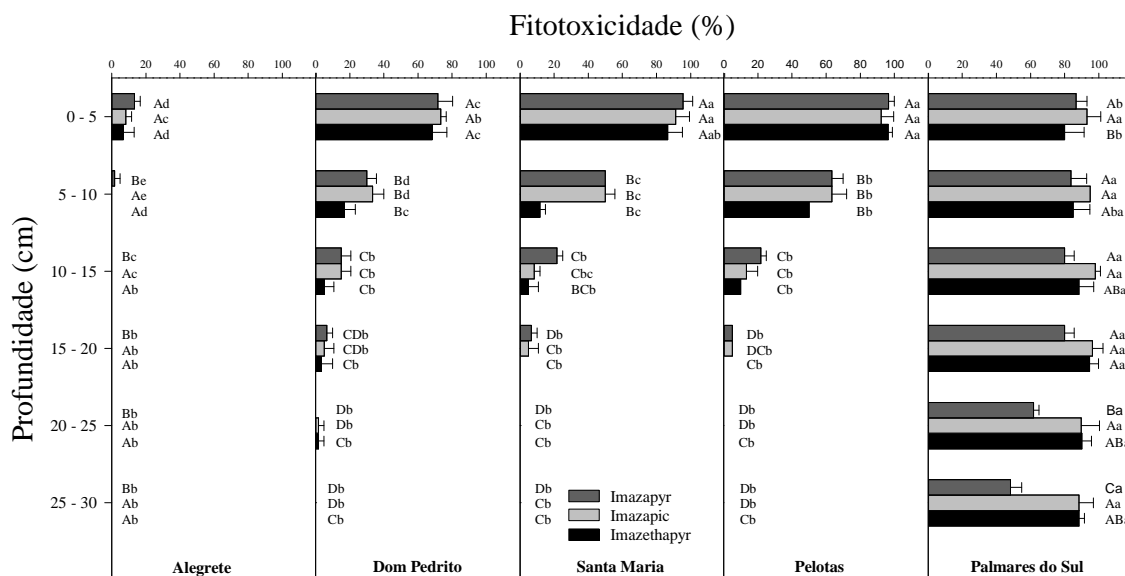


Figura 4 - Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da fitotoxicidade observada aos 07 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

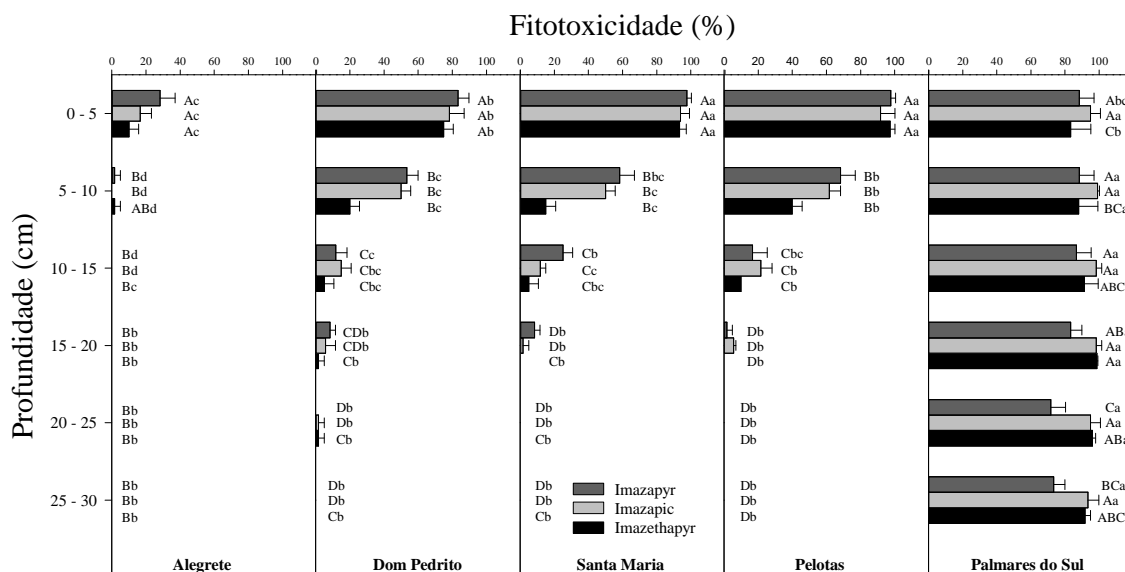


Figura 5 - Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da fitotoxicidade observada aos 14 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

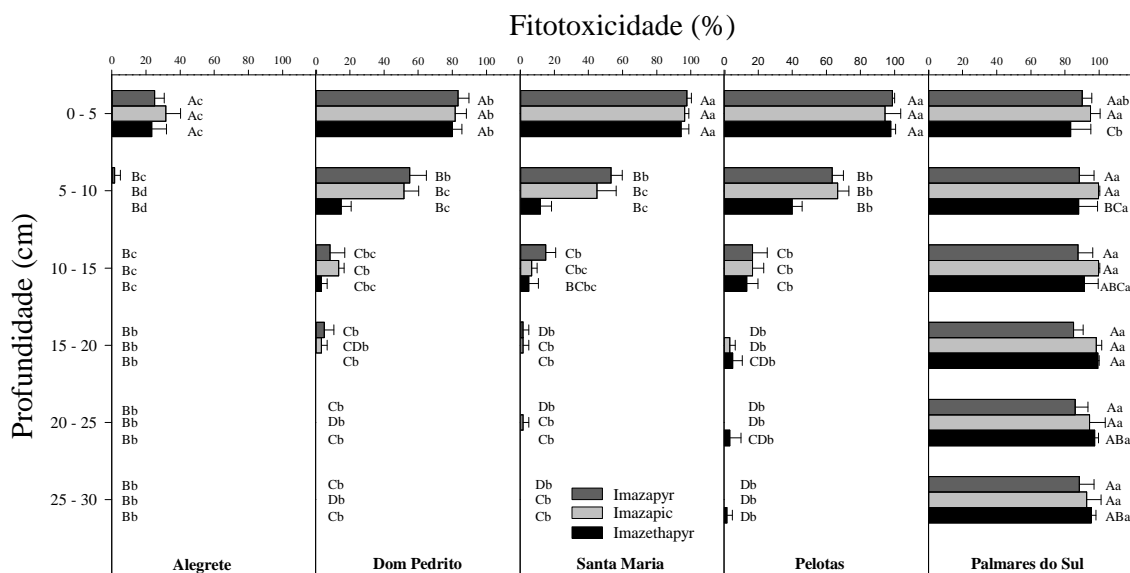


Figura 6 - Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da fitotoxicidade observada aos 21 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

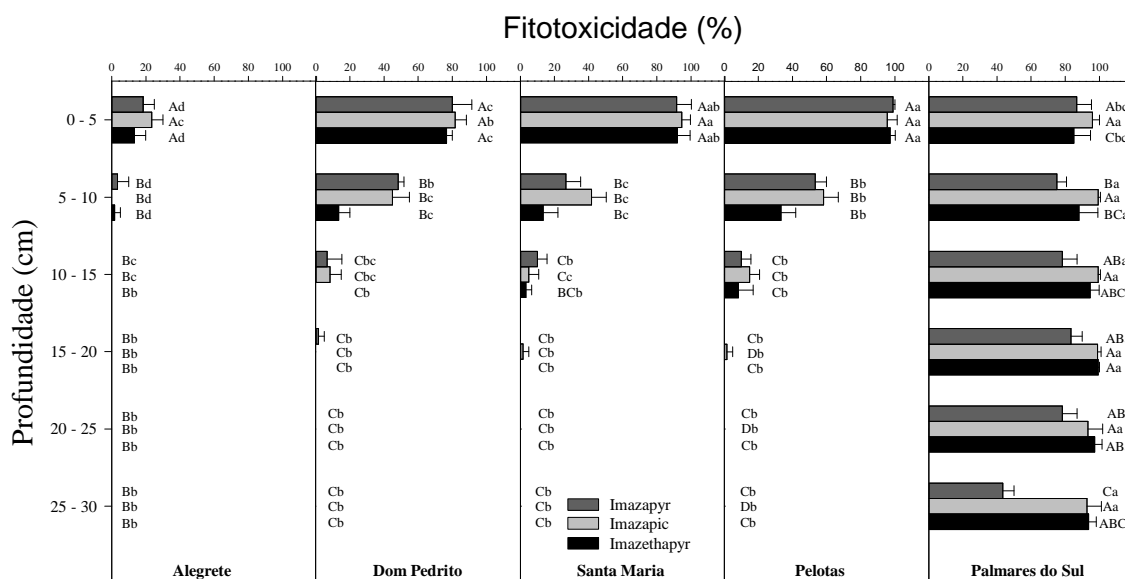


Figura 7 - Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da fitotoxicidade observada aos 07 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

Quanto à estatura de plantas, os resultados obtidos mostram semelhança com os encontrados para a fitotoxicidade (Figura 8 e 9). Para todos os tipos de solo foram detectadas variações na estatura em relação à testemunha, até a camada de 25-30 cm. Entretanto, essas variações nas camadas inferiores podem não ter sido causadas pela ação dos herbicidas, mas sim por outros fatores intrínsecos do experimento. Além disso, pode estar relacionada com a precisão da escala utilizada (0,5 cm), a qual considera pequenas variações quando comparada com a avaliação de fitotoxicidade.

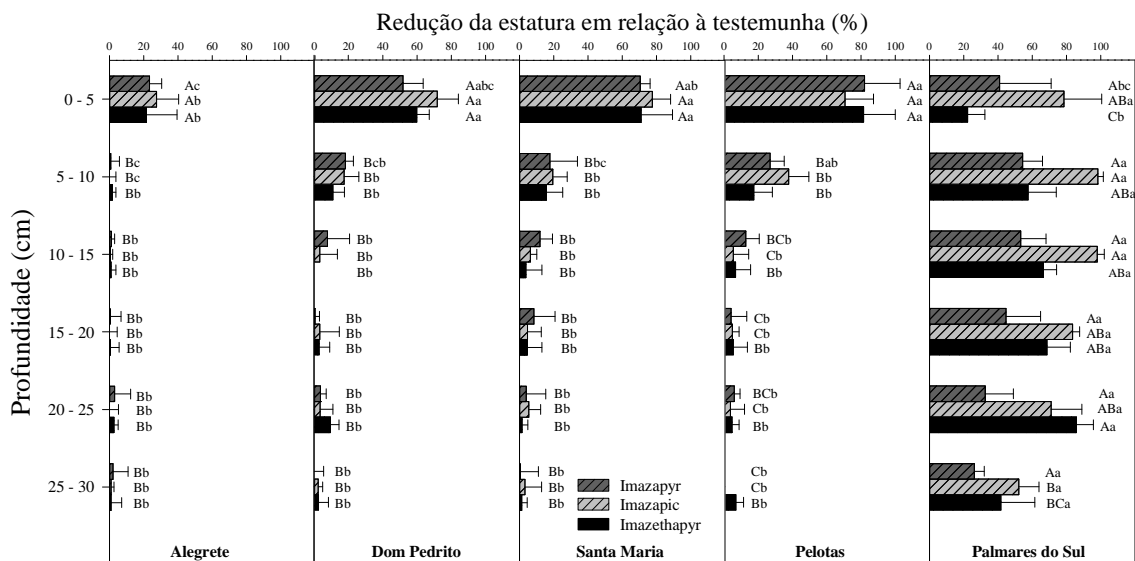


Figura 8 - Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da redução da estatura de plantas observada 21 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

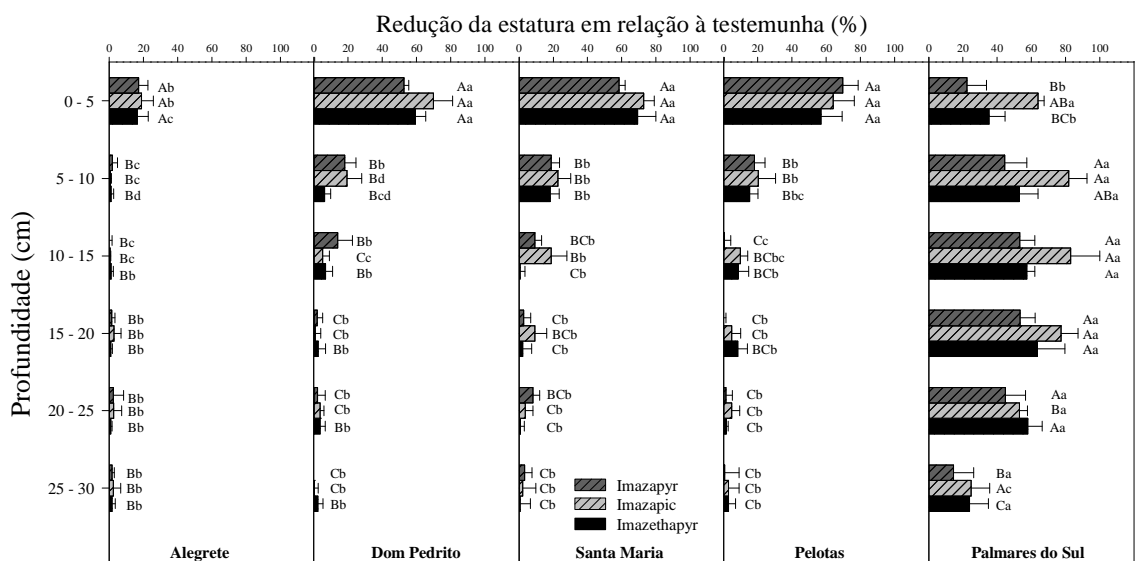


Figura 9 - Lixiviação de imazethapyr, imazapic e imazapyr estimada a partir da redução da estatura de plantas observada aos 28 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 60 dias após a aplicação dos herbicidas. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

O comportamento dos herbicidas pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas apresenta relativa variação dependendo de fatores edafoclimáticos bem como das próprias características da molécula (Senseman, 2007). Isso torna os resultados encontrados na literatura algumas vezes divergentes quando tenta-se comparar comportamentos de um mesmo herbicida. Essas divergências estão relacionadas às diferentes condições de ambiente encontradas em cada local. As principais variáveis relacionadas ao solo que interferem na dinâmica desses herbicidas são o pH (Loux e Reese, 1993), o teor de matéria orgânica (Stougaard et al., 1990), a textura (Loux e Reese, 1993), o manejo (Kraemer et al., 2009) e a umidade do solo (Baughman e Shaw, 1996). Quanto às moléculas, características como solubilidade (Avila et al., 2005), capacidade de ionização (Inoue et al., 2007), coeficiente de adsorção ao solo e tipo de degradação são as que mais interferem nesse comportamento.

A elevada solubilidade das imidazolinonas (1.400 mg L^{-1} , 11.272 mg L^{-1} e 2.200 mg L^{-1} para imazethapyr, imazapyr e imazapic, respectivamente) (Senseman et al., 2007), apresenta-se como um importante fator que resulta em alta mobilidade das moléculas. Com isso, esses herbicidas tendem a permanecer na solução do solo sendo facilmente carregados para zonas mais profundas do perfil. Em áreas cultivadas com arroz irrigado, esse fato pode potencializar a lixiviação desses herbicidas visto que em boa parte do ciclo da cultura o solo permanece encharcado.

Além disso, solos com baixo teor de argila e matéria orgânica, como os encontrados na região de Palmares do Sul e em outras regiões do Estado do Rio Grande do Sul, podem oferecer sérios problemas de contaminação de águas subterrâneas. Em áreas cultivadas com arroz irrigado, geralmente, ocorre a presença de uma camada de solo subsuperficial que oferece maior resistência à percolação, porém, a superficialidade e flutuação do lençol freático nessas áreas aumentam as chances de contaminação.

Contudo, os resultados obtidos neste trabalho podem auxiliar na compreensão do comportamento das imidazolinonas em condições de cultivo de arroz irrigado em solos de cultivo de arroz irrigado. É importante ressaltar que em condições distintas de solo e clima, os resultados podem ser diferentes para os herbicidas testados. Porém, na falta de informações para outros solos, esses podem ser usados considerando as semelhanças físico-químicas. Entretanto, podemos notar que existem diferenças quanto à lixiviação de imidazolinonas em diferentes solos e isso nos leva a considerar a necessidade de

recomendações de herbicidas que atentem às condições edáficas do local onde serão aplicados. Juntamente com os efeitos prejudiciais da lixiviação, devem ser considerados os prejuízos causados pelo efeito residual desses herbicidas em cada solo.

Assim, a partir dos resultados do presente trabalho é possível concluir que o solo com baixo teor de argila e matéria orgânica tem maior lixiviação de herbicidas observado através dos sintomas fitotóxicos na cultivar não tolerante até a profundidade de 30 cm. A lixiviação é menor no solo com maior teor de argila e matéria orgânica.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Pelotas pela disponibilidade de sua estrutura e viabilização das pesquisas realizadas. À CAPES pelo auxílio financeiro, ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa do segundo autor e bolsa de pós-doutorado de Roberta Manica-Berto (Projeto de Pesquisa - Nº 028423/2009).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- BAUGHMAN, T.A.; SHAW, D.R. Effect of wetting/drying cycles on dissipation patterns of bioavailable imazaquin. **Weed Science**, v.44, n.2, p.380-382, 1996.
- BIGGAR, J.W.; CHEUNG, M.W. Adsorption of picloram (4-amino-3,5,6-richloropicolinic acid) on Panoche, Ephrata, and Palouse soils. Thermodynamic approach to the adsorption mechanism. **Soil Science Society of America**, v.37, p.863-868, 1973.
- COX, L.; KOSKINEN, W.C e YEN, P.Y. Changes in sorption of imidacloprid with incubation time. **Soil Science Society of America**, v.62, p.342-347, 1998.

CURRAN, W.S. et al. Photolysis of imidazolinone herbicides in aqueous solution and soil. **Weed Science**, v.40, p.143-148, 1992.

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

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.

FUSI, P. et al. Interactions of two acetanilide herbicides with clay surfaces modified with Fe(III) oxyhydroxides and hexadecyltrimethyl ammonium. **Chemosphere**, v.27, p.765-771, 1993.

GAZZIERO, D. L. P.; VELINI, E. D.; OSIPE, R. Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas. **Plantas Daninhas**, 1995. 42p.

HAGER, A.; NORDBY, D. Herbicide persistence and how to test for residues in soils. In: BISSONNETTE, S. **Illinois agricultural pest management handbook**. Illinois: University of Illinois, 2004. p.323-326.

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.

JENKINS, S. R. et al. Temperature effects on retention of atrazine and imazapyr soils. **Water Air Soil Pollution**, v.118, p.169-178, 2000.

JOURDAN, S.W. et al. Imazethapyr bioactivity and movement in soil. **Weed Science**, v.46, p.608-613, 1998.

KOSKINEN, W. C.; HARPER, S. S. The retention process: mechanisms. In: CHENG, H. H.; BAILEY, B. W.; GREN, R. E.; SPENCER, W. F. (Ed.). **Pesticides in the soil environment: Processes, impacts, and modeling**; Madison: SSSA, 1990. p51-77.

KRAEMER, A. F. et al. Lixiviação do imazethapyr em solo de várzea sob dois sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v.39, n.6, p.1660-1666, 2009.

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

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.

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

MARTINI, L. F. D. et al. Lixiviação de imazethapyr + imazapic em função do manejo de irrigação do arroz. **Planta daninha**, v.29, n.1, p.185-193, 2011.

PINTO, L. F. S.; LAUS NETO, J. A.; PAULETTO, E. A. **Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado**. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JR. A. M. (Ed.) Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 75-96.

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.

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.

SILVA, D. R. O. et al. Ocorrência de agrotóxicos em águas subterrâneas de áreas adjacentes a lavouras de arroz irrigado. **Química Nova**, v.34, n.5, p.748-752, 2011.

STOUGAARD, R. N. et al.; SHEA, P. J.; 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.

WANG, Q.; WEIPING, L. Correlation of imazapyr adsorption and desorption with soil properties. **Soil Science**, v.164, n.6, p.411-416, 1999.

WILLIAMS, B. J. et al. Weed management systems for Clearfield Rice. **Louisiana Agriculture**, v.45, n.1, p.16-17, 2002.

4. Artigo II - Efeito da calagem na lixiviação de imazethapyr e imazapyr em solo de cultivo de arroz irrigado⁶

Effect of liming on imazethapyr and imazapyr leaching in irrigated rice soil

REFATTI, J. P.¹; AVILA, L. A.²; AGOSTINETTO, D.³; MANICA-BERTO, R.⁴; BUNDT, A. C.⁵; ELGUEIRA, D. B.¹

RESUMO - Herbicidas imidazolinonas são amplamente utilizados em áreas de cultivo de arroz irrigado no controle das principais plantas daninhas. Esses herbicidas comportam-se como ácidos ou bases fracas, dependendo do pH onde se encontram, podendo, desta forma, influenciar na sua lixiviação. Com isso, o objetivo desse estudo foi avaliar o efeito da elevação do pH, através da calagem, na lixiviação de imazethapyr e imazapyr. Para isso, foram coletadas amostras indeformadas de solo com pH 4,8 em uma lavoura de arroz irrigado sem histórico de aplicação de imidazolinonas. As colunas de solo foram coletadas utilizando-se um extrator e constituíram-se nas unidades experimentais. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, arranjado em esquema fatorial, sendo o fator A constituído por solo com pH natural (pH 4,8) e solo com calagem, o fator B os herbicidas imazethapyr e imazapyr (todos a 100 g i.a. ha⁻¹), aplicados sobre a superfície das colunas de solo 30 dias após aplicação dos tratamentos do fator A. Após isso, o experimento foi mantido por 60 dias com lamina de irrigação de 6 cm simulando condições normais de cultivo. Ao final desse período, as unidades experimentais foram cortadas em diferentes profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30 cm) para realização de um bioensaio. Para análise, essas profundidades foram consideradas como fator C. Os resultados mostram que o solo calcareado apresenta maior lixiviação dos herbicidas imazapyr e imazethapyr.

Palavras-chave: percolação, calcário, poluição ambiental, imidazolinonas

ABSTRACT - Imidazolinone herbicides are widely used in areas of irrigated rice for control the most important weeds. These herbicides behave as weak acids or bases, depending on the pH which may affect leaching. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of raising the pH by liming on leaching of imazethapyr and imazapyr. Undisturbed samples were collected in a rice paddy field that had no history

¹ Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade, Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Bolsista CAPES; ² Professor Adjunto, Ph.D., Departamento de Fitossanidade, UFPel, Caixa Postal 354, 96010-900 Pelotas-RS, Brasil, <laavilabr@gmail.com>; ³ Professor Adjunto, Dr. Departamento de Fitossanidade, UFPel, Pelotas-RS, Brasil, <agostinnetto@ig.com.br>; ⁴ Pós-Doutorado(a) Universidade Federal de Pelotas, UFPel, Brasil. Bolsista do(a): Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES; ⁵ Doutora Pesquisadora da empresa Dow AgroSciences. ⁶ Artigo formatado segundo normas da revista Planta Daninha

of imidazolinone herbicide usage (pH 4.8). The soil columns, that constituted the experiment units, were collected using a soil extractor constituting. The experiment was conducted in a greenhouse, arranged in a factorial design. Factor A consisted of natural soil (pH 4.8) and limed soil. Factor B were the herbicides imazethapyr and imazapyr (all at 100 g a.i. ha⁻¹) applied to the surface of the soil columns 30 days after application of factor A. Then, the experimental units were flooded for 60 days with 6 cm water layer simulating normal cultivation. After this period, the experimental units were divided in sections according to different depths (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 and 25-30 cm) for conducting a bioassay. For analysis, these depths were considered as a factor C. The results show that soil liming resulting in greater leaching of imazapyr and imazethapyr.

Keywords: *percolation, lime, environmental pollution, imidazolinon*

INTRODUÇÃO

Os herbicidas pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas são amplamente utilizados devido a fatores como seletividade a algumas culturas, eficiência no controle de plantas daninhas, atividade residual no solo (Shaw e Wixson, 1991; Loux e Reese, 1993) dentre outros. Esses herbicidas podem ser aplicados em pré ou pós-emergência (Steele et al., 2002; Ottis et al., 2003), como herbicidas seletivos para o controle de um amplo espectro de plantas daninhas monocotiledôneas e dicotiledôneas em culturas de grande importância como soja, arroz e cana-de-açúcar. Também podem ser utilizados como herbicidas não seletivos em áreas não agrícolas devido à sua elevada persistência no solo.

Na cultura do arroz irrigado, o desenvolvimento da tecnologia Clearfield[®], fez com que esses herbicidas passassem a serem utilizados com maior frequência nas áreas de relevo plano onde é cultivado o arroz irrigado. Essa tecnologia combina cultivares tolerantes e herbicidas do grupo químico das imidazolinonas, formulados isoladamente ou em misturas, visando o controle das principais plantas daninhas da cultura.

As moléculas de herbicidas imidazolinonas apresentam um comportamento anfótero devido à presença de grupos funcionais carboxílicos (ácido) e amino (básicos). Essa característica confere a esses herbicidas a capacidade de agirem como ácidos ou bases fracas dependendo do pH do meio em que se encontram (Pusino et al., 1997). Com isso, dependendo do coeficiente de ionização (pKa) e do pH do ambiente, as

moléculas dos herbicidas podem estar mais ou menos disponíveis. O pKa representa o pH no qual a moléculas desses herbicidas encontram-se 50% na forma associada ou neutra (COOH) e 50% na forma dissociada ou iônica (COO⁻). Com isso, quando o pH do solo for maior que o pKa desses herbicidas, suas moléculas apresentam-se em sua maior parte na forma aniônica (COO⁻), e na forma associada (COOH) quando o pH do solo é mais baixo que o pKa do herbicida. Os valores de pKa dos herbicidas imidazolinonas variam entre 1,3 e 3,9, podendo, na mesma molécula, existirem um ou mais pKa. O herbicida imazethapyr, por exemplo, apresenta dois pKa (3,9 e 2,1) assim como o imazapyr (3,6 e 1,9), já o imazapic apresenta apenas um (3,9) (Senseman, 2007).

Em solos com pH elevado, a sorção destes herbicidas é reduzida, devido à predominância de moléculas dissociadas (COO⁻) as quais são repelidas pelas cargas negativas do solo, permanecendo mais biodisponível na solução do solo. Por outro lado, em solos com pH baixo, o número de moléculas associadas (COOH) é maior aumentando a sorção desses herbicidas à matriz do solo (Madani et al., 2003; Oliveira et al., 2004). Devido aos baixos valores de pKa das imidazolinonas, esses herbicidas têm sido considerados de elevado potencial de lixiviação (Regitano et al., 2002) podendo causar contaminação de águas subterrâneas. Em lavouras de arroz irrigado, o elevado teor de água no solo aumenta a disponibilidade destes herbicidas (Avila et al., 2005), podendo aumentar ainda mais o deslocamento desses herbicidas no perfil do solo.

Quando o valor do pH da solução do solo está próximo ao pKa do herbicida, pequenas variações no pH provocam grandes alterações nas proporções de moléculas associadas e dissociadas, influenciando a disponibilidade desses herbicida na solução do solo. Com isso, a alteração do pH do solo através de práticas de manejo como a calagem e, no caso de lavouras de arroz irrigado, o estabelecimento de lâmina de água resultando na auto calagem, podem aumentar a lixiviação e consequentemente os riscos de contaminação.

A expansão do cultivo de soja em áreas de cultivo de arroz irrigado, nos últimos anos, como alternativa de rotação de cultura, tem incentivado a elevação do pH desses solos através da calagem. A elevação do pH para a cultura de arroz irrigado não tem demonstrado aumento significativo na produção de grãos (Moraes e Dynia, 1992), principalmente devido ao fenômeno da auto calagem que ocorre naturalmente após o

estabelecimento da lâmina de água. Entretanto, o cultivo de soja na mesma área faz com que haja a necessidade de correção da acidez visto que proporciona considerável aumento na produção final dessa cultura (Sávio, F. L. et al., 2011).

Neste contexto, solos com diferentes valores de pH podem oferecer diferentes condições de lixiviação para os herbicidas imidazolinonas. A influência do pH dos solos nas formas em que as moléculas desses herbicidas se encontram na natureza podem sugerir diferentes manejos dos mesmos a fim de diminuir os riscos de contaminação ambiental. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar o efeito da elevação do pH, através da calagem, na lixiviação de imazethapyr e imazapyr.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação pertencente à Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), localizada no município de Capão do Leão, RS, no ano agrícola 2011/2012. O experimento foi realizado em três etapas. Na primeira etapa, foram coletadas colunas de solo em uma lavoura com pH superficial próximo a 4,8, na cidade de Faxinal do Soturno localizada na Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul – BR (29°32'59,01"S, 53°29'27,42"O). A coleta foi realizada entre os meses de outubro e novembro de 2011. O local foi escolhido por apresentar pH relativamente baixo (4,8) e ser uma área cultivada com arroz irrigado sem histórico de aplicação de imidazolinonas.

As amostras foram coletadas com o auxílio de um extrator de solo (Figura 10-A), constituído por um cilindro de metal onde foi inserido tubos de PVC no seu interior para evitar a quebra dos mesmos durante a extração. As colunas de solo foram coletadas através da inserção de tubos de PVC até a profundidade de 30 cm, sem que houvesse a desestruturação das camadas. Os tubos possuíam 40 cm de comprimento por 150 mm de diâmetro sendo, após a coleta, vedados com um tampo (CAP-PVC) em sua base inferior (Figura 10-B). Os tubos juntamente com a coluna de solo constituíram-se nas unidades experimentais da primeira etapa do experimento. Para o estabelecimento de uma lâmina de água, foram reservados 10 cm de borda livre em cada unidade experimental. O solo predominante no local de coleta foi classificado como Planossolo Háplico. Em seguida,

após a coleta, foi realizada a calagem e incorporação até 15 cm de profundidade em metade das colunas de solo. Nas demais o solo foi apenas revolvido até a mesma profundidade para manter as mesmas condições em todas as unidades experimentais. A quantidade de calcário utilizada foi estimada pelo índice SMP para elevar o pH a 6. O calcário utilizado foi o filler (PRNT > 90%) por apresentar rápida reação no solo. Além disso, o solo das unidades experimentais era irrigado semanalmente para acelerar o efeito do calcário.

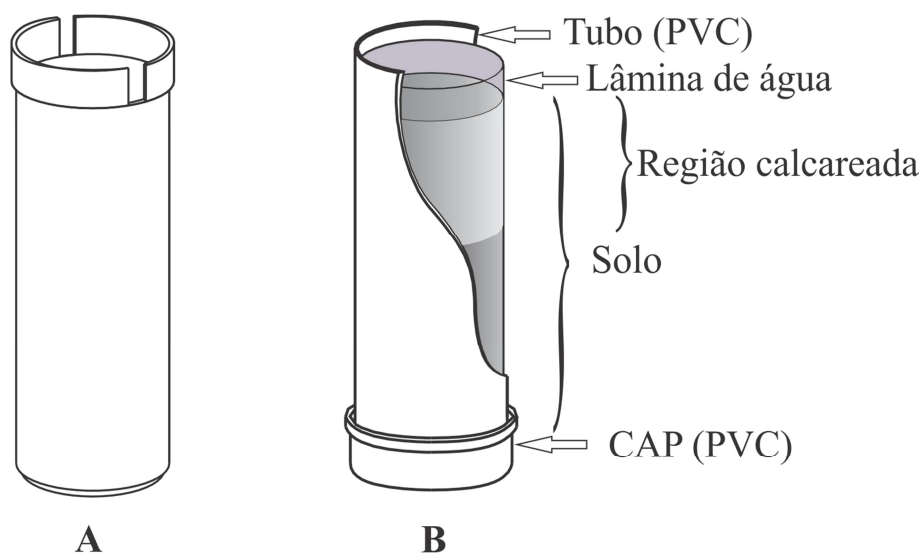
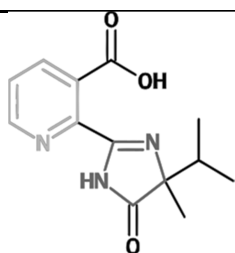
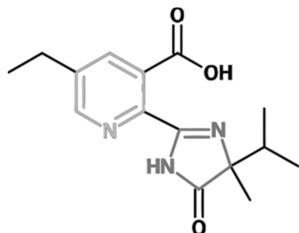


Figura 10 - Desenho esquemático do extrator de solo (A) e do corte da unidade experimental demonstrando suas principais partes e região calcareada/revolvida (B).

A segunda etapa do experimento foi iniciada 30 dias após a calagem e constituiu na aplicação dos tratamentos herbicidas. Os herbicidas utilizados foram: imazethapyr (100 g i.a. ha⁻¹) e imazapyr (100 g i.a. ha⁻¹) e mais um tratamento testemunha sem aplicação de herbicidas. Esses herbicidas foram escolhidos por apresentarem a maior diferença de pKa entre as imidazolinonas registradas para o uso em arroz irrigado (Tabela 3). Os herbicidas foram aplicados com o auxílio de um borrifador utilizando-se um volume de calda de 10 ml por unidade experimental. Para que não houvesse a contaminação das bordas internas superiores e posterior escoamento pelas laterais, durante a aplicação dos tratamentos, foi utilizado um cano PVC de menor diâmetro no interior da parte superior dos tubos que continha o solo. Um dia após a aplicação dos tratamentos, foi estabelecida uma lâmina de água constante de 6 cm de altura acima do nível do solo por

60 dias simulando as condições reais de cultivo. Em lavoura comercial o período em que o solo fica com lâmina é de aproximadamente 80 dias, não sendo adotado esse intervalo de tempo nesse experimento devido à necessidade de condições climáticas ideais para a realização do bioensaio. Após esse período, as colunas de solo foram cortadas longitudinalmente e o solo removido para a condução do bioensaio da terceira etapa.

Tabela 3 - Herbicidas utilizados no experimento com as respectivas formulas química, pKa, Kow, $t_{1/2}$, Koc e solubilidade em água dos herbicidas utilizados.

Herbicidas	Estrutura química	pKa ¹	Kow (pH 7 e 20°C) ²	$t_{1/2}$ (dias) ³	Koc (mL g ⁻¹) ⁴	Solubilidade em água (pH 7 e 20°C) (mg L ⁻¹)
imazapyr		1,9 3,6 11	1,29	25- 142	4-170	9.746
imazethapyr		2,1 3,9	30,9	30-90	75-173	1.400

1 pK_a: constante de dissociação;

2 K_{ow}: coeficiente de partição octanol-água;

3 $t_{1/2}$: meia vida em solo, tempo requerido para que 50% da dose inicial do herbicida seja dissipado;

4 K_{oc}: coeficiente de sorção em solos normalizado pelo teor de carbono orgânico.

A terceira etapa do experimento consistiu na condução de um bioensaio com o solo retirado das unidades experimentais onde foram aplicados os tratamentos na segunda etapa. Para isso, as colunas de solo foram seccionadas de 5 em 5 cm de profundidade (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30 cm). Posteriormente o solo de cada camada foi destorroado e colocado 400 g do mesmo em potes de 500 ml devidamente identificados. Após isso, cada solo armazenado nos potes, foi adubado com 300 kg ha⁻¹ da fórmula 05-20-20 (N-P₂O₅-K₂O) e procedeu-se a semeadura com a cultivar de arroz IRGA 417,

sensível ao grupo químico das imidazolinonas. Após 20 dias da semeadura, aplicou-se nitrogênio na forma de uréia em dose equivalente a 70 kg ha^{-1} de N. Para que houvesse melhor uniformidade, a uréia foi inicialmente diluída em água, e posteriormente, uma alíquota de 10 ml da solução foi aplicada em cada pote. Em seguida da aplicação do nitrogênio, os potes foram mantidos com aproximadamente 2 cm de lâmina de água até o fim da condução do experimento.

As duas primeiras etapas do experimento foram conduzidas em casa de vegetação, onde as unidades experimentais foram organizadas em delineamento de blocos ao acaso com três repetições. O experimento foi arranjado em esquema fatorial, sendo o fator A constituído pelos solos, com e sem calagem e o fator B pelos herbicidas imazethapyr e imazapyr aplicados sobre a superfície das colunas de solo. O bioensaio foi conduzido em câmara de crescimento (fitotron). Para análise, as camadas de solo foram consideradas como fator C. Antes da realização do bioensaio, foram coletados aproximadamente 300 g de solo de todas as camadas e enviado para laboratório, onde foram feitas análises físico-químicas para determinação do pH em água dentre outros parâmetros (Tabela 4).

Tabela 4 - Tabela com os dados de pH em água, teor de argila, matéria orgânica (MO), saturação por alumínio (S. Al), saturação por bases (S. B) e capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva para o solo de Faxinal do Soturno.

Camadas (cm)	pH (em água)		Argila	MO	S. Al	S. B	CTC (Efetiva)	
	Natural ¹	30 dias ²					Natural ¹	30 dias ²
0-5	4,8	6,1	14	1,8	11,7	54,7	7,6	8,4
5-10	4,9	5,1	14	1,3	16,9	50,1	4,9	4,9
10-15	4,7	4,8	15	1,2	15,9	54,8	4,7	4,6
15-20	4,8	4,8	15	1,2	15,5	58,7	4,8	6,0
20-25	4,7	5,0	15	1,2	12,1	57	6,8	6,1
25-30	5,1	5,0	16	1,1	5,5	66,4	6,7	7,2

¹ Valor antes da calagem; ² Valor 30 dias após a calagem.

As variáveis avaliadas foram: toxicidade dos herbicidas às plantas de arroz, estatura de planta e massa seca da parte aérea (MSPA) (dados não apresentados). A avaliação da toxicidade dos herbicidas às plantas de arroz aos 07, 14, 21 e 28 dias após a emergência (DAE) foi realizada visualmente atribuindo-se notas de 0 a 100%. Nessa escala zero

corresponde à ausência de sintomas de fitotoxicidade e 100% corresponde à morte das plantas de arroz (Gazziero et al., 1995). A estatura foi determinada com o auxílio de régua milimetrada aos 07, 14 (dados não mostrados), 21 e 28 DAE, medindo-se no colmo principal, a distância do nível do solo até a extremidade da última folha com colar formado. Para determinação da MSPA, as plantas de arroz foram cortadas ao nível do solo aos 28 DAE e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 60°C, até se obter massa constante, quando então foram pesadas. A lixiviação foi estimada através de bioensaio utilizando as avaliações de fitotoxicidade e redução de estatura em relação às plantas testemunhas.

Os dados foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e à homocedasticidade pelo teste de Levene, posteriormente foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$). Quando necessário, os dados foram transformados. Em caso de significância, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) e por intervalos de confiança (95%).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve interação significativa ($p \leq 0,05$) entre manejos de solo (com calagem e sem calagem), tratamentos herbicidas e camadas de solo para todas as variáveis analisadas. Para as variáveis manejo e camadas de solo, as médias foram comparadas através do teste de Tukey ($p \leq 0,05$), já para a variável herbicidas, a comparação foi realizada através de intervalos de confiança (95%) dentro da mesma camada e manejo.

Os resultados demonstram que houve lixiviação dos herbicidas imazethapyr e imazapyr, sendo seus efeitos fitotóxicos detectados até a profundidade de corte de 20-25 cm (Figura 11 a 14) e de redução de estatura em relação à testemunha até a profundidade de corte de 25-30 (Figura 15 e 16). Os efeitos da presença dos herbicidas foram observados com maior intensidade nas camadas mais superficiais de todos os tratamentos, independente do manejo adotado. O manejo de solo sem calagem, onde o pH era mais baixo, apresentou, em geral, exceto em algumas comparações, menor lixiviação tanto para o herbicida imazethapyr como imazapyr. Tais resultados corroboram com os encontrados na literatura quanto a influência do pH do meio na

lixiviação de imidazolinonas. Monquero e colaboradores (2010), testando diferentes pH (4,7 e 6), constataram ligeiro aumento da lixiviação na condição de solo mais alcalino. Tais resultados ocorrem devido à capacidade que esses herbicidas possuem de se ionizarem. Com isso, quando o pH do solo se aproxima da neutralidade, passa a predominar a forma dissociada (aniônica) desses herbicidas, diminuindo a força de atração entre as moléculas das imidazolinonas e as cargas predominantes na matriz do solo. Consequentemente, haverá menor sorção dos herbicidas causando maior lixiviação desses no solo. Essa pequena diferença entre os dois manejos, pode estar relacionada com a pequena variação de pH entre os dois tratamentos, aliado à pequena diferença entre os pKa dos dois herbicidas.

Apesar do pKa dos herbicidas testados (3,6 e 3,9 para imazethapyr e imazapyr, respectivamente) não estarem dentro da faixa de pH comumente encontrado nos solos agricultáveis (4,5 a 7,5) a ionização pode ocorrer na superfície dos colóides e matéria orgânica do solo. Pesquisas tem mostrado que na superfície dos colóides o pH apresenta-se com valor inferior ao da solução do solo (Bresnahan et al., 2000), fazendo com que ocorra a ionização mesmo com pH do solo acima do pKa das moléculas herbicidas. Aliado a isso, a quantidade de moléculas que não apresentam-se associadas, quando o pH for igual a $pK_a + 1$, são estimadas em aproximadamente 10% do total. No solo sem calagem, os efeitos fitotóxicos dos herbicidas imazapyr e imazethapyr foram observados até a camada de 15 a 20 cm de profundidade.

A lixiviação de herbicidas imidazolinonas depende de uma série de fatores, tais como características das moléculas (Senseman et al., 2007) pH (Loux e Reese, 1993), teor de matéria orgânica (Stougaard et al., 1990), textura (Loux e Reese, 1993), manejo (Kraemer et al., 2009) e umidade do solo (Baughman e Shaw, 1996). Com isso, a dinâmica de um herbicida no ambiente deve ser tratada considerando-se as características de cada local, assim como das moléculas desses produtos.

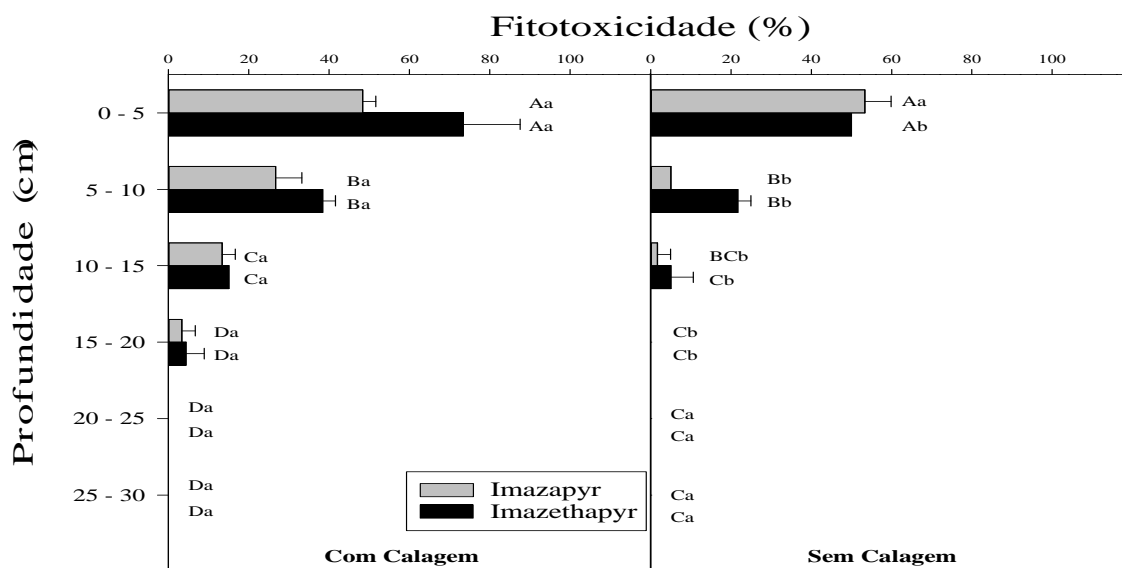


Figura 11 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr avaliada a partir da fitotoxicidade observada aos 07 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e manejos de solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os manejos de solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada manejo de solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

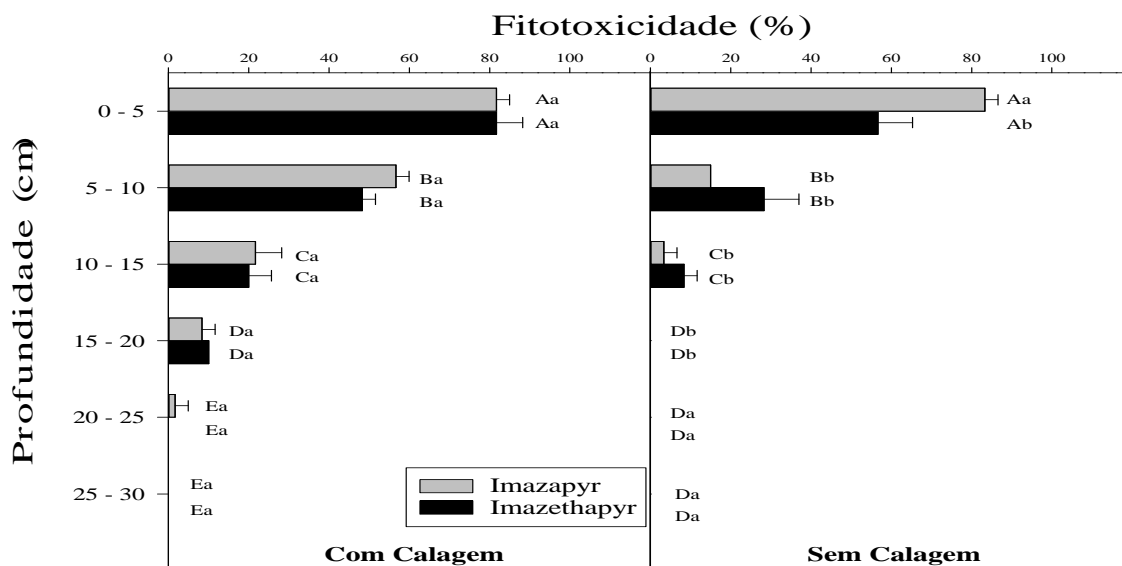


Figura 12 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr avaliada a partir da fitotoxicidade observada aos 14 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e manejos de solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os manejos de solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada manejo de solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

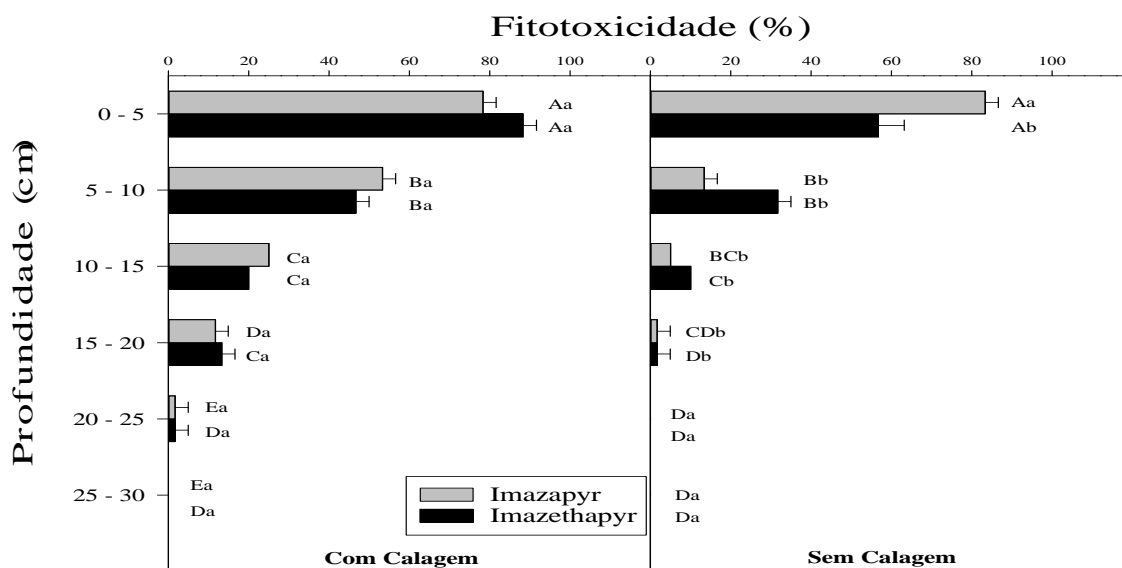


Figura 13 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr avaliada a partir da fitotoxicidade observada aos 21 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e manejos de solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os manejos de solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada manejo de solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

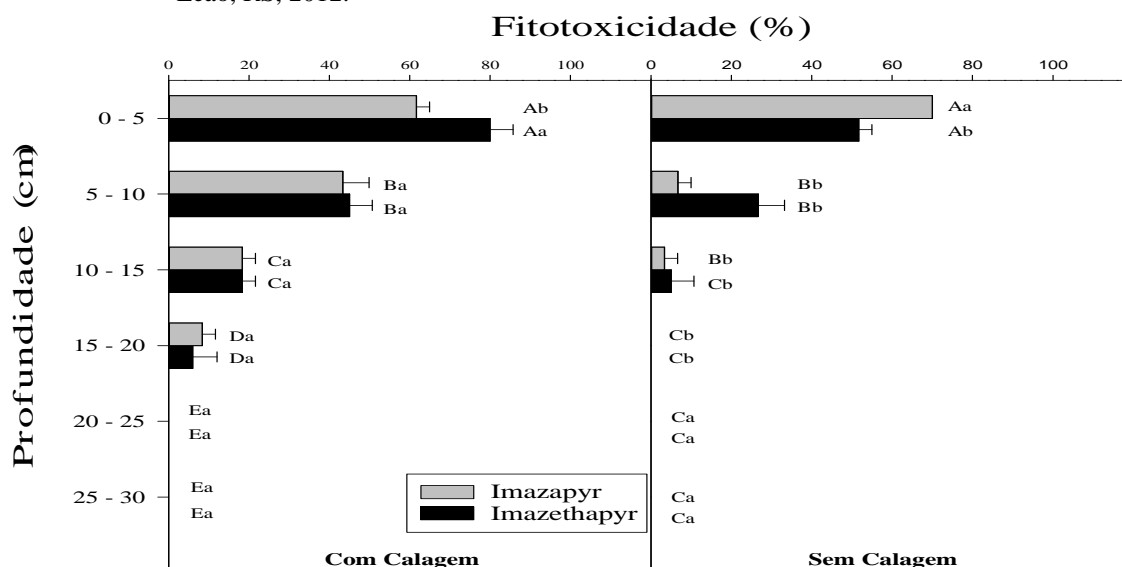


Figura 14 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr avaliada a partir da fitotoxicidade observada aos 28 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e manejos de solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os manejos de solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada manejo de solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

Para a diferença de estatura em relação à testemunha, os resultados obtidos mostram semelhança com os encontrados para a fitotoxicidade (Figura 15 e 16). Em todos os manejos foram detectadas variações na estatura em relação à testemunha, até a camada de 25-30 cm. Tais variações nas camadas inferiores podem não ter sido causadas pela ação dos herbicidas. Além disso, a escala utilizada na medição das plantas considera pequenas variações quando comparada com a avaliação de fitotoxicidade.

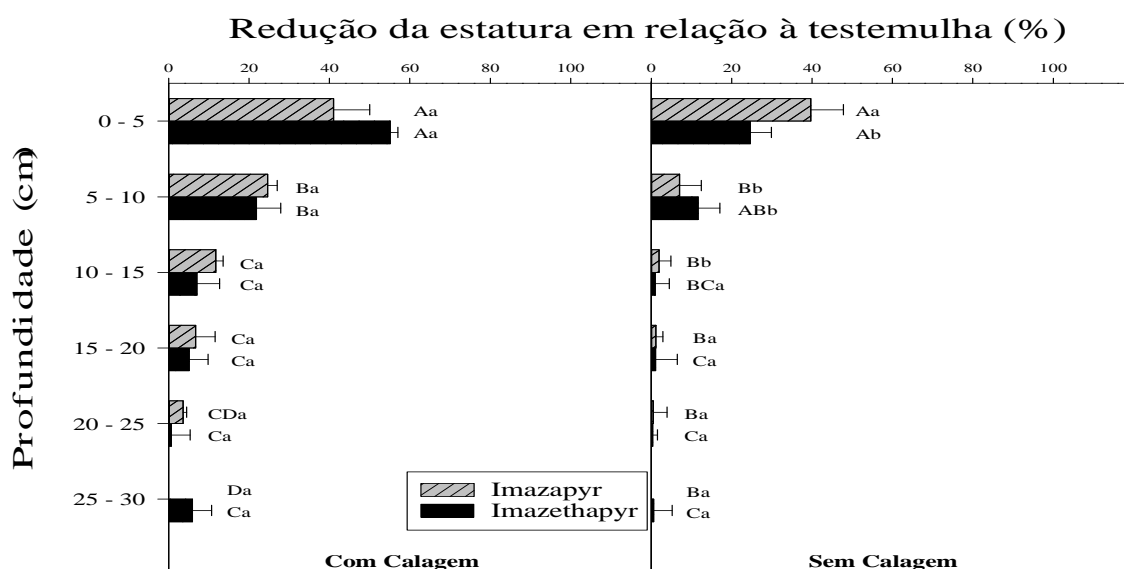


Figura 15 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr, avaliada a partir da redução da estatura em relação à testemunha, observada aos 21 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e manejos de solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os manejos de solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada manejo de solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

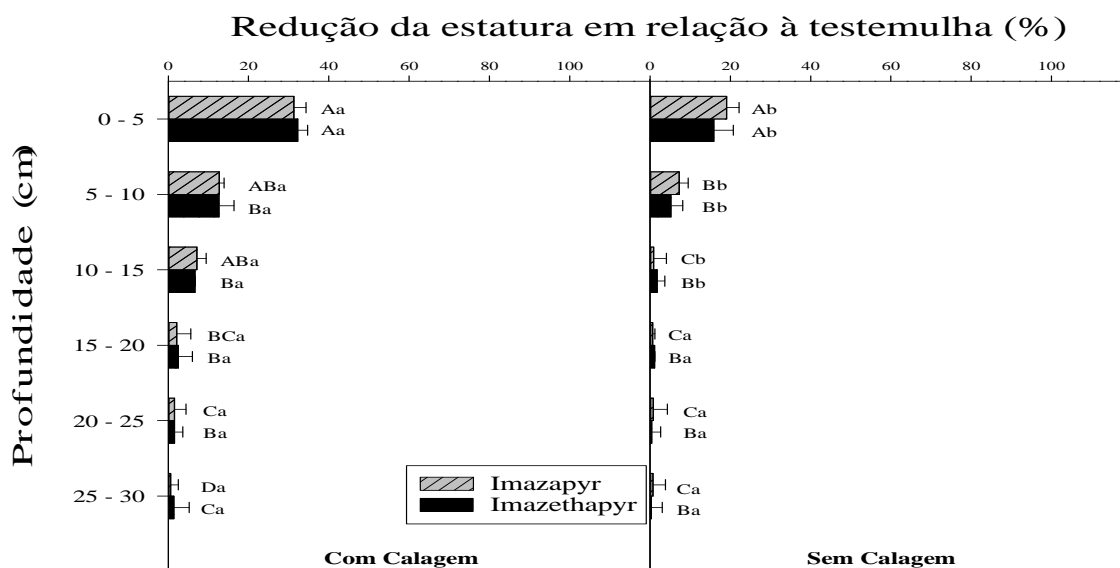


Figura 16 - Estimativa da lixiviação de imazapyr e imazethapyr, avaliada a partir da redução da estatura em relação à testemunha, observada aos 28 dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas 90 dias após a aplicação dos tratamentos com calagem e mantidas por 60 dias com lâmina de água. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte da coluna dentro de cada herbicida e manejos de solo (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os manejos de solos dentro de cada herbicida e profundidade de corte (Tukey, 5 %); e o intervalo de confiança (95%) compara os herbicidas em cada manejo de solo e profundidade de corte. Capão do Leão, RS, 2012.

Grande parte do volume de herbicidas aplicados em uma lavoura tem como destino final o solo podendo causar contaminação. Contudo, os resultados obtidos neste trabalho auxiliam no melhor entendimento da dinâmica dos herbicidas imazapyr e imazethapyr quanto às condições de pH do solo em que se encontram. Porém, para um eficiente uso desses herbicidas devemos considerar várias variáveis relacionadas ao solo e ao ambiente onde os mesmos são aplicados. Aliado a isso, existe a necessidade de corrigir o pH do solo, para obtenção de maior produtividade, o que exige maior atenção quanto ao uso de herbicidas ionizáveis como as imidazolinonas. Tendo em vista a semelhança entre as moléculas desse grupo químico e as peculiaridades de cada local de aplicação, é possível generalizar, com algumas restrições, o comportamento das demais imidazolinonas utilizadas no sistema Clearfield®.

Entretanto, devem ser tomados alguns cuidados quando da aplicação de imidazolinonas em áreas com pH elevado. Na quase totalidade das recomendações de herbicidas não são consideradas as condições de cada local, como o pH, podendo gerar graves problemas de contaminação do meio ambiente. Stougaard e colaboradores

(1990) encontraram maior capacidade de absorção de princípios ativos aos sorbentes do solo quando estes apresentavam pH ácido e com maior teor de matéria orgânica e argila. Corroborando com esses resultados, Wehtje e colaboradores (1987) mostram, em seus resultados, maior mobilidade do imazapyr em solos argilosos e, também, que essa mobilidade diminuiu com a redução da umidade e do pH do solo. Contudo, podemos notar que existem diversos fatores, além do pH, que influenciam na lixiviação de imidazolinonas. Com isso, divergências entre os resultados de lixiviação encontradas na literatura podem estar relacionados com fatores ligados aos sítios de adsorção do solo, tais como teor de matéria orgânica e características mineralógicas e/ou com a própria degradação do herbicida no solo.

Assim, com os resultados obtidos nesse experimento, é possível concluir que a elevação do pH, através da calagem, aumenta a lixiviação dos herbicidas imazapyr e imazethapyr em solo de cultivo de arroz irrigado.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Pelotas pela disponibilidade de sua estrutura e viabilização das pesquisas realizadas. À CAPES pelo auxílio financeiro, ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa do segundo autor e bolsa de pós-doutorado de Roberta Manica-Berto (Projeto de Pesquisa - Nº 028423/2009).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROFIT, 2012 - **Desenvolvido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. 2001. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/agrofit>> Acesso em: 1 de dezembro de 2012.

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, p.190-193. 2005.

- BAUGHMAN, T. A.; SHAW, D. R. Effect of wetting/drying cycles on dissipation patterns of bioavailable imazaquin. **Weed Science**, v.44, n.2, p.380-382, 1996.
- BRESNAHAM, G. A. et al. Influence of soil pH-Sortie interactions on imazethapyr to soil. **Weed Science**, v.48, p.1929-1934, 2000.
- OLIVEIRA, M. F. et al. Sorção do herbicida imazaquin em Latossolo sob plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.8, p.787-793, 2004.
- GAZZIERO, D. L. P.; VELINI, E. D.; OSIPE, R. **Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas**. Londrina: Sociedade Brasileira da Ciência de Plantas Daninhas, 1995. 42p.
- KRAEMER, A. F. et al. Lixiviação do imazethapyr em solo de várzea sob dois sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v.39, n.6, p.1660-1666, 2009.
- 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.
- MADANI, M. E. et al. pH effect and kinetic studies of the binding behaviour of imazethapyr herbicide on some Moroccan soils. **Fresenius Environmental Bulletin**, v.12, p.1114-1119, 2003.
- MONQUERO, P. A. et al. Potencial de lixiviação de herbicidas no solo submetidos a diferentes simulações de precipitação. **Planta Daninha**, v.26, n.2, p. 403-409, 2008.
- MORAES, J. F. V.; DYNIA, J. F. Alterações nas características químicas e físico-químicas de um solo Gley Pouco Húmico sob inundação e após a drenagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.2, p.225-235, 1992.
- OTTIS, B. V. et al. Imazethapyr application methods and sequences for imidazolinone-tolerant rice (*Oryza sativa*). **Weed Technology**, v.17, n.3, p.526-533, 2003.
- PUSINO, A.; PETRETTO, S.; GESSA, C. Adsorption and desorption of imazapyr by soil. **Journal Agricultural Food Chemistry**, v.45, n.3, p.1012-1016, 1997.
- REGITANO, B. et al. Imazaquin mobility in tropical soils in relation to soil moisture and rainfall timing. **Weed Research**, v.41, n.4, p.42-271. 2002.
- SÁVIO, F. L. et al. Calagem e gessagem na nutrição e produção de soja em solo com pastagem degradada. **Revista Agrotecnologia**, Anápolis, v.2, n.1, p.19-31, 2011.
- SENSEMAN, S.A. et al. **Herbicide handbook**. Lawrence: Weed Science Society of America, 2007. 458p.

SHAW, D.; WIXSON, M. Post emergence combinations of imazaquin or imazethapyr with AC 263,222 for weed control in soybean (*Glycine max*). **Weed Science**, v.39, p.644-649, 1991.

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. et al. 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.

5. Artigo III - Lixiviação e efeito residual de herbicidas do sistema Clearfield® em solo de cultivo de arroz irrigado⁵

Leaching and carryover of Clearfield™ system herbicides in rice paddy soil

REFATTI, J. P.¹; AVILA, L. A.²; NOLDIN, J. A.³; PACHECO, I.⁴; PESTANA, R.⁴

RESUMO: Os herbicidas utilizados no sistema Clearfield® de produção de arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) apresentam potencial de lixiviação, o que pode causar contaminação de mananciais hídricos subterrâneos. O efeito residual prolongado, em condições desfavoráveis para a degradação, pode causar fitotoxicidade às culturas não tolerantes semeadas em sucessão e/ou rotação. O objetivo do trabalho foi determinar o potencial de lixiviação e o efeito residual dos herbicidas utilizados no sistema Clearfield® de arroz irrigado. O experimento foi conduzido durante dois anos e consistiu da realização de um ensaio a campo seguido de um bioensaio sendo esse repetido no ano seguinte. Inicialmente foi instalado o experimento em área de cultivo de arroz irrigado onde foi semeado arroz da cultivar Puita INTA CL. Aproximadamente um ano após foram coletadas amostras de solo, de cada parcela, em intervalos de 5 cm até 30 cm de profundidade para a realização de um bioensaio. No segundo ano agrícola foi repetido o bioensaio a fim de avaliar o efeito residual dos herbicidas. Nos períodos de entressafra foi cultivado azevém, sendo esse, dessecada 10 dias antes da semeadura do arroz. O fator A foi constituído pelos herbicidas Only® (imazethapyr e

¹ Mestrando(a), Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade, Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Bolsista CAPES; ² Professor Adjunto, Ph.D., Departamento de Fitossanidade, UFPel, Caixa Postal 354, 96010-900 Pelotas-RS, Brasil, <laavilabr@gmail.com>; ³ Professor Colaborador, Ph.D. pesquisador da Epagri; ⁴ Graduando de agronomia.

⁵ Artigo formatado segundo normas da revista Ciência Rural

imazapic, 75 e 25 g i.a. L⁻¹, respectivamente) e Kifix[®] (imazapyr e imazapic, 525 e 175 g i.a. kg⁻¹, respectivamente) em duas doses, imazethapyr (100 g i.a. L⁻¹) e um tratamento testemunha sem aplicação. Para a análise, foi considerado um segundo fator (fator B) que consistiu de seis camadas de solo (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30 cm). Os resultados mostram que os herbicidas Only[®], Kifix[®] e imazethapyr apresentam potencial de lixiviação e elevado efeito residual em solos de cultivo de arroz irrigado. Os efeitos fitotóxicos desses herbicidas podem ser observados em até dois anos após sua aplicação.

Palavras-chave: meio ambiente, lençol freático, imazethapyr, imazapyr, imazapic, residual.

ABSTRACT: *The herbicides used in the Clearfield[®] rice (Oryza sativa L.) production system have potential for leaching, which can cause contamination of underground water sources. Herbicides persistence in conditions unfavorable to degradation can cause phytotoxicity to non-tolerant crops seeded in succession and/or rotation. The objective of this study was determine the leaching potential and residual effects of the herbicides used in the Clearfield[®] system rice. The experiment was conducted for two years and consisted of conducting a field experiment followed by a bioassay being this repeated the following year. Initially was conducted an experiment in a lowland area where it was grown rice (Puita INTA CL). Approximately one year after imidazolinonas application, soil samples were collected from each plot. Soil layer of 5 cm each were sampled up to 30 cm in depth and used to conduct a biossay. In the second year, the bioassay was repeated to evaluate the residual effect of herbicides. In the periods between harvests ryegrass was grown, and this, desiccated 10 days before seeding rice. The factor A was composed of herbicides Only[™] (imazethapyr and imazapic, 75 and 25 g a.i. L⁻¹, respectively) and Kifix[™] (imazapyr and imazapic, 525 and 175 g a.i. kg⁻¹, respectively) in two doses, imazethapyr (100 g a.i. L⁻¹) and a control treatment without application. For the analysis, was considered a factor B which consisted of six soil layers (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 and 25-30 cm). The results show that herbicides Only[®],*

Kifix[®] and imazethapyr have high leaching potential and potential for carryover in in soils of irrigated rice cultivation. The phytotoxic effects of these herbicides can be observed in until two years after application.

Keywords: environmental, groundwater, imazethapyr, imazapyr, imazapic, *reside*.

INTRODUÇÃO

Para atender ao aumento da demanda de alimentos tem-se buscado métodos de produção que visam manter e elevar a produtividade das lavouras. Dentre esses, destaca-se o crescente uso de agrotóxicos que oferecem eficiente controle de plantas daninhas, pragas e doenças. Os herbicidas, em especial, apresentam papel relevante para a obtenção de elevados índices de produtividade, devido à diminuição da população de plantas daninhas a níveis satisfatórios. Entretanto, a contaminação ambiental, causada pelo uso desses agrotóxicos, é uma das principais preocupações relacionada à atividade agrícola atual.

No cultivo de arroz irrigado, o uso de herbicidas com elevado efeito residual, como os pertencentes ao grupo químico das imidazolinonas, aliado às melhorias ocorridas nas demais práticas culturais, tem elevado substancialmente a produtividade deste cereal. Contudo, por ser cultivado em locais geralmente próximos a mananciais hídricos e utilizar grande volume de água para irrigação, a cultura do arroz irrigado é, muitas vezes, apontada como potencial contaminadora do meio ambiente. Essas áreas de cultivo, geralmente, localizadas adjacientemente a fontes de água para irrigação e possuem relevo com pouco desnível, oferecendo condições ideais para a manutenção de uma lâmina de água sobre a superfície durante parte do ciclo da cultura. A permanência da lâmina de água é recomendada para a cultura do arroz irrigado (IRGA, 2011), pois apresenta-se como uma barreira física para a

emergência de plantas daninhas, diminuindo a competição com a cultura (Freitas, 2004). Além disso, a elevada saturação do solo com água provoca alterações químicas e biológicas que resultam na maior disponibilização de alguns nutrientes presentes no solo (Hernández e Meurer, 2000; Silva et al., 2003).

As áreas de cultivo de arroz irrigado possuem a particularidade de apresentarem, muitas vezes, o nível do lençol freático próximo à superfície, fato que agrava o risco de contaminação dos mananciais hídricos. Aliado a isso, a inundação do solo aumenta a disponibilidade desses agrotóxicos que se encontram sorvidos no mesmo (Avila et al., 2005). Isso faz com que aumente ainda mais os riscos de contaminação ambiental. A contaminação pode ocorrer através de processos como o escoamento superficial e a lixiviação dentre outros. Contudo, entre os processos de transporte de herbicidas, destaca-se a lixiviação, que refere-se ao movimento vertical do produto, juntamente com a água, ao longo do perfil do solo. A movimentação dos herbicidas no solo depende de fatores ligados ao solo, ao ambiente e às suas características físico-químicas (Keller e Weber, 1998; Lee e Weber, 1993; Weber et al., 2006). A compreensão desses fatores é de grande relevância para prevermos o comportamento dos agrotóxicos nos diferentes tipos de solo e para escolhermos a melhor dosagens, bem como para evitar efeitos prejudiciais ao ambiente e às culturas subsequentes (Rossi et al., 2005).

Características físicas do solo como a textura, podem influenciar na lixiviação de herbicidas. Em solos arenosos os herbicidas tendem a lixiviar mais facilmente em relação a solos argilosos (Rossi et al., 2005), pois não apresentam muitas partículas com compostos ativos, que funcionam como sítios de captura dos herbicidas. A lixiviação também é influenciada pela porosidade do solo. Solos que apresentam uma quantidade maior de macroporos são mais propensos ao surgimento da chamada lixiviação por fluxo preferencial. Nesse tipo de lixiviação os herbicidas podem ser transportados diluídos na água ou sorvidos no solo através do fluxo de massa.

Características dos herbicidas como a meia-vida também são determinantes, pois estão relacionadas com a persistência e degradação desses compostos no ambiente. A meia-vida dos herbicidas pode alterar, aumentando sua persistência em profundidades maiores do perfil do solo. Isso se deve principalmente à menor temperatura, radiação solar e número de microrganismos degradadores das moléculas dos herbicidas (Costa et al., 2000; Prata et al., 2001). Esse fenômeno aliado à flutuação no nível do lençol freático aumenta os riscos de contaminação em áreas de cultivo de arroz irrigado.

Os herbicidas imidazolinonas podem apresentar elevada persistência quando em solos de áreas de cultivo de arroz irrigado. O efeito residual desses herbicidas no solo pode manifestar-se, nas culturas subsequentes, na forma de fitotoxicidade (Kraemer et al., 2009), diminuição da estatura (Pinto et al., 2009) e na morte de plantas. Aliado a isso, o aumento da dose desses herbicidas, promovido pelo surgimento de cultivares de arroz com maior nível de tolerância, pode agravar o problema de residual no solo.

Nesse contexto, o estudo do comportamento de herbicidas residuais no solo, tal como a sua lixiviação, torna-se importante para a análise dos possíveis efeitos negativos que possam ocorrer com sua utilização. Em vista do exposto, o objetivo desse trabalho foi determinar o potencial de lixiviação e o efeito residual dos herbicidas utilizados na tecnologia Clearfield® de produção de arroz irrigado.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido durante os anos agrícolas de 2010/2011 e 2011/2012 sendo que em cada ano foram realizadas duas etapas.

Ano I (2010/2011): Foi instalado um experimento na área experimental da Fazenda da Palma pertencente à Universidade Federal de Pelotas (UFPel), localizada no município de Capão do Leão, RS. O solo nesse local é classificado como Planossolo Háplico Eutrófico

solódico com textura franco-siltosa. Inicialmente foi semeada a cultivar de arroz Puita INTA CL na densidade de 100 kg ha⁻¹. Quando as plantas encontravam-se no estágio V3-V4 (Counce et al., 2000), foram aplicados os tratamentos herbicidas (Tabela 5) seguindo o delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições, totalizando 24 unidades experimentais. Os herbicidas foram aplicados com o auxílio de pulverizador costal pressurizado com CO₂, provido de barra de pulverização contendo quatro bicos tipo leque (Teejet 110.02), com volume de aplicação de 150 L ha⁻¹. As demais práticas culturais foram realizadas conforme as recomendações técnicas da pesquisa para o arroz irrigado na região sul do Brasil (SOSBAI, 2010). Na entressafra foi semeado azevém em toda a área e dessecado para o cultivo de arroz no segundo ano.

Tabela 5 - Tabela com a descrição dos tratamentos.

Tratamentos	Produtos	Dose	Aplicações
Testemunha	Testemunha	-	A
Only 1	Only [®] + Dash [®]	0,75 L ha ⁻¹ + 0,5 %	AB
Only 2	Only [®] + Dash [®]	1,5 L ha ⁻¹ + 0,5 %	AB
Kifix 1	Kifix [®] + Dash [®]	0,1 L ha ⁻¹ + 0,5 %	AB
Kifix 2	Kifix [®] + Dash [®]	0,2 L ha ⁻¹ + 0,5 %	AB
Imazeth	Imazethapyr	0,75 L ha ⁻¹	AB

A = Tratamentos dessecados com Glyphosate (3 l/ha) em ponto de agulha.

B = Aplicação dos tratamentos.

A segunda etapa consistiu da realização de um bioensaio, em casa de vegetação pertencente à Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM), da mesma instituição, um ano após a aplicação dos tratamentos. Para isso, foram coletadas amostras de solo de diferentes profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 e 25-30 cm) em cada parcela onde foram

aplicados os tratamentos a campo no ano anterior e dessecado o azevém. Essas amostras de solo, proveniente das diferentes camadas, foram destorroadas, peneiradas e, posteriormente, alocadas em potes plásticos com 400 g de solo cada. Em seguida foram depositadas cinco sementes de arroz da cultivar IRGA 417, não tolerante ao ingrediente ativo dos herbicidas testados. A semeadura do bioensaio foi realizada no sistema pré-germinado onde as sementes foram embebidas em água por um período de 24 horas e após mantidas em local com temperatura e umidade adequada até o início da emissão da radícula. A lâmina de água nos potes foi mantida em meio centímetro até os 14 dias após a semeadura para o melhor estabelecimento das plantas. Após esse período a lâmina de água foi mantida em três centímetros de altura.

As variáveis analisadas no bioensaio foram: toxicidade dos herbicidas às plantas de arroz aos 07 (dados não apresentados), 14, 21 e 28 (dados não apresentados) dias após a emergência (DAE), sendo realizada visualmente atribuindo-se notas de 0 a 100%. Nessa escala zero corresponde à ausência de sintomas de fitotoxicidade e 100% corresponde à morte das plantas de arroz (Gazziero et al., 1995). A estatura foi determinada com o auxílio de régua milimetrada aos 07 (dados não mostrados), 14, 21(dados não mostrados) e 28 DAE, medindo-se no colmo principal, a distância desde a coroa até a extremidade da última folha com colar formado.

Ano II (2011/2012): No segundo ano agrícola foi semeado arroz da cultivar Puita INTA CL na mesma área com a finalidade de simular as condições reais de lavoura. Os tratos culturais realizados foram semelhantes aos adotados no primeiro ano de cultivo.

Na última etapa, aproximadamente dois anos da aplicação dos herbicidas, foi realizado o segundo bioensaio com a finalidade de avaliar o potencial de lixiviação e a persistência dos mesmos no solo. O bioensaio foi conduzido nos mesmos moldes do primeiro, porém, com a semeadura sendo realizada sem a pré-germinação das sementes.

Os dados foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e à homocedasticidade pelo teste de Levene, posteriormente foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$). Quando necessário, os dados foram transformados. Em caso de significância, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve interação significativa ($p \leq 0,05$) entre tratamentos herbicidas e camadas de solo para todas as variáveis analisadas, sugerindo que os herbicidas estudados diferem quanto à mobilidade ao longo do perfil do solo.

No primeiro ano, os maiores níveis de fitotoxicidade, obtidos no bioensaio com plantas suscetíveis, foram observados nas camadas de 0-5 e 5-10 cm (Figura 17). Esses dados diferem dos encontrados por Martini et al. (2011) onde, avaliando a lixiviação da mistura formulada de imazethapyr e imazapic, em diferentes manejos de irrigação, encontraram maior concentração do herbicida na camada de 5-10 cm. Essa diferença pode estar relacionada com a má drenagem da área pós-colheita associado à presença de azevém cultivado em sucessão ao arroz durante o outono-inverno para a cobertura do solo. Tal condição diminui a atividade de microrganismos aeróbicos, principal mecanismo de dissipação das imidazolinonas no solo (Flint e Witt, 1997). Além disso, a elevada incidência de chuvas, na entressafra, pode ter diminuído a degradação dos herbicidas.

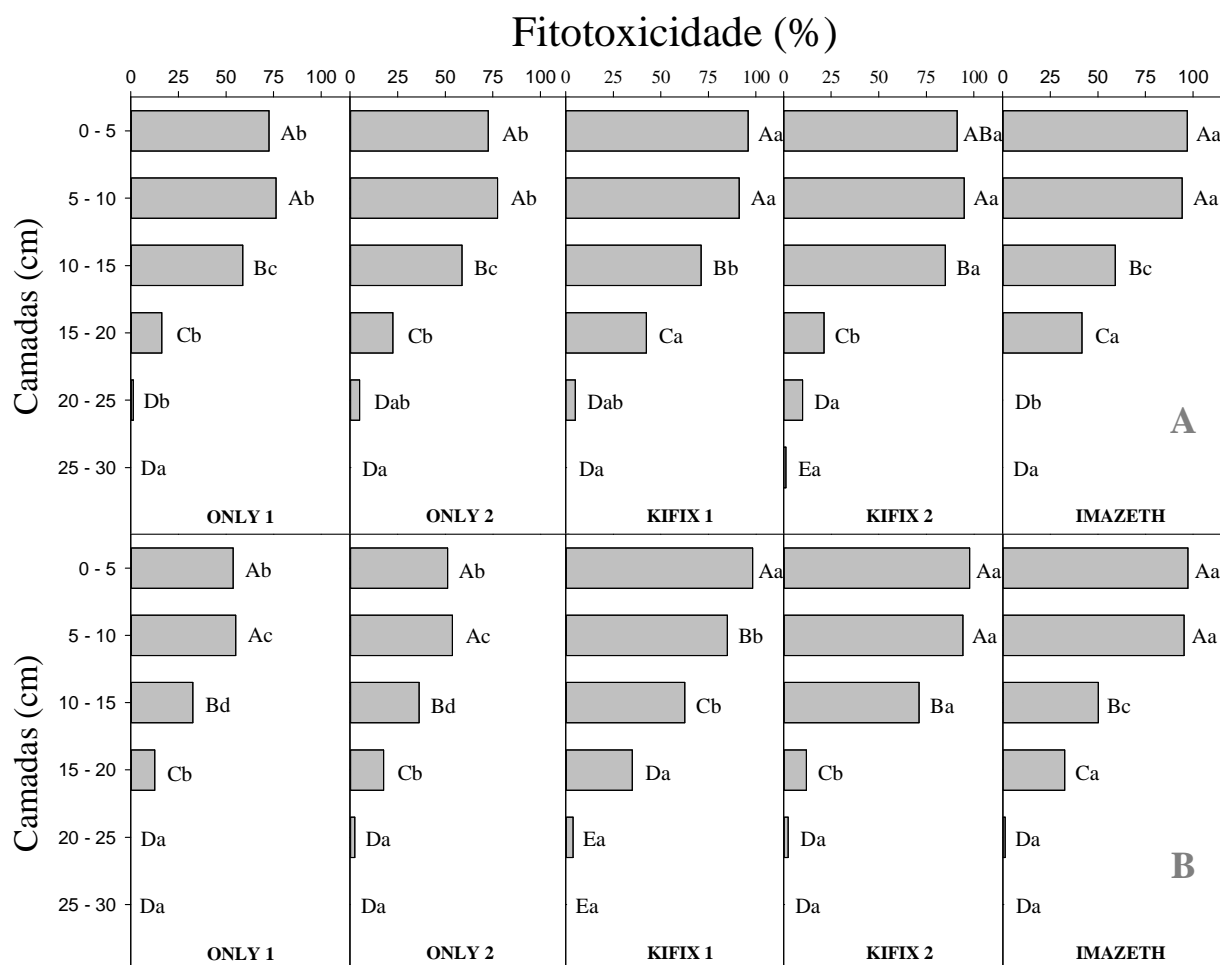


Figura 17 - Estimativa da lixiviação de imidazolinonas avaliada a partir da fitotoxicidade

observada aos 14 (A) e 21 (B) dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas um ano após a aplicação dos herbicidas. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte (camadas) dentro de cada herbicida (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os tratamentos (herbicidas) dentro da mesma camada de solo (Tukey, 5%). Capão do Leão-RS, 2011.

Os dois tratamentos com Only[®] apresentaram menor fitotoxicidade nas duas camadas superiores. Já os tratamentos com Kifix[®] e imazethapyr foram os que apresentaram maior fitotoxicidade. Esses dados indicam que os efeitos fitotóxicos causados pelos resíduos dos herbicidas Kifix[®] e imazethapyr são maiores em relação aos do Only[®] após um ano de sua aplicação.

Na avaliação aos 14 DAE os tratamentos que apresentaram maior lixiviação foram o Only 2, Kifix 1 e 2. Entretanto, para a avaliação aos 21 DAE, os maiores níveis de fitotoxicidade na camada de 15 a 20 cm foi observada para os tratamentos Kifix 1 e imazethapyr. Esses dados corroboram com os encontrados por Kraemer e colaboradores (2009) os quais observaram a lixiviação do herbicida imazethapyr até 20 cm de profundidade.

Os resultados obtidos com a redução da estatura em relação à testemunha apresentam semelhança com os encontrados para a fitotoxicidade (Figura 18) no bioensaio realizado no primeiro ano. Para todos os tratamentos herbicidas foram detectadas variações na estatura em relação à testemunha, até a camada de 25-30 cm. Entretanto, a última camada de todos os tratamentos, exceto o tratamento Imazeth, não diferiu da camada ligeiramente superior (20-25 cm). Essas variações de estatura observadas nas camadas inferiores podem não ter sido causadas pela ação dos herbicidas, mas sim por razão da escala utilizada para a medição. Tais resultados corroboram com os obtidos por Kraemer e colaboradores (2009) os quais, avaliando a atividade residual da mistura formulada pelos herbicidas imazethapyr e imazapic concluíram que, esses, além de provocarem fitotoxicidade, diminuem a estatura de planta, massa da massa seca, estande de plantas, perfilhamento e número de panículas.

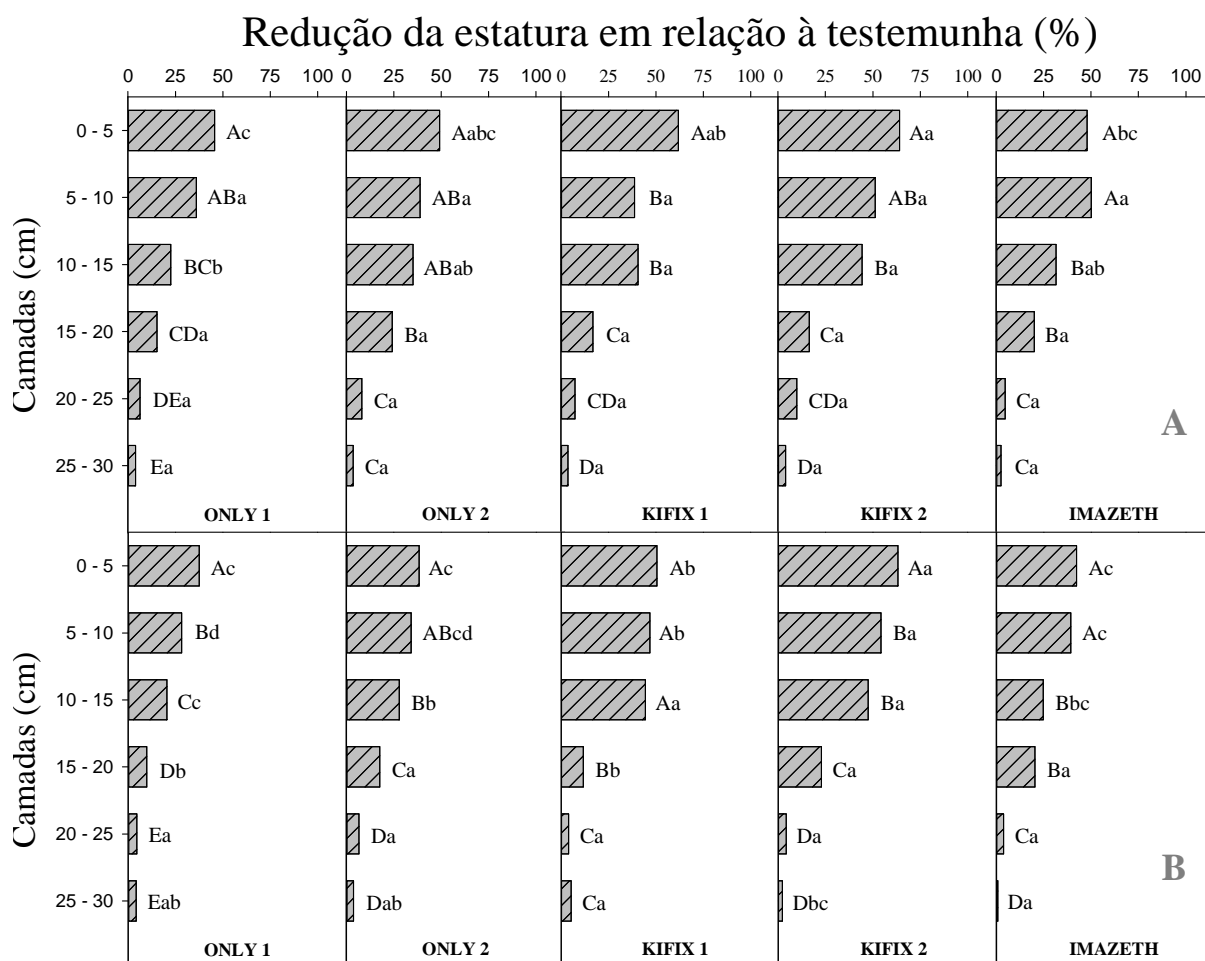


Figura 18 - Estimativa da lixiviação de imidazolinonas avaliada a partir da redução da estatura em relação à testemunha observada aos 14 (A) e 21 (B) dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas um ano após a aplicação dos herbicidas. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte (camadas) dentro de cada herbicida (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os tratamentos (herbicidas) dentro da mesma camada de solo (Tukey, 5%). Capão do Leão-RS, 2011.

No segundo ano após a aplicação dos herbicidas, a toxicidade desses às plantas bioindicadoras foi observada até a camada de 10 a 15 cm de profundidade, para os tratamentos Kifix 2 e Imazethapyr (Figura 19). Para os demais tratamentos, foram observados efeitos fitotóxicos até a camada de 5-10 cm. Segundo dados encontrados na literatura, esperava-se maior concentração dos herbicidas nas camadas intermediárias onde os mesmos

são pouco degradados devido a condições desfavoráveis como menor temperatura e menor número de microrganismos degradadores. Tal resultado pode estar relacionado com as condições climáticas ocorridas na entressafra do segundo ano de experimento a campo onde foi observado menor precipitação de chuvas e maiores temperaturas. Segundo Mangels (1991), sob condições de elevada evapotranspiração pode ocorrer movimento capilar da água movimentando de forma ascendente os herbicidas imidazolinonas no solo (lixiviação reversa), o que mantém o herbicida próximo à superfície do solo nos períodos de escassez de chuva. Os herbicidas, uma vez nas camadas mais superficiais, ficam sujeitos a maior degradação por parte dos microrganismos decompositores. Isso pode ter sido responsável pelos menores índices de fitotoxicidade encontrados no segundo ano de avaliação.

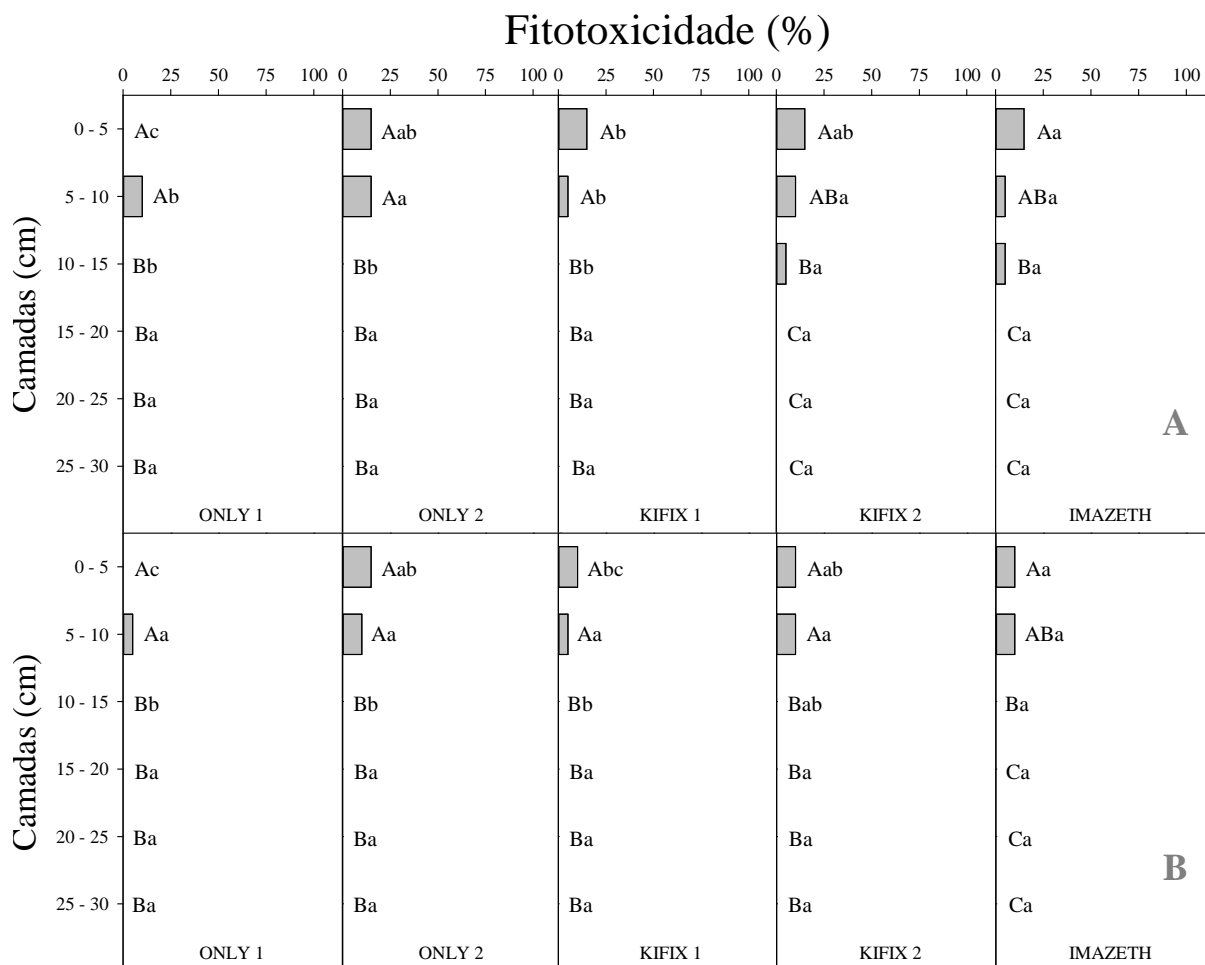


Figura 19 - Estimativa da lixiviação de imidazolinonas avaliada a partir da fitotoxicidade observada aos 14 (A) e 21 (B) dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas dois anos após a aplicação dos herbicidas. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte (camadas) dentro de cada herbicida (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os tratamentos (herbicidas) dentro da mesma camada de solo (Tukey, 5%). Capão do Leão-RS, 2012.

Quanto à redução da estatura de plantas em relação à testemunha, observada no bioensaio realizado no segundo ano (Figura 20) após aplicação dos tratamentos, os resultados obtidos mostram similaridade com os de fitotoxicidade do mesmo ano de avaliação. Entretanto, para o tratamento Only 1 não foi observado fitotoxicidade, porém, detectou-se pequena redução da estatura em relação à testemunha nas camadas 0-5 e 5-10 cm.

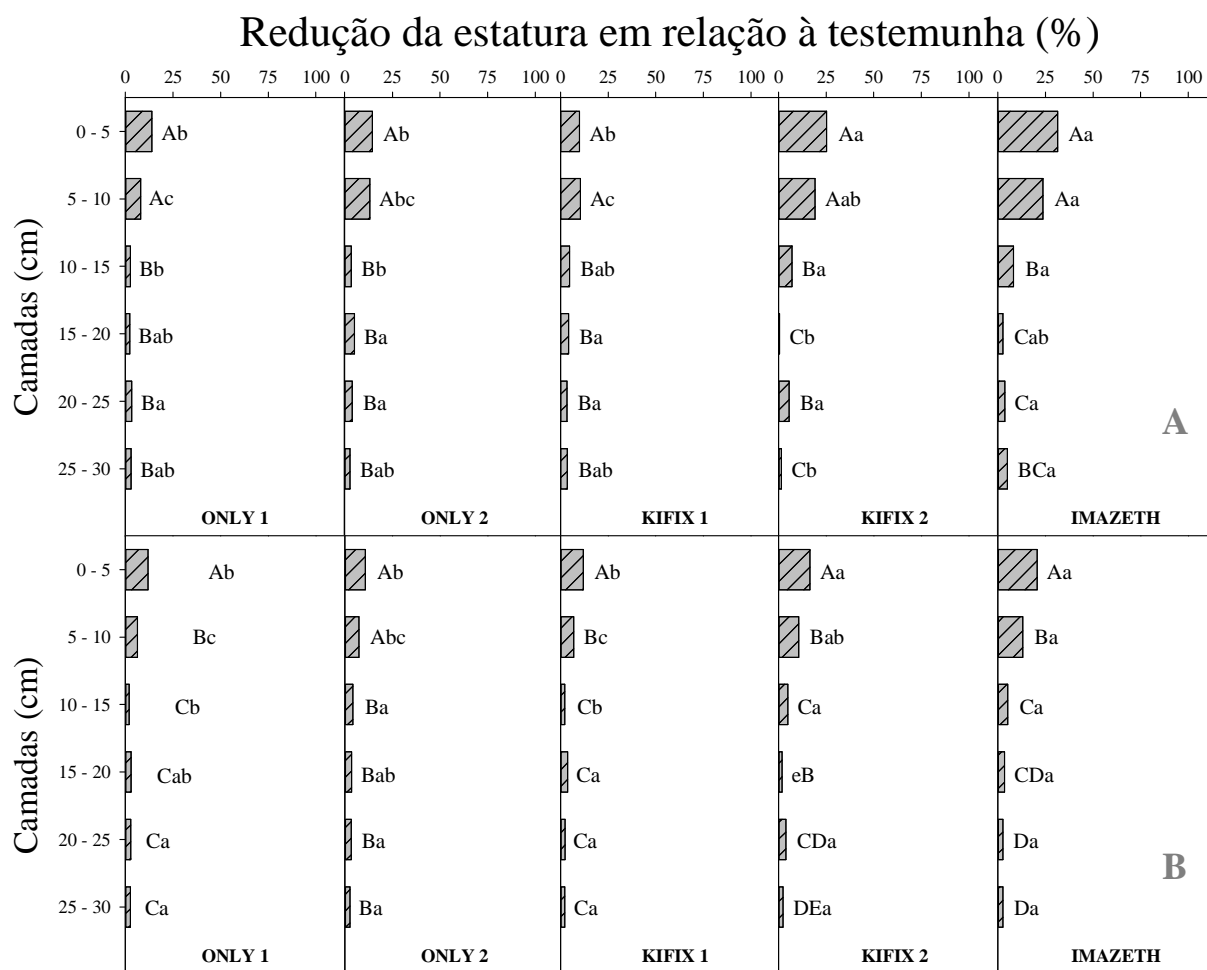


Figura 20 - Estimativa da lixiviação de imidazolinonas avaliada a partir da redução da estatura em relação à testemunha observada aos 14 (A) e 21 (B) dias após a emergência em plantas de arroz não tolerante semeadas dois anos após a aplicação dos herbicidas. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam profundidades de corte (camadas) dentro de cada herbicida (Tukey, 5 %); minúscula, comparam os tratamentos (herbicidas) dentro da mesma camada de solo (Tukey, 5%). Capão do Leão-RS, 2012.

Contudo, o presente trabalho nos auxilia na compreensão do comportamento ambiental das imidazolinonas, comumente utilizadas em grandes culturas como arroz irrigado e soja, em solo mal drenado. Convém ressaltar que, por estar relacionado com vários fatores edáficos e climáticos, o comportamento das imidazolinonas pode apresentar-se de forma distinta em cada local onde forem aplicadas. Com isso, a análise de cada situação particular da

área onde serão aplicados é de grande importância a fim de diminuir a probabilidade de contaminação das reservas subterrâneas de água. Além disso, a elevada persistência desses herbicidas no solo pode causar danos às culturas subsequentes através da toxicidade às plantas (Kraemer et al., 2009) e diminuição da estatura (Pinto et al., 2009).

Os valores de fitotoxicidade e redução de estatura, obtidos no segundo ano desse experimento, podem, em um primeiro momento, parecer baixos e provavelmente não causariam redução na produtividade final de grãos. Entretanto, o uso contínuo desses herbicidas pode gerar aumento da concentração dos mesmos no solo causando graves problemas ambientais e à saúde humana.

Em vista do exposto, é possível concluir que os herbicidas imazethapyr e as misturas formuladas de imazethapyr + imazapic e imazapyr + imazapic apresentam elevado potencial de lixiviação, atingindo profundidades de até 25 cm em solo de cultivo de arroz irrigado um ano após sua aplicação. Os herbicidas imidazolinonas utilizados no sistema Clearfield® de arroz irrigado apresentam elevada persistência no solo, podendo seus efeitos fitotóxicos ser observados até dois anos após sua aplicação.

LITERATURA CITADA

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.

COSTA, E. A. D.; GELMINI, G. A.; ZAMBON, S. Avaliação de isoxaflutole aplicado isoladamente ou em mistura de tanque no nivelamento do solo para controle pré-emergente de infestantes em cana-planta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS

DANINHAS, 22, 2000, Foz do Iguaçu. **Anais...** Londrina: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2000. p.295.

COUNCE, P. A. et al. A uniform, objective, and adaptative system for expressing rice development. **Crop Science**, v.40, n.2, p.436-443, 2000.

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

FREITAS, G. D. **Desempenho do arroz (*Oryza sativa* L.) cultivar BRS Pelota e controle de capim-arroz (*Echinochloa* sp.) submetidos a quatro épocas de entrada de água após aplicação de doses reduzidas de herbicidas**. 2004. 54 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2004.

VELINI, E.D.; OSIPE, R.; GAZZIERO, D.L.P. **Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas**. Londrina: SBCPD, 1995. 42p.

HERNÁNDEZ, J.; MEURER, E. J. Disponibilidade de fósforo em seis solos do Uruguai afetada pela variação temporal das condições de oxirredução. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.19-26, 2000.

INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ - IRGA, 2011. Disponível em <http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20090819102316.pdf>. Acesso em: 03 de dezembro de 2012

KELLER, K. E.; WEBER, J. B. Soybean (*Glicine max*) influences metolachlor mobility in soil. **Weed Science**, Lawrence, v.45, n.6, p.833-841, 1997.

KRAEMER, A. J. et al.. Lixiviação do imazethapyr em solo de várzea sob dois sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v.39, n.6, 2009.

LEE, S. J.; KATAYAMA, A.; KIMURA, M. Microbial-degradation of paraquat sorbed to plant residues. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v.43, n.5, p.1343-1347, 1995.

MANGELS, G. Behavior of the imidazolinone herbicides in soil: a review of the literature. In: SHANER, D. L.; O'CONNOR, S. L. (Ed.). **The imidazolinone herbicides**. Boca Raton: CRC Press, 1991. p.191-209.

MARTINI, L. F. D. et al. Lixiviação de Imazethapyr + Imazapic em Função do Manejo de Irrigação do Arroz. **Planta Daninha**, v.29, n.1, p.185-193, 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**, Viçosa, v.27, n.3, 2009.

PRATA, F. et al. Degradação e sorção de ametryn em dois solos com aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.7, p.975-981, 2001.

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.

SILVA, L. S.; SOUSA, R. O.; BOHNEN, H. Alterações nos teores de nutrientes em dois solos alagados, com e sem plantas de arroz. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.3, p.487-490. 2003.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO – SOSBAI. **Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 2010. 188 p.

WEBER J. B.; TAYLOR, K. A.; WILKERSON, G. G. Soil and herbicide properties influenced mobility of atrazine, metolachlor and primisulfuron-metyl in field lysimeters. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, n.1, p.8-18, 2006.

6. Conclusões

A lixiviação de imidazolinonas é maior em solos com baixo teor de argila e matéria orgânica, sendo os sintomas dos herbicidas detectados até a profundidade de 30 cm. A lixiviação é menor em solo com maior teor de argila e matéria orgânica.

A elevação do pH, através da calagem, aumenta a lixiviação dos herbicidas imazapyr e imazethapyr em solo de cultivo de arroz irrigado.

Os herbicidas imazethapyr e as misturas formuladas de imazethapyr + imazapic e imazapyr + imazapic apresentam elevado potencial de lixiviação, atingindo profundidades de até 25 cm em solo de cultivo de arroz irrigado. Os herbicidas imidazolinonas utilizados no sistema Clearfield® de arroz irrigado apresentam elevada persistência no solo, podendo seus efeitos fitotóxicos ser observados até dois anos após sua aplicação.

7. Referências

AGOSTINETTO, D. et al. Arroz-vermelho: ecofisiologia e estratégias de controle. **Ciência Rural**, v.31, n.2, p.165-174, 2001.

BAUGHMAN, T. A. e SHAW, D. R. Effect of wetting/drying cycles on dissipation patterns of bioavailable imazaquin. **Weed Science**, v.44, p.380-382, 1996.

CARTER, A.D. Herbicide movement in soils: Principles, pathways and processes. **Weed Research**, v.40, p.113-122. 2000.

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

JOHNSON, D. H. et al. Time dependent adsorption of imazethapyr to soil. **Weed Science**, v.48, p.769-775, 2000.

KRAEMER, A. J. et al.. Lixiviação do imazethapyr em solo de várzea sob dois sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v.39, n.6, 2009.

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.

MARTINI, L. F. D. et al. Lixiviação de imazethapyr + imazapic em função do manejo de irrigação do arroz. **Planta daninha**, v.29, n.1, p.185-193, 2011.

MONQUERO, P. A. et al. Potencial de lixiviação de herbicidas no solo submetidos a diferentes simulações de precipitação. **Planta Daninha**, v.26, n.2, p.403-409, 2008.

POLUBESOVA, T. et al. Imazaquin adsorbed on pillared clay and crystal violet-montmorillonite complexes for reduced leaching in soil. **Journal Environmental Quality**, v.31, p.1657-1664, 2002.

PUSINO, A.; PETRETTO, S.; e GESSA, C. Adsorption and desorption of imazapyr by soil. **Journal Agriculture Food Chemistry**. V.45, p.1012 -1016, 1997.

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

RICE, J.P. et al. Advances in pesticide environmental fate and exposure assessments. **Journal Agriculture Food Chemistry**, v.55, p.5367-5376, 2007.

SENSEMAN, S. A. **Herbicide handbook**. 9.ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2007. 458 p.

SHANER, D. L., e Singh, B. K. Acetohydroxyacid synthase inhibitors, p.69-110, In: R. Roe, M., et al. **Herbicide Activity: Toxicology, Biochemistry, and Molecular Biology**. IOS Press., Washington, DC. 1997.

SILVA, D. R. O. et al. Monitoramento de agrotóxicos em águas superficiais de regiões orizícolas no sul do Brasil. **Ciência Rural**, v.39, n.9, p.2383-2389, 2009.

STOUGAARD, R. N.; SHEA, P. J. E MARTIN, A. R. Effect of soil type and pH on adsorption, mobility, and efficacy of imazaquin and imazethapyr. **Weed Science**, v.38, p.67- 73, 1990.

TREZZI, M. M.; VIDAL, R. A. Herbicidas inibidores da ALS. In: VIDAL, R. A.; MEROTTO Jr., A. **Herbicidologia**. Porto Alegre. p. 25-36. 2001.

TU et al. Imazapic. **Weed control methods handbook**. London: Academic, 2004. Cap.7, p.1-7.

VITA

João Paulo Refatti é filho de João Vicente Refatti e Neiva Vizzotto Refatti, nasceu em 15 de junho de 1984, no município de São João do Polêsine, Rio Grande do Sul. No ano de 2006 ingressou no curso de Agronomia junto a Universidade Federal de Santa Maria, através do vestibular. Em janeiro de 2011 colou grau, recebendo o título de Engenheiro Agrônomo. Durante a graduação, iniciou sua vida científica como estagiário do Departamento de Fitotecnia, no Grupo de Pesquisas em Arroz Irrigado e Uso Alternativo de Áreas de Várzea. Em março de 2011, iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade da Universidade Federal de Pelotas/RS, na área de concentração em herbologia.